

مدل سازی توزیع ژئوشیمیایی عناصر نادر خاکی با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره در محدوده خاوری پلاسروست، جنوب یزد

امین حسینی مرشدی*، امیرحسین کوهساری و محمدرضا شاکری ورزانه

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

دریافت مقاله: 1394/10/22، پذیرش: 1395/03/09

چکیده

امروزه، اکتشاف ذخایر عناصر نادر خاکی به‌عنوان منابع و اولویت‌های راهبردی مورد تأکید قرار گرفته است که از جایگاهی ویژه در صنایع پیشرفته و هوشمند برخوردار است. پژوهش‌های اخیر، به‌شناسایی توانایی‌های امیدبخش این عناصر در ایران منجر شده است که از جمله می‌توان به بی‌هنجاری‌های پلاسروست موناویت یزد در محدوده خاوری و باختری اشاره کرد. در این پژوهش، از داده‌ها و نمونه‌های تجزیه شده از 53 چاهک در محدوده خاوری این بی‌هنجاری در جنوب شهرستان یزد به‌منظور مدل‌سازی و پتانسیل‌یابی عناصر نادر خاکی استفاده شد. در منطقه مروست، سنگ منشأ موناویت شیل‌های سیاه است که به‌صورت متناوب با ماسه سنگ‌های آهکی، آهک و کنگلومرا و به شکل گرهک‌های پراکنده در شیل‌ها دیده می‌شود. بررسی الگوی توزیع عناصر نادر خاکی استاندارد شده به مقادیر کندریت، بیانگر مطابقت بالا با الگوی استاندارد موناویت است. برای بررسی توزیع و تمرکز ژئوشیمیایی در منطقه، نقشه درون‌یابی توزیع این عناصر ترسیم شد که بیشترین تمرکز به‌ترتیب مرتبط با عناصر سبک، حدواسط و سنگین بود و بی‌هنجاری در قسمت جنوب و جنوب‌باختری محدوده واقع شده است. محدوده بی‌هنجاری ژئوشیمیایی از طریق ضریب شدت بخشی از جمله نسبت غلظت عناصر نادر خاکی سبک به سنگین نیز به اثبات رسید. در مرحله بعد، خوشه‌بندی داده‌ها در دو سطح عناصر و نمونه‌ها انجام شد که نشانگر چهار گروه‌بندی عناصر بر اساس سبک و سنگینی (ساختار اتمی و شیمیایی) و چهار پهنه فضایی بر اساس مناطق امیدبخش تعیین شد که مناطق دارای برچسب خوشه چهارم، منطبق بر منطقه بی‌هنجاری است. در نهایت، از روش آماری چند متغیره تحلیل مؤلفه‌های اصلی در راستای مدل‌سازی بی‌هنجاری استفاده شد که نقشه توزیع بار فاکتوری مؤلفه اول، منطبق بر منطقه بی‌هنجاری جنوبی محدوده است.

واژه کلیدی: عناصر نادر خاکی، خوشه‌بندی سلسله مراتبی، پهنه‌بندی، تحلیل مؤلفه اصلی، موناویت، پلاسروست، یزد

مقدمه

گروهی از عناصر لانتانیدها و دو عنصر اسکاندیم و ایتیریم است و می‌توان عناصر خاکی کمیاب را در سه گروه سبک، حدواسط و سنگین تقسیم‌بندی کرد که عناصر خاکی کمیاب سبک دارای فراوانی بیشتر از انواع سنگین آن در زمین هستند (Castor and Hedrick, 2006; Henderson, 2013). این عناصر دارای

عناصر خاکی کمیاب¹ به مجموعه‌ای از عناصر گفته می‌شود که از کانی‌های کمیابی به‌دست می‌آیند و به‌دلیل ویژگی‌های ژئوشیمیایی در زمین بسیار پراکنده‌اند و به‌ندرت در یک‌جا به‌صورت اقتصادی و کانسار تمرکز یافته‌اند. این عناصر شامل

1. Rare Earth Elements (REEs)

*مسئول مکاتبات: morshedy@yazd.ac.ir

تفکیک ماگمایی تجمع می‌یابند. این ذخایر عموماً به صورت عدسی شکل یا رگه‌های نامنظم که از نظر شکل، دارای شکل‌های هلالی یا حلقه‌ای هستند، تشکیل می‌شوند. منابع اصلی این نوع، ذخایر کوه‌های پاس در جنوب کالیفرنیا و بایان اوبو در مرکز مغولستان، جمهوری خلق چین است. در سنگ‌های آذرین پرآلکالن، کانی‌سازی ماگمایی و متاسوماتیکی عناصر نادر خاکی اغلب با فازهای کوچک باتولیت‌های پرآلکالن همراه هستند. در ذخایر متاسوماتیکی، کانی‌های اصلی حاوی عناصر نادر خاکی شکل توده آذرین اولیه خود را می‌گیرند و به صورت پراکنده در واحدهای آذرین یافت می‌شوند؛ در صورتی که ذخایر متاسوماتیکی شکلی بین رگه و استوک به خود می‌گیرند. در ذخایر بازماندی لاتریتی، عناصر نادر خاکی به وسیله هوازگی وسیع زیر نواحی حاره کمپلکس‌های آلکالی غنی به وجود می‌آیند. در ذخایر پلاسری که اغلب حاوی مقادیر قابل توجه تیتانیوم و زیرکونیوم هستند، کانی‌های مقاوم عناصر نادر خاکی با وزن مخصوص بالا، موناژیت و زنونیم یافت می‌شوند. بنابراین تولیدکنندگان اصلی ذخایر ماسه‌ای ساحلی و آبرفتی با برداشت کانی‌های سنگین از جمله زیرکن، روتیل، ایلمنیت، کاستریت و غیره، به صورت محصول همراه موناژیت و زنونیم نیز تولید می‌شوند (Jones et al., 1996; Voncken, 2016).

بر اساس بررسی‌های انجام شده در ایران، کانسارهای مگنتیت-آپاتیت از جمله معدن اسفوردی، کانسارهای مگنتیتی آپاتیت‌دار مانند چادرملو و چغارت و وجود سنگ‌های کربناتیت و قلیایی قوی می‌تواند امیدهای اکتشافی این ذخایر باشند. به خصوص در کانسارهای آهن فسفردار ایران مرکزی، توانایی وجود این عناصر به ثبت رسیده است. در معدن سنگ آهن چغارت پس از نمونه برداری سیستماتیک از ضلع شمال و شمال شرقی معدن، مؤلفه‌های اقتصادی برای میانگین کل محدوده محاسبه شده که در مقایسه با معادن بزرگ دنیا قابل توجه است. همچنین در معدن فسفات اسفوردی، آپاتیت این کانسار از نوع فلوئور آپاتیت است که درصد فسفر آنها تا 40 درصد هم می‌رسد و ارتباط مستقیمی بین مقدار اکسید فسفر و تمرکز عناصر نادر خاکی در کانی‌های این کانسارها دیده شده است. پی‌جویی

کاربردهای تکنولوژیکی وسیع به‌ویژه در فناوری‌های جدید از جمله صنایع اتمی، ابرساناها، مواد اپتوالکترونیک، کاتالیزورها، متالورژی، شیمیایی، الکتریکی و مغناطیسی هستند. کانی‌هایی فراوانی شناسایی شده‌اند که در آنها عناصر نادر خاکی وجود دارند که تعداد محدودی از آنها دارای ارزش اقتصادی هستند. به طور کلی کانی‌های عناصر نادر خاکی به کانی‌هایی گفته می‌شود که عناصر نادر خاکی، تشکیل‌دهنده اصلی آنها باشد. سه کانی اصلی دربرگیرنده عناصر خاکی کمیاب شامل باستانیت، موناژیت و زنونیم است که باستانیت و موناژیت منبع عناصر کمیاب سبک و موناژیت کانسنگ اصلی توریم هستند (Castor and Hedrick, 2006; Chakhmouradian and Wall, 2012).

برای اولین بار، عناصر خاکی کمیاب به صورت مقادیر جزئی از نهشته‌های کوچک در محیط پگماتیت گرانیته کشف شد. در نیمه دوم قرن نوزدهم تا نیمه اول قرن بیستم، عناصر خاکی کمیاب به طور عمده از نهشته‌های پلاسری به دست آمدند. در بین سالهای 1965 تا 1985، بیشتر عناصر خاکی کمیاب جهان از کوه پاس¹ واقع در کالیفرنیا مربوط به دوران پرکامبرین استخراج شد. استرالیا به عنوان یکی از تولیدکنندگان این عناصر به صورت همراه، از ماسه سنگ‌های حاوی کانی سنگین تا اوایل سال 1990 محسوب می‌شد. در طول سال 1980، چین به عنوان یک تولیدکننده عمده عناصر خاکی کمیاب در جهان مطرح شد به طوری که سهم بازار استرالیا و آمریکا به طور چشم‌گیری کاهش پیدا کرد و از سال 1998 بیش از 80 درصد این عناصر به صورت خام توسط چین به جهان عرضه می‌شود (Castor and Hedrick, 2006; Jaireth et al., 2014).

عناصر نادر خاکی اصولاً در نهشته‌های اولیه همراه با توده‌های آذرین نفوذی در رگه‌ها، دایک‌ها و پگماتیت‌ها و نهشته‌های ثانویه در سواحل، تلماسه‌ها، پلاسرهای آواری و ذخایر بازماندی لاتریتی تشکیل می‌شوند. کربناتیت‌ها، اختصاصاً حاوی میزان بالاتری از عناصر نادر خاکی نسبت به دیگر انواع سنگ‌ها و منبع اصلی عناصر نادر خاکی در دنیا هستند. عناصر نادر خاکی در کربناتیت‌ها عموماً در حین تفریق بلورین در مراحل آخر سری

پالئوزوئیک است که سنگ پی را تشکیل داده و اغلب دگرگون شده اند. این سنگ ها که در قسمت شمال و شمال شرقی محدوده اکتشافی رخنمون دارد شامل متادولومیت و متاریولیت است که توسط گسل مروست - هرات با راستای تقریبی شمال غربی - جنوب شرقی از فروافتادگی کویر صاحب آباد - مروست جدا شده اند. واحدهای شیستی مربوط به پالئوزوئیک بالایی در قسمت های شمالی گستره دربرگیرنده سرسیت - کوارتز، آلیت، آمفیبولیت، گارنت و آهک شیت دیده می شود. واحدهای دیگر شامل شیل و آهک چرتی تیره رنگ پرمن، دیاباز تریاس زیرین، دولومیت های تریاس میانی، شیل، ماسه سنگ خاکستری - سیاه ژوراسیک و سنگ های رسوبی نئوژن است (Alipour-Asll et al., 2006; Ghalehnoee and Kohnsary, 2015).

