

اولین گزارش از حضور کانی‌های مونازیت و آپاتیت حامل عناصر نادر خاکی REEs در سنگ‌های آذرین در منتهی‌الیه پهنه جبالبارز، جنوب استان کرمان بر پایه داده‌های Raman و SEM-EDX

محمدعلی رجب‌زاده^{۱*}، زهرا سلیمانی^۲

۱- استاد بخش علوم زمین دانشگاه شیراز، mrajibzadeh@shirazu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی اقتصادی بخش علوم زمین دانشگاه شیراز، soleimani.geo94@gmail.com

چکیده

فسفات‌های REE دار نظیر آپاتیت و مونازیت از مهم‌ترین کانی‌های میزبان عناصر نادر خاکی‌اند و شناسایی آن‌ها در پهنه‌های ماگمایی-گرمایی می‌تواند در تبیین فرآیندهای دگرسانی و نیز غربالگری اکتشافی REEs اهمیت داشته باشد. در این مقاله اولین گزارش از حضور کانی‌های آپاتیت حامل REEs و مونازیت در منتهی‌الیه پهنه جبالبارز در استان کرمان ارائه شده و ارزیابی کارایی رویکرد تلفیقی Raman و SEM-EDX برای تفکیک این دو فاز انجام شده است. پس از تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی بر روی ۱۶۹۵ نمونه سنگی و انجام مطالعات میکروسکوپی بر روی ۵۰ نمونه تکمیلی از مناطق هدف، کانی‌های مورد نظر با استفاده از تصویربرداری و آنالیز عنصری موضعی با SEM-EDX (TESCAN Vega 3) روی نمونه‌های پوشش داده‌شده مورد آنالیز قرار گرفتند. برای شناسایی قطعی فازهای فسفات‌ها از رامان کانفوکال (Horiba LabRAM HR) استفاده شد. نتایج نشان داد آپاتیت و مونازیت به‌صورت ریزفازهای قابل تشخیص در نمونه‌های سنگ آذرین منطقه حضور دارند. داده‌های رامان معیار طیفی مشخصی برای تفکیک دو فاز ارائه کرد، به‌گونه‌ای که پیک اصلی فسفات‌ها در آپاتیت در بازه $960-965\text{ cm}^{-1}$ و در مونازیت در بازه $965-972\text{ cm}^{-1}$ مشاهده شد و با شواهد SEM-EDX پشتیبانی گردید. همخوانی داده‌های Raman و SEM-EDX نشان می‌دهد رویکرد تلفیقی به‌کاررفته ابزار مناسبی برای شناسایی سریع و قابل اتکای فسفات‌های REE دار در محیط‌های دگرسانی و ریزدانه می‌باشد. یافته‌های این مطالعه، حضور حامل‌های کلیدی REE در نگیسان-جبالبارز را مستند کرده و می‌تواند مبنایی برای مطالعات تکمیلی (مانند EPMA/LA-ICP-MS و نقشه‌برداری رامان) و نیز غربالگری اکتشافی دقیق‌تر REE در این پهنه باشد.

کلیدواژه‌ها: آپاتیت، جبالبارز، کرمان، مونازیت، REE

First Report of REE-Bearing Monazite and Apatite in Igneous Rocks from the Terminal Jebalbarez Belt, Southern Kerman Province (SE Iran), Based on Raman and SEM-EDX Data

MohammadAli, Rajabzadeh¹; Zahra, Soleimani²

¹ Professor of Earth science at Shiraz university, mrajibzadeh@shirazu.ac.ir

² Ph.D. student of Economic Geology, soleimani.geo94@gmail.com

Abstract

REE-bearing phosphates such as apatite and monazite are among the most important host minerals for rare earth elements (REEs). Identifying these phases in magmatic-hydrothermal belts is valuable for interpreting alteration processes and for exploration screening of REEs. This paper presents the first report of REE-bearing apatite and monazite from the terminal Jebalbarez belt in Kerman Province (SE Iran) and evaluates the

performance of an integrated Raman + SEM-EDX workflow for discriminating these two phases. Following geochemical analysis of 1,695 rock samples and petrographic investigation of 50 additional samples from target areas, the minerals of interest were examined using SEM-EDX imaging and in situ elemental spot analyses (TESCAN Vega 3) on gold-coated mounts. Phase identification of the phosphate minerals was confirmed by confocal Raman spectroscopy (Horiba LabRAM HR). The results indicate that apatite and monazite occur as discernible micro-phases in the studied samples. Raman spectra provided a clear diagnostic criterion: the main phosphate band occurs at $960-965\text{ cm}^{-1}$ for apatite and $965-972\text{ cm}^{-1}$ for monazite, consistent with and supported by SEM-EDX observations. The agreement between Raman and SEM-EDX data demonstrates that this integrated approach is a practical tool for rapid and reliable identification of REE-bearing phosphates in altered and fine-grained settings. These findings document key REE hosts in the Negisan-Jebalbarez area and provide a basis for follow-up studies (e.g., EPMA/LA-ICP-MS and Raman mapping) as well as more targeted REE exploration screening in this belt.

Keywords: Apatite, Jebalbarez, Kerman Province, Monazite, REE

۱- مقدمه

عناصر نادر خاکی (REE) به دلیل نقش کلیدی در فناوری‌های انرژی پاک، الکترونیک و صنایع پیشرفته، در سال‌های اخیر در ادبیات «مواد خام بحرانی» جایگاه برجسته‌ای یافته‌اند (Gosh, 2025). این عناصر در فهرست «کانی‌ها و مواد معدنی بحرانی» منتشرشده توسط USGS برای سال ۲۰۲۵ قرار گرفته و بر اهمیت REEs و ریسک اختلال در زنجیره تأمین آن‌ها تأکید شده است (USGS, 2025). هم‌زمان، چارچوب‌های سیاستی جدید مانند مقرر «Critical Raw Materials Act» اتحادیه اروپا (۱۲۵۲/۲۰۲۴) نشان می‌دهد که ارزیابی و ردیابی منابع بالقوه (REE) حتی به صورت محصول جانبی در سامانه‌های کانه‌زایی متداول اهمیت عملی و راهبردی دارد (EUR-Lex, 2024). در این میان، کانی‌های فسفات‌های مانند آپاتیت و مونازیت از میزبان‌های اصلی و شاخص REE به‌شمار می‌روند و می‌توانند ردپای تکامل ماگمایی-گرمایی، آلیش پوسته‌ای و رخداد‌های سیال‌زاد را در مقیاس ریزکانی ثبت کنند (Skrzypek, 2025).

با وجود این اهمیت، یکی از چالش‌های اصلی در مطالعات REE به‌ویژه در کمرندهای ماگمایی-گرمایی، ریزدانی و پراکندگی ناهمگن فازهای REE دار و نیز همپوشانی بافتی آن‌ها با کانی‌های دگرسانی است؛ بنابراین اتکا به روش‌های میکروسکوپی و میکروآنالیزی ضروری می‌شود. رهیافت تلفیقی Raman و SEM-EDX از یک‌سو امکان تشخیص «اثر انگشت ارتعاشی» فازهای فسفات (مثلاً باند $\nu_1(\text{PO}_4)$ در آپاتیت نزدیک $\sim 960\text{ cm}^{-1}$ و تغییرات آن با جانشینی‌ها) و از سوی دیگر تعیین ترکیب عنصری موضعی را فراهم می‌کند. مطالعات رامان روی مونازیت نیز نشان داده‌اند که جایگاه و پهنای باندهای فسفات می‌تواند با ساختار و ترکیب تغییر کند و در بازه‌ای نزدیک به ~ 962 تا $\sim 981\text{ cm}^{-1}$ گزارش می‌شود؛ بنابراین استفاده از رامان برای تمایز مونازیت از فازهای مشابه (و نیز کنترل اثرات ترکیبی و ساختاری) اهمیت دارد. از دیدگاه زمین‌ساخت و کانه‌زایی، کمرند کرمان یکی از پهنه‌های شاخص پورفیری ایران است و بخش جبال‌بارز به‌عنوان یکی از بخش‌های اصلی کانه‌زایی پورفیری در جنوب‌شرق این کمرند معرفی شده است؛ با این حال، گزارش‌های ریزکانی‌شناسی مبتنی بر داده‌های همبسته (Raman and SEM-EDX) از فسفات‌های REE دار در برخی زیرپهنه‌ها هنوز محدود است (Schulz, 2019).

هدف این مقاله، ارائه اولین گزارش و مستندسازی حضور فسفات‌های REE دار (آپاتیت و مونازیت) در منتهی‌الیه جبال‌بارز (استان کرمان، جنوب‌شرق ایران) و در موقعیت مطالعاتی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ نگيسان است؛ در داده‌های این پژوهش، تمایز طیفی با اتکا به اختلاف چند واحدی در پیک اصلی (حدود $960-965\text{ cm}^{-1}$ برای آپاتیت در برابر $965-972\text{ cm}^{-1}$ برای مونازیت) و نیز تفاوت در باندهای فرعی به‌عنوان معیار کلیدی گزارش شده است، و هم‌زمان شواهدی از تشکیل و هم‌زیستی آپاتیت و مونازیت روی پلاژیوکلازهای دگرسان‌شده و ارتباط با دگرسانی کلریتی ارائه می‌شود. افزون بر آن، داده‌های SEM-EDX برای شناسایی عنصری نقطه‌ای و بررسی غنی‌شدگی REE در ریزفازها به‌کار گرفته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری صحرایی از منتهی‌الیه جبالبارز در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ (استان کرمان، جنوب شرق ایران) طی دو مرحله انجام شد. در مرحله نخست تحلیل آماری بر روی داده‌های ژئوشیمیایی ۱۶۹۵ نمونه سنگی که توسط شرکت معدنی-صنعتی گهر زمین در اختیار نویسندگان این مقاله قرار گرفته بود، انجام شد و پس از تعیین مناطق هدف، در مرحله دوم ۵۰ نمونه سنگی از مناطق دارای اولویت برداشت گردید. پس از آماده‌سازی اولیه، همه نمونه‌ها تحت مطالعات میکروسکوپی قرار گرفتند تا فازهای مستعد کانی‌های فسفات و ریزفازهای احتمالی REE دار مشخص شوند؛ سپس نمونه‌های شاخص (و نیز نقاط هدف درون نمونه‌ها) برای آنالیزهای میکروآنالیزی انتخاب شدند. این رویکرد انتخاب هدفمند، امکان تمرکز بر ریزفازهای کمیاب و ناهمگن را فراهم کرد و از تفسیرهای مبتنی بر داده‌های پراکنده جلوگیری نمود. برای ریزبررسی بافتی و تعیین ترکیب عنصری موضعی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به EDX (SEM-EDX) با دستگاه Tescan Vega 3 در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز استفاده شد و نمونه‌ها پیش از آزمون با پوشش طلا آماده‌سازی شدند. آنالیزهای EDX به صورت نقطه‌ای روی فازهای منتخب انجام گرفت و نتایج به صورت درصدی و زنی عناصر و الگوی حضور و غنی‌شدگی عناصر گزارش شد. برای تأیید کانی‌شناسی و تفکیک دقیق فسفات‌ها، از طیف‌سنجی رامان کانفوکال با دستگاه Horiba LabRAM HR نیز بهره گرفته شد. در تفسیر داده‌ها، تطبیق هم‌زمان شواهد بافتی (SEM)، ترکیب عنصری (EDX) و اثر انگشت طیفی (Raman) مبنای شناسایی آپاتیت و مونازیت قرار گرفت و پیک‌های شاخص ارتعاشات PO₄ به عنوان معیار اصلی تفکیک فازهای فسفات استفاده شد.

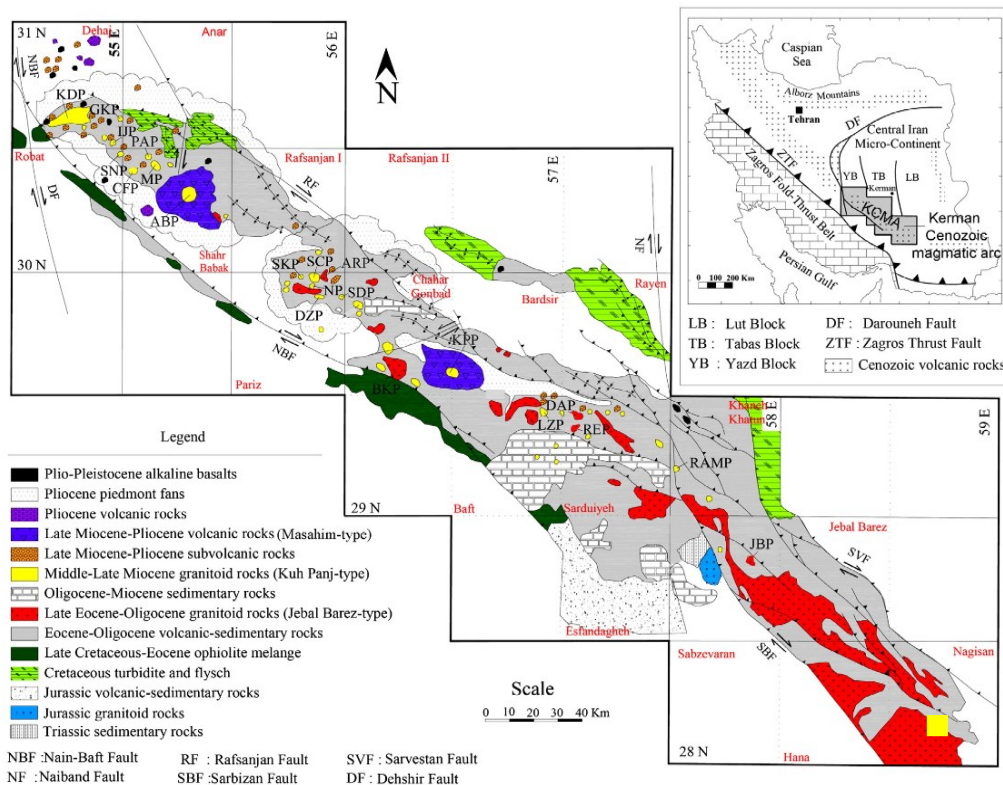
۳- موقعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در منتهی‌الیه رشته‌کوه جبالبارز و در جنوب شرق شهرستان جیرفت (استان کرمان) قرار دارد (شکل ۱) و از دیدگاه زمین‌ساختی بخشی از پهنه ماگمایی-کانه‌زایی جنوب شرق ایران محسوب می‌شود. این ناحیه در گستره‌ای قرار گرفته که فعالیت ماگمایی سنوزوئیک آن به طور عمده به فروانش نئوتتیس و تکامل کمان ماگمایی مرتبط با آن نسبت داده می‌شود. در مقیاس پهنه‌ای، «کمر بند مس کرمان» بخشی از همین سامانه کمانی است و پژوهش‌های جدید نشان می‌دهند که این کمر بند دست کم به دو بخش اصلی کان‌زایی پورفیری تقسیم می‌شود: بخش کوه پنج در شمال غرب و بخش جبالبارز در جنوب شرق. بنابراین، نگیسان در یک موقعیت فلززایی قرار می‌گیرد که از نظر رخدادهای ماگمایی-گرمایی، هم‌پوشانی زمانی و مکانی با سامانه‌های پورفیری و رگه‌ای در بخش جنوب شرقی کمر بند کرمان دارد. از دیدگاه سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی، سنگ‌های آتشفشانی ائوسن (به‌ویژه طیف آندزیتی تا داسیتی و واحدهای پیروکلاستیک مرتبط) در بخش‌هایی از جبالبارز گسترش قابل توجهی دارند و در بسیاری از مناطق توسط توده‌ها و دایک‌های نفوذی جوان تر قطع شده‌اند. مجموعه‌های نفوذی الیگوسن تا میوسن در این بخش فراوانند و در قالب توده‌ها و کمپلکس‌های پلوتونی (از کوارتز دیوریت تا گرانودیوریت و گرانیت، همراه با انکلوهای ماگمایی) رخمون دارند؛ این مجموعه‌ها در زمین‌شناسی منطقه با عنوان «کمپلکس پلوتونی جبالبارز» نیز شناخته می‌شوند و به عنوان بخشی از تکامل کمان ماگمایی و شرایط فرورانشی تفسیر شده‌اند. از نظر ساختاری، روندهای غالب گسلی و شکستگی‌ها در این پهنه، مسیرهای مناسب برای گردش سیالات گرمایی فراهم کرده و به همین دلیل، همراهی زون‌های دگرسانی (پتاسیک، فلیک، پروپیلیتیک و گاه دگرسانی‌های اکسیداسیون و سوپرژن سطحی) با رخدادهای مس‌دار و چندفلزی در بخش جبالبارز بارها مورد اشاره قرار گرفته است (Mahmoodi et al., 2013; Taghipour et al., 2008).

در مقیاس محلی (ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ نگیسان و پیرامون آن)، داده‌های سنگی و میکروآنالیزی این پژوهش نشان می‌دهد که واحدهای حدواسط تا بازیک و رخدادهای دگرسانی در نمونه‌ها برجسته‌اند؛ به طور مشخص، در اولویت‌بندی واحدهای سنگی، دیوریت (تازه و نیز دیوریت دگرسان شده) به عنوان واحدی با پتانسیل بالاتر برای تمرکز REE و عناصر ارزشمند معرفی شده و حضور فازهای متمرکزکننده REE مانند مونازیت و آپاتیت به همراه شواهد دگرسانی گرمایی در آن گزارش شده است. همچنین واحدهایی مانند میکروگابرو و داسیت (و نمونه‌های داسیت دگرسان شده) نیز در مجموعه نمونه‌ها دیده می‌شوند و از دیدگاه

ژئوشیمیایی، ناهمگنی‌های موضعی و نقش سیالات گرمایی در تمرکز برخی عناصر در کانی‌های فرعی و سولفیدها مورد توجه قرار گرفته است. در همین راستا، شواهد رامن و SEM-EDX بیانگر آن است که بخشی از کانی‌سازی و تمرکز عناصر، همزمان با دگرسانی پروپیلیتیک و کلریتی و تشکیل سولفیدهایی مانند پیریت رخ داده و در مراحل پیشرفته‌تر، تشکیل فازهای ثانویه و ریزکانی نیز محتمل است. مهم‌تر اینکه، در محدوده نگیسان حضور همزمان آپاتیت و مونازیت به‌صورت ریزفاز و گاه روی پلاژیوکلازهای دگرسان شده گزارش شده که از دیدگاه زمین‌شناسی اقتصادی می‌تواند بازتابی از برهم‌کنش سیالات ماگمایی-گرمایی با سنگ میزبان و آزادسازی و بازرسوب‌گذاری فسفر و REE باشد (Rasouli et al., 2023).

بر این اساس، موقعیت زمین‌شناسی نگیسان را می‌توان در قالب یک زیرپهنه از بخش جبال‌بارز در کمربند کرمان در نظر گرفت که طی تکامل ماگمایی سنوزوئیک، هم واحدهای آتشفشانی ائوسن و هم نفوذی‌های جوان‌تر را در بر می‌گیرد و تحت تأثیر شبکه شکستگی‌ها و دگرسانی‌های گرمایی، ظرفیت مناسبی برای رخداد کانی‌های حامل REE (به‌ویژه فسفات‌ها) در مقیاس ریزکانی نشان می‌دهد.



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی کمربند ماگمایی سنوزوئیک کرمان و وضعیت آن در کمربند ماگمایی ارومیه- دختر (Asadi et al., 2014). موقعیت منطقه با مربع زرد نشان داده شده است.

۴- بحث

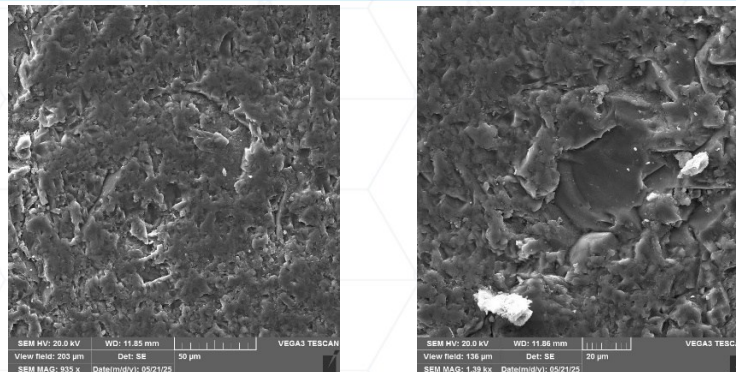
یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که در منتهی‌الیه جبال‌بارز، دو فاز فسفات REE دار یعنی آپاتیت و مونازیت به‌صورت ریزفازهای قابل تشخیص حضور دارند و با رویکرد تلفیقی Raman + SEM-EDX می‌توان آن‌ها را با اطمینان بالاتری از فازهای مشابه تفکیک کرد. معیار کلیدی در بخش رامن، اختلاف ۳ تا ۷ واحد موجی در پیک اصلی فسفات‌ها است؛ به‌طوری‌که پیک اصلی آپاتیت در بازه $960-965 \text{ cm}^{-1}$ و پیک اصلی مونازیت در بازه $965-972 \text{ cm}^{-1}$ گزارش شده و باندهای فرعی نیز به‌عنوان شاخص‌های مکمل استفاده شده‌اند. این تمایز طیفی، همراه با شواهد SEM-EDX، ستون اصلی نتیجه‌گیری است و

از نظر کاربردی اهمیت دارد؛ زیرا در محیط‌های دگرسانی و نمونه‌های ریزدانه، صرفاً با میکروسکوپ نوری یا حتی SEM بدون طیف‌سنجی و میکروآنالیز ممکن است مونازیت با فازهای REE دار دیگر (مانند برخی فسفات‌های ثانویه یا برتلویت) اشتباه شود. از منظر زمین‌شناسی اقتصادی، نکته مهم این است که شواهد تشکیل و تمرکز REE را در قالب "ریزفازهای جانبی" داخل یک سامانه ماگمایی-گرمابی نشان می‌دهد؛ یعنی REE احتمالاً به صورت محصول جانبی در کنار کانه‌زایی‌های تیپ پورفیری منطقه قابل پیگیری است. این جمع‌بندی با بخش تفسیر اکتشافی داده‌های رامان در گزارش هم‌خوان است.

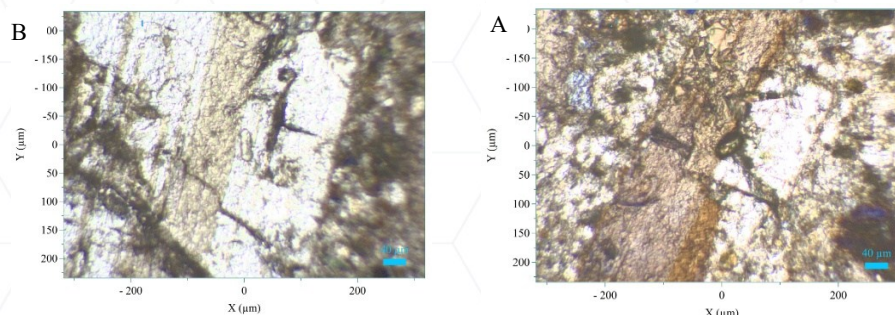
در بسیاری از سامانه‌های پورفیری، فسفات‌ها (به‌ویژه آپاتیت) نقش «ثبت‌کننده» ترکیب سیال و ماگما و گاهی نقش (منبع REE) را دارند و حضور مونازیت می‌تواند بیانگر شرایط ویژه (تفریق پیشرفته، آلاش، یا بازرسوب‌گذاری گرمابی) باشد. در بخش SEM-EDX نیز «وجود ریزفاز هدف» با تصویر و طیف‌ها مستند شده است: مونازیت در دیوریت با تصاویر SEM شکل‌های ۲A و آپاتیت در دیوریت با شکل‌های ۲B گزارش شده است. علاوه بر آن، نمایش رخداد‌های کانیایی مونازیت و آپاتیت روی میزبان‌های مختلف در بخش رامان (مونازیت روی کوارتز، مونازیت روی پلاژیوکلاز و آپاتیت روی پلاژیوکلاز)؛ شکل‌های ۳ نشان می‌دهد که این فازها فقط «در یک نقطه منفرد» دیده نشده‌اند، بلکه در چند موقعیت کانیایی تکرارپذیرند. این تکرارپذیری، ارزش نتیجه را بالا می‌برد؛ زیرا از دام "مشاهده تصادفی یک دانه" فاصله می‌گیرد.

ترکیب داده‌ها به‌ویژه ناهمگنی الگوی REE و رخداد کانی‌ها روی کانی‌های دگرسان‌شده بیش از یک سناریو را محتمل می‌کند، اما دو مسیر اصلی قابل دفاع است: (الف) مسیر ماگمایی و تفریق پیشرفته: در نمونه JB21-1 (مونازیت در دیوریت پورفیری تازه)، الگوی گزارش‌شده HREE-dominant و نسبت بالای HREE/LREE در کنار رخداد آنومالی مثبت Eu، به‌عنوان نشانه‌ای از تفریق پیشرفته و یا ورود سیال‌های ویژه تفسیر شده است. از نظر مفهومی، مونازیت در بسیاری از محیط‌ها بیشتر LREE غالب است و HREE-dominant بودن می‌تواند غیرمعمول تلقی شود؛ همین «غیرمعمول بودن» می‌تواند نشان دهد که یا فاز مورد آنالیز با فازهای HREE دار دیگر هم‌رخداد بوده، یا شرایط سیال و ماگما باعث تمرکز انتخابی HREE شده است. (در داده‌ها نیز به همراهی Nb و احتمال وجود فازهای Nb-Ta اشاره شده است). در چنین چارچوبی، می‌توان فرض کرد که در مراحل پایانی تبلور، عناصر ناسازگار P و REE و احتمالاً Nb در فازهای فرعی متمرکز شده‌اند و مونازیت به‌عنوان یکی از گیرنده‌های این عناصر ظاهر شده است. (ب) مسیر گرمابی/دگرسانی و بازرسوب‌گذار: تشکیل ثانویه آپاتیت و مونازیت روی پلاژیوکلازهای دگرسان‌شده و ارتباط آن با دگرسانی کلریتی و پروپیلیتیک. همچنین رخداد مونازیت روی پلاژیوکلاز (شکل A۳) و آپاتیت روی پلاژیوکلاز (شکل B۳) با این سناریو سازگار است؛ زیرا در بسیاری از سامانه‌های گرمابی، فسفات‌های REE دار به صورت پرکننده ریزفضاها، روی کانی‌های دگرسانی و میزبان یا در امتداد ریزشکستگی‌ها دیده می‌شوند.

در بخش رامان، علاوه بر پیک اصلی، به تفاوت‌های شکل باند و جابه‌جایی‌ها اشاره شده است (پیک باریک‌تر در آپاتیت در برابر پیک پهن‌تر در مونازیت که می‌تواند با حضور REE و اثرات ساختاری و ترکیبی مرتبط باشد). از نظر ادبیات علمی، وجود باند شاخص $\nu_1(\text{PO}_4)$ نزدیک $\sim 960 \text{ cm}^{-1}$ برای آپاتیت به‌خوبی شناخته شده و تغییرات کوچک آن می‌تواند با جانمایی‌ها و اختلال ساختاری مرتبط باشد. برای مونازیت نیز گزارش A، است که باند $\nu_1(\text{PO}_4)$ معمولاً نزدیک 970 cm^{-1} قرار می‌گیرد و پهن شدن باند می‌تواند نسبت به ترکیب (Th, U, Ca, Pb) و میزان بی‌نظمی ساختاری حساس باشد. همچنین دامنه جابه‌جایی این باند در نمونه‌های طبیعی و فرآورده‌های آزمایشگاهی می‌تواند نسبتاً گسترده باشد (تقریباً 962 تا 1981 cm^{-1}) بنابراین این راهبرد برای «تفکیک آپاتیت و مونازیت با تکیه بر اختلاف چند واحدی پیک اصلی» وقتی مستدل‌تر می‌شود که با SEM-EDX پشتیبانی گردد؛ دقیقاً همان کاری که انجام شده است.



شکل ۲. (A) تصاویر حاصل از SEM مربوط به کانی مونازیت در سنگ دیوریت (B) تصاویر حاصل از SEM مربوط به کانی آپاتیت در سنگ دیوریت



شکل ۳. (A) تصویر Raman و فاز کانیایی مونازیت روی پلاژیوکلاز، (B) تصویر Raman و فاز کانیایی آپاتیت روی پلاژیوکلاز از دیدگاه ادبیات پژوهشی، سازوکار انحلال-رسوب‌گذاری همزمان (coupled dissolution-precipitation) برای تبدیل و جایگزینی آپاتیت و تشکیل فازهای REE دار (از جمله مونازیت یا مراحل واسطه مانند رایدوفان) هم در مطالعات آزمایشگاهی و هم در شواهد طبیعی گزارش شده است. بنابراین، تفسیر «رابطه ژنتیکی» یعنی امکان اینکه انحلال آپاتیت توسط سیالات، فسفر و REE را برای تشکیل مونازیت ثانویه فراهم کند، از نظر نظری قابل پشتیبانی است.

قرارگیری محدوده نگیسان در بخش جبالبارز کمر بند کرمان، از نظر مقایسه با پژوهش‌های پیشین اهمیت دارد؛ زیرا مطالعات منطقه‌ای اخیر نیز بر وجود دو بخش متفاوت پورفیری در کمر بند کرمان (کوه پنج و جبالبارز) تأکید کرده‌اند. در چنین پهنه‌هایی، انتظار می‌رود که ماگماهای کالک‌آلکالن تا حدی تکامل یافته و رخداد گسترده دگرسانی، امکان جابه‌جایی و تمرکز عناصر ناسازگار (از جمله REE) را در مقیاس ریز فراهم کند. نتیجه که «تمرکز REE می‌تواند در قالب محصول جانبی سامانه پورفیری-سولفیدی دنبال شود» با این نگاه منطقه‌ای هم‌جهت است. همچنین حضور پیریت در واحدهای دگرسان شده می‌تواند به عنوان یک شاخص همراه دگرسانی و ورود سیالات گرمایی دیده شود و از این رو، هم‌نشینی رخدادهای سولفیدی با فسفات‌های REE دار را تقویت کند. از نظر نظری، داده‌ها یک مدل چندمرحله‌ای قابل طرح می‌کند: در مراحل ماگمایی، آپاتیت می‌تواند به عنوان مخزن اولیه P و بخشی از REE عمل کند؛ سپس در طی دگرسانی و ورود سیالات، بخشی از REE و فسفر آزاد شده و در ریزمحیط‌های مناسب، مونازیت (و احتمالاً سایر فازهای همراه) رسوب می‌کند. این نگاه با مفهوم «انحلال آپاتیت و تأمین P+REE برای مونازیت ثانویه» سازگار است. و از سوی دیگر با سازوکارهای گزارش شده برای جایگزینی هیدروترمال آپاتیت-مونازیت همخوانی دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با هدف گزارش و مستندسازی حضور فسفات‌های REE دار (آپاتیت و مونازیت) در منتهی‌الیه جبالبارز (استان کرمان، جنوب شرق ایران)، رویکرد تلفیقی Raman و SEM-EDX به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که دو کانی هدف

به صورت ریزفازهای قابل تشخیص در نمونه‌های منطقه حضور دارند و ترکیب شواهد طیفی و عنصری امکان تفکیک مطمئن‌تر آن‌ها را فراهم می‌کند. در داده‌های رامان، باندهای شاخص فسفات‌ها (به‌ویژه اختلاف پیک اصلی در بازه‌های $960-965\text{ cm}^{-1}$ برای آپاتیت و $965-972\text{ cm}^{-1}$ برای مونازیت) به عنوان معیار کلیدی شناسایی استفاده شد و با داده‌های SEM-EDX (تصویربرداری ریزساختاری و آنالیز عنصری نقطه‌ای) همخوانی نشان داد. از منظر علمی و کاربردی، این یافته‌ها دو پیام اصلی دارند: نخست اینکه در بخش جبالبارز، حتی در مقیاس ریزکانی و در نمونه‌های دگرسان‌شده، می‌توان حامل‌های مهم REE را شناسایی و به عنوان شاخص‌های فرآیندهای ماگمایی-گرماپی دنبال کرد؛ دوم اینکه بسته روش‌شناسی Raman+SEM-EDX یک ابزار سریع و کم‌هزینه برای غربالگری اکتشافی REE به عنوان محصول جانبی در پهنه‌های ماگمایی-کانه‌زایی فراهم می‌کند. شواهد رخداد آپاتیت و مونازیت روی کانی‌های دگرسان‌شده (از جمله پلاژیوکلاز) نیز نشان می‌دهد که بخشی از تمرکز REE می‌تواند با دگرسانی و بازتوزیع عناصر در مقیاس میکرو مرتبط باشد. در مجموع، این مطالعه با ارائه شواهد میکروآنالیزی از حضور آپاتیت و مونازیت در نگيسان، جبالبارز، گامی در جهت تکمیل شناخت کانی‌شناسی عناصر نادر خاکی در جنوب شرق ایران و فراهم کردن مبنایی برای برنامه‌ریزی اکتشافی دقیق‌تر در این پهنه به شمار می‌رود.

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

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.001>
- Ghosh, B., Vapnik, H., Kim, H.-E., Kim, Y., Ruchitha Birawat, Lu, Y., Su, X., & Yang, H. (2025). Electrochemical Separation and Clean Energy Applications of Rare Earth Elements. *Chemical Reviews*. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5c00103>
- Mahmoodi, M. Y., Bahroudi, A., Ghorbani, M., & Arian, M. (2013). Preliminary Exploration of Copper Minerals in Jebal Barez Mountains, Iran. *Open Journal of Geology*, 03(03), 201–208. <https://doi.org/10.4236/ojg.2013.33023>
- Nader Taghipour, Alijan Aftabi, & Mathur, R. (2008). Geology and Re-Os Geochronology of Mineralization of the Miduk Porphyry Copper Deposit, Iran. *Resource Geology*, 58(2), 143–160. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2008.00054.x>
- Rasouli, J., Ghorbani, M., Ahadnejad, V., & Poli, G. (2016). Calk-alkaline magmatism of Jebal-e-Barez plutonic complex, SE Iran: implication for subduction-related magmatic arc. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4). <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2124-9>
- Schulz, B., Merker, G., & Gutzmer, J. (2019). Automated SEM Mineral Liberation Analysis (MLA) with Generically Labelled EDX Spectra in the Mineral Processing of Rare Earth Element Ores. *Minerals*, 9(9), 527. <https://doi.org/10.3390/min9090527>
- Skrzypek, E., Gallhofer, D., Balen, D., Schneider, P., & Hauzenberger, C. A. (2025). “Dry” and “wet” alteration of magmatic monazite in Variscan crystalline rocks from Mt. Papuk (Croatia). *Geologica Carpathica*, 76(3). <https://doi.org/10.31577/geolcarp.2025.10>