

# کانی‌شناسی و ژئوشیمی عناصر خاکی کمیاب در کانسارهای اکسید آهن - آپاتیت ناحیه زنجان

قاسم نباتیان<sup>۱</sup> و مجید قادری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، بخش زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، بخش زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۹/۰۱

## چکیده

کانسارهای اکسید آهن - آپاتیت، از ذخایر مهم عناصر خاکی کمیاب به‌شمار می‌روند. کانی‌زایی عناصر خاکی کمیاب در ناحیه زنجان، همراه با کانسارهای مگنتیت - آپاتیت سرخه‌دیزج، علی‌آباد، مروارید، ذاکر، اسکند و گلستان آباد دیده می‌شود. این ناحیه از دید ساختاری در پهنه البرز باختری - آذربایجان و زیرپهنه طارم قرار دارد. بیشتر سنگ‌های ناحیه، مربوط به واحدهای گدازه‌ای انوسن و شامل الیون‌بازالت، تراکی‌آندزیت، آندزیت و به مقدار فراوان سنگ‌های آذرآواری به‌ویژه توف است که در طی انوسن بالایی توسط توده‌های نفوذی با ترکیب میکرو کوآرتزدیوریت پورفیری و کوآرتزومونونیت تا کوآرتزومونوزدیوریت قطع شده‌اند. کانی‌زایی مگنتیت - آپاتیت ناحیه زنجان در ارتباط با سنگ‌های نفوذی با ترکیب کوآرتزومونونیت تا کوآرتزومونوزدیوریت است و بیشتر به شکل رگه‌ای و داربستی (رگه - رگچه‌های نامنظم مگنتیت - آپاتیت) دیده می‌شود. در همه کانسارهای مگنتیت - آپاتیت ناحیه، بلورهای آپاتیت همراه با مگنتیت است و اندازه آنها در برخی موارد به بیش از ۲۰ سانتی‌متر می‌رسد. موناژیت مهم‌ترین کانی عناصر خاکی کمیاب در این ذخایر است که به‌صورت میانبار (انکلوزیون) در آپاتیت تمرکز پیدا کرده است. محتوای مجموع REE در کانی آپاتیت این کانسارها ۰/۴ تا ۱/۶ درصد است. مطالعات انجام‌شده، بیانگر غنی‌شدگی این کانسارها از عناصر خاکی کمیاب سبک (LREE) نسبت به عناصر خاکی کمیاب سنگین (HREE) است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد کانی‌سازی مگنتیت - آپاتیت در ناحیه زنجان از ماگمای کوآرتزومونونیتی با ترکیب کالک‌آلکانل که در موقعیت زمین‌ساختی کمان‌های ماگمایی قرار دارد، تشکیل شده است. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در ناحیه زنجان، کانسارهای مگنتیت - آپاتیت این ناحیه در گروه پتانسیل‌های مهم تمرکز REE در ایران به‌شمار می‌آیند.

**کلیدواژه‌ها:** کانی‌زایی مگنتیت - آپاتیت، البرز باختری - آذربایجان، عناصر خاکی کمیاب، کالک‌آلکانل، زیرپهنه طارم.

E-mail: mghaderi@modares.ac.ir

\*نویسنده مسئول: مجید قادری

## ۱- پیش‌گفتار

کانساری و سنگی (آذرین، رسوبی و دگرگونی) تشکیل شوند (شکل ۱) (Sawka et al., 1990; Harben & Kuzvart, 1996; Jones et al., 1996; Christie et al., 1998). به‌طور کلی، کانسارهای عناصر خاکی کمیاب شامل کربناتیت‌ها، پلاسرها، سنگ‌های آذرین پرآلکانل گرانیتی و سینیتی، کانسارهای آهن دارای REE، پگماتیت‌ها، رگه‌های فلورین و کوآرتز گرمابی، کانسارهای اسکارن، لاتریت‌های بازماندی غنی در REE و کانسارهای بازماندی REE هستند. معادن عظیم آنها در برزیل، رودزیا، آفریقای جنوبی، اسکاندیناوی، کانادا، هندوستان، اوگاندا و روسیه قرار دارد. در این مناطق، ذخایر عناصر خاکی کمیاب به سنگ‌های آلکالی و کربناتیت‌ها و گاهی معادن آهن وابسته‌اند.