در منطقه مروست، سنگ منشأ موناویت شیل های سیاه است که به صورت متناوب با ماسه سنگ های آهکی، آهک و کنگلومرا قرار گرفته اند و موناویت به صورت گرهک های پراکنده در شیل ها دیده می شود. این توالی رسوبی در محیط کم عمق قاره ای و در دوره تریاس بالایی تشکیل شده است. پیدایش کانی موناویت پیش از دگرگونی و دگرشکلی رسوبات رخ داده است. موناویت های موجود در رسوب های دشت جوان، حاصل هوازگی سنگ های اطراف و بالا دست هستند. بررسی های کانی سنگین، لیتوژئوشیمیایی و سنگ شناسی نشان می دهد که واحدهای شیلی، شیل های سیاه و شیل های آهکی حاوی گرهک های پراکنده ای از موناویت هستند. شکل گیری موناویت و غنی شدگی عناصر خاکی کمیاب در شیل های سیاه خاستگاه دیاژنتیکی دارد (GSI, 2004). موناویت حاصل فاز دیاژنتیک پسین (پس از متراکم شدن رسوب ها) است و عناصر نادر خاکی از واکنش آب های گرم دریایی با بازالت های قلیایی در عمق به وجود آمده است (فاز کششی سمیرین پیشین در پهنه سنندج - سیرجان با فوران بازالت قلیایی همراه بوده است) و سپس به کف دریا راه یافته است (Alipour-Asll et al., 2007). عناصر نادر خاکی موجود در آب بلافاصله به وسیله کانی های رسی جذب و در شرایطی که رسوب گذاری تخریبی به کمترین میزان

ژئوشیمی ناحیه ای در محور یزد - سبزواران به شناسایی کانی موناویت (فسفات عناصر نادر خاکی) در رسوبات آبرفتی جنوب مروست منجر شده است. تجزیه کانی موناویت، وجود مقادیر قابل توجهی از عناصر نادر خاکی در این کانی به ثبت رسانده است که از میان آن ها عناصر خاکی نادر سبک به خصوص نتودیمیم، سریم و یورویوم قابل توجه هستند (Alipour-Asll et al., 2006; Parsapoor et al., 2009; Alipour-Asll (Kryvdik and Mykhayiov, 2001; et al., 2012; Ghorbani, 2013).

در این پژوهش، توزیع ژئوشیمیایی عناصر نادر خاکی در آبرفت های مروست (منطقه خاوری) بررسی می شود. ابتدا الگوی REE مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از روش خوشه بندی سلسله مراتبی، افراز در دو سطح ویژگی (عناصر) و نمونه ها انجام می شود و پهنه بندی در منطقه صورت گرفته و مناطق امیدبخش تعیین می شود. در نهایت، خروجی های به دست آمده با دیگر روش آماری چند متغیره تحلیل مؤلفه های اصلی مورد مقایسه قرار می گیرد.

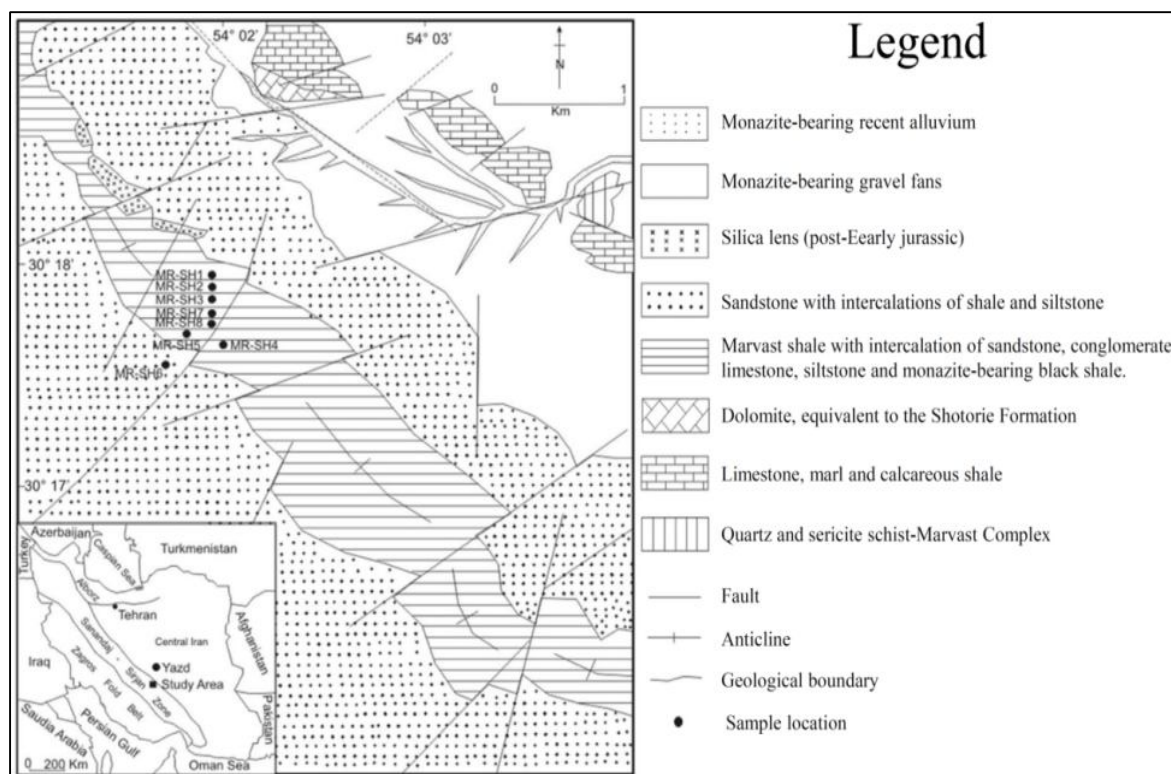
زمین شناسی کانسار پلاس مروست

منطقه مورد بررسی در 180 کیلومتری جنوب شهرستان یزد، واقع در مرکز ایران و در 25 کیلومتری جنوب غربی مروست قرار دارد. این گستره با مساحت تقریبی دو کیلومتر مربع دشت آبرفتی موناویت دار و سنگ های رسوبی تریاس بالایی - ژوراسیک پایینی (سنگ میزبان موناویت) را در برمی گیرد. آب و هوای منطقه، خشک و نیمه خشک است و مقدار میانگین بارندگی سالانه کمتر از 200 میلی متر و دارای پوشش گیاهی ضعیف است. دسترسی به این منطقه از طریق جاده های آسفالته یزد - مهریز - مروست، مروست - ترکان - توتک و جاده های خاکی منشعب از آن امکان پذیر است (GSI, 2004; Alipour-Asll et al., 2012).

کانسار مورد بررسی در جنوب شرقی پهنه سنندج - سیرجان و در مرز پهنه ایران مرکزی واقع شده است (شکل 1). اغلب سنگ های این منطقه رسوبی با روند عمومی شمال غربی - جنوب شرقی است. قدیمیترین سنگ های منطقه مربوط به دوران

در سنگ منشأ از توجیه اقتصادی برخوردار نیست؛ اما تمرکز موناژیت ثانویه به صورت پلاس، سبب اقتصادی‌سازی این بی‌هنجاری شده است (Alipour-Asll et al., 2006; GSI, 2004; Alipour-Asll et al., 2012).

می‌رسد، ته‌نشین شدند. رسوب‌های دشت و رودخانه‌ای جوان که جنس سازنده‌های آن متأثر از سنگ‌های اطراف و بالادست منطقه است، بخش‌های شمال و شمال‌شرقی محدوده را پوشش داده و دربردارنده کانی با ارزش موناژیت است. بررسی‌ها بیانگر این مطلب است که عیار موناژیت و غلظت عناصر نادر خاکی



شکل 1. نقشه زمین‌شناسی منطقه مروست و موقعیت قرارگیری نمونه‌ها بر روی نقشه (Alipour-Asll et al., 2012)

Fig. 1. The geological map of Marvast area with showing sample locations (Alipour-Asll et al., 2012)

مجموع پنج کیلومتر مربع منجر شد. در این پژوهش، داده‌های بی‌هنجاری محدوده شرقی مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه بررسی‌های اکتشافی تکمیلی در محدوده پلاس، تعداد حفر 53 حلقه چاهک اکتشافی در شبکه منظم با ابعاد 200×200 متر، نمونه‌برداری و تجزیه نمونه‌های مرتبط انجام شد. از آنجا که چاهک‌های یادشده به روش دستی حفر شده‌اند، مساحتی به شعاع 5 تا 6 متر در اطراف چاهک را تحت تأثیر قرار داده و عمق چاهک‌ها بین 1 تا 10 متر متغیر است (GSI, 2004).

