

تحلیل آماری عناصر نادر خاکی با هدف شناسایی کانی‌های شاخص محیط‌های فرورانشی؛ جنوب

شرق پهنه جبالبارز

اکرم انگار^{۱*}، محمدعلی رجب‌زاده^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه شیراز، a.engar@hafez.shirazu.ac.ir

۲- استاد بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز، mrajabzadeh@shirazu.ac.ir

چکیده

عناصر نادر خاکی (REEs) به دلیل پایداری نسبی رفتار ژئوشیمیایی و وابستگی مستقیم به ویژگی‌های منبع و فرآیندهای ماگمایی، از شاخص‌های قابل اتکا برای تفسیر منشأ ماگما و محیط‌های زمین‌ساختی به‌شمار می‌روند. در این مقاله، الگوی توزیع REEs در شمال‌شرق شهر زهک‌لوت واقع در جنوب‌شرق پهنه جبالبارز، جنوب استان کرمان بر پایه تحلیل آماری داده‌های ژئوشیمیایی بررسی شده است. بدین منظور، تعداد ۱۶۹۵ نمونه سنگی به روش ICP-MS آنالیز شده و غلظت REEs به همراه Sc و Y اندازه‌گیری شده است. شاخص‌های آمار توصیفی برای عناصر نادر خاکی سبک (LREEs) و سنگین (HREEs) محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان‌دهنده غنی‌شدگی سیستماتیک LREEs در برابر تهی‌شدگی نسبی HREEs و تفاوت معنادار در درجه تمرکز و تفکیک ژئوشیمیایی این دو گروه عنصری می‌باشد. انحراف از توزیع نرمال و غالب‌بودن چولگی مثبت در بسیاری از LREEs، بیانگر ناهمگنی ژئوشیمیایی و نقش فرآیندهای تفریق ماگمایی در تمرکز انتخابی REEs در سنگ‌های آگلومرا-توف، داسیتی و آندزیتی منطقه مورد مطالعه است. این الگوی آماری با شرایط زمین‌ساختی فرورانشی منطقه سازگار بوده و می‌تواند بازتابی از کنترل فازهای کانیایی حامل REEs نظیر مونازیت، آپاتیت، اپیدوت، بیوتیت و گارنت در طی تبلور و تکامل ماگما باشد.

کلیدواژه‌ها: عناصر نادر خاکی (REEs)، تحلیل آماری، محیط فرورانشی، پهنه جبالبارز، استان کرمان

Statistical Analysis of Rare Earth Elements for Identifying Diagnostic Minerals of Subduction-Related Environments; Southeastern Jebal Barez Zone

Akram Engar¹; Mohammad Ali Rajabzadeh²

¹Msc, Department of Earth Sciences, College of Sciences, Shiraz University, Shiraz,
a.engar@hafez.shirazu.ac.ir

²Professor, Department of Earth Sciences, College of Sciences, Shiraz University, Shiraz,
mrajabzadeh@shirazu.ac.ir

Abstract

Rare earth elements (REEs) are considered reliable indicators for interpreting magma origin and tectonic environments because they have relative stability in geochemical behavior and direct dependence on the characteristics of the source and magmatic processes. In this study, the distribution pattern of REEs in the northeastern part of Zahaklut City, located in the southeastern Jebal Barez zone, southern Kerman Province, was investigated based on statistical analysis of geochemical data. Accordingly, a total of 1,695 rock samples were analyzed using ICP-MS, and the concentrations of REEs, together with Sc and Y, were measured. Descriptive statistical indices for light rare earth elements (LREEs) and heavy rare earth elements (HREEs) were calculated and compared. The results indicate an enrichment of LREEs relative to HREEs, with distinct geochemical concentrations and fractionation patterns between the two groups. Geochemical heterogeneity and magmatic fractionation, indicated by deviation from normal distribution and positive skewness in light rare earth elements (LREEs), controlled selective REE concentration in agglomerate-tuff, dacite, and andesite rocks. This statistical pattern is consistent with the subduction-related tectonic setting of the region and may reflect the control exerted by REE-bearing minerals such as monazite, apatite, epidote, biotite, and garnet during magma crystallization and evolution.