با وجود ناشناخته بودن عمومی عناصر خاکی کمیاب، این عناصر کاربردهای بسیار گوناگون و ضروری دارند. ویژگی‌های گوناگون هسته‌ای، شیمیایی، متالورژی، کاتالیزور، الکتریکی، مغناطیسی و نوری این عناصر، سبب افزایش گوناگونی کاربردهای این مواد در دنیا شده است.

با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی و خاستگاه این عناصر، یعنی همراهی با سنگ‌های کربناتیت و کانسارهای آپاتیت منشأ آذرین، مگنتیت‌های آپاتیت‌دار و یا سنگ‌های قلیایی غنی از کانی‌های فلدسپاتویدی، نباید احتمال وجود منابع و ذخایر این گونه عناصر را در ایران از نظر دور داشت. در ایران هم کانسارهای آپاتیت - مگنتیت و هم کانسارهای مگنتیت آپاتیت‌دار و هم نشانه‌هایی از سنگ‌های کربناتیت (Waters & Alavi (1973) به وجود احتمالی کربناتیت در جزیره زراکوه خلیج فارس اشاره کردند) و قلیایی قوی (سنگ‌های قلیایی منطقه کلبدر در آذربایجان شرقی (حاجی‌علی‌اوغلی و مؤذن، ۱۳۸۸)، سنگ‌های قلیایی در شمال ایران در منطقه املش (زعیم‌نیا و همکاران، ۱۳۸۹) و همچنین سنگ‌های قلیایی جنوب ایران در جزیره هرمز) وجود دارد که می‌توانند امیدهای اکتشافی این ذخایر باشند، ولی

عناصر خاکی کمیاب (REE) در جدول تناوبی، جزو عناصر سری 4f به‌شمار می‌روند. این عناصر دارای اعداد اتمی ۵۷ تا ۷۱ هستند که عنصر ایتیریم (Y) با عدد اتمی ۳۹ نیز در میان آنها قرار می‌گیرد. عناصر یادشده معمولاً به ۲ گروه تقسیم می‌شوند (Jones et al., 1996) که عبارتند از:

- گروه سریم شامل عناصر La, Ce, Pr, Nd, Sm و Eu که با نام عناصر خاکی کمیاب سبک نامیده و با علامت اختصاری LREE و یا TRCe مشخص می‌شوند.  
- گروه ایتیریم شامل عناصر Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb و Lu که به عناصر خاکی کمیاب سنگین موسومند و با علامت اختصاری HREE و یا TRY مشخص می‌شوند.

در میان این دو سری، گروه سریم نسبت به گروه ایتیریم درجه‌ناسازی بالاتری دارند، بنابراین تمایل دارند که در محصولات پایانی تفریق ماگمایی تجمع یابند. این امر در الگوی فراوانی این عناصر در نمودارهای عنکبوتی نیز مشخص است (Henderson, 1984).

کانسارهای عناصر خاکی کمیاب در گستره پهناوری از موقعیت‌های ژئودینامیکی زمین‌شناسی، هم به‌صورت همزاد (syngenetic) و هم به‌صورت پسین‌زاد (epigenetic) تشکیل می‌شوند. در حال حاضر، تمرکز اصلی بررسی‌ها و مطالعات در این ذخایر، بیشتر روی کانسارهای REE پلاسری و کربناتیتی است (Giere, 1996)، به‌طوری‌که کانسارهای پلاسری موناژیت تا اواسط دهه ۱۹۶۰، مهم‌ترین منبع تولید عناصر خاکی کمیاب بوده است. پس از سال ۱۹۶۴، کانسارهای کربناتیتی مهم‌ترین منبع تولید REE به‌شمار آمدند. تمرکز اصلی در آن زمان روی این کانسارها، به‌دلیل داشتن عیار بالا و معدنکاری آسان در آنها بوده است. اگر چه ذخایر پلاسری و کربناتیتی، مهم‌ترین منبع تولید REE در طول تاریخ به‌شمار می‌آمده‌اند، ولی ذخایر غنی در عناصر خاکی کمیاب می‌توانند در انواع موقعیت‌های زمین‌ساختی،