مجموعه داده‌ها

عیار قابل ملاحظه موناژیت در رسوبات آبرفتی، گسترش این رسوبات در این منطقه و جایگاه عناصر نادر خاکی در صنعت، پی‌جویی و اکتشافات در منطقه مروست را توجیه‌پذیر می‌کند. بررسی‌ها بیانگر تمرکز کانی موناژیت در این منطقه است؛ اما از نظر ویژگی‌ها و پیدایش، متفاوت از موناژیت‌های نوع آذرین است. طرح پی‌جویی موناژیت با نمونه‌برداری کانی سنگین از رسوبات آبرفتی و حفر دو حلقه چاهک انجام شد که به شناسایی دو محدوده بی‌هنجاری شرقی و غربی با وسعت تقریبی

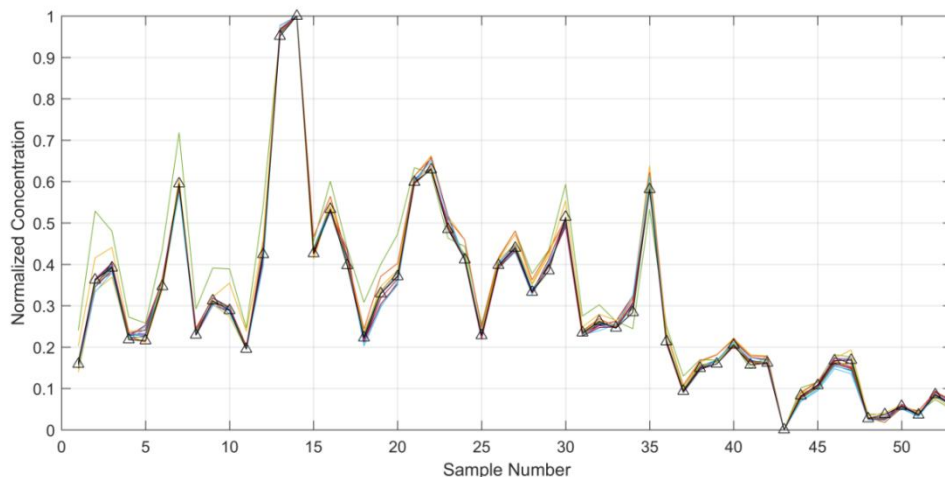
بحث بر روی داده ها

مواد به دست آمده از حفاری به صورت کپه های جدا که هر یک مربوط به عمق یک متر است به صورت ماریجی در اطراف چاه قرار داده شدند. برای هر کپه از طریق مخروط سازی و چهار قسمتی های متوالی، نمونه برداشت شد. در امتداد چاهک های اکتشافی به ازای هر متر مکعب نیز یک نمونه کانی سنگین برداشت شد. بر روی تمامی نمونه ها مراحل مختلف توزین، لاوک شویی، آماده سازی و جدایش انجام شد و برای شناسایی دقیق موناژیت، کانی های همراه و عناصر همراه از روش های کمکی مانند میکروسکپ الکترونی، XRD، طیف سنج جرمی پلاسمای جفتی القایی لیزری (LA-ICP-MS) و برش های نازک استفاده شد (GSI, 2004).

برای بررسی میزان تغییر پذیری توزیع عناصر نادر خاکی و نمونه های با تمرکز بالا، غلظت عناصر نادر خاکی با توجه به رابطه (1) در بازه [0-1] استاندارد شد که برای استاندارد سازی داده های پیوسته، با کم کردن مقدار کمینه غلظت x_{min} از مقدار متغیر x و تقسیم آن بر دامنه تغییرات بر اساس اختلاف مقدار

بیشینه x_{max} از کمینه غلظت، مقدار استاندارد شده به دست می آید. نمونه هایی که مقدار استاندارد شده آن نزدیک به یک است، بیشترین تمرکز و توانایی عناصر نادر خاکی در منطقه را دارند و مقادیر استاندارد نزدیک به صفر کمترین تمرکز از این عناصر را در این منطقه شامل می شود. نکته قابل توجه این است که غلظت عناصر در نمونه ها از یک روند پیروی می کند؛ به عبارتی دیگر، غلظت عناصر به صورت روندی تقریباً یکنواخت در یک نمونه افزایش می یابد و یا در نمونه دیگر روند کاهشی از خود نشان می دهد. در شکل 2، تمرکز غلظت عناصر نادر به صورت استاندارد شده (محور عمودی) خاکی برای تعداد 53 نمونه (محور افقی) نمایش داده شده است که بیانگر همبستگی قابل توجه بین غلظت عناصر در این منطقه است. بیشترین تمرکز عناصر نادر خاکی به صورت بیشینه در نمونه های جنوبی منطقه (شماره های 13 و 14) و نمونه های مربوط به حاشیه محدوده دارای غلظت کمتری از این عناصر هستند.

$$Normalize = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad \text{رابطه 1}$$



شکل 2. نمودار تغییر پذیری غلظت عناصر نادر خاکی (استاندارد شده در بازه 0-1) برای نمونه های مورد بررسی در محدوده خاوری مروت

Fig. 2. Distribution of REEs normalized concentration in the studied samples in the eastern part of Marvast placer

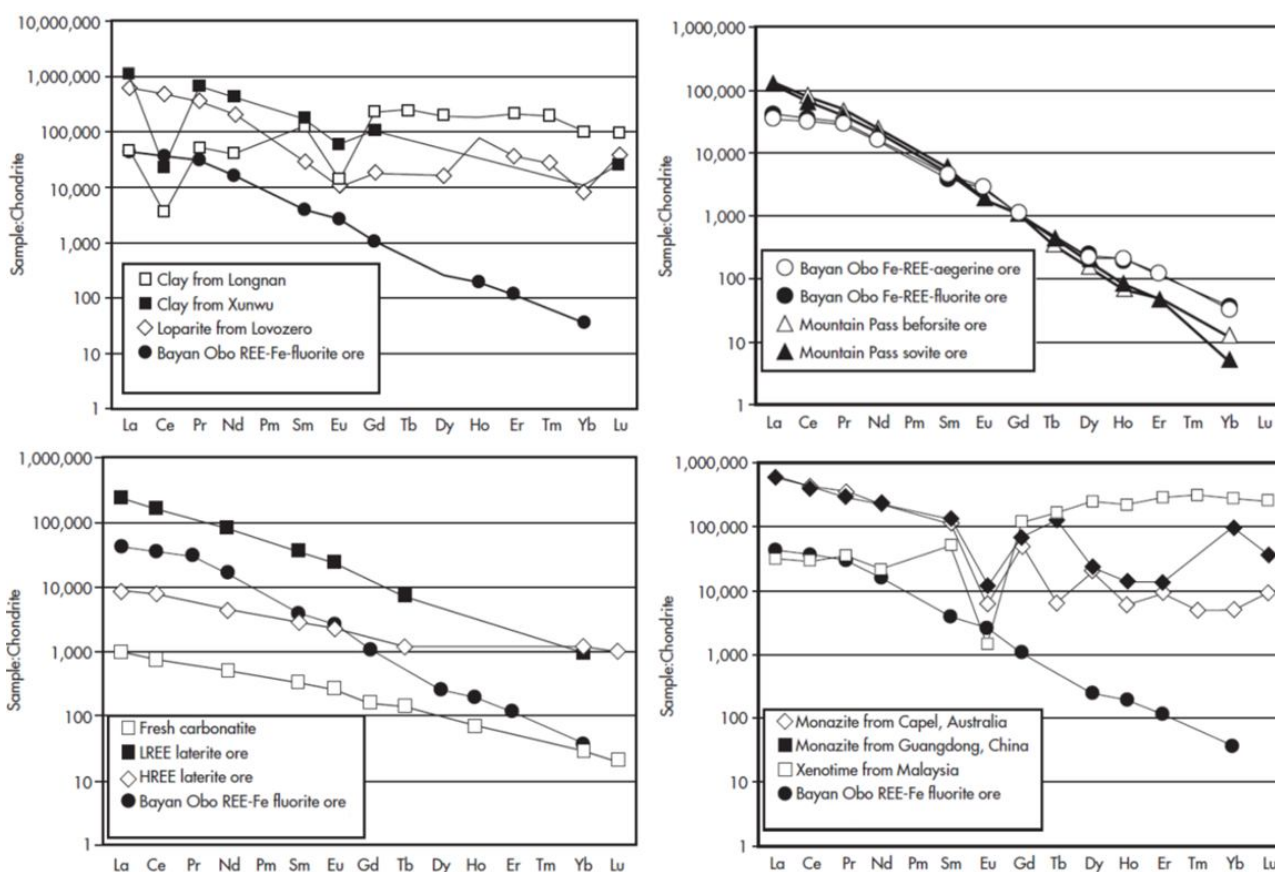
می توان نقشه های ژئوشیمیایی و کانی سنگین با مقیاس های مختلف را از مراحل شناسایی تا اکتشاف عمومی به کار گرفت. با توجه به کاربرد عناصر نادر خاکی در تشخیص فرآیندهای

بررسی ژئوشیمیایی عناصر نادر خاکی منطقه

بررسی های ژئوشیمیایی یکی از مهمترین راهنماها و راه کارها برای اکتشاف عناصر نادر خاکی است. بر اساس این داده ها

اساس تغییرات عناصر نادر خاکی نسبت به مقادیر کندریت، شیل آمریکای شمالی و ... استاندارد شده و الگوی مشخص برای نوع‌ها و کانی‌سازی مختلف در شکل 3 نمایش داده شده است.

آذرین، روش‌های لیتوژئوشیمیایی کاربرد گسترده‌ای در اکتشافات انواع کانسارهای عناصر نادر خاکی دارند. در اکتشافات این نوع کانسارها می‌توان از نسبت‌های عناصر نظیر LREEs/HREEs استفاده کرد (Rostami et al., 2014).