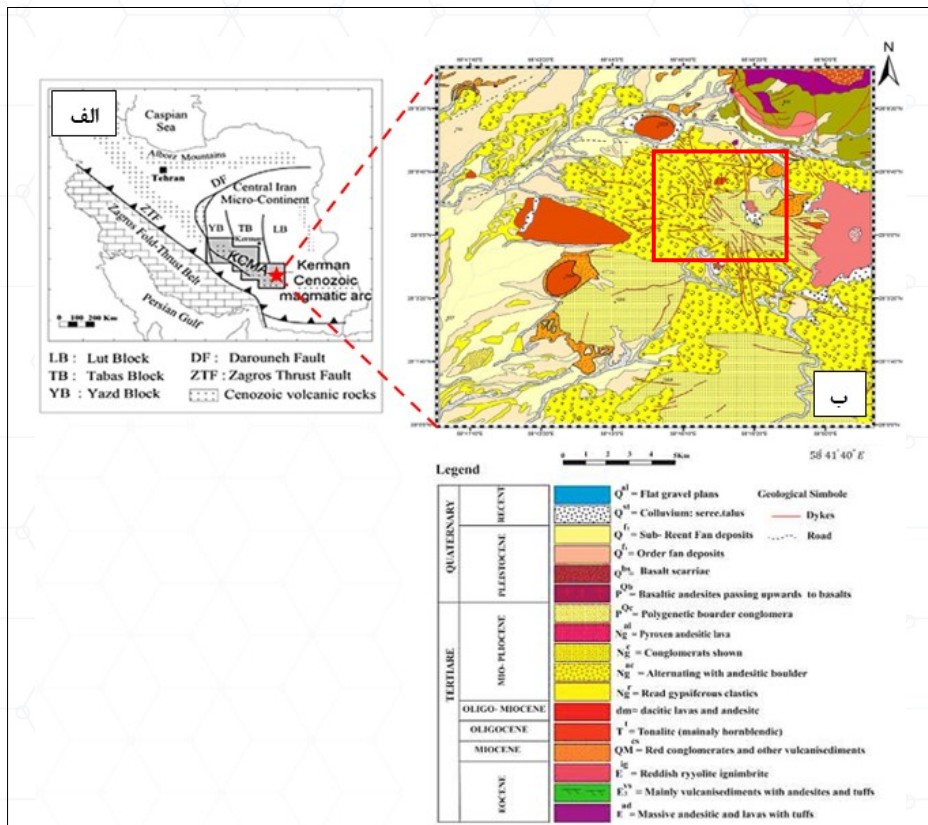
Keywords: Rare earth elements (REEs), Statistical analysis, Subduction-related environment, Jebal Barez zone, Kerman Province

۱- مقدمه

عناصر نادر خاکی (REEs) علاوه بر کاربرد ویژه در فناوری‌های پیشرفته (High Tech) در مباحث علم ژئوشیمی نیز بسیار حائز اهمیت هستند. این عناصر به دلیل رفتار ژئوشیمیایی منسجم، دامنه تغییرات پیش‌بینی‌پذیر و مقاومت نسبی در برابر فرآیندهای ثانویه، از جمله معتبرترین شاخص‌های ژئوشیمیایی برای بررسی منشأ ماگما و شرایط زمین‌ساختی تشکیل سنگ‌ها محسوب می‌شوند. وجود کانی‌های میزبان REEs مانند گارنت، موناژیت، زیرکن، اپیدوت و بیوتیت نقش مهمی در کنترل توزیع عناصر نادر خاکی سبک LREEs و عناصر نادر خاکی سنگین HREEs دارد (McDonough and Sun, 1995). مطالعات گسترده نشان داده‌اند که الگوی توزیع عناصر نادر خاکی می‌تواند به طور مؤثری در تمایز محیط‌های زمین‌ساختی مختلف مورد استفاده قرار گیرد (Pearce, 1983). در این میان، سامانه‌های مرتبط با فرورانش اغلب با غنی‌شدگی نسبی LREEs و تهی‌شدگی HREEs همراه هستند؛ الگویی که معمولاً به حضور فازهایی مانند گارنت در ناحیه ذوب و تأثیر سیالات آزادشده از صفحه فرورانشده نسبت داده می‌شود (Tatsumi and Eggins, 1995). منطقه مورد مطالعه، واقع در شمال شرق شهر زهک لوت در جنوب شرق پهنه جبالبارز، بخشی از یک کمر بند تکتونیکی فعال با سابقه ماگماتیسم وابسته به فرآیندهای همگرایی صفحه‌ای است (Berberian and King, 1981). اگرچه مطالعات زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی متعددی در این پهنه انجام شده است، اما بررسی سیستماتیک الگوهای توزیع و غنی‌شدگی REEs، به ویژه با تکیه بر داده‌های آماری، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله با استفاده از تحلیل داده‌های آماری سعی شده است ابتدا به شناسایی سنگ‌های میزبان و سپس تشخیص کانی‌های حامل REEs اقدام گردد.

۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

کمان ماگمایی ارومیه-دختر (UDMA) یکی از مهم‌ترین کمر بندهای ماگمایی ایران به شمار می‌رود که شامل مجموعه‌ای گسترده از واحدهای آتشفشانی و توده‌های نفوذی است. بر اساس دیدگاه‌های ارائه شده (Mohajjel et al., 2003)، این زون در امتداد حاشیه فعال خردقاره ایران مرکزی و در حد فاصل پهنه‌های سنندج-سیرجان و ایران مرکزی توسعه یافته است. شکل‌گیری این کمر بند عمدتاً به فرورانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس به زیر ایران مرکزی از اواخر کرتاسه تا سنوزوئیک نسبت داده می‌شود (Alavi, 1980). بخش جنوب شرقی کمان ارومیه-دختر که با عنوان زون ماگمایی سنوزوئیک کرمان شناخته می‌شود، میزبان توده‌های نفوذی و واحدهای آتشفشانی با ترکیب کالک‌آلکالن تا آداکیتی و سن ائوسن پسین تا میوسن میانی-بالایی است (Aghanabati, 2004). در این پهنه، دو گروه عمده گرانیتوئیدی شامل گرانیتوئیدهای تیپ جبالبارز و کوه پنج شناسایی شده‌اند. گرانیتوئیدهای جبالبارز عموماً پتانسیل کانی‌زایی محدودی دارند، در حالی که توده‌های کم‌عمق کوه پنج به عنوان میزبان اصلی کانی‌زایی مس پورفیری در این کمر بند شناخته می‌شوند و در واحدهای آتشفشانی-رسوبی ائوسن تا الیگوسن جای‌گیری یافته‌اند (Asadi et al., 2014). کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان به سه بخش شمال باختری، مرکزی و جنوب خاوری تقسیم می‌شود. بخش جنوب خاوری آن، موسوم به پهنه خانه‌خاتون-جبالبارز، عمدتاً از باتولیت‌های گرانیتوئیدی و واحدهای آتشفشانی-رسوبی ائوسن تشکیل شده است (Khosravi et al., 2019، شفیع بافتی، ۱۳۸۶). منطقه مورد مطالعه در حدود ۸۵ کیلومتری شرق شهر رودبار جنوب در استان کرمان و در بخش انتهایی پهنه جبالبارز واقع شده است. بر اساس نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۵۰۰۰، رخنمون‌های اصلی منطقه شامل واحدهای آتشفشانی، آذرآواری و توفی می‌باشند (شکل ۱).



شکل ۱- الف) موقعیت کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان (KCMA) (شفیعی بافتی، ۱۳۸۶). ب) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (اقتباس از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ نگیسان با اندکی تغییرات). موقعیت دقیق منطقه با مربع قرمز نشان داده شده است.