Moinvaziri, 1985) که در موقعیت‌های زمین‌ساختی کمان ماگمایی و پشت کمانی در یک محیط کشتی (پس از برخورد) تشکیل شده‌اند (Berberian, 1983; Allen et al., 2003; Hassanzadeh et al., 2002). رخساره‌های سنگ‌شناسی ناحیه مورد مطالعه متشکل از سنگ‌های آتشفشانی (گدازه-آذرآواری) ائوسن و توده‌های گرانیتوبیدی با ترکیب کوارتز مونزونیت تا کوارتز مونزودوریت به سن ائوسن بالایی و میکرو کوارتز دوریت پورفیری است (نابتیان، ۱۳۹۱). این توده‌ها در داخل واحدهای آتشفشانی تزیق شده و آنها را قطع کرده‌اند (شکل ۲).

توده نفوذی میکرو کوارتز دوریت پورفیری بافت پورفیری باخمیره ریزبلور و گرانولار دارد که درشت بلورهای آن شامل پیروکسن و پلاژیو کلاز است. در زمینه این سنگ به مقدار کمی کوارتز نیز دیده می‌شود. از کانی‌های فرعی این توده می‌توان به مگنتیت و آپاتیت اشاره کرد. دگرسانی پروپیلیتیک که شامل کانی‌های ثانویه کلریت-اپیدوت و کلسیت است، از مهم‌ترین دگرسانی‌های تشکیل شده در این توده به‌شمار می‌رود. توده نفوذی کوارتز مونزونیت تا کوارتز مونزودوریت دارای بافت گرانولار و در برخی موارد گرانوفیری است که پلاژیو کلاز، فلدسپار قلیایی، پیروکسن و به مقدار کمی کوارتز، کانی‌های اصلی آن را تشکیل می‌دهند. مهم‌ترین و فراوان‌ترین کانی‌های فرعی موجود در این سنگ، زیرکن، مگنتیت، آپاتیت و به مقدار کم، اسفن است که به همراه کانی‌های اصلی دیده می‌شوند. سریستی، اپیدوتی و کلسیتی شدن بلورهای پلاژیو کلاز، آرژیلی شدن بلورهای پلاژیو کلاز و فلدسپار قلیایی و همچنین کلسیتی، اپیدوتی و کلریتی شدن بلورهای پیروکسن از دگرسانی‌های موجود در این سنگ به‌شمار می‌روند. همان‌گونه که در نقشه ناحیه مورد مطالعه نیز دیده می‌شود (شکل ۲)، توده‌های موجود (میکرو کوارتز دوریت پورفیری و کوارتز مونزونیت تا کوارتز مونزودوریت) به سن ائوسن بالایی در راستای شمال باختر- جنوب خاور که هم‌راستا با گسل زنجان است، درون واحدهای آتشفشانی- آذرآواری ائوسن نفوذ کرده‌اند (نابتیان، ۱۳۹۱). سنگ‌های آتشفشانی- آذرآواری ائوسن در این ناحیه متشکل از واحدهای توف‌برش، لاپیلی توف، آندزیت، تراکیت- تراکی آندزیت و البوین- اوژیت بازال است. این واحدها در تماس با توده نفوذی، دچار دگرگونی مجاورتی در حد رخساره هورنبلند- هورنفلس (به‌ویژه در معدن ذاکر) شده است.

توده‌های نفوذی ناحیه، از گرانیت نوع I هستند و بر پایه نمودار  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ ، نمونه‌ها در محدوده ساب‌آلکالین و در نمودار مثلثی  $\text{FeO}_3\text{-MgO-Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  (Irvine & Baragar, 1971)، در محدوده کالک‌آلکالین جای می‌گیرند. توده‌های یادشده غنی از پتاس هستند و در نمودار A/CNK-A/NK در محدوده مت‌آلو مینوس (meta-aluminous) جای می‌گیرند. توده‌های نفوذی این ناحیه از دید زمین‌ساختی، محیط‌های زمین‌ساختی پس از برخورد را نشان می‌دهند (Nabatiyan et al., 2008).