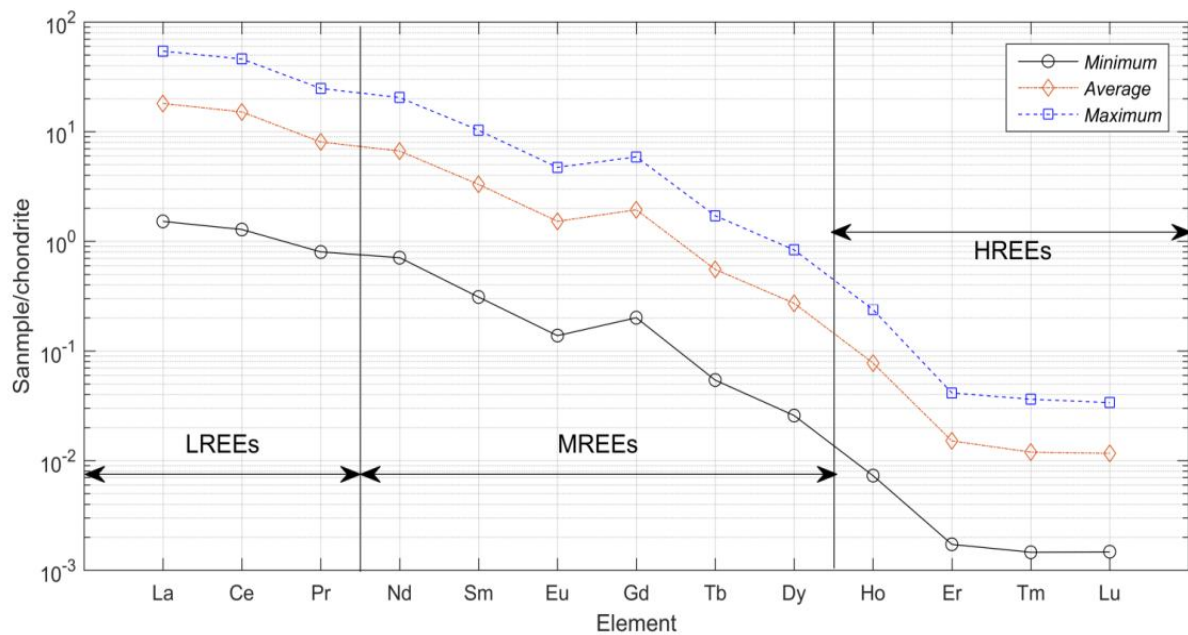


شکل 3. مقایسه الگوی توزیع REEs استاندارد شده به مقدار کندریت در کانسارها و نوع‌های مختلف (Castor and Hedrick, 2006)

Fig. 3. The comparison of REE chondrite-normalized pattern for different types of resources (Castor and Hedrick, 2006)

سنگین پی برد، علاوه بر این بی‌هنجاری منفی (تهی‌شدگی) یوروپیم در این نوع کانسارها دیده می‌شود. با استفاده از مقایسه الگوی مشاهده شده برای پلاسروست و الگوهای استاندارد ارائه شده برای عناصر خاکی، همچنین تمرکز قابل توجه عناصر سبک نادر خاکی از جمله سریم نسبت به عناصر سنگین و بی‌هنجاری منفی یوروپیم، می‌توان به منشأ مونازیتی این بی‌هنجاری پی برد.

برای تحلیل و خلاصه‌سازی نمونه‌های محدوده مورد بررسی، مقدار بیشینه، میانگین و کمینه نمونه‌ها برای عناصر نادر خاکی محاسبه و با توجه به مقدار میانگین کندریت‌ها، استاندارد شد. نمودار الگو مقادیر عناصر سبک تا سنگین نادر خاکی به صورت نیمه لگاریتمی ترسیم شد که دارای هم‌خوانی قابل توجهی با الگوی استاندارد مونازیت دارد (شکل 4). در الگوهای مربوط به توزیع عناصر نادر خاکی در کانسارهای مونازیتی می‌توان به غنی‌شدگی و تمرکز قابل توجه عناصر نادر خاکی سبک به



شکل 4. الگوی توزیع REEs استاندارد شده به مقدار کندریت در پلاسر مروست (محدوده خاوری)

Fig. 4. The REE chondrite-normalized pattern in the eastern part of Marvast placer

خاکی (LREEs/HREEs) استفاده شد. بر اساس غنی شدگی سریم و تهی شدگی یوروم در تمرکزهای موناژیتی از نسبت (Ce/Eu) نیز می توان استفاده کرد که بیانگر تمرکز این عناصر در مرکز محدوده مورد بررسی است (شکل 6). نسبت های مورد بررسی، نشان دهنده سهم قابل توجه و بالای غلظت عناصر سبک به سنگین است که با تمرکز ثانویه موناژیت ارتباط دارد.

خوشه بندی

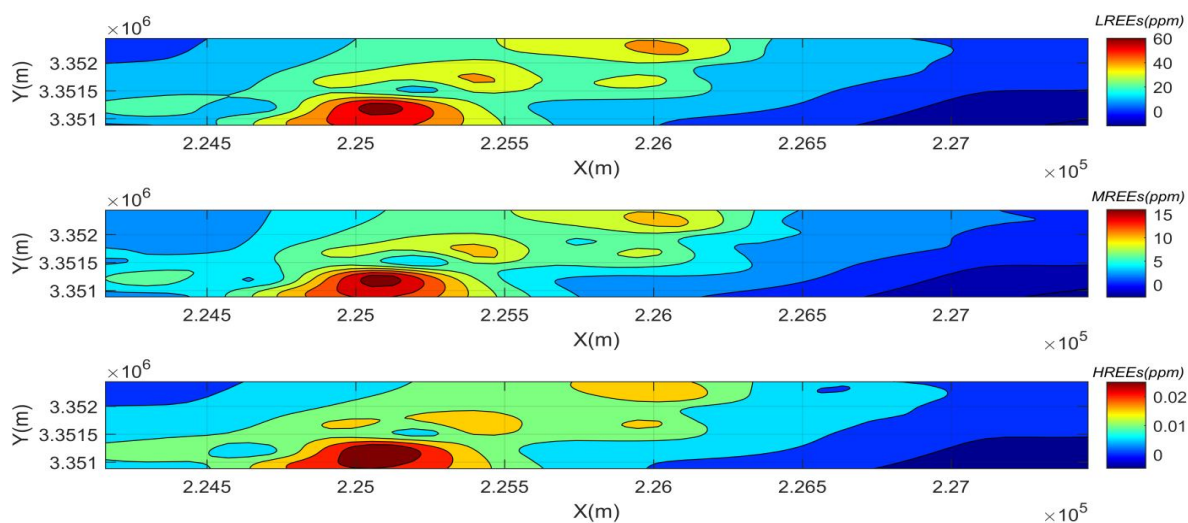
خوشه بندی، یافتن یک ساختار یا کشف نظم درون یک مجموعه از داده های بدون برچسب است. امروزه، خوشه بندی به عنوان روش یادگیری بدون ناظر در بسیاری از رشته ها از جمله زیست شناسی، پزشکی، روان شناسی، جغرافیا، بازاریابی، پردازش تصویر، باستان شناسی و غیره توانایی خود را به اثبات رسانده است. بسیاری از پژوهشگران، یک خوشه را به عنوان مجموعه داده همگن دارای انسجام داخلی و جدایش خارجی معرفی می کنند. درحقیقت، هیچ تعریف واحد و جامعی برای خوشه و خوشه بندی که دارای همه شرایط باشد، وجود ندارد. این تصور ممکن است موجب ایجاد مفاهیم دقیق همگن سازی و جدایش

برای پردازش داده های ژئوشیمیایی، نقشه های ژئوشیمیایی عناصر نادر خاکی، هم یافت و کانی سنگین تهیه و محدوده های امیدبخش دارای کانی سازی مشخص می شوند. برای بررسی توزیع و تمرکز ژئوشیمیایی در منطقه، عناصر نادر خاکی را به سه گروه سبک، حدواسط و سنگین تقسیم بندی کرده که دسته بندی این عناصر در شکل 4 به طور نمونه نشان داده شده است و مجموع میزان غلظت عناصر در هر سه گروه جداگانه محاسبه شده است. در مرحله بعد، نقشه توزیع عناصر سبک، حدواسط و سنگین نادر خاکی بر اساس نمونه های موجود درون یابی شد که بیشترین تمرکز به ترتیب مربوط به عناصر سبک، حدواسط و سنگین است که بی هنجاری مربوط به قسمت جنوب و جنوب غربی محدوده است. در شکل 5، نقشه ژئوشیمیایی عناصر سبک (LREEs)، عناصر حدواسط (MREEs) و عناصر سنگین (HREEs) نشان داده شده است که محورهای افقی و عمودی به ترتیب بیانگر طول و عرض جغرافیایی هستند.

برای تعیین بی هنجاری های ژئوشیمیایی از نسبت های شدت بخشی از نسبت عناصر (La/Lu) و مقادیر عناصر نادر

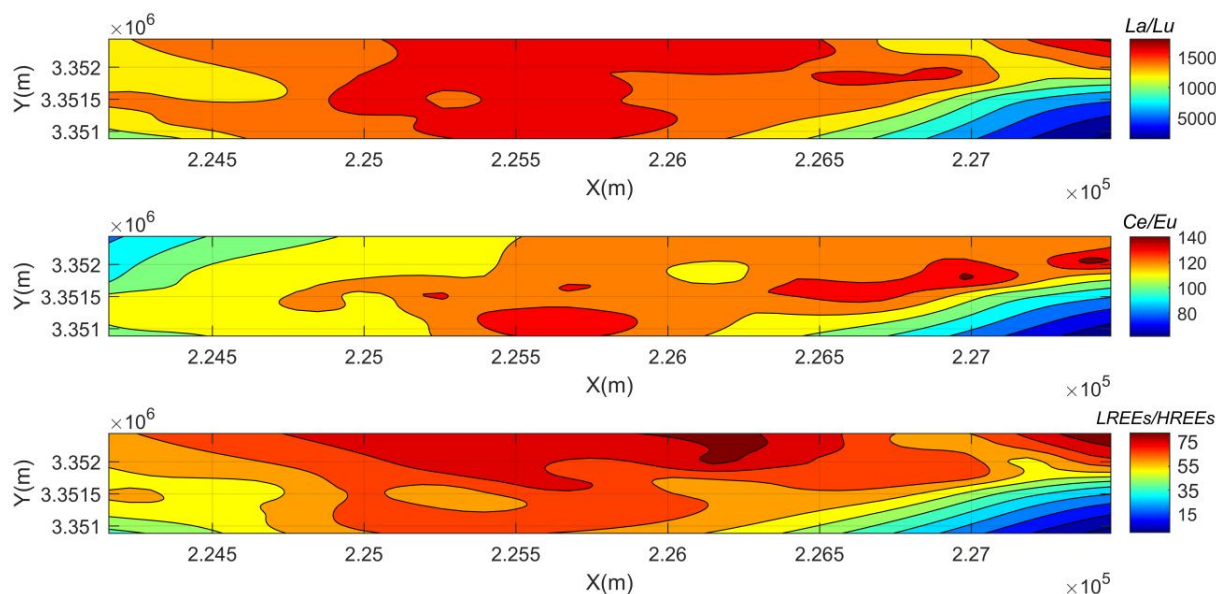
که شباهت بین داده‌های درون هر خوشه حداکثر و شباهت بین داده‌های خوشه‌های مختلف حداقل شود. در روش‌های خوشه‌بندی، خوشه‌ها را می‌توان بر اساس هریک از معیارهای ارتباط بین داده‌ها، مرکز ثقل، توزیع و چگالی تعیین کرد (Jain et al., 1999; Everitt et al., 2011)