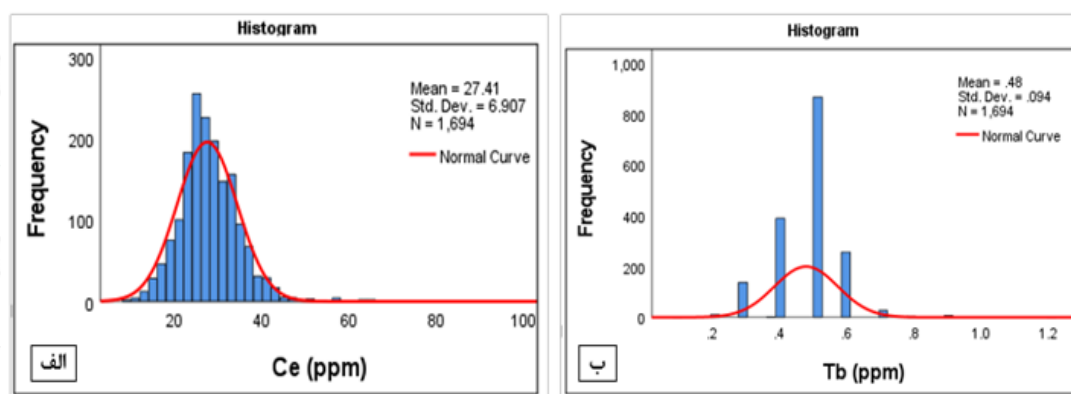
۳- روش مطالعه

در این پژوهش از نتایج آنالیز تعداد ۱۶۹۵ نمونه به روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) که توسط شرکت معدنی-صنعتی گهرزمین در اختیار نویسندگان این مقاله قرار گرفته شده است، به منظور بررسی الگوی توزیع و غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی در شمال شرق شهر زهک لوت، استفاده شده است. نمونه‌برداری از سنگ به صورت سیستماتیک در یک محدوده با وسعت تقریبی ۱۷ کیلومتر مربع و با فواصل ۱۰۰ متری از هم انجام شد تا با پوشش دادن کلیه سنگ‌های تشکیل دهنده منطقه مورد مطالعه، رفتار ژئوشیمیایی عناصر مورد بررسی گیرد. در این پژوهش شاخص‌های آمار توصیفی شامل میانگین، میانه، انحراف معیار، حداقل و حداکثر محاسبه و به طور جداگانه برای LREEs و HREEs محاسبه گردید. در ادامه برای نمایش پراکندگی و نحوه توزیع داده‌ها، نمودارهای هیستوگرام همراه با منحنی توزیع نرمال همراه با نمودارهای ستونی میانگین برای مقایسه رفتار کلی عناصر نادر خاکی تهیه شد. پس از مشخص شدن سنگ‌های اصلی میزبان REEs، با انجام عملیات نمونه برداری تکمیلی از مناطق هدف، مطالعات پتروگرافی سنگ‌های میزبان و آنالیز کانی‌شناسی با استفاده از روش‌های XRD و Raman Spectroscopy بر روی نمونه‌های شاخص انجام شد.

۴- بحث

۴-۱- تحلیل آماری عناصر نادر خاکی (REEs)