بر پایه مطالعات انجام‌شده، توده‌های نفوذی ناحیه محدود میان ۲ گسل امتدادلغز با امتداد شمال باختر- جنوب خاور هستند. جنوبی‌ترین این گسل‌ها که به گسل "زنجان" نیز معروف است، بخشی از گسل اصلی زنجان- تبریز است که تا تبریز و حتی تا کشور ترکیه ادامه دارد. گسل امتدادلغز دوم که روی نقشه نشان داده شده است، گسلی است که در بخش شمالی توده میزبان کانه‌زایی و در زیر توده میکرو کوارتز دوریت پورفیری قرار دارد. در میان این گسل‌های امتدادلغز موجود در ناحیه، یک سری گسل‌هایی دیده می‌شود که امتداد آنها ENE-WSW است و این گسل‌ها میزبان اصلی کانی‌زایی در این ناحیه هستند.

#### ۴- بحث

##### ۴-۱. کانه‌زایی

همان‌گونه که در نقشه زمین‌شناسی ناحیه (شکل ۲) نیز مشخص شده است، محدوده‌های معدنی در ناحیه زنجان شامل کانسارهای سرخه‌دیزج، علی‌آباد،

متأسفانه تاکنون مطالعات محدودی روی آنها از دید بررسی عناصر خاکی کمیاب صورت گرفته است. بنابراین شناخت منابع و پتانسیل‌های این عناصر در ایران ضروری به نظر می‌رسد تا از این راه بتوان به فناوری‌های پیشرفته دست پیدا کرد. با این وجود، بررسی‌های حاصل از نتایج عملیات اکتشافی و همچنین بازرنگری در اطلاعات ژئوفیزیکی، زمین‌شناسی، ماهواره‌ای و اکتشافی و تلفیق آنها نشان می‌دهد که مواد معدنی مختلف از جمله عناصر خاکی کمیاب در کمر بند فلز زایی ساغند- بافق در ایران مرکزی وجود دارد. منابع چیره‌ای از کانسارهای آهن در این ناحیه شناسایی شده است که هر یک مورد بررسی پژوهشگران مختلف قرار گرفته و در مواردی به تمرکز عناصر خاکی کمیاب در آنها اشاره شده است (سامانی، ۱۳۷۸; Foster & Jafarzadeh, 1994; Daliran, 2002; Jami et al., 2007; Bonyadi et al., 2011). کانی‌سازی عناصر خاکی کمیاب در ناحیه بافق، در ارتباط با افق‌ها و توده‌های مگنتیت- آپاتیت است. بر پایه مطالعات انجام‌شده پیشین (درویش‌زاده، ۱۳۶۲؛ سامانی و باباخانی، ۱۳۶۹؛ سامانی، ۱۳۷۸؛ رحمانی و همکاران، ۱۳۸۱؛ علیپور و همکاران، ۱۳۸۵؛ Kryvdik & Mykhaylov, 2001)، یکی از ویژگی‌های کانی‌سازی آپاتیت در ایران مرکزی، فراوانی عناصر خاکی کمیاب در آن است که این امر بر اهمیت این کانسارها می‌افزاید.

کانسارهای اکسید آهن- آپاتیت در جنوب خاور زنجان را نیز می‌توان به عنوان یکی از منابع مهم عناصر خاکی کمیاب در ایران به‌شمار آورد که در این پژوهش سعی شده است به بررسی پتانسیل عناصر خاکی کمیاب این کانسارها پرداخته شود.