ریاضیاتی به صورت شاخص‌های عددی صریح باشد که به ایجاد معیارهای متعدد و متنوع منجر شده است. به‌طور واضح نمی‌توان، پراکندگی یک خوشه را وقتی بر روی یک صفحه به‌نمایش در می‌آید، تعیین کرد؛ در حالی که یکی از ویژگی‌های معمول در فرآیند شناسایی، محاسبه فواصل نسبی بین نقاط است. در خوشه‌بندی سعی می‌شود تا داده‌ها به خوشه‌هایی تقسیم شوند



شکل 5. نقشه فضایی دوبعدی X-Y (طول و عرض جغرافیایی) مجموع عناصر نادر خاکی سبک، حدواسط و سنگین در محدوده شرقی مروست

Fig. 5. 2D spatial map of total LREEs, MREEs, and HREEs in the eastern area of Marvast



شکل 6. توزیع فضایی دوبعدی X-Y (طول و عرض جغرافیایی) محدوده آنومالی مروست بر اساس نسبت‌های LREEs/HREEs, Ce/Eu, La/Lu

Fig. 6. 2D spatial distribution of Marvast anomaly area based on LREEs/HREEs, Ce/Eu, and La/Lu ratios

پهنه‌بندی داده‌ها و منطقه مورد بررسی

برای بررسی همبستگی و افراز نمونه‌ها و عناصر نادر خاکی از روش‌های خوشه‌بندی استفاده شده است. در روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی، به خوشه‌های نهایی بر اساس میزان عمومیت آن‌ها ساختاری سلسله مراتبی، معمولاً به صورت درختی نسبت داده می‌شود که به این درخت سلسله مراتبی، دندروگرام می‌گویند. روش‌های خوشه‌بندی بر اساس ساختار سلسله مراتبی تولیدی توسط آن‌ها معمولاً به دو بخش بالا به پایین (تفریق) و پایین به بالا (تلفیق) تقسیم می‌شوند. در روش تقسیم‌کننده، ابتدا تمام داده‌ها به عنوان یک خوشه در نظر گرفته می‌شوند و سپس در طی یک فرآیند تکرار شونده در هر مرحله داده‌هایی که شباهت کمتری به هم دارند به خوشه‌های مجزایی شکسته می‌شود و این روند تا رسیدن به خوشه‌هایی که دارای یک عضو هستند، ادامه پیدا می‌کند. در رویکرد متراکم شونده، هر داده به عنوان خوشه‌ای جدا در نظر گرفته می‌شود و طی فرآیندی تکراری، در هر مرحله خوشه‌های مشابه با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا در نهایت یک خوشه یا تعداد مشخصی خوشه حاصل شود.

الگوریتم‌های خوشه‌بندی سلسله مراتبی متفاوتی بر اساس نحوه محاسبه شباهت (اتصال) بین خوشه‌ها وجود دارد که شامل حداقل فاصله (اتصال منفرد)، میانگین فواصل، حداکثر فاصله (اتصال کامل)، فاصله بین مرکز خوشه و روش واردز¹ است. در روش وارد از مجموع مربعات تفاضل هر داده از یک خوشه با بردار میانگین آن خوشه به عنوان معیاری برای سنجش یک خوشه استفاده می‌شود (Parks, 1966; Ji et al., 2007; Templ et al., 2008).

ورودی الگوریتم خوشه‌بندی سلسله مراتبی، شامل تعداد 53 نمونه شامل 13 ویژگی که غلظت عناصر نادر خاکی در نمونه‌ها به صورت مقادیر استاندارد شده مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله اول خوشه‌بندی بر روی 13 ویژگی انجام و در چهار گروه تقسیم بندی شد. به‌طور کلی، عوامل مختلفی از جمله ویژگی‌های بلورشیمی، اختلاف در ویژگی بازی این عناصر، اختلاف در توانایی برای تشکیل کمپلکس‌ها، توانایی اکسیداسیون- احیا، اختلاف در قدرت جذب سطحی، قدرت

انحلال و تحرک در تقسیم‌بندی عناصر مؤثر است که از مهمترین آن‌ها، می‌توان به طبقه‌بندی سنگین و سبک بودن این عناصر اشاره کرد. گروه اول شامل سبکترین عناصر، گروه دوم ترکیبی از عناصر حدواسط و سنگین، گروه سوم شامل عناصر میانی (حدواسط) و اریبم، رفتاری مجزا از دیگر عناصر از خود نشان می‌دهد. بررسی کانی‌شناسی عناصر نادر خاکی نشان می‌دهد که عنصر اریبوم به همراه ایتریوم به صورت ترکیبات فسفاتی، اکسیدی- هیدروکسیدی و سیلیکاتی یافت می‌شود و کانی موناژیت نسبت به اریبوم فقیرشدگی شدیدی نشان می‌دهد. در شکل 7، ساختار درختی عناصر نادر خاکی نمایش داده شده است.

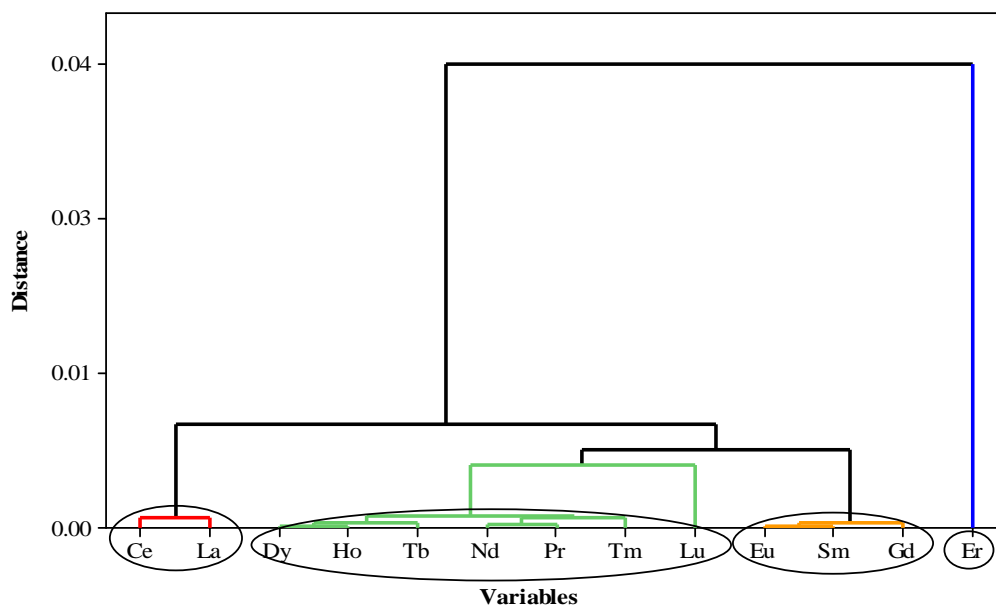
ساختار درختی عناصر نادر خاکی در کنسانتره‌های موناژیت مروست بر پایه ضرایب همبستگی این عناصر ترسیم شده است، به عبارتی مؤلفه مشابهت در اتصال خوشه‌ها ضریب همبستگی است. در سه گروه عناصر مورد بررسی، ماتریس همبستگی هیستوگرام و تابع خطی برازش شده بین عناصر مورد بررسی شد که بیانگر ضریب همبستگی بالای 0/9 بین عناصر موجود در هر گروه بود (شکل‌های 8، 9 و 10).

با ترانهاده‌سازی ماتریس قبلی، جایگزینی سطر با ستون انجام شد، خوشه‌بندی سلسله مراتبی در سطح نمونه‌ها بررسی و بر اساس حد جدایش پهنه‌ها، 53 نمونه‌های برداشت‌شده در چهار گروه تقسیم‌بندی شد. در شکل 11، سطح جدایش خوشه‌ها بر اساس توزیع فضایی نقاط و همبستگی داده‌ها تعیین شد و دندروگرام نمونه‌ها بر اساس ویژگی غلظت عناصر نادر خاکی در چهار خوشه تعیین شده است.

بر اساس نتایج خروجی دندروگرام در سطح نمونه‌ها، هر نمونه به خوشه‌های 1 تا 4 اختصاص داده شد و با توجه به موقعیت جغرافیایی و برجسب خوشه‌بندی، برای پهنه‌بندی ژئوشیمیایی منطقه استفاده شده است. در شکل 12، چهار پهنه بخش شرقی پلاس مروست با استفاده از مقیاس رنگی (آبی تا قرمز) با در نظر گرفتن رویکرد خوشه‌بندی سلسله مراتبی نمایش داده شده است. مناطق مرتبط با خوشه‌های اول و دوم بیانگر مناطق با

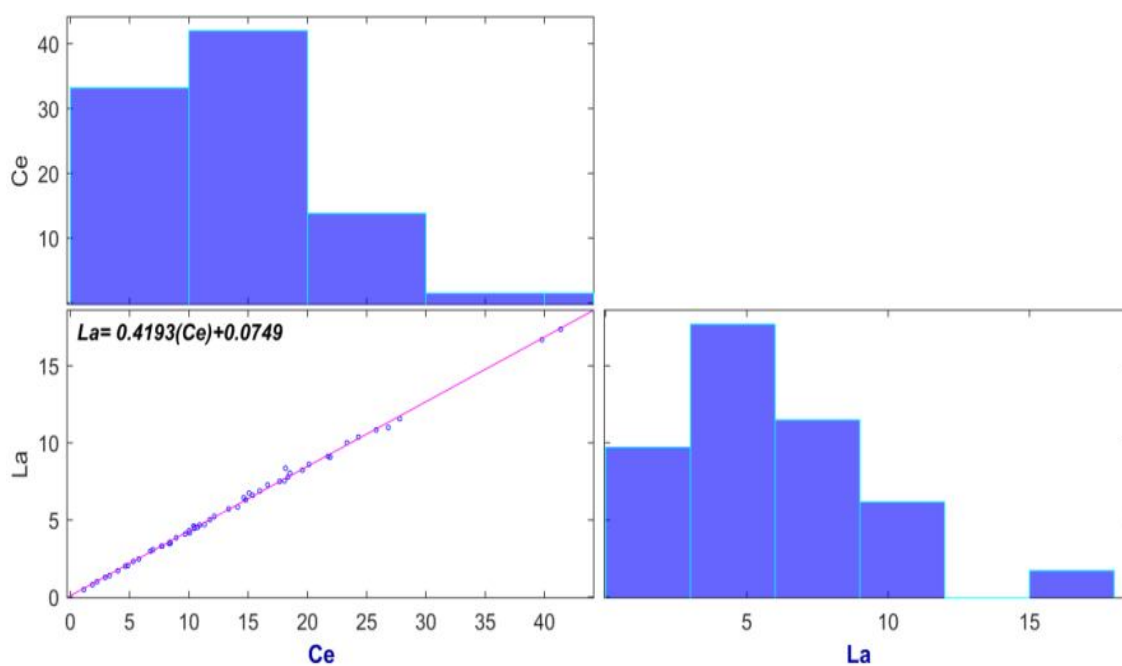
در برگیرنده بی‌هنجاری است؛ در حالی که پهنه چهارم منطبق بر مناطق با توانایی بالا و بی‌هنجاری است.