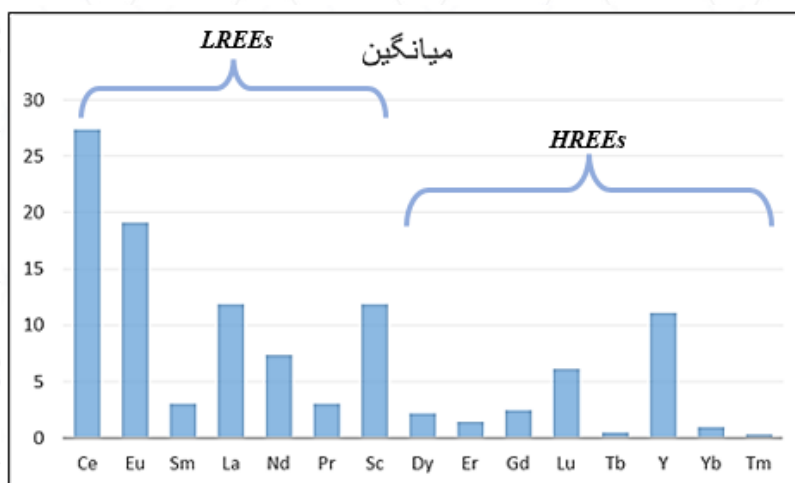
به منظور شناسایی رفتار آماری و نحوه پراکندگی عناصر نادر خاکی در مجموعه داده‌های مورد مطالعه، تحلیل اولیه بر پایه آماره‌های توصیفی انجام شد. بر اساس دیدگاه حسنی پاک (۱۳۹۵)، شاخص‌هایی نظیر میانگین، واریانس و انحراف معیار ابزارهای کلیدی در تبیین الگوی توزیع داده‌های ژئوشیمیایی محسوب می‌شوند و می‌توانند مبنای مقایسه کمی رفتار عناصر مختلف را فراهم سازند. از این رو، محاسبه این شاخص‌ها به عنوان گام نخست، چارچوب لازم برای بررسی تفاوت‌های توزیعی LREEs، HREEs و تفسیرهای بعدی را فراهم کرد. نتایج آماره‌های توصیفی نشان می‌دهد که LREEs به طور کلی دارای میانگین و میانه بالاتر و مقادیر نسبتاً نزدیک به یکدیگر هستند که بیانگر تمرکز و غنی‌شدگی نسبی این عناصر در داده‌های منطقه است. در مقابل، HREEs عمدتاً دارای میانگین پایین‌تری بوده و حضور محدود مقادیر خارج از رده، موجب ایجاد چولگی مثبت و انحراف از توزیع نرمال شده است. بررسی هم‌زمان شاخص‌های مرکزی و پراکندگی، الگوی کلی غنی‌شدگی LREEs و تهی‌شدگی نسبی HREEs را در مجموعه داده‌ها تأیید می‌کند. به منظور بررسی دقیق‌تر شکل توزیع داده‌ها، هیستوگرام REEs مورد تحلیل قرار گرفت (شکل ۲).



شکل ۲- نمودارهای هیستوگرام REEs منتخب در منطقه مورد مطالعه. الف) سربیم (Ce) به عنوان عنصر نماینده از گروه LREEs. ب) تربیم (Tb) به عنوان عنصر نماینده از گروه HREEs.

نتایج نشان می‌دهد که توزیع آماری اغلب عناصر از نرمال بودن کامل فاصله دارد و تفاوت میان شاخص‌های مرکزی، همراه با مقادیر قابل توجه چولگی و کشیدگی، بیانگر توزیع‌های نامتقارن و عمدتاً راست‌چوله است. در LREEs، مانند عنصر سربیم (Ce)، هیستوگرام عمدتاً تمرکز داده‌ها را در بازه‌های مشخص و یک قله اصلی نشان می‌دهد، اما وجود دم کشیده در سمت مقادیر بالا و کشیدگی بیش از حد نرمال در سایر عناصر این گروه، حاکی از انحراف از توزیع نرمال و حضور مقادیر غنی‌شده است. با این حال، شدت این ناهنجاری‌ها در همه LREEs یکسان نیست و برخی از آن‌ها توزیعی نسبتاً متعادل‌تر دارند. در مقابل، HREEs رفتار آماری متنوع‌تری از خود نشان می‌دهند؛ به طوری که برخی از HREEs مانند عنصر تربیم (Tb)، دارای توزیعی نسبتاً متقارن، تک‌قله‌ای و نزدیک به نرمال با چولگی و کشیدگی پایین می‌باشد. در ادامه، نمودار میانگین غنی‌شدگی REEs به منظور جمع‌بندی نتایج آماری مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). این نمودار اختلاف آشکار میان میانگین LREEs و HREEs را نشان می‌دهد، به گونه‌ای که مقادیر میانگین LREEs به صورت سیستماتیک بالاتر از HREEs است. یکنواختی نسبی روند تغییرات میانگین در LREEs و کاهش محسوس مقادیر در HREEs، بیانگر تمرکز LREEs در مقادیر بالاتر و تجمع HREEs در بازه‌های پایین‌تر است. این الگو با نتایج آماره‌های توصیفی و تحلیل هیستوگرام‌ها همخوانی دارد و نشان می‌دهد که غنی‌شدگی LREEs یک روند غالب و ساختاری در داده‌های ژئوشیمیایی منطقه است. الگوی به‌دست‌آمده با نتایج

مطالعات پیشین در پهنه جبالبارز و کمر بند ارومیه-دختر نیز همخوانی دارد، به گونه‌ای که غنی‌شدگی LREEs نسبت به HREEs به عنوان یکی از ویژگی‌های شاخص سامانه‌های ماگمایی مرتبط با فروران‌ش گزارش شده است (Berberian and King, 1981; Shahabpour, 2007). از این رو، تطابق نتایج این پژوهش با الگوهای منطقه‌ای، مؤید نقش فرآیندهای فروران‌شی در کنترل ترکیب ژئوشیمیایی ماگمای والد و شکل‌گیری الگوی توزیع REEs در جنوب شرق پهنه جبالبارز است.



