



بررسی رفتار ژئوشیمیایی عناصر نادر خاکی در آپاتیت‌های جزیره هرمز

علی رستمی^{1*}، مرضیه بازآمد²، بهزاد حاج‌علیلو¹، محسن مؤذن³

(1) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، ایران

(2) کارشناس ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تهران، ایران

(3) دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، ایران

دریافت مقاله: 1392/1/18، پذیرش: 1392/6/4

چکیده

منطقه مورد مطالعه در سه کیلومتری جنوب غربی جزیره هرمز، در استان هرمزگان واقع است. واحدهای اصلی زمین‌شناسی منطقه توده اسیدی گرانوفیر که به شدت دگرسان شده و عامل به وجود آوردن آپاتیت‌های منطقه است، دایک دیابازی، مارن و بازالت تجزیه شده می‌باشند. آپاتیت تنها کانی فسفات‌ه تمرکزدهنده عناصر نادر خاکی در جزیره هرمز است. در این آپاتیت‌ها، مقدار اکسیدهای SiO_2 و Na_2O بالا و مقدار متوسط عناصر اصلی چون Fe , Mg , Al , Ca بترتیب برابر با 2880ppm, 27.8%, 7.5ppm, 365ppm می‌باشد. با افزایش تفریق ماگمایی میزان عناصر Y , Mn , Rb افزایش و میزان Sr کاهش می‌یابد، میزان این عناصر در آپاتیت‌های هرمز به گونه‌ای است که تفریق ماگمایی متوسط را نشان می‌دهند. مجموع عناصر REE (1.22-2.25%) و نسبت LREE/HREE در آپاتیت‌های هرمز بالا هستند. بنابراین آپاتیت‌های هرمز از عناصر نادر خاکی سبک غنی شده‌اند. شیب الگوی به‌هنجار شده نسبت به کندریت این عناصر منفی و همراه با آنومالی منفی Eu می‌باشد. از نمودارهای مختلف متمایزکننده انواع واحدهای سنگی براساس ترکیب آپاتیت‌ها مشخص شده است که آپاتیت‌های هرمز به گرانیتوئیدهای نوع I مافیک با درجه اکسیدشدگی بالا ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO} > 1$) تعلق دارند.

واژه‌های کلیدی: عناصر نادر خاکی، آپاتیت، جزیره هرمز، ژئوشیمی REE.

مقدمه

فسفات‌ها، در تیتانیوم به فرمول CaTiSiO_5 و آلانیت نیز مقداری عناصر نادر خاکی متمرکز می‌شوند [3]. عناصر نادر خاکی به دو زیرگروه LREE یا عناصر نادر خاکی سبک شامل هفت عنصر (از عدد اتمی 57 تا 63) و HREE یا عناصر نادر خاکی سنگین (از عدد اتمی 64 تا 71) تقسیم می‌شوند [4].

این عناصر در ضمن فرآیندهای ماگمایی دچار تفکیک می‌شوند و به دلیل تغییر بسیار ملایم شعاع یونی، نمایشگرهای حساسی برای فرآیندهای مختلف آذرین می‌باشند. بازالت‌های اقیانوسی معمولاً کمترین الگوهای تفکیک‌شده این عناصر را نسبت به فراوانی آنها در کندریت، نشان می‌دهند. بازالت‌های قاره‌ای تا حدودی الگویی تفکیک یافته دارند و همراه با افزایش عدد اتمی، تهی‌شدگی نسبی بیشتری در این بازالت‌ها مشاهده

عناصر نادر خاکی دارای بار الکتریکی و شعاع یونی نسبتاً بالا بوده ولی غلظت آنها در کانیها کم است. این عناصر میل کمی به جای‌گزین شدن عناصر اصلی طی تبلور ماگمایی دارند. بنابراین بیشتر در کانیهای فرعی متمرکز می‌شوند. کانیهای فسفات‌ه اهمیت بسیار زیادی در تمرکز عناصری نظیر U , Th , Sr و REE دارند [1 و 2]. کانیهای فرعی معمول فسفات‌ه که تمرکز دهنده عناصر REE هستند، عبارتند از فلوئورآپاتیت $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_4$ که مهمترین کانی فسفات‌ه تغلیظ‌کننده این عناصر می‌باشد، مونازیت $(\text{Ce}, \text{LREE})\text{PO}_4$ و زنونیم $(\text{Y}, \text{HREE})\text{PO}_4$ که به میزان کمتری می‌تواند عناصر نادر خاکی را در خود متمرکز سازد. علاوه بر کانیهای

*مسئول مکاتبات: arostami_231@yahoo.com

مجموع این گنبد‌ها تحت عنوان سری هرمز معرفی می‌شود (شکل 1 ب) واحدهای سری هرمز از پایین به بالا به ترتیب عبارتند از [11]:

واحد h₁ یا واحد نمکی سازند هرمز: قاعده این واحد معلوم نیست و در هیچ‌جا به‌طور کامل ظاهر نشده است. طبقات و لایه‌های نمکی بیشتر حجم این واحد را تشکیل می‌دهند که با میان‌لایه‌های نازکی از توف، مارن، آهک‌های تیغه‌ای، اکسیدها و سولفورهای آهن (پیریت) همراه است.

واحد هرمز h₂: این واحد با رنگ قرمزی که در رسوبات زیرین آن غلبه دارد از فواصل دور قابل تشخیص و رنگ قرمز آن نشانه پیدایش خاک سرخ در این واحد است. واحد هرمز 2 تناوبی است از مارن‌های سفید تا زرد کم‌رنگ، انیدریت (که غالباً به ژیپس تبدیل شده است)، توف، ایگنمبریت، آهک‌های نازک لایه سیاه‌رنگ و سنگ آهن که به‌صورت نوارهای نازک میلی‌متری آهن‌دار، اکسیدهای بی‌آب و آبدار آهن می‌باشد.

واحد هرمز h₃ یا واحد آهک‌های سیاه‌رنگ جلبیکی: این واحد در همه‌جا از ویژگی ثابتی برخوردار است و از طبقات نازک لایه آهکی سیاه‌رنگی تشکیل می‌شود که عموماً سرشار از فسفیل جلبک‌های گوناگون است. ضخامت این واحد گاهی تا حدود 50 متر می‌رسد.

واحد هرمز h₄ یا واحد آواری - ولکانیکی: این واحد در هر گنبد نمکی دارای لیتولوژی خاص همان گنبد است و معمولاً در جاهایی ظاهر می‌شود که واحد نمکی یا ظاهر نشده و یا اندکی از آن رخنمون دارد. بیشتر حجم این واحد را ماسه سنگ‌های قرمز خاکستری و سبزرنگی تشکیل می‌دهند که دارای موج نقشه‌هایی چشمگیر هستند. این طبقات با میان‌لایه‌هایی از توفیت‌های سبز رنگ تناوب دارند.

سنگ‌های ماگمایی سازند هرمز: این سنگ‌ها به دو گونه مشخص دیده می‌شود: یا به‌صورت سنگ‌های خروجی توف و گدازه در تناوب با سنگ‌های رسوبی سازند هرمز و یا به‌صورت سنگ‌های نفوذی که سن آنها از واحد h₄ جوانتر است. دسته اول بیشتر اسیدی تا متوسط از نوع ریولیت داسیت و احیاناً تراکیت هستند که گرایش قلیایی دارند. دسته دوم را بیشتر دیاباز و گرانوفیر تشکیل می‌دهند که پی‌درپی سازند هرمز را قطع کرده‌اند. دیاباز به‌صورت دایک بوده و دارای امتداد شرقی-غربی به طول تقریبی 2 کیلومتر می‌باشد که در بخش‌هایی توسط گسل‌های راست‌گرد به طول 10 تا 15 متر به صورت

می‌شود [5]. گرانبه‌ها بیشترین تهی‌شدگی از عناصر نادر خاکی سنگین نشان می‌دهند که می‌تواند به‌علت غنی‌شدگی نسبی این عناصر در برخی از مواد همراه باشد [3]

آپاتیت مقادیر بالایی از عناصر U, Th, Sr و REE سنگ کل را در خود جمع می‌کند [6 و 7] و بنابراین یک ثبت‌کننده حساس شیمی عناصر فرعی در زمان تبلور است [8, 9 و 10] غلظت عناصر فرعی در آپاتیت‌ها با پارامترهای سنگ کل از قبیل میزان fO_2 , SiO_2 مقدار کل آلکالی‌ها و میزان اشباع‌شدگی از آلومینیوم (اندیس ASI) بستگی دارد [5]. بنابراین مشخصات ژئوشیمیایی ثبت‌شده در آپاتیت از تیپ‌های سنگی خاص و سیستم‌های کانی‌زایی شده، سبب می‌شود که آپاتیت به‌عنوان کانی نشانگر در اکتشاف کانیایی مورد استفاده واقع شود.

جزیره هرمز در فاصله هشت کیلومتری جنوب بندرعباس واقع شده است (شکل 1 الف). آپاتیت‌ها تنها در بخش جنوب و جنوب غربی این جزیره در درون درز و شکاف‌های توده گرانوفیری به‌صورت رگه‌ای و در امتداد آبراهه‌ها به‌صورت پلاسری یافت می‌شوند.

این منطقه بین طول‌های شرقی $27^{\circ} 02' 16''$ تا $27^{\circ} 02' 716''$ شرقی و عرض‌های شمالی $56^{\circ} 26' 56/8''$ تا $56^{\circ} 27' 28/8''$ و در ارتفاع 50 متری از سطح دریا واقع شده است.

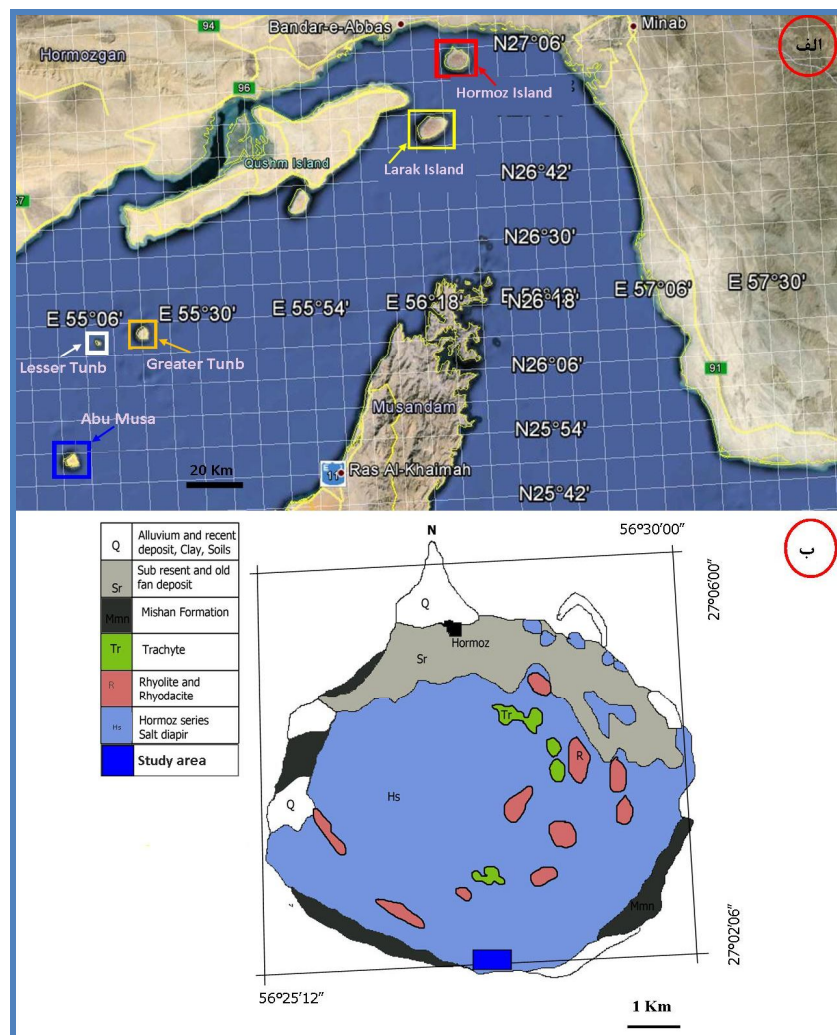
آپاتیت‌های این جزیره علی‌رغم وفور و درشتی و به‌عنوان نمونه‌های زیبا و رایج در موزه‌های زمین‌شناسی و تاریخ طبیعی کشور، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این نوشتار به این کانیهای مشهور ولی از نظر کانی‌شناسی و ژئوشیمی کمتر شناخته‌شده پرداخته می‌شود. هدف از مطالعه، بررسی شیمیایی این کانیها، تعیین مقادیر عناصر نادر در آنها به‌عنوان منبع احتمالی این عناصر و همچنین ارائه داده‌های بیشتر برای تعیین سنگ در برگیرنده آنها که به‌شدت هوازده‌شده و با روش‌های معمول پترولوژی قابل بررسی نمی‌باشد، بوده است.

زمین‌شناسی

زمین‌شناسی عمومی منطقه مورد مطالعه

پراکندگی گنبد‌های نمکی در جنوب ایران یکنواخت نیست و در دو گستره قرار دارند. یکی بندرعباس - سروستان که 101 گنبد و دیاباز را شامل می‌شود و دیگری گستره جنوب کازرون که تنها 14 گنبد و دیاباز را در خود جای داده است.

افقی جابه‌جا شده است (شکل 2).



شکل 1. موقعیت منطقه جزیره هرمز الف) تصویر ماهواره‌ای تنگه و جزیره هرمز، ب) نقشه زمین‌شناسی هرمز (برگرفته از [12])

دایک‌ها به صورت سیستماتیک و با شبکه مستطیلی با طول 10 و عرض 4 متر، در رسوبات آهن‌دار به علت پراکندگی نسبتاً یکسان به صورت شبکه مربع و با فواصل یکسان 5 متر و در طول آبراهه‌ها به صورت غیرسیستماتیک انجام پذیرفت. ابتدا 30 نمونه از آپاتیت‌های منطقه نمونه‌برداری و توسط میکروسکپ بیناکولار بررسی و پاک‌سازی (شکل 3) و کانیهای همزیست آن شامل خاک سرخ و الیژیست از آن جدا شدند (شکل 4). سپس 10 نمونه از آنها انتخاب و جهت تجزیه عناصر اصلی به روش فلورسانس اشعه ایکس (XRF) به آزمایشگاه کارخانه سیمان بندرخمیر و برای تجزیه ICP-MS به آزمایشگاه LABWEST کشور استرالیا فرستاده شد. پنج

گرانوفیر غالباً از نوع کوارتز پورفیری است که گاه بافت درشت‌تری پیدا کرده و به توده گرانیتوئیدی تبدیل می‌گردد [13]. در محدوده مورد مطالعه آپاتیت‌ها به صورت رگه‌ای در درون درز و شکافهای گرانوفیرها دیده می‌شود. اندازه‌گیری سنی که بر روی گرانوفیرهای جزیره هرمز انجام شده است، سن 227 ± 3 میلیون سال را نشان می‌دهد [14] که همان اواخر پرمین - اوایل تریاس است.

روش مطالعه

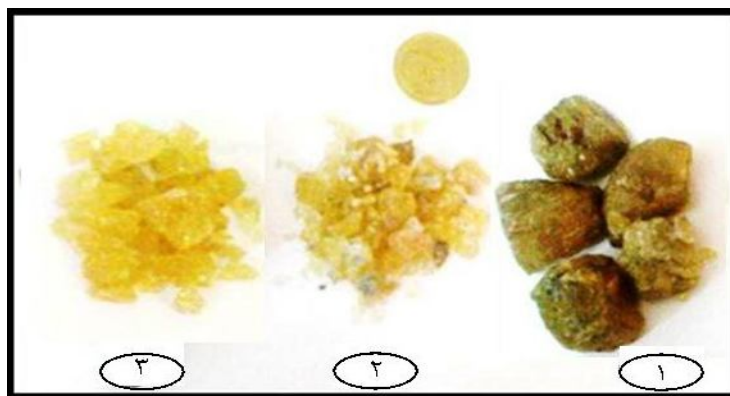
نمونه‌برداری از محل‌هایی صورت پذیرفت که حجم کانی‌سازی آپاتیت در آن‌جا بیشتر بوده است. نمونه‌برداری در امتداد

تا 10 سانتی‌متری (شکل 5) به صورت نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار (هگزاگونال) می‌باشند (شکل 6). معمولاً آپاتیت‌ها به رنگ‌های سبز روشن، سبز متمایل به زرد، سبز خاکستری و قهوه‌ای مشاهده می‌شوند.

نمونه نیز جهت انجام تجزیه XRD برای مشخص کردن کانیه‌های همزیست آپاتیت، به آزمایشگاه شرکت زرآزما پرشین ارسال شد. نمونه‌های آپاتیت هرمز از اندازه‌های ریز (در حد میلی‌متری)



شکل 2. دایک دیابازی با امتداد شرقی - غربی (دید به سمت غرب)



شکل 3. مراحل مختلف پاک‌سازی نمونه

ژئوشیمی

بررسی فراوانی عناصر اصلی و فرعی آپاتیت‌های هرمز

میزان CaO در اکثر آپاتیت‌های جهان بین 54%-57% است [5]. در آپاتیت‌های هرمز فراوانی Ca بین 23/9% تا 29/5% می‌باشد. مقدار اکسید Na_2O در بیشتر آپاتیت‌ها کم و در محدوده 0/01-0/3% متغیر است اما در آپاتیت‌های هرمز این اکسید دارای گستره 0/02-0/29% می‌باشد.

غلظت عناصری مثل Si, Na, Al, K, Fe, Ti در ساختمان آپاتیت‌ها بسیار کم و اغلب زیر حد آشکارسازی است. در آپاتیت‌های هرمز تمرکز K و Ti کمتر از حد آشکارسازی

($10 > \text{ppm}$)، میزان Al بین 1810 تا 3950 ppm، Fe بین 75-1350 ppm و فراوانی Na بین 4220-4660 ppm می‌باشد. محتوای Mg آپاتیت‌ها محدوده‌ای از 10 تا 700 ppm است. کمترین میزان آن در آپاتیت‌های گرانیتوئیدها و پگماتیت‌های گرانیتی وجود دارد. در حالی که کانسارهای آهن بیشترین میزان Mg را دارا هستند [5] فراوانی این عنصر در آپاتیت‌های هرمز بین 335 تا 395 ppm است. سولفور در آپاتیت‌ها معمولاً به میزان کمتر از 0/2 درصد [10] و در آپاتیت‌های هرمز به مقدار 259-294 ppm حضور دارد. میزان بالای عناصر Zn, Cu, Ni, V, As مربوط به ذخایر

دلریت کریمن¹ (5-1 ppm) گزارش شده است [5]. در لرزولیت‌ها بالاترین فراوانی اورانیوم (15-280 ppm) وجود دارد [5]. برای آپاتیت‌های هرمز متوسط میزان این عنصر 2/7 ppm است (جدول 1).

مقدار Th از 1 ppm تا چند صد ppm و با متوسط ppm 106 می‌باشد. Th بسیار بالا مخصوص آپاتیت‌های ذخایر آهنی (200-300 ppm) و لرزولیت‌ها (360-42 ppm) است اما بالاترین میزان آن از آپاتیت‌های کربناتیت کودور² روسیه با میزان 2000 ppm گزارش شده است [5]. غلظت این عنصر در آپاتیت‌های هرمز 0/08-10/3 ppm می‌باشد. مقادیر بسیار پایین U و Th در آپاتیت‌های هرمز می‌تواند در اثر دو عامل باشد (1) ماگمای مادر از این عناصر فقیر بوده است (2) U و Th وارد ساختار کانیه‌های دیگری می‌شوند که قبل از آپاتیت متبلور شده‌اند. کانیه‌های همزیست با آپاتیت‌های هرمز کانیه‌های کوارتز، همتایت، ارتوکلاز و بیوتیت می‌باشند. در منطقه کوارتزهای دودی خودشکل مشاهده می‌شود که احتمال می‌رود رنگ تیره این کانیه‌ها حاصل واپاشی عناصر پرتوزا باشد و کانی اصلی تمرکز دهنده اورانیوم و توریوم، این کوارتزها باشند. کم بودن میزان این عناصر در آپاتیت‌ها، مؤید این موضوع است.

فراوانی عنصر Pb برای آپاتیت‌های سنگهای مختلف از ppm 1-30 متغیر و با میانگین 13 ppm می‌باشد. در آپاتیت‌های دارای U و Th بالا، میزان این عنصر نیز افزایش می‌یابد. در آپاتیت‌های هرمز میزان متوسط سرب حدود 6 ppm است.

بررسی فراوانی عناصر نادر خاکی آپاتیت‌های هرمز

عناصر REE می‌توانند جای‌گزين Ca در آپاتیت شوند [7]، 16 و 17]. در این جانشینی REE و Na⁺ به جای Ca²⁺ و Si⁴⁺ به جای P⁵⁺ جای‌گزين می‌شوند تا بارها موازنه شوند [17]. مجموع REE بیشتر آپاتیت‌ها معمولاً 0/1-1/7 درصد وزنی (0.1-1.7wt%) می‌باشد [5].

مجموع عناصر REE با افزایش میزان SiO₂ و پیشرفت تبلور افزایش می‌یابند. این عناصر همچنین با افزایش میزان K و تفریق ماگمایی زیاد می‌شوند. در واقع هر چه میزان مجموع REE بیشتر شود نشانه جدایش بیشتر مواد فرار و فلزات

آهنی هستند [5]. فراوانی این عناصر در آپاتیت‌های هرمز به ترتیب برابر 229-279، 16، 3، 0/8-1/7 و 1/2 ppm می‌باشد.

تغییرات مقادیر Mn در آپاتیت‌ها بسیار وسیع و در لرزولیت‌ها کمتر از حد آشکارسازی و در گرانیتوئیدها و پگماتیت گرانیتها تا چند درصد گزارش شده است [5]. میزان تغییرات این عنصر در آپاتیت‌های هرمز 83-99 ppm است (جدول 1).

فراوانی عنصر V معمولاً کمتر از 10 ppm است، بیشترین میزان (40-50 ppm) آن در آپاتیت‌های کمتر تفریق‌یافته و کانسارهای آهن وجود دارد. میانگین غلظت این عنصر در آپاتیت‌های هرمز 16 ppm است (جدول 1).

عنصر Sr طیف گسترده‌ای دارد از 50 ppm < تا چند هزار ppm و در آپاتیت‌های زولیت‌های لرزولیتی گوشته بالاترین میزان Sr گزارش شده که به درصد نیز می‌رسد [15]. در سنگهای بسیار تفریق‌یافته گرانیتوئیدی و گرانیت پگماتیتی کمترین میزان Sr (<100ppm) وجود دارد [5]. میزان این عنصر در آپاتیت‌های هرمز 289-375 ppm می‌باشد (جدول 1).

با افزایش تفریق ماگمایی، میزان Rb نیز بالاتر می‌رود در آپاتیت‌های سنگهای مختلف مقدار آن بسیار پایین و تنها کمی بالاتر از حد آشکارسازی دستگاه (0/1 ppm) است، میانگین این عنصر در آپاتیت‌های هرمز 0/5 ppm می‌باشد. فراوانی عنصر زیرکونیوم (Zr) نیز در سنگهای مختلف بسیار جزئی (0/2-5 ppm) و در آپاتیت‌های هرمز به میزان کمتر از حد آشکارسازی (<1ppm) وجود دارد (جدول 1).

مقدار عنصر Y از چند ده ppm تا یک درصد با میانگین (1500 ppm) متغیر است، بیشترین میزان Y در آپاتیت‌های پگماتیت‌ها و کمترین میزان آن در لرزولیت‌ها و کربناتیت‌ها وجود دارد [5]. در واقع رابطه مستقیمی بین فراوانی عنصر Y و درجه تفریق ماگمایی وجود دارد [5]. در آپاتیت‌های هرمز میزان آن 1300-4960 ppm (جدول 1) است که با انواع تفریق‌یافته همخوانی دارد.

میزان U برای سنگهای مختلف بین 40-5 ppm تغییر می‌کند و متوسط آن 29 ppm می‌باشد. کمترین میزان اورانیوم از

1 - Crimean dolerite

2 - Kovdor

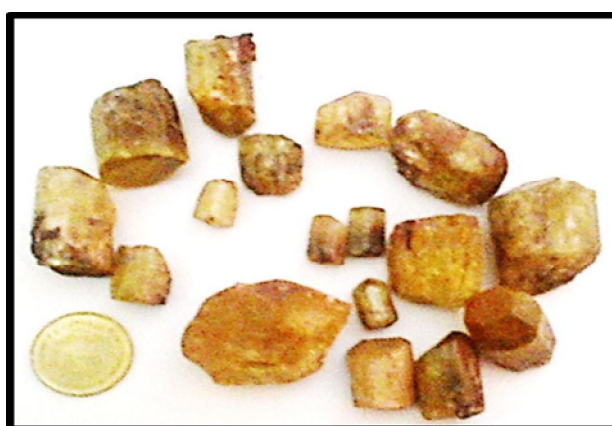
و عناصر ناسازگار از ماگماست [18]. مجموع REE در آپاتیت‌های هر مز 2/25%-1/22% می‌باشد.



شکل 4. نمونه‌های همزیست با آپاتیت شامل خاک سرخ و الیژیست



شکل 5. بزرگترین نمونه آپاتیت یافت‌شده در منطقه با ارزش گوهری



شکل 6. انواع مختلف آپاتیت موجود در منطقه با سیستم تبلور هگزگونال

جدول 1. نتایج تجزیه ICP-MS عناصر فرعی در آپاتیت‌های هرمز (بر حسب ppm)

sample	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Rb	0/7	0/4	0/5	0/7	0/6	0/6	0/6	0/5	0/4	0/6
Pb	8/3	7/7	7/7	7/7	0/2	7/9	8/1	7/8	8	7/7
Sr	334	290	318	375	307	308	316	304	289	339
La	4550	3660	4430	4940	4040	4560	4670	3830	2710	4940
Ce	8400	6620	8130	9000	7330	8290	8380	6830	4760	8950
Pr	964	781	945	1030	848	940	948	790	579	1020
Nd	3790	3080	3710	4040	3270	3690	3710	3120	2360	3970
Sm	691	550	673	730	584	667	655	545	385	709
Eu	60/8	48	59/1	64/9	51/3	58/8	57/4	47/3	36/2	62/2
Gd	865	663	828	898	717	834	791	658	503	850
Tb	126	94/5	120	130	102	119	114	92/9	65/4	123
Dy	674	495	643	692	542	633	592	489	360	650
Y	4460	2540	3880	4960	3180	3830	3430	2440	1300	4130
Ho	158	115	152	162	128	148	136	116	84/4	152
Er	418	301	402	429	335	391	358	305	217	403
Tm	46/3	32/4	44/9	48/5	37/1	43/1	39/6	33/4	22/8	45/6
U	2/78	2/72	2/75	2/86	2/72	2/69	2/72	2/71	2/75	2/68
Yb	316	198	304	325	240	287	252	204	133	307
Lu	31/8	21/6	31/9	33/1	25	29/2	26/3	22/1	13/9	31/2
Mn	99	84	84	87	86	84	86	83	83	83
Fe	1350	724	894	658	711	671	642	625	579	700
Zr	1>	1>	1>	1>	1>	1>	1>	1>	1>	1>
V	17	16	16	17	16	16	16	16	16	16
As	233	229	234	278	252	254	271	272	270	279

بحث

با ترسیم الگوی به‌هنجار شده عناصر REE آپاتیت‌های هرمز نسبت به کندریت‌ها (شکل 7) مشخص می‌شود که شیب این الگوها منفی و نشانگر غنی‌شدگی بیشتر LREE نسبت به HREE است. میزان $(Ce/Yb)_{cn}$ آپاتیت‌های معمول دنیا برابر 18 است [5]. آپاتیت‌های لرزولیتی و کربناتیتی دارای بیشترین شیب در الگوی REE هستند و میزان $(Ce/Yb)_{cn}$ برای لرزولیت‌ها برابر 57-273 و برای کربناتیت‌ها برابر 240-70 می‌باشد. این نسبت برای آپاتیت‌های گرانیتوئیدی برابر 9/6 و برای آپاتیت‌های دلریتی برابر 5/4 است. برای پگماتیت‌های گرانیتی نسبت $(Ce/Yb)_{cn}$ کمتر از 1 می‌اشد که نشان‌دهنده غنی‌شدگی از HREE و تهی‌شدگی از LREE

در این سنگهاست [5]. میزان $(Ce/Yb)_{cn}$ آپاتیت‌های هرمز 30 است که نشان می‌دهد در این منطقه تفریق به‌شدت پگماتیت‌ها رخ نداده است.

چون میزان عناصر کمیابی مثل Sr, Mn, As, Th و REE در آپاتیت‌های سنگهای مختلف متفاوت است می‌توان از این عناصر جهت تشخیص انواع سنگها استفاده کرد. شکل الگوی به‌هنجار شده نسبت به کندریت و میزان غنی‌شدگی از LREE نیز می‌تواند کمک زیادی به شناسایی سنگهای مختلف کند.

همان‌طور که ذکر شد SiO_2 سنگ کل به‌شدت در غلظت عناصر کمیاب تأثیرگذار است و میزان عناصر نادر خاکی با پیشرفت تفریق ماگمایی و افزایش میزان SiO_2 افزایش

لرزولیتی و بعضی گرانیوتوئیدها آنومالی مثبت ضعیف Eu دارند. با افزایش درجه تفریق در سنگها، دامنه آنومالی منفی Eu افزایش می‌یابد که می‌تواند به دلیل تبلور فلدسپارها باشد که Eu را از مذاب جدا کرده و در خود متمرکز می‌سازند [19]. نسبت Eu/Eu^* در آپاتیت‌های هرمز برابر 0/08 می‌باشد که نشانگر درجه تفریق بالاست.

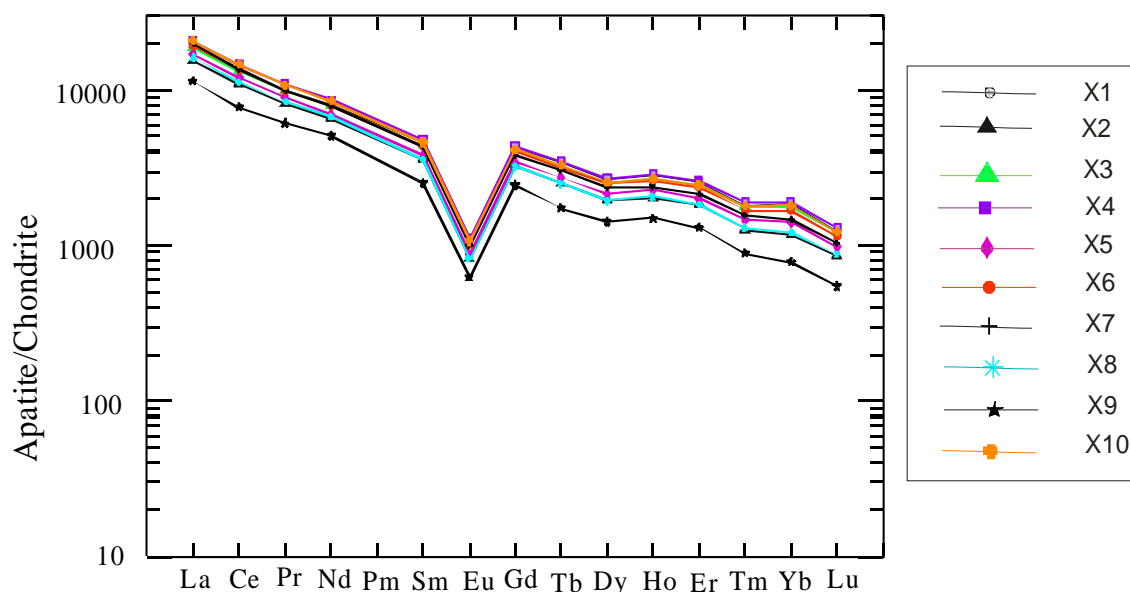
عناصر LREE و Th در سنگهای کمتر تفریق یافته متمرکز شده و برخی از کانیها مثل مونازیت عناصر LREE و Th را از مذابهای بسیار تفریق یافته جدا کرده و در خود متمرکز می‌سازند از این رو آپاتیت‌های سنگهای بسیار تفریق یافته تهی‌شدگی شدیدی در این عناصر نشان می‌دهند. دلیل بالا بودن LREE در آپاتیت‌های سنگهای تفریق یافته هرمز، عدم تبلور مونازیت در منطقه است.

برای تشکیل مونازیت باید بخشی از آپاتیت در سیال حل شود تا فضای لازم جهت هسته‌بندی و رشد مونازیت ایجاد گردد و همچنین سیال باید قابلیت انتقال P, Ca و ایجاد تعادل جرمی را داشته و درجه حرارت باید از $850^{\circ}C$ بیشتر باشد. تبلور مونازیت با تهی‌شدگی $HREE+Na+Si+Y$ از آپاتیت و شست‌وشوی¹ آپاتیت همراه می‌باشد. وجود NaCl در سیال باعث پایداری Na و LREE در آپاتیت و تأخیر در تبلور مونازیت می‌شود.

می‌یابد. به دلیل ورود به شبکه پلاژیوکلازها غلظت Sr آپاتیت‌ها به سمت سنگهای فلسیک‌تر کاهش می‌یابد. فراوانی Y, HREE در سنگهای تفریق یافته‌تر بیشتر است چون به صورت عناصر ناسازگار عمل می‌کنند. در واقع با افزایش درجه تفریق سنگ میزبان، غنی‌شدگی در Y, HREE و Mn و تهی‌شدگی در Sr دیده می‌شود. بنابراین افزایشی در محتوای Mn و Y آپاتیت‌های کربناتیت‌ها و لرزولیت‌های مشتق شده گوشته حدود 100 ppm و در آپاتیت‌های به شدت تفریق یافته گرانیوتوئیدها و پگماتیت‌ها تا تقریباً 1% است [5].

آپاتیت‌های هرمز بی‌هنجاری منفی Ce مشخصی نشان نمی‌دهند اما ذخایر آهنی آنومالی منفی Ce نشان می‌دهند ($Ce/Ce^*=0.68-0.74$). آپاتیت‌های سنگهای گرانیوتی بی‌هنجاری مثبت ضعیفی از Ce با نسبت $Ce/Ce^*=1.3$ دارند (1.5).

در آپاتیت‌های هرمز آنومالی مثبت Ce وجود دارد و نسبت Ce/Ce^* برابر 3 می‌باشد. در مقابل آنومالی مثبت Ce، آنومالی منفی قوی Eu در آپاتیت‌ها (با میانگین $Eu/Eu^*=0.41$) متداول است. آپاتیت‌های کربناتیت‌ها آنومالی منفی ضعیف Eu (با نسبت $Eu/Eu^*=0.7-0.9$)، آپاتیت‌های پگماتیت‌ها آنومالی قوی منفی (با نسبت $Eu/Eu^*=0.04-0.25$)، گرانیوتوئیدها نسبت $Eu/Eu^*=0.4$ و آپاتیت‌های



شکل 7. موقعیت نمونه‌های منطقه جزیره هرمز در نمودار عنکبوتی REE آپاتیت‌های هرمز که نسبت به کندریت‌ها به‌هنجار شده‌اند. میزان LREE نسبت به HREE این آپاتیت‌ها بالا بوده و بی‌هنجاری منفی قابل توجهی در عنصر Eu وجود دارد.

تفریق‌یافته و پگماتیت‌هاست [5] (شکل 8 پ). میزان بالای نسبت LREE/HREE در آپاتیت‌های هرمز نشان‌دهنده غنی‌شدگی LREE و تفریق‌شدگی در حد گرانیوتوئید است. در نمودار Y در برابر Eu/Eu^* دو محدوده برای آپاتیت‌های گرانیتی و پگماتیته وجود دارد (شکل 8 پ) و این می‌تواند نشان‌دهنده نسبت Kfs/Pl در سنگهای میزبان باشد. هر دو نوع فلدسپار، مقادیر زیادی Eu را در خود جای می‌دهند اما چون Eu جانشین Sr و Ca می‌شود تمایل پلاژیوکلازها بیشتر از پتاسیم فلدسپارها است. نمونه‌های هرمز در محدوده گرانیوتوئیدهای با نسبت $Eu/Eu^*=0.08$ پایین قرار گرفته‌اند. بنابراین از تمام نمودارهای 9 مشخص می‌شود آپاتیت‌های هرمز به گرانیوتوئیدها تعلق دارند.

تعیین حالت اکسیداسیون ماگما

عناصر زیادی از جمله Mn, Ce, Eu با ظرفیتهای متفاوت وارد ساختمان آپاتیت می‌شوند. آنومالی Eu به‌شدت توسط تبلور جدایشی فلدسپار کنترل می‌شود. آنومالی قابل ملاحظه مثبت یا منفی Ce در آپاتیت‌ها نادر است [5].

میزان Mn در آپاتیت‌های ماگماهای احیایی بیشتر است و طی پیشرفت تفریق میزان این عنصر نیز به‌صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. بین میزان Mn در آپاتیت‌ها و نسبت Fe_2O_3/FeO در ماگمای میزبان، همبستگی منفی واضحی وجود دارد. میزان Mn در آپاتیت‌های هرمز نشان‌دهنده میزان تفریق ماگمایی متوسط است. از روی ترکیب شیمیایی آپاتیت می‌توان نسبت Fe_2O_3/FeO را به کمک نمودارهای مختلف تخمین زد. در تمام نمودارها (شکل 9) آپاتیت‌های هرمز به گروه 2 تعلق دارند که نشان‌دهنده میزان بالای نسبت Fe_2O_3/FeO می‌باشد.

بین REE و درجه اکسیداسیون ماگما رابطه مناسبی وجود دارد. آپاتیت‌های سنگهای اکسیده‌تر نسبت Y/REE و همچنین میزان Ce/Th پایینی دارند. این نتایج بدون لحاظ کردن درجه تفریق سنگ مشخص می‌شود. از آنجا که آپاتیت‌های هرمز میزان پایین این نسبتها را دارا هستند می‌توان نتیجه گرفت که آنها از ماگمایی اکسیده به‌وجود آمده اند (شکل 9). البته سایر فازهای فرعی مانند آلانیت در گرفتن HREE و Fe^{3+} نیز مؤثر هستند و مطالعه ترکیب سایر فازها در ارتباط با آپاتیت برای تشخیص این مطلب مفید است.

دو شرط اساسی برای تبلور موناژیت در آپاتیت وجود دارد 1- مجموع $Y+REE$ باید زیاد باشد ($>0.2-0.3 \text{ wt}\%$) 2- ترکیب سیال اجازه واکنشها را بدهد. در هرمز کانی موناژیت مشاهده نمی‌گردد که نشان می‌دهد این شرایط در منطقه وجود نداشته است.

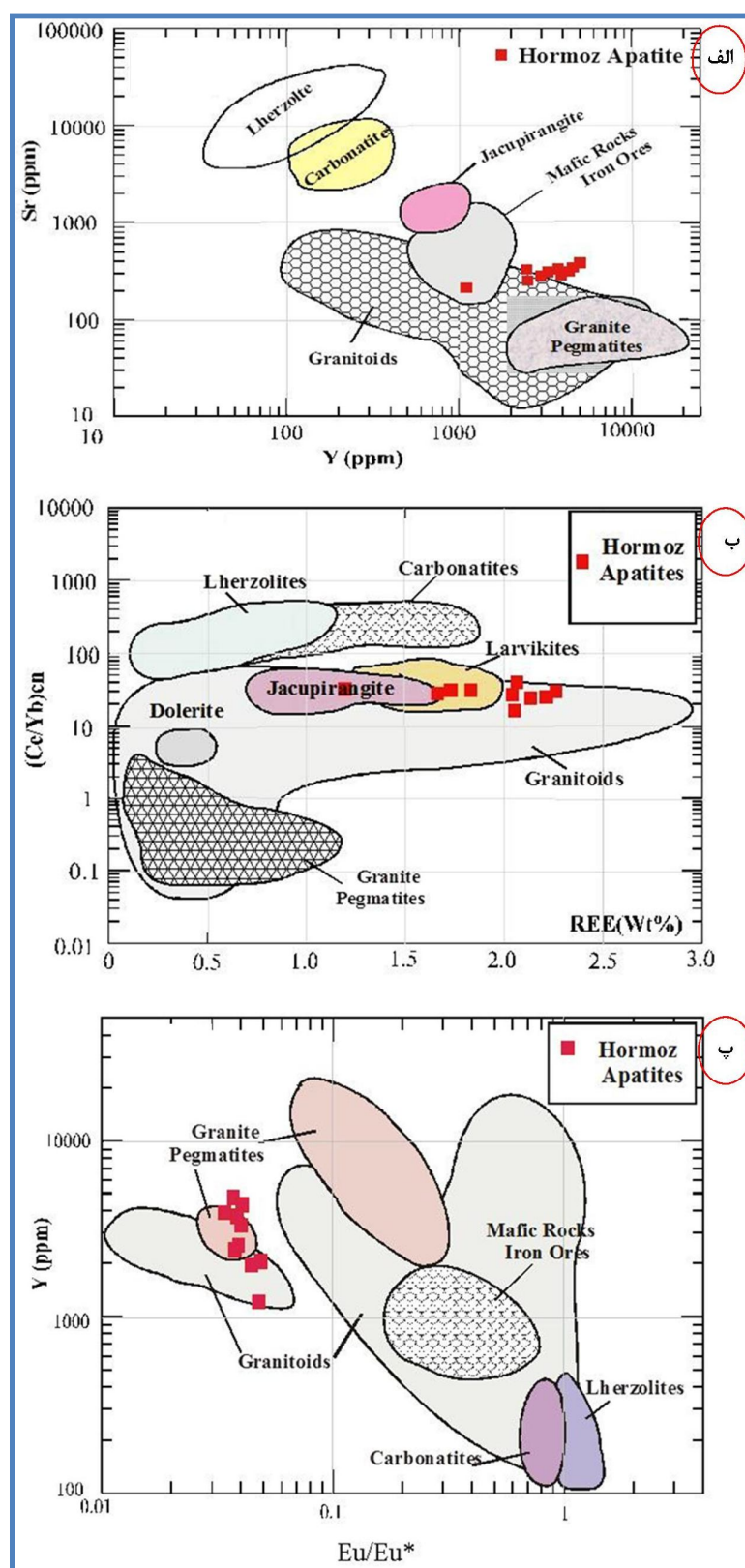
نمودارهای متمایزکننده

براساس نمودارهای Sr در مقابل Y و Mn و همچنین نمودار $(Ce/Yb)cn$ در مقابل REE و نمودار Y در مقابل Eu/Eu^* می‌توان محدوده‌های ترکیبی مشخصی از آپاتیت‌ها را برای گروه‌های مختلف سنگی مشخص کرد [5] (شکل 8). نسبت Sr در برابر Y شامل محدوده گسترده‌ای است که همبستگی منفی شدیدی دارند چرا که با افزایش درجه تفریق ماگمایی میزان Sr کاهش اما میزان Y افزایش می‌یابد (شکل 8 الف). میزان Sr در آپاتیت‌های هرمز نسبتاً بالاست که می‌تواند به‌علت عدم تبلور پلاژیوکلاز در مراحل ابتدایی تفریق باشد. این امر باعث شده است تا استرانسیم که در ساختمان پلاژیوکلاز جمع می‌شود در ماگما باقی مانده و هنگام تبلور آپاتیت در ساختمان این کانی نیز وارد شود.

نمودار $(Ce/Yb)cn$ در مقابل ΣREE برای جداسازی آپاتیت‌ها از انواع مختلف سنگی مناسب است. میزان $(Ce/Yb)cn$ و شیب الگوی REE از سنگهای مافیک/الترامافیک (مثل کربناتیت) تا سنگهای مافیک، حدواسط، گرانیوتوئیدها و سنگهای به‌شدت تفریق‌یافته مثل پگماتیت‌ها کاهش می‌یابد. این هم‌سویی با میزان ΣREE ارتباط واضح و مشخصی ندارد چون غنی‌شدگی از LREE مشخصه آپاتیت پریدوتیت‌های مشتق‌شده از گوشته و کربناتیت‌ها و تهی‌شدگی LREE نسبت به HREE مشخصه آپاتیت‌های تفریق‌یافته گرانیوتوئیدها و پگماتیت‌های گرانیتی است [5].

در نمودار $(Ce/Yb)cn$ در مقابل ΣREE (شکل 8 ب) مشاهده می‌شود نسبت $(Ce/Yb)cn$ در آپاتیت‌های هرمز بالاتر از این نسبت در گرانیته‌ها و به‌خصوص پگماتیت‌هاست و بیان می‌کند که تفریق ماگمایی در هرمز به‌شدت گرانیته‌های معمولی و پگماتیت‌ها رخ نداده است.

میزان بالای HREE و نسبت پایین LREE/HREE در سنگهای تفریق‌یافته بازتاب‌کننده میزان بالای Y است. کمترین میزان Y در آپاتیت‌های پریدوتیت‌های مشتق‌شده از گوشته و کربناتیت‌ها و بالاترین میزان آن در سنگهای گرانیتی

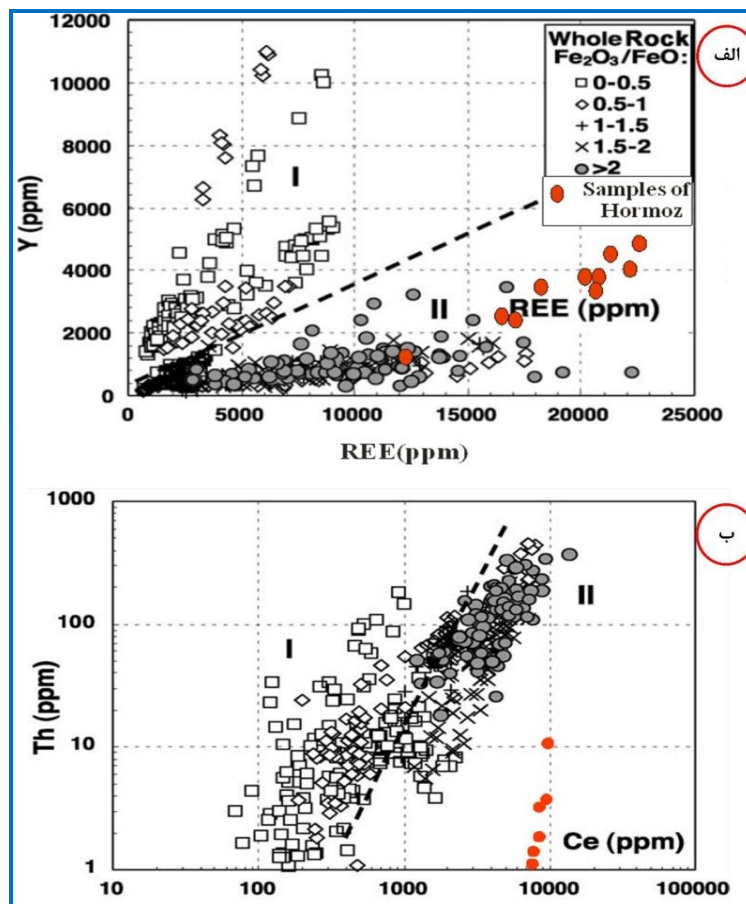


شکل 8. استفاده از عناصر فرعی آپاتیت‌ها جهت تشخیص انواع مختلف سنگها از یکدیگر (الف) نمودار Sr/Y (ب) نمودار Ce/Yb در مقابل مجموع REE (پ) نمودار Y در برابر Eu/Eu^* [5].

شیمیایی کل سیستم از مؤلفه‌هایی هستند که ترکیب شیمیایی کانی را در یک سیستم ماگمایی تعیین می‌کنند. در واقع ترکیب شیمیایی کانی می‌تواند انعکاس‌دهنده اطلاعات مهمی از شدت تأثیر این شرایط باشد. چون آپاتیت در هر دو نوع گرانیت I و S وجود دارد و مقادیر معتدله‌ای از عناصر کمیاب و فرعی دارد، می‌توان برای تعیین پتروژنز گرانیت‌ها از آن استفاده کرد. گرانیتوئیدهای نوع I فلسیک و S از نظر میزان عناصر اصلی، فرعی و کمیاب مشابه هم هستند.

تعیین نوع گرانیتوئیدهای هرمز

سنگ منشأ و فرآیندهای گوناگون ماگمایی، تأثیر بسیار زیادی بر ترکیب ماگمای گرانیتی می‌گذارند [20]. گرانیت‌های S و I از دو منبع آذرین و رسوبی به‌وجود آمده‌اند. این دو نوع گرانیت تفاوت‌های مشخص شیمیایی، کانیایی و پترولوژیکی دارند که ناشی از تفاوت اساسی در ترکیب شیمیایی منشأ و به میزان کمتر شرایط فیزیکی شیمیایی می‌باشد. به‌طور کلی حرارت، فشار، فوگاسیته اکسیژن، اکتیویته و ترکیب فازهای همزیست (مذاب، بخار، سیال و سایر کانیها) و ترکیب



شکل 9. تقسیم‌بندی آپاتیت‌ها طبق میزان Fe_2O_3/FeO گروه 1 $I = Fe_2O_3/FeO < 1$ و گروه 2 $II = Fe_2O_3/FeO > 1$ (الف) Y در مقابل مجموع REE و (ب) Th در مقابل Ce. آپاتیت‌های هرمز در گروه 2 قرار می‌گیرند.

زیاد شدن Rb به‌ترتیب در سنگ منشأ نوع S و مذاب باقی‌مانده شوند [20] آنومالی منفی Eu نیز مؤید تفریق کم پلاژیوکلازهاست.

در گرانیتوئیدهای نوع S نسبت Ce/Y ، Ce/Dy و Ce/Nd کمتر از نوع I است. میزان این نسبتها در آپاتیت‌های هرمز بالا بوده و ترکیب گرانیتوئیدهای هرمز به نوع I مافیک نزدیک

فراوانی عنصر Sr در گرانیتوئیدهای نوع I بین 400-110 ppm و در گرانیتوئیدهای نوع S کمتر از 150 ppm می‌باشد. در آپاتیت‌های هرمز میزان این عنصر 370-280 ppm می‌باشد که به ترکیب نوع I نزدیکتر است و عدم تبلور قابل ملاحظه پلاژیوکلاز می‌تواند دلیل فزونی Sr در آپاتیت باشد. هوازدگی و تبلور تفریقی می‌تواند باعث کم شدن Sr و

محدب رو به بالا همراه با تهی‌شدگی بیشتر از Eu و با آنومالی منفی Nd است. نمودار عنکبوتی آپاتیت‌های هرمز مشابه گرانیتوئیدهای نوع I هستند (شکل 2).

نتیجه‌گیری

1- کانی آپاتیت تنها کانی فسفات در منطقه است که عناصر نادر خاکی را در خود متمرکز ساخته است.

2- بی‌هنجاری عنصر Eu به‌ویژه در مذاب حدواسط - فلسیک توسط دو عامل فوگاسیته اکسیژن در ماگما و تبلور فلدسپارها کنترل می‌گردد. چنانچه فوگاسیته اکسیژن کم باشد اروپیم به‌صورت دو ظرفیتی وارد ساختمان پلاژیوکلاز می‌شود. در حالی که در فوگاسیته بالای اکسیژن این عنصر اکسید شده و به شکل اروپیم سه ظرفیتی در می‌آید که نمی‌تواند وارد ساختمان پلاژیوکلاز و یا کانیه‌های دیگر مانند آپاتیت شود که این عنصر را با ظرفیت دو بار مثبت در ساختمان خود می‌پذیرند. چنانچه در بالا بیان شد آپاتیت‌های هرمز به گروهی تعلق دارند که نشان‌دهنده میزان بالای نسبت Fe_2O_3/FeO و در نتیجه فوگاسیته بالای اکسیژن هستند. این امر موجب شده است تا اروپیم نتواند به صورت یون دو بار مثبت وارد ساختمان آپاتیت شود و در نتیجه آنومالی منفی نشان می‌دهد.

3- عناصر نادر خاکی در ضمن فرآیندهای ماگمایی دچار تفکیک می‌شوند. آپاتیت‌های هرمز دارای غنی‌شدگی از عناصر نادر خاکی سبک هستند و نسبت LREE/HREE بالایی دارند شیب نمودار به‌هنجار شده نسبت به کندریت در آپاتیت‌های هرمز منفی است.

4- میزان عناصر اصلی و فرعی و عناصر نادر خاکی در آپاتیت‌های هرمز نشان‌دهنده درجه تفریق ماگمایی متوسط در منطقه است.

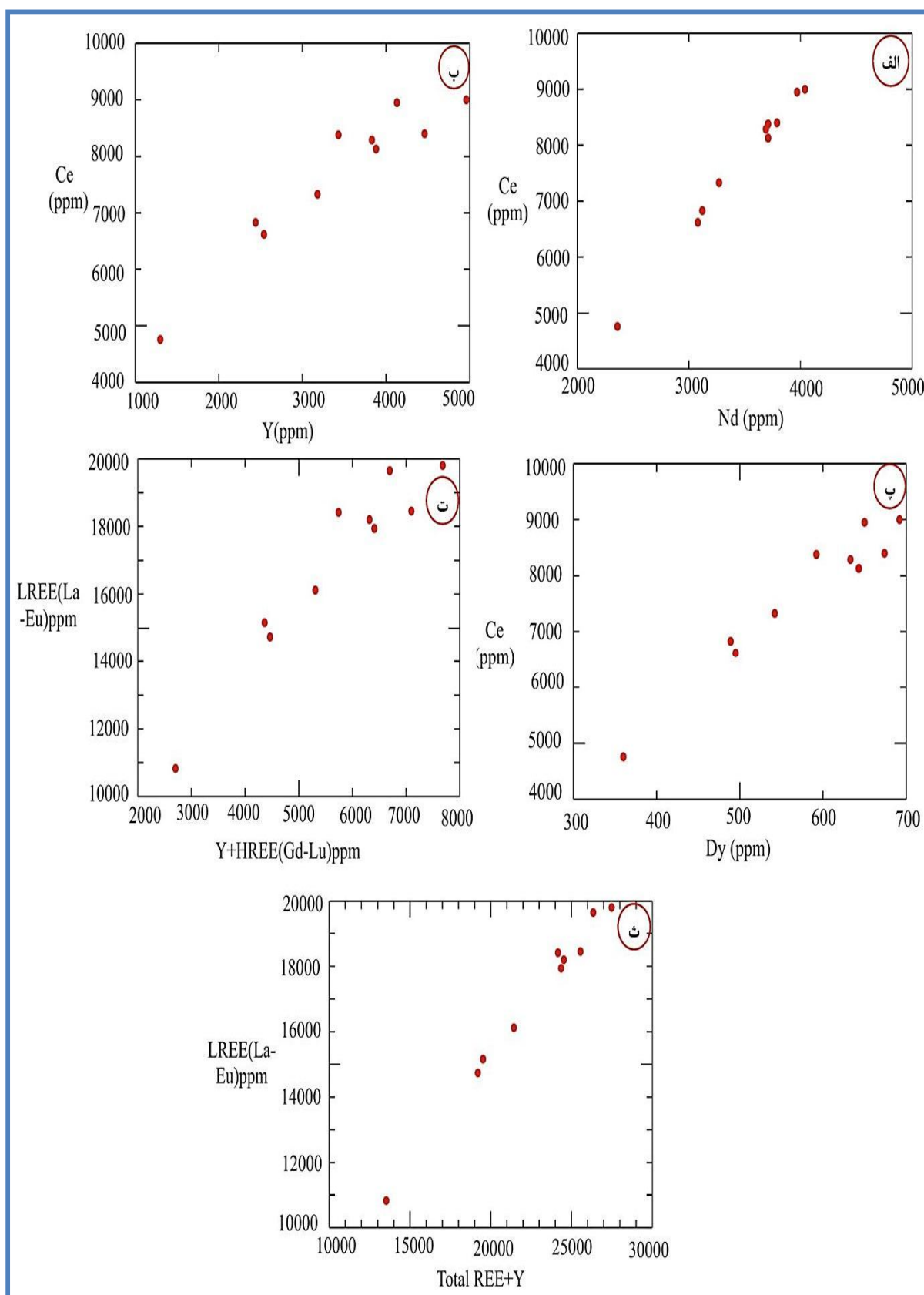
5- مجموع REE در آپاتیت‌های هرمز 1/22-2/25 می‌باشد و این نشانه جدایش نسبتاً بالای مواد فرار و فلزات و عناصر ناسازگار از ماگمای مولد است.

6- مقادیر U و Th در آپاتیت‌های هرمز بسیار پایین است که یا به دلیل منشأ گرفتن از ماگمای مادر فقیر از این عناصر است و یا U و Th وارد ساختار کانیه‌های دیگری شده که قبل از آپاتیت تبلور شده‌اند. کانیه‌های همزیست با آپاتیت در هرمز کوارتز، هماتیت، ارتوکلاز و بیوتیت می‌باشند ولی احتمال

می‌باشد (شکل 10 الف، ب و پ). گرانیتوئیدهای نوع I دارای نسبت LREE/HREE بیشتر از $(1/9-7/9)$ $I>1.9$ و گرانیتوئیدهای نوع S کمتر از 1/9 هستند در آپاتیت‌های هرمز این نسبت 7/4 است که با نوع I همپوشانی دارند (شکل 10 ت و ث).

آپاتیت‌های موجود در گرانیتوئیدهای نوع I نسبت به نوع S از LREE غنی‌تر هستند که دلیل آن ارتباطی به تفاوت سنگ کل ندارد بلکه علت، توزیع این عناصر بین فازهای مختلف REE دار است. بزرگترین میزبانهای REE در گرانیتوئیدهای نوع I آپاتیت، تیتانیت، زیرکن و آلانیت و برای نوع S زیرکن، آپاتیت، زنونیم و موناژیت می‌باشند. توانایی رقابت برای گرفتن عناصر در یک کانی عامل اصلی مقدار مطلق REE در آن کانی است. ماگماهای نوع S پرآلومینوس و احیایی تر با فوگاسیته پایین‌تر اکسیژن و نسبت کمتر Ce^{4+}/Ce^{3+} هستند. از این رو موناژیت پایدار و سنگ به‌سرعت از این کانی اشباع می‌گردد.

در آپاتیت‌های نوع S عناصر LREE بیشتر وارد ساختمان موناژیت می‌شوند که زودتر متبلور شده‌اند در نتیجه مذاب باقی‌مانده از این عناصر تهی می‌شود. حلالیت موناژیت با مقدار اشباعی از آلومینیوم نسبت عکس دارد. ولی آپاتیت‌های گرانیتوئیدهای نوع I اکسیدی تر و متآلومین هستند، موناژیت در گرانیتوئیدهای این نوع پایدار نیست. افزایش کلسیم در گرانیتوئید نوع I به اشباع شدگی سریع از آپاتیت منجر می‌شود که REE را از مذاب می‌گیرد و در نتیجه تبلور موناژیت به تأخیر می‌افتد. در این سنگها موناژیت فقط در مراحل پایانی که مذاب باقی‌مانده از Ca تهی‌شده و ماگما ترکیب فلسیک پیدا کرده است، متبلور می‌شود. بنابراین با استفاده از ترکیب آپاتیت، انواع مختلف گرانیت‌ها از هم تشخیص داده می‌شوند. برای مثال الگوی REE، نسبت‌های REE، و درجه تهی‌شدگی از Eu برای انواع گرانیت‌ها خاص است، همچنین صفات شیمیایی آپاتیت از آلومینوسیته (اشباع از آلومینابودن) مذاب تبعیت می‌کند. از نظر پرآلومین بودن گرانیتوئیدهای نوع S و I تقریباً مشابه (نوع S پرآلومین‌تر هستند) ولی گرانیتوئید نوع I مافیک متآلومین است بنابراین میزان آلومینیوم عاملی برای تفکیک گرانیتوئیدهاست [9]. نمودار عنکبوتی REE برای آپاتیت‌های گرانیتوئیدهای نوع I خطی با شیب منفی (نسبت بالاتر LREE) و برای نوع S



شکل 10. رفتار عناصر جزئی در آپاتیت‌های موجود در گرانیتوئید نوع I جزیره هرمز الف) نمودار Ce در مقابل Nd ب) نمودار Ce در مقابل Y پ) نمودار Ce در مقابل Dy ت) نمودار LREE در مقابل Y+HREE ث) نمودار LREE در مقابل total REE

"Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace-element compositions and their relationship to host rock type", *Journal of Geochemical Exploration* 76 (2002) 45–69.

[6] Ayers J. C., Watson E. B., "Apatite/fluid partitioning of rare-earth elements and strontium: experimental results at 1.0 GPa and 1000 °C and application to models of fluid– rock interaction", *Chemical Geology* 110 (1993) 299–314.

[7] Roder P. L., Macarthur D., Xin-Pei M., Palmer G. R., Mariano A. N., "Cathodoluminescence and microprobe study of rare earth elements in apatite", *American Mineralogist* 74 (1987) 896–901.

[8] Belousova E. A., Walters S., Griffin W. L., O'Reilly S. Y., "Trace element signatures of apatites from granitoids of Mount Isa Inlier, north-west Queensland, Australia", *Australian Journal of Earth Sciences* 48 (2001) 603–619.

[9] Sha L. K., Chappell B. W., "Apatite chemical composition, determined by electron microprobe and laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, as a probe into granite petrogenesis", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63 (1999) 3861–3881.

[10] Belousova E. A., "Trace elements in zircon and apatite: application to petrogenesis and mineral exploration", PhD thesis. Macquarie University, Australia (2000) 310 p.

[11] Blanford N. T., "Note on the geological formation seen along the coasts of Baluchistan and Persia from Karachi to the head of Persian Gulf", *Geological Survey of India* 5 (1872) 5–41.

[12] الیاسی ج، امین سبحانی ا، بهزاد ع، معین وزیری ج، میثمی ع، "زمین‌شناسی جزیره هرمز"، مجموعه مقالات دومین سمپوزیم زمین‌شناسی ایران (1355) ص 31–72.

[13] احمدزاده هروی م، هوشمندزاده ع، نبوی م ج، "مفاهیم جدیدی از چینه‌شناسی سازند هرمز و مسأله دیاپیریسم در گنبد‌های نمکی جنوب ایران"، مجموعه مقالات سمپوزیوم دیاپیریسم با نگاهی ویژه به ایران (1369) ص 1–22.

[14] Richardson R. K., "Die Geologie und die Salzdoms in sud-Westlichen des Persischen Golfes: Verh. Naturh-med", Ver Teile Heidelberg D. S 15 (1972).

[15] O'Reilly S. Y., Griffin W. L., "Apatite in the mantle: implications for metasomatic processes and high heat production in Phanerozoic mantle", *Lithos* 53 (2000) 217–232.

می‌رود این عناصر در کوارتزهای دودی با حاشیه سوخته (که به‌صورت رگه‌ای در منطقه وجود دارند) تمرکز یافته باشند.

7- نمودارهای Sr در مقابل Y و Mn و همچنین نمودار (Ce/Yb)cn در مقابل REE و نمودار Y در مقابل Eu/Eu^* محدود ترکیبی آپاتیت‌های هرمز را آپاتیت‌های مرتبط با گرانیتوئیدها نشان می‌دهند.

8- در گرانیتوئیدهای نوع S نسبت Ce/Y، Ce/Dy و Ce/Nd کمتر از نوع I است میزان این نسبتها در آپاتیت‌های هرمز بالاست، در گرانیتوئیدهای نوع I نسبت LREE/HREE بیشتر است، با توجه به میزان 7 به 4 این نسبت در آپاتیت‌های هرمز، گرانیتوئیدهای هرمز از نوع I مافیک می‌باشند.

9- نسبت Fe_2O_3/FeO در آپاتیت‌های هرمز بالاست در نتیجه طبق نمودارهای مربوطه، آنها به گروه دو تعلق دارند و اکسیدی‌تر هستند .

قدردانی

این مقاله حاصل طرح پژوهشی "بررسی ژئوشیمی عناصر نادر خاکی در آپاتیت‌های جزیره هرمز" است؛ بنابراین نویسندگان لازم می‌دانند تا از حوزه پژوهشی دانشگاه پیام نور استان هرمزگان که هزینه انجام این پروژه را تأمین کردند، تشکر کنند، همچنین از شرکت سیمان خمیر که آنالیزهای XRF را انجام دادند قدردانی می‌شود. از سردبیر مجله زمین‌شناسی اقتصادی و همچنین داوران محترم که راهنمایی‌های ارزنده‌ای کردند کمال تشکر و سپاس را داریم.

منابع

[1] Fleet M. E., Pan Y., "Site preference of rare earth elements in fluorapatite", *American Mineralogist* 80 (1995) 329–335.

[2] Bea F., Fershtater G., Corretge L.G., "The geochemistry of phosphorus in granite and the effect of aluminum", *Lithos* 29 (1992) 43–45.

[3] میسون ب، مر ک. ب، (مترجم مرف، شرفی ع ا)، "اصول ژئوشیمی"، انتشارات دانشگاه شیراز (1382) 566 ص.

[4] رولینسون ه، (مترجم کریم زاده ثمرین ع)، "کاربرد داده‌های ژئوشیمیایی: ارزیابی، نمایش، تفسیر"، انتشارات دانشگاه تبریز (1391) 557 ص.

[5] Belousova E. A., Walters S., Suzanne Y., Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Fisher N. I.,

intrusion", *American Mineralogist* 57 (1972) 877-886.

[19] Budzinski H., Tischendorf G., "Distribution of REE among minerals in the Hercynian post kinematic granites of West Erzgebirge- Vogland, GDR. Z", *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften* 17 (1989) 1019– 1031.

[20] Chappell B. W., "Aluminum saturation in I and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites", *Lithos* 46 (1999) 535-551.

[16] Coulson I. M., Chambers A. D., "Patterns of zonation in rare-earth-bearing minerals in nepheline syenites of the North Qo^oroq Center, South Greenland", *The Canadian Mineralogist* 34 (1996) 1163–1178.

[17] Rønsbo J. G., "Coupled substitutions involving REEs and Na and Si in apatites in alkaline rocks from the Ilimaussaq intrusion, South Greenland, and the petrological implications", *American Mineralogist* 74 (1989) 896– 901.

[18] Nash W. P., "Apatite chemistry and Phosphorus fugacity in a differentiated igneous