غلظت و تمرکز پایین عناصر نادر خاکی است که در حاشیه منطقه واقع شده است. پهنه سوم بیانگر محدوده اطراف و محیط



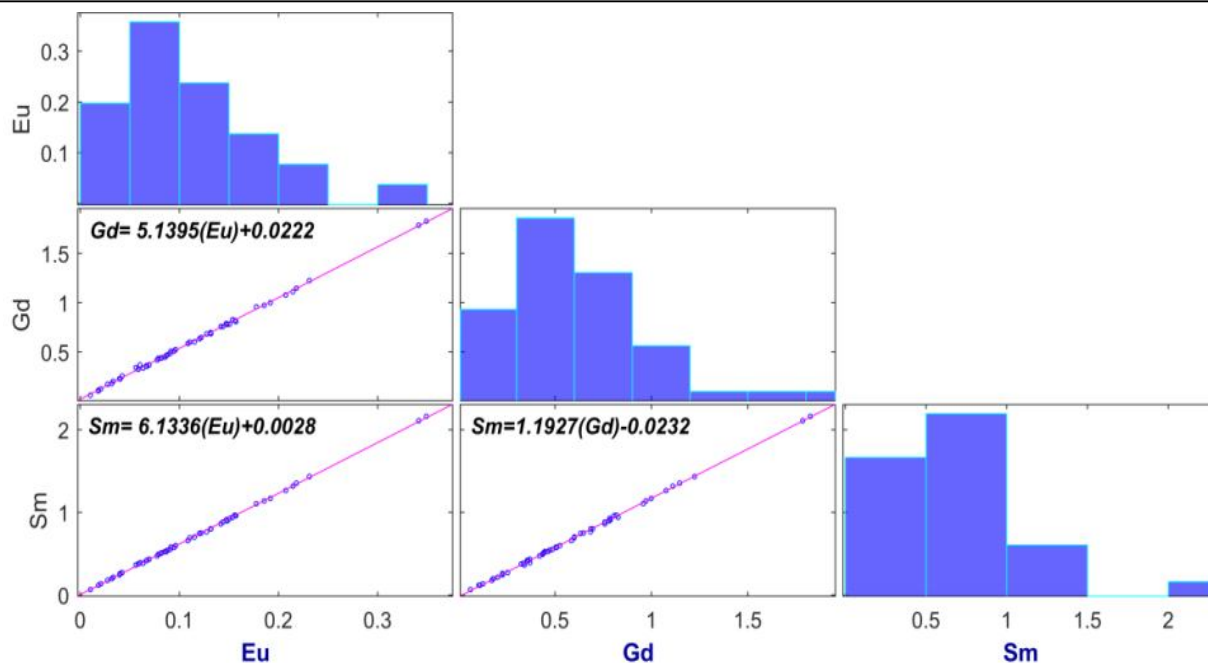
شکل 7. دندروگرام مربوط به خوشه‌بندی عناصر نادر خاکی در محدوده شرقی مروست

Fig. 7. Dendrogram of REEs clustering in the eastern area of Marvast



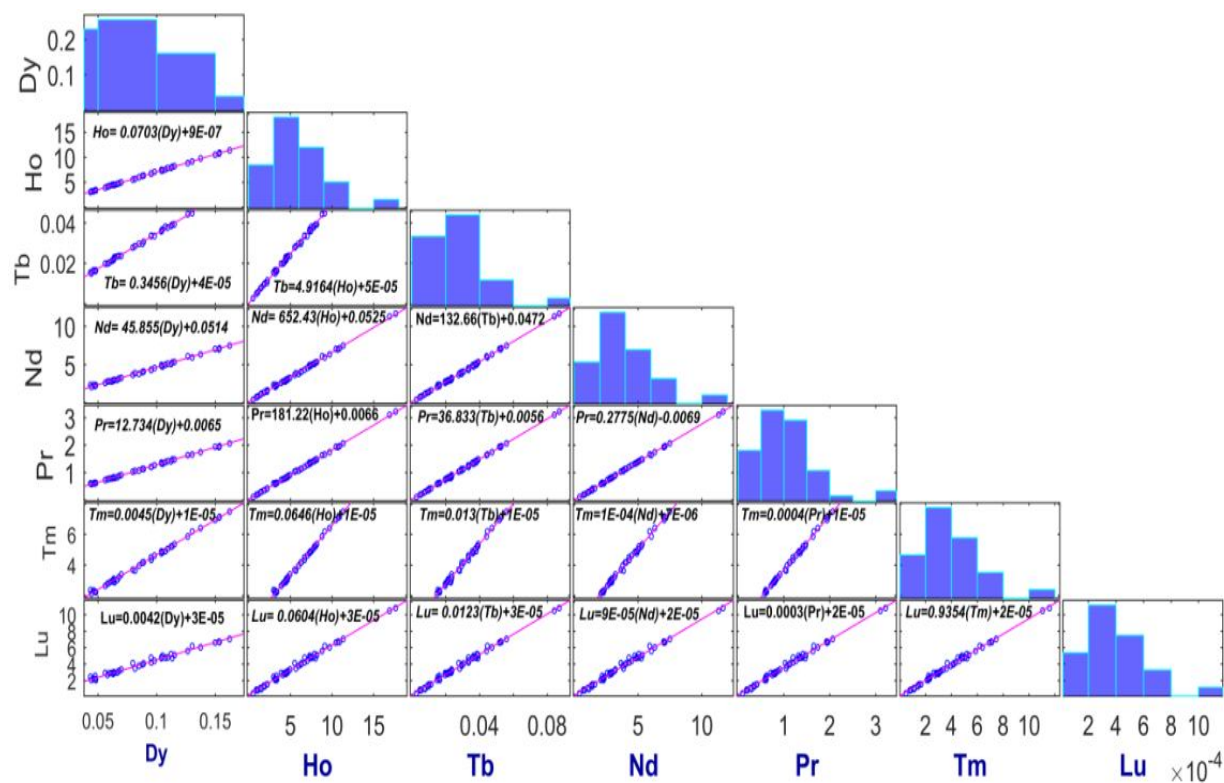
شکل 8. نمودار ماتریسی رابطه همبستگی و تابع خط برازش‌شده برای عناصر گروه اول در محدوده شرقی مروست

Fig. 8. Matrix plot of correlational relationship and fitted linear function for group I in the eastern area of Marvast



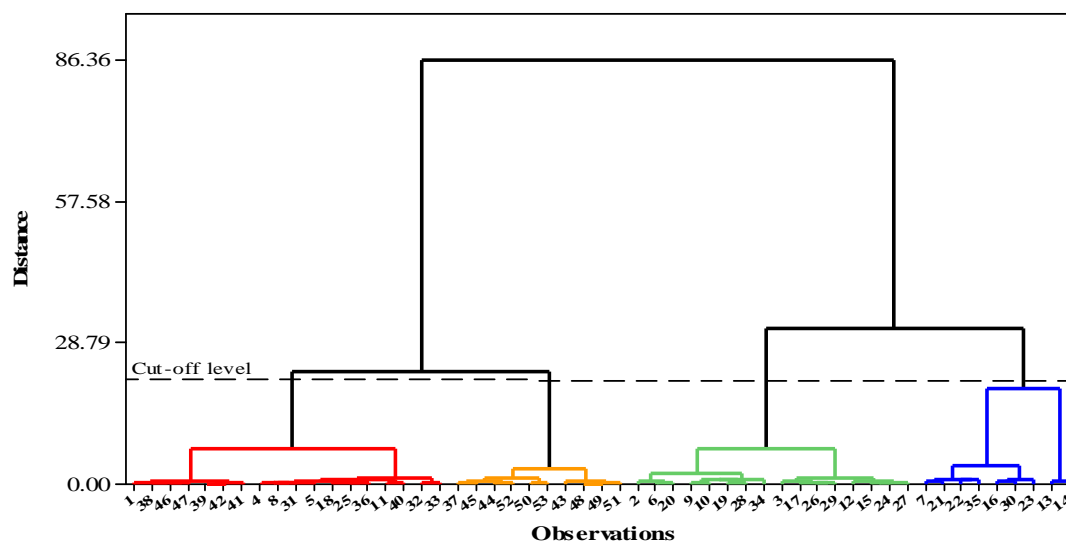
شکل 9. نمودار ماتریسی رابطه همبستگی و تابع خط برازش‌شده برای عناصر گروه دوم در محدوده شرقی مروست

Fig. 9. Matrix plot of correlational relationship and fitted linear function for group II in the eastern area of Marvast



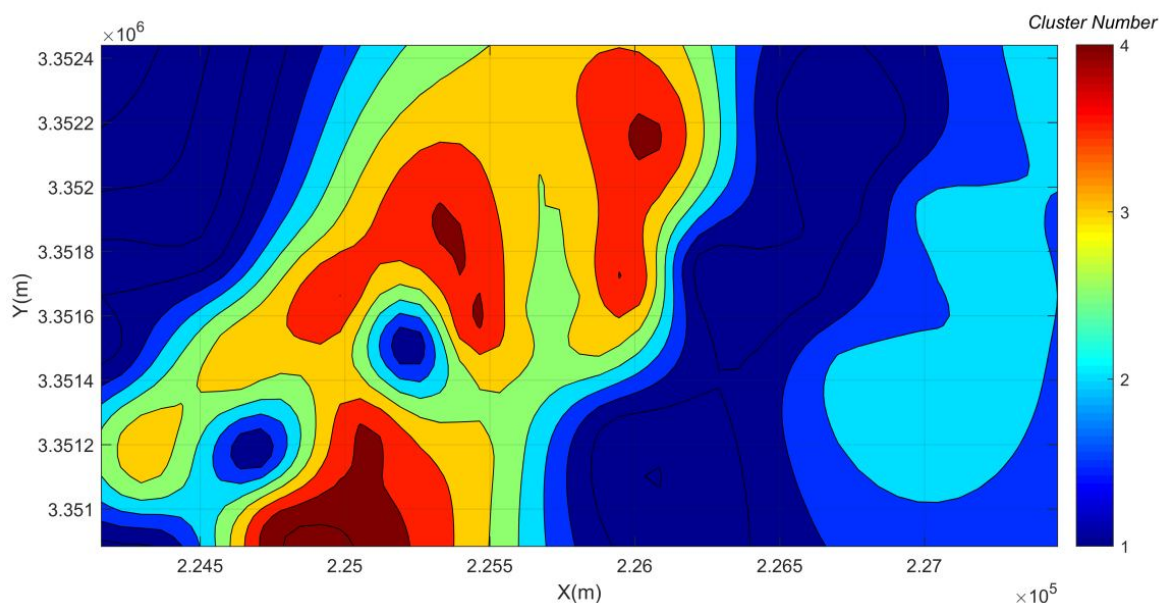
شکل 10. نمودار ماتریسی رابطه همبستگی و تابع خط برازش‌شده برای عناصر گروه سوم در محدوده شرقی مروست

Fig. 10. Matrix plot of correlational relationship and fitted linear function for group III in the eastern area of Marvast



شکل 11. دندروگرام افراز نمونه‌ها در چهار پهنه (بخش شرقی مروست)

Fig. 11. Dendrogram of samples partitioning in the four zones (eastern part of Marvast)



شکل 12. پهنه‌بندی فضایی محدوده شرقی مروست بر اساس نتایج خوشه‌بندی در محدوده شرقی مروست

Fig. 12. Spatial zoning of the studied area based on clustering outputs in the eastern area of Marvast

بحث

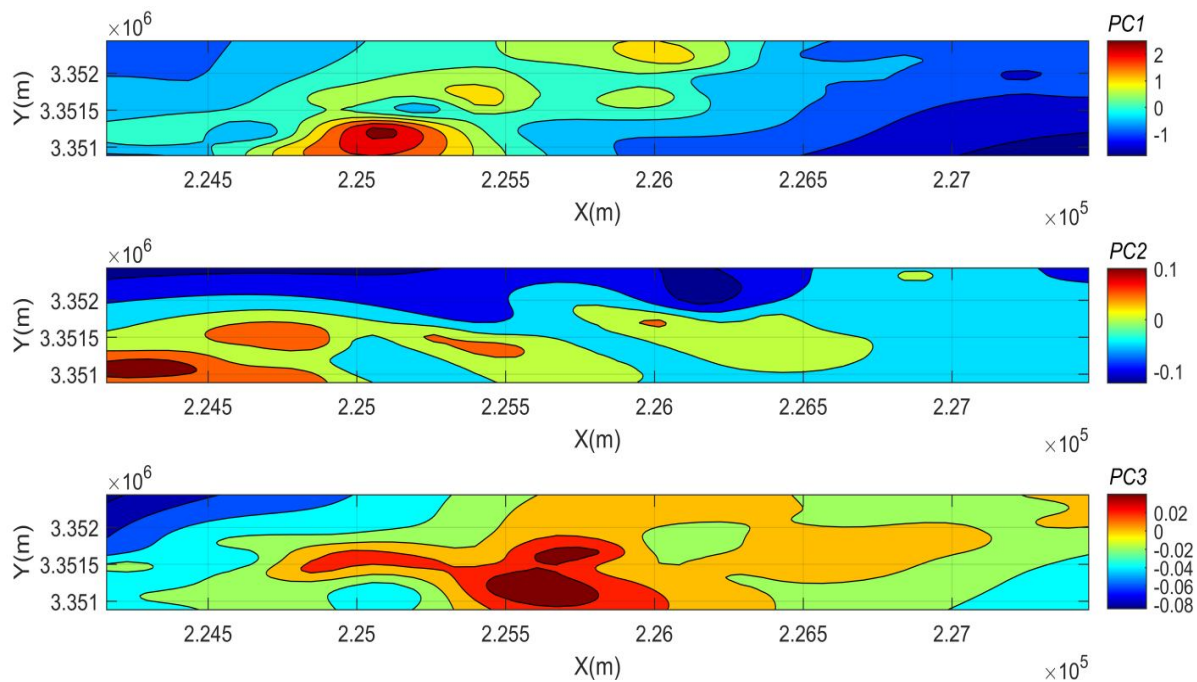
مقادیر ویژه است که با استفاده از مقادیر ویژه و بردارهای ویژه، جهت‌هایی با بیشترین تغییرپذیری را شناسایی می‌کند. سپس با تعریف متغیرهای جدیدی (مؤلفه اصلی) که ترکیب خطی از متغیرهای اولیه هستند، تعداد ابعاد متغیرهای اولیه کاهش می‌یابد و نقش هر یک از این متغیرها در تغییرپذیری مشخص می‌شود.

برای بررسی روند تغییرات عناصر کانسار ساز و تعیین بی‌هنجاری در منطقه مورد بررسی، روش آماری چند متغیره تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر روی داده‌های ژئوشیمیایی استفاده شد. روش تحلیل مؤلفه اصلی¹ از رویکردهای آماری چند متغیره مبتنی بر

دوم (PC_2)، بار فاکتوری عناصر سبک و حدواسط نادر خاکی بیشتر است و مؤلفه سوم (PC_3) بیشتر نشانگر تحت تأثیر عناصر سریم و لانتانیم است. در شکل 13، نقشه توزیع بار فاکتوری مؤلفه اول، دوم و سوم به صورت درون‌یابی نمایش داده شده است که مناطق با مقادیر بالای مؤلفه اول، بیانگر مناطق بی‌هنجاری و تمرکز عناصر نادر خاکی در محدوده مورد بررسی است. خروجی حاصل از روش‌های رایج ژئوشیمی و الگوریتم‌های، محدوده آنومالی یکسان را در جنوب محدوده نشان می‌دهند.

به عبارت دیگر، این روش، ابزاری است برای یافتن ترکیبات خطی از متغیرهای اولیه همبسته که تشکیل یک دستگاه محور مختصات جدید را بدهند و هدف آن توجیه بخش بزرگی از تغییرپذیری در فضایی با بُعد کمتر است (Sadeghi et al., 2013; Chen et al., 2015).

بر اساس بررسی مقادیر ویژه بر حسب تعداد مؤلفه‌های اصلی، سه مؤلفه اول بالغ بر 90% از درصد تغییرپذیری را مدل می‌کنند. مؤلفه اول (PC_1)، مؤلفه‌ای بسیار قوی است و بار فاکتوری آن برای همه متغیرها (عناصر)، دارای مقادیر مشابهی است. در مؤلفه



شکل 13. نقشه دو بعدی X-Y (طول و عرض جغرافیایی) توزیع بار فاکتوری مؤلفه‌های اول تا سوم (PC_1 - PC_3) در محدوده شرقی مروست

Fig. 13. 2D map of loading factor distribution for three principal components (PC_1 - PC_3) in the eastern area of Marvast

نتیجه‌گیری

- الگوی عناصر نادر خاکی استاندارد شده به مقادیر کندریت در بی‌هنجاری مورد مطالعه بررسی شد که دارای بی‌هنجاری مثبت سریم (Ce) و بی‌هنجاری منفی یوروم (Eu) بود و با الگوی استاندارد عناصر نادر خاکی در موناویت مطابقت دارد.

- توزیع و تمرکز ژئوشیمیایی عناصر نادر خاکی بر اساس سه گروه سبک، حدواسط و سنگین در منطقه مورد بررسی قرار گرفت و نقشه درون‌یابی توزیع این عناصر برای هر گروه ترسیم

کانسار پلاسما موناویت مروست به عنوان یکی از نواحی امیدبخش عناصر نادر خاکی در کشور شناسایی شده است. در این مقاله از داده‌های بی‌هنجاری محدوده شرقی به دست آمده از 53 چاهک برای مدل‌سازی و پهنه‌بندی عناصر نادر خاکی استفاده شده است که به اختصار نتایج ذکر شده است:

عناصر میانی (حدواسط) و اربیم رفتاری مجزا از دیگر عناصر از خود نشان می‌دهد. پهنه‌بندی در سطح نمونه‌ها بیانگر چهار زیر پهنه بود که پهنه سوم و چهارم بیانگر مناطق مرتبط با توانایی بالا بوده و خوشه‌های اول و دوم بیانگر مناطق با غلظت و تمرکز پایین عناصر نادر خاکی است.

- در راستای مدل‌سازی تغییرپذیری بی‌هنجاری، از روش آماری چندمتغیره تحلیل مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. با کاهش ابعاد داده‌های مورد بررسی، سه مؤلفه اول بالغ بر 90% از درصد تغییرپذیری را مدل کرد که نقشه توزیع بار فاکتوری مؤلفه اول عناصر، نشانگر مقادیر بالا در منطقه جنوبی محدوده است که نتایج مراحل قبل را تأکید کرد.

شد. نقشه‌های ژئوشیمیایی بیانگر بیشترین غلظت مربوط به عناصر سبک نسبت به عناصر سنگین بود که بی‌هنجاری در قسمت جنوب و جنوب‌غربی محدوده قرار گرفته است. در ادامه از نسبت‌های شدت‌بخشی نسبت عناصر (La/Lu)، (Ce/Eu) و مقادیر عناصر نادر خاکی (LREEs/HREEs) استفاده شد که محدوده بی‌هنجاری به‌دست آمده از نقشه‌های ژئوشیمیایی را تأکید کرد.

- برای پهنه‌بندی داده‌ها، خوشه‌بندی در دو سطح عناصر و نمونه‌ها انجام شد. بر اساس خوشه‌بندی در سطح عناصر چهار گروه تعیین شد که گروه اول شامل سبک‌ترین عناصر، گروه دوم ترکیبی از عناصر حدواسط و سنگین، گروه سوم شامل

References

- Alipour-Asll, M., Mirnejad, H. and Milodowski, A.E., 2012. Occurrence and paragenesis of diagenetic monazite in the upper Triassic black shales of the Marvast region, South Yazd, Iran. *Mineralogy and Petrology*, 104(3-4): 197-210.
- Alipour-Asll, M., Rasa, I., Mehrpartou, M. and Babakhani, A.R., 2006. The Measurement of Monazite and Associated Minerals by Heavy Mineral Concentrate Method in Marvast Placer Deposit (Yazd-Iran). *Geoscience - Scientific Quarterly Journal*, 15(60): 22-31. (in Persian with English abstract)
- Alipour-Asll, M., Rasa, I., Mehrpartou, M., Khakzad, A. and Adabi, M.H., 2007. The Composition and Distribution of Nodular Monazite in the Marvast Upper Triassic Shales (Yazd-Iran). *Geosciences Scientific Quarterly Journal*, 16(62): 1-8. (in Persian with English abstract)
- Castor, S.B. and Hedrick, J.B., 2006. Rare earth elements. In: J.E. Kogel (Editors), *Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and uses*. Society for mining, metallurgy, and exploration, Inc. (SME), Colorado, pp. 769-792.
- Chakhmouradian, A.R. and Wall, F., 2012. Rare earth elements: minerals, mines, magnets (and more). *Elements*, 8(5): 333-340.
- Chen, S., Grunsky, E.C., Hattori, K. and Liu, Y., 2015. Principal Component Analysis of Geochemical Data from the REE-rich Maw Zone, Athabasca Basin, Canada; Geological Survey of Canada. Open File 7689, 24 pp.
- Everitt, B., Landau, S., Leese, M. and Stahl, D., 2011. *Cluster Analysis*. 5th ed., Wiley Publishing, Hoboken, 330 pp.
- Geological Survey of Iran (GSI), 2004. Exploration of rare earth element and monazite in the alluvium of the southern Marvast (eastern area). Tehran, 66 pp. (in Persian)
- Ghalehnoee, M.H. and Kohsary, A.H., 2015. The study of distribution of monazite and REE in the Marvast alluvium, Yazd, Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 22(4): 621-630. (in Persian with English abstract)
- Ghorbani, M., 2013. *The economic geology of Iran: mineral deposits and natural resources*. Springer, London, 569 pp.
- Henderson, P., 2013. *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 510 pp.
- Jain, A.K., Murty, M.N. and Flynn, P.J., 1999. Data clustering: a review. *Association for Computing Machinery computing surveys*, 31(3): 264-323.
- Jaireth, S., Hoatson D.M. and Mieztis Y., 2014. Geological setting and resources of the major rare-earth-element deposits in Australia. *Ore Geology Reviews*, 62: 72-128.
- Ji, H., Zeng, D., Shi, Y., Wu, Y. and Wu, X., 2007. Semi-hierarchical correspondence cluster analysis and regional geochemical pattern recognition. *Journal of Geochemical Exploration*, 93(2): 109-119.

- Jones, A.P., Wall, F. and Williams, C.T., 1996. Rare earth minerals: chemistry, origin and ore deposits (Vol. 7). Springer, London, 377 pp.
- Kryvdik, S.T. and Mykhayiov, V., 2001. The potential of Rare Earth mineralization of Islamic Republic Iran. National Academy of Science of Ukraine, Kiev, 48 PP.
- Parks, J.M., 1966. Cluster analysis applied to multivariate geologic problems. *Geology*, 74(5): 703-715.
- Parsapoor, A., Khalili, M. and Mackizadeh, M.A., 2009. The behaviour of trace and rare earth elements (REE) during hydrothermal alteration in the Rangan area (Central Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(2): 123-134.
- Rostami, A., Bazamad, M., Hajalilou, B. and Moazzen, M., 2014. The study of geochemical behavior of rare earth elements in apatite's from the Hormuz Island, Persian Gulf. *Journal of Economic Geology*, 6(1): 71-85. (in Persian with English abstract)
- Sadeghi, M., Morris, G.A., Carranza, E.J.M., Ladenberger, A. and Andersson, M., 2013. Rare earth element distribution and mineralization in Sweden: An application of principal component analysis to FOREGS soil geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 133: 160-175.
- Templ, M., Filzmoser, P. and Reimann, C., 2008. Cluster analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 23(8): 2198-2213.
- Voncken, J.H.L., 2016. *The Rare Earth Elements: An Introduction*. Springer, London, 126 pp.



Modeling the geochemical distribution of rare earth elements (REEs) using multivariate statistics in the eastern part of Marvast placer, the Yazd province

Amin Hossein Morshedy*, Amir Hossein Kouhsari and Mohammad Reza Shakery Varzaneh

Mining Exploration Department, Faculty of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

Submitted: Jan. 12, 2016

Accepted: May 29, 2016

Keywords: Rare earth elements, Hierarchical clustering, Zonation, Principal component analysis, Monazite, Marvast placer, Yaz

Introduction

Nowadays, exploration of rare earth element (REE) resources is considered as one of the strategic priorities, which has a special position in the advanced and intelligent industries (Castor and Hedrick, 2006). Significant resources of REEs are found in a wide range of geological settings, including primary deposits associated with igneous and hydrothermal processes (e.g. carbonatite, (per) alkaline-igneous rocks, iron-oxide breccia complexes, scarns, fluorapatite veins and pegmatites), and secondary deposits concentrated by sedimentary processes and weathering (e.g. heavy-mineral sand deposits, fluvial sandstones, unconformity-related uranium deposits, and lignites) (Jaireth et al., 2014). Recent studies on various parts of Iran led to the identification of promising potential of these elements, including Central Iran, alkaline rocks in the Eslami Peninsula, iron and apatite in the Hormuz Island, Kahnouj titanium deposit, granitoid bodies in Yazd, Azerbaijan, and Mashhad and associated dikes, and finally placers related to the Shemshak formation in Marvast, Kharanagh, and Ardekan indicate high concentration of REE in magmatogenic iron-apatite deposits in Central Iran and placers in Marvast area in Yazd (Ghorbani, 2013).

Materials and methods

In the present study, the geochemical behavior of rare earth elements is modeled by using multivariate statistical methods in the eastern part of the Marvast placer. Marvast is located 185 km south of the city of Yazd in central Iran between Yazd and Mehriz. This area lies within the

southeastern part of the Sanandaj-Sirjan Zone (Alipour-Asll et al., 2012). The samples of 53 wells were analyzed for Whole-rock trace-element concentrations (including REE) by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) (GSI, 2004).

The clustering techniques such as multivariate statistical analysis technique can be employed to find appropriate groups in data sets. One of the main objectives of data clustering is to maximize both the similarity within each cluster and the difference between clusters, and finally find the structure in the data. Nowadays, cluster analysis is applied in many disciplines: biology, botany, medicine, psychology, geography, marketing, image processing, psychiatry, archaeology, etc. (Everitt et al., 2011). To execute a partitioning algorithm, the principal components analysis (PCA) algorithm is applied for feature selection, feature extraction and dimension reduction. Hierarchical clustering can be utilized to provide a nested sequence of partitions with bottom-up or top-down methods based on similarity. The single linkage and complete linkage are the most popular hierarchical algorithms (Jain et al., 1999; Ji et al., 2007).

Results and discussion

The REE chondrite-normalized pattern for the eastern area in the Marvast placer represents a high match to the standard pattern of monazite. This pattern shows the positive anomaly of Ce and the negative anomaly of Eu. To determine the distribution of REEs concentration, 2D interpolation maps were plotted in three groups of light, middle, and heavy REEs (LREE, MREE,

*Corresponding authors Email: morshedy@yazd.ac.ir

and HREE), which were indicated in the geochemical anomaly at the south and south-west of the area. The relative ratios of (LREE/HREE) and (Ce/Eu) exposed the high proportion of LREEs to HREEs. In the next section, the hierarchical clustering algorithm was employed to partition the data in the feature and sample levels. The elements portioning demonstrated four separated groups, which can be related to atomic and chemical structures. The studied region was divided into four zones by the clustering approach. The fourth zone confine coincided with the REE anomaly area. Finally, PCA was applied as the multivariate statistical tool to this dataset. Hence three principal components modeled over 90% of the variance. For the first component, the distribution map of load factor has a good agreement with anomaly area.

References

- Alipour-Asll, M., Mirnejad, H. and Milodowski, A.E., 2012. Occurrence and paragenesis of diagenetic monazite in the upper Triassic black shales of the Marvast region, South Yazd, Iran. *Mineralogy and Petrology*, 104(3-4): 197-210.
- Castor, S.B. and Hedrick, J.B., 2006. Rare earth elements. In: J.E. Kogel (Editors), *Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and uses*. Society for mining, metallurgy, and exploration, Inc. (SME), Colorado, pp. 769-792.
- Everitt, B., Landau, S., Leese, M. and Stahl, D., 2011. *Cluster Analysis*. 5th ed., Wiley Publishing, Hoboken, Geological Survey of Iran (GSI), 2004. Exploration of rare earth element and monazite in the alluvium of the southern Marvast (eastern area). Tehran, 66 pp. (in Persian)
- Ghorbani, M., 2013. *The economic geology of Iran: mineral deposits and natural resources*. Springer, London, 569 pp.
- Jain, A.K., Murty, M.N. and Flynn, P.J., 1999. Data clustering: a review. *Association for Computing Machinery computing surveys*, 31 (3): 264-323.
- Jaireth, S., Hoatson D.M. and Miezitis Y., 2014. Geological setting and resources of the major rare-earth-element deposits in Australia. *Ore Geology Reviews*, 62: 72-128.
- Ji, H., Zeng, D., Shi, Y., Wu, Y. and Wu, X., 2007. Semi-hierarchical correspondence cluster analysis and regional geochemical pattern recognition. *Journal of Geochemical Exploration*, 93(2): 109-119.