شکل ۳- میزان غنی‌شدگی REEs در منطقه مورد مطالعه

۴-۲- کانی‌های شاخص و کنترل‌کننده در محیط‌های فروران‌شی

رفتار ژئوشیمیایی REEs در محیط‌های فروران‌شی به طور مستقیم تحت تأثیر فازهای کانیایی میزبان و شرایط تبلور ماگمایی قرار دارد. عناصر LREEs به دلیل شعاع یونی بزرگ‌تر و بار یونی پایدار (+۳)، تمایل بیشتری به جای‌گیری در ساختار کانی‌های سیلیکاتی و آلومینوسیلیکاتی دارند و در نتیجه، در سامانه‌های ماگمایی مرتبط با فروران‌ش، به صورت انتخابی در برخی فازهای کانیایی متمرکز می‌شوند (Henderson, 1984). در پهنه‌های فروران‌شی، ذوب جزئی گوشته متأثر از سیالات آزاد شده از صفحه فرورانده شده و تکامل ماگماهای کالک‌آلکالن تا گرانیتوئیدی، شرایط مناسبی برای تمرکز LREEs فراهم می‌کند. این فرآیندها موجب می‌شوند که LREEs در مراحل مختلف تبلور ماگما، در کانی‌های شاخصی همچون مونازیت، آپاتیت، اپیدوت، بیوتیت و گارنت متمرکز شوند. این کانی‌ها، که در سنگ‌های آذرین و آذرآواری مرتبط با محیط‌های فروران‌شی فراوان گزارش شده‌اند، به عنوان مهم‌ترین میزبان‌های بالقوه LREEs در منطقه مورد مطالعه شناخته می‌شوند. مونازیت یکی از اصلی‌ترین فازهای غنی از LREEs به شمار می‌رود که به ویژه در سنگ‌های گرانیتوئیدی و واحدهای آذرآواری تکامل یافته تشکیل می‌شود و توانایی بالایی در تمرکز عناصری مانند La، Ce و Nd دارد. آپاتیت نیز به عنوان یک کانی فراگیر اولیه در بسیاری از سنگ‌های آذرین، نقش مؤثری در ذخیره‌سازی LREEs ایفا می‌کند. حضور اپیدوت و بیوتیت، چه به صورت کانی‌های اولیه و چه ثانویه، می‌تواند به تثبیت و بازتوزیع LREEs در طی فرآیندهای ماگمایی و دگرسانی محدود کمک کند. گارنت، به ویژه در شرایط فشار نسبتاً بالا که مشخصه نواحی فروران‌شی است، نقش مهمی در تفکیک REEs ایفا می‌کند. این کانی با تمایل بیشتر به جذب HREEs می‌تواند سبب تهی‌شدگی نسبی این عناصر در مذاب باقی‌مانده و در نتیجه، غنی‌شدگی نسبی LREEs در فاز ماگمایی شود. چنین رفتاری به عنوان یکی از دلایل اصلی الگوی شیب‌دار REEs با غنی‌شدگی LREEs و افت HREEs در محیط‌های فروران‌شی شناخته می‌شود (McDonough & Sun, 1995). اگرچه در این پژوهش شناسایی مستقیم کانی‌ها از طریق روش‌های کانی‌شناسی انجام نشده است، اما الگوی آماری به دست آمده از توزیع عناصر نادر خاکی، به ویژه غنی‌شدگی سیستماتیک LREEs و پراکندگی بیشتر HREEs، با رفتار ژئوشیمیایی مورد انتظار در حضور کانی‌های میزبان یاد شده سازگاری دارد.

از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که کنترل کانی‌شناسی، در کنار فرآیندهای ماگمایی وابسته به فرورانش، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری الگوی توزیع REEs در جنوب شرق پهنه جبال‌بارز ایفا می‌کند (McLennan, Lipin, & McKay, 198).

۵- نتیجه‌گیری

تحلیل‌های آماری توصیفی REEs در شمال شرق زهک‌لوت نشان می‌دهد که الگوی ژئوشیمیایی منطقه با غنی‌شدگی LREEs و تهی‌شدگی نسبی HREEs مشخص می‌شود. تفاوت شاخص‌های مرکزی و پراکندگی LREEs و HREEs بیانگر رفتار ژئوشیمیایی ناهمگن این دو گروه و تأثیر ویژگی‌های منبع ماگما و فرآیندهای تکاملی ماگمایی بر توزیع آن‌ها است. توزیع نامتقارن داده‌ها، همراه با چولگی و کشیدگی قابل توجه، نشان‌دهنده نقش فازهای کانیایی و فرآیندهای تفریق ماگمایی در تمرکز انتخابی REEs می‌باشد. با توجه به غنی‌شدگی LREEs، می‌توان احتمال حضور کانی‌های میزبان نظیر موناژیت، آپاتیت، اپیدوت، بیوتیت و گارنت را در منطقه مورد مطالعه مطرح کرد. ترکیب تحلیل‌های آماری گسترده با تفسیر ژئوشیمیایی، ابزار مؤثری برای شناسایی ویژگی‌های محیط‌های ماگمایی وابسته به فرورانش و درک الگوی توزیع REEs در پهنه جبال‌بارز فراهم می‌کند.

۶- تقدیر و تشکر

از شرکت معدنی-صنعتی گهرزمین که داده‌ها و نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌ها را در اختیار نویسندگان این مقاله قرار دادند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

۷- مراجع

حسنی پاک، ع.ا. (۱۳۹۵). اصول اکتشافات ژئوشیمیایی (مواد معدنی). نوبت چاپ نهم. انتشارات دانشگاه تهران، تهران
شفیعی بافتی، ب. (۱۳۸۶). الگوی فلزائی کمر بند مس پورفیری کرمان و رهیافت‌های اکتشافی آن، رساله دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه باهنر کرمان، ۲۷۲ ص.

- Aghanabati, A. (2004). *Geology of Iran*. Geological Survey of Iran.
- Alavi, M. (1980). Tectonics of the Sanandaj–Sirjan Zone. *Geological Society of Iran*, 3(2), 45–60.
- Asadi, S., Moore, F., & Zarasvandi, A. (2014). Discriminating productive and barren porphyry copper deposits in the southeastern part of the central Iranian volcano-plutonic belt, Kerman region, Iran: A review. *Earth-Science Reviews*, 138, 25–46.
- Berberian, M., & King, G. C. P. (1981). Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18, 210–265.
- Geological Survey of Iran (GSI) (n.d.). Geological map of Negisan, scale 1:100,000. Tehran.
- Henderson P (1983) Rare Earth Element Geochemistry: Elsevier Science Publishers B.V. 511.
- Khosravi, M., Rajabzadeh, M. A., Qin, K., & Asadi, H. (2019). Tectonic setting and mineralization potential of the Zefreh porphyry Cu–Mo deposit, central Iran: Constraints from petrographic and geochemical data. *Journal of Geochemical Exploration*, 199, 106–118.
- McDonough, W.F., & Sun, S.S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 223–253.
- McLennan, S., Lipin, B., & McKay, G. (1989). Geochemistry and mineralogy of rare earth elements. *Reviews in Mineralogy*, 21, 169–200.
- Mohajjel, M., Fergusson, C. L., & Nouri, S. (2003). The geology of the Urumieh–Dokhtar magmatic belt, Iran: Implications for continental collision and magmatic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(4), 437–455.
- Pearce, J.A. (1983). Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. *Geological Society, London, Special Publications*, 16, 230–249.

Shahabpour, J. (2007). Magmatic belts of Iran: A tectono-magmatic approach. Iranian Journal of Earth Sciences, 1(2), 1–20.

Tatsumi, Y., & Eggins, S. (1995). Subduction Zone Magmatism. Blackwell, Oxford, 211 p.