#### ۲- مواد و روش‌ها

مطالعات انجام‌شده شامل مطالعات صحرایی، سنگ‌نگاری، کانه‌نگاری، تجزیه دستگاهی ریز کاو الکترونی، ICP-MS و تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی- معدنی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ است. ۹۰ نمونه از واحدهای مختلف کوارتز مونزودوریت، کوارتز مونزونیت، مونزوگرنایت و واحدهای آتشفشانی- رسوبی ائوسن از جمله آندزیت و واحدهای توفی، برای مطالعات سنگ‌نگاری انتخاب شد. همچنین برای مطالعات کانه‌نگاری در این کانسارها، ۱۱۵ مقطع نازک- صیقلی و ۳۰ مقطع صیقلی از ماده معدنی تهیه و مطالعه شد. به‌منظور شناسایی ترکیب شیمیایی کانی‌ها به‌وسیله تجزیه دستگاهی ریز کاو الکترونی (EPMA)، ۱۴ نمونه آپاتیت و مگنتیت از این کانسارها انتخاب و تجزیه شد. تجزیه دستگاهی ریز کاو الکترونی در گروه زمین‌شناسی دانشگاه سالزبورگ در کشور اتریش، به‌وسیله دستگاه مدل JEOL 8600 superprobe و در شرایط 40 nA (Beam Current) با ولتاژ 15.00 kV روی مقاطع نازک- صیقلی که دارای پوشش کربن بودند، انجام شده است. ۸ نمونه آپاتیت از میان ۵۰ نمونه مگنتیت- آپاتیت نیز برای تعیین ویژگی‌های ژئوشیمیایی آنها انتخاب و با استفاده از تجزیه ICP-MS به‌روش ذوب در شرکت ALS-Chemex در کانادا تجزیه شد. گفتنی است که تصاویر BSE مربوط به بلورهای مونازیت، در دانشگاه کارلسروهه آلمان تهیه شده است.

#### ۳- زمین‌شناسی عمومی ناحیه

ناحیه مورد مطالعه در پهنه البرز باختری- آذربایجان (کوه‌های طارم) و در استان زنجان جای گرفته است (شکل ۲). کمر بند ماگمایی البرز به‌صورت سینوسی شکل، با طول تقریبی ۶۰۰ و عرض ۱۰۰ کیلومتر و با روند خاوری- باختری در بخش شمالی ایران قرار دارد که این کمر بند، در بخش جنوبی به‌وسیله گسل تبریز از خردقاره‌های ایران مرکزی جدا می‌شود و در بخش شمالی به درون کشور ارمنستان کشیده می‌شود (Azizi & Jahangiri, 2008). از ویژگی‌های مهم این کمر بند می‌توان به گسترش زیاد فعالیت ماگمایی سنوزوییک با ویژگی کالک‌آلکالین و سنگ‌های آتشفشانی پتاسیک اشاره کرد (Berberian & King, 1981).

#### ۴-۲. دگرسانی

یکی از ویژگی‌های اصلی ناحیه که در تصویرهای ماهواره‌ای نیز نمود آشکاری دارد، دگرسانی است که در محدوده مورد مطالعه گسترش بالایی دارد. مهم‌ترین دگرسانی‌های موجود در محدوده کانسارها، شامل دگرسانی کلسیک، پتاسیک، پروپیلیتیک، سیلیسی، سریسیتی، تورمالینی و کربناتی است. هر چند برخی از دگرسانی‌ها گسترش زیادی ندارند، ولی در پیرامون ماده معدنی به‌خوبی قابل تشخیص هستند. از این دگرسانی‌ها می‌توان به دگرسانی کلسیک اشاره کرد که بلورهای کلینوپروکسن با بافت پگماتوئیدی و به مقدار کم اکتینولیت در پیرامون ماده معدنی و گاه همراه با آن تشکیل شده است (شکل‌های ۵-۵، a، b و c) (نباتیان، ۱۳۹۱). دگرسانی پتاسیک نیز در اثر جانشین شدن کانی فلدسپار قلیایی به‌جای پلاژیوکلاز، تشکیل فلوگوپیت به‌صورت رگه-رگچه‌ای و همچنین تشکیل ریزبلورهای فلوگوپیت در متن سنگ است که با گسترش کم در منطقه کانی‌زایی قابل تشخیص است (شکل‌های ۵-۵ d و e). گفتنی است که در طی دگرسانی پتاسیک، کانی‌های پروکسن تشکیل شده در مرحله دگرسانی کلسیک، در بخش‌هایی به اکتینولیت تجزیه شده‌اند. از دگرسانی‌های دیگری که در ناحیه گسترش زیادی دارد، دگرسانی پروپیلیتیک است که همراهی خوبی با اکسیدهای آهن دارد. در مراحل پایانی کانی‌زایی، دگرسانی هیدرولیک که شامل دگرسانی‌های سیلیسی، سریسیتی و کربناتی است تشکیل شده است (شکل‌های ۵-۵ d و e).

دگرسانی تورمالینی از دیگر دگرسانی‌هایی است که در این ناحیه گسترش یافته است. این دگرسانی بیشتر با دگرسانی سیلیسی همراه و میزان گسترش آن محدود به بخش‌های دگرسان شده سیلیسی است. با توجه به شواهد موجود و مطالعات انجام شده در این ناحیه، می‌توان اظهار داشت که دگرسانی‌های تشکیل شده از دید زمانی نسبت به هم نظمی دارند که این ترتیب زمانی در شکل ۶ نشان داده شده است.

#### ۴-۳. ژئوشیمی عناصر کمیاب در کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت ناحیه زنجان

برای مطالعات ژئوشیمیایی، ۲ نمونه آپاتیت از هر کدام از معادن سرخه‌دیزج، علی‌آباد، مروارید و ذاکر نمونه‌برداری شده است. این نمونه‌ها در آزمایشگاه ALS-Chemex کشور کانادا به‌روش ICP-MS مورد تجزیه قرار گرفته که نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است. افزون بر آن، ۱۱۷ نقطه از بلورهای آپاتیت نیز با استفاده از روش تجزیه ریزکاوا الکترونی در دانشگاه سالزبورگ اتریش تجزیه شدند که نتایج شماری از این تجزیه‌ها برای نمونه، در جدول ۲ آورده شده است. همان‌گونه که در جدول ۲ نشان داده شده است، میزان Cl در نمونه‌های آپاتیت در بازه ۰/۹ تا ۲/۶ درصد و مقدار F آنها در گستره ۲/۱ تا ۳/۲ درصد قرار دارد. با توجه به شکل ۷، بلورهای آپاتیت غنی از F هستند و میزان Cl در آنها پایین است.

الگوی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب نمونه‌های آپاتیت کانسارهای ناحیه زنجان در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص شده، آپاتیت‌های ناحیه زنجان از دید غنی‌شدگی و پراکندگی عناصر خاکی کمیاب، همانند یکدیگر هستند و روند مشخصی را نشان می‌دهند. با توجه به این نمودار، همه نمونه‌ها نسبت به LREE غنی‌شدگی دارند و در Eu بی‌هنجاری منفی نشان می‌دهند. تجزیه‌های موجود از بلورهای آپاتیت نشان از آن دارد که آپاتیت‌های موجود در کانسار سرخه‌دیزج، دارای بیشترین مقدار REE (۱/۲۲ تا ۱/۵۹ درصد وزنی REE) و بلورهای آپاتیت در کانسار ذاکر، دارای کمترین میزان REE (۰/۴۲ تا ۰/۵۵ درصد وزنی REE) هستند.

آپاتیت کانسارهای آهن ناحیه زنجان غنی‌شدگی تقریباً برابر در عناصر La و Nd دارد، ولی میزان غنی‌شدگی La نسبت به Y در آنها بیشتر است (جدول ۱). میزان غنی‌شدگی از LREE نسبت به HREE در این کانسارها را می‌توان به‌وسیله نسبت Ce/Y نشان داد که این نسبت برابر با ۱/۳۴ تا ۳/۳۲ است.

مروارید، اسکند، ذاکر و گلستان‌آباد است. کانه‌زایی اکسید آهن آپاتیت‌دار در این ناحیه، بیشتر به شکل رگه‌ای درون توده نفوذی کوارتزومونزویت تا کوارتزومونزودپوریت (شکل ۳-۳ a) و به مقدار کمتر درون سنگ‌های آتشفشانی-آذرآواری ائوسن روی داده است. کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت در توده نفوذی میکروکوارتزودپوریت پورفیری تشکیل نشده است. امتداد کانه‌زایی در محدوده‌های معدنی زنجان، شمال خاوری-جنوب باختری تا خاوری-باختری است که از امتداد گسل‌های موجود در این ناحیه پیروی می‌کند. شیب این رگه‌ها در حدود ۴۵ تا ۵۰ درجه به‌سوی شمال، طول آنها بیشینه تا ۳۰۰ متر و سربرای واقعی آنها بیشینه ۱۰ تا ۱۵ متر است.

همان‌گونه که در بالا اشاره شد، یک سری رگه‌های معدنی غیراقتصادی نیز درون سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن در تماس با توده نفوذی کوارتزومونزویت تا کوارتزومونزودپوریت تشکیل شده‌اند که پهنا و درازای این رگه‌ها متغیر است و رگه-رگچه‌های به پهنای چند میلی‌متر تا بیشینه یک متر دیده می‌شود.

افزون بر کانی‌زایی رگه‌ای در ناحیه، کانی‌زایی داربستی در بخش زیرین ماده معدنی و در درون توده نفوذی، همراه با کانی‌زایی نواری مگنتیت-آپاتیت، توده‌ای و برشی تشکیل شده است (شکل‌های ۳-۳ b و c). کانی‌زایی برشی به میزان کمتر نسبت به دیگر کانی‌زایی‌ها و در بخش‌های حاشیه‌ای آنها دیده می‌شود. کانی‌زایی نواری از باندهای متوالی مگنتیت و آپاتیت در مقیاس‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی تشکیل شده است. کانی‌شناسی ماده معدنی در این کانسارها چندان پیچیده نیست و شامل مگنتیت، آپاتیت، مونازیت، اکتینولیت، پروکسن، کوارتز، کلسیم و به مقدار کم کانی‌های سولفیدی همچون پیریت، کالکوپیریت و بورنیت است. افزون بر این، کانی‌هایی مانند ایلمنیت و مگنتیت اسپینل‌دار نیز به‌وسیله تجزیه ریزکاوا الکترونی شناسایی شده‌اند. مگنتیت در راستای سطوح رخ، شکستگی‌ها و از حاشیه بلورها به کانی‌های ثانویه مانند هماتیت تبدیل شده است. کانی پیریت به کانی‌های ثانویه همچون گوتیت و لیدوکروزیت تبدیل و کانی کالکوپیریت نیز در نتیجه دگرسانی برونزاد به مالاکیت، کوولیت و کالکوسیت تجزیه شده است.

مگنتیت کانه اصلی این کانسارهاست که به‌همراه آپاتیت بیشتر کانسارها را تشکیل می‌دهد. بلورهای مگنتیت با بافت توده‌ای، نواری و برشی به‌شکل ریزدانه تا درشت‌دانه در نمونه‌ها دیده می‌شوند. در برخی بخش‌ها، بلورهای مگنتیت حالت خردشده دارند و بافت کاتاکلاستیک را به‌وجود آورده‌اند. این کانی معمولاً به‌رنگ سیاه مایل به قهوه‌ای در این کانسارها دیده می‌شود.

آپاتیت کانی باطله اصلی در کانسنگ‌های مگنتیتی است که رنگ شیری تا سفید و در برخی موارد صورتی دارد و بر پایه مطالعات تجزیه ریزکاوا الکترونی، ترکیب آن از نوع کلرفلونورآپاتیت است (جدول ۲). مطالعات صحرایی و میکروسکوپی مشخص ساخت که آپاتیت بلورهای خودشکل منشوری هگزاگونال دارد و به‌صورت بلورهای شش‌وجهی بزرگ و کوچک دیده می‌شود (شکل ۳-۳ c). اندازه بلورهای آپاتیت در برخی موارد به بیش از ۲۰ سانتی‌متر نیز می‌رسد (شکل ۳-۳ d).

بر پایه مطالعات میکروسکوپی و ریزکاوا الکترونی مشخص شد که بلورهای مونازیت در کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت زنجان، به ۳ شکل دیده می‌شوند. در نوع اول، این کانی به‌صورت میانبار درون آپاتیت دیده می‌شود (شکل ۴-۴ a). اندازه بلورها از ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر است و بیشتر به‌صورت خودشکل و بلورهای هگزاگونال درون آپاتیت و در راستای محور C آن قرار گرفته‌اند.

نوع دوم بلورهای مونازیت محدود به مرز میان بلورهای آپاتیت و مگنتیت هستند (شکل ۴-۴ b) و شکل منظم خاصی ندارند. اندازه این بلورها از ۲۰ تا ۱۵۰ میکرومتر است. نوع سوم مونازیت درون رگه-رگچه‌های کربناتی تأخیری وجود دارد (شکل ۴-۴ c). همان‌گونه که در این شکل‌ها نیز دیده می‌شود، این بلورها بیشتر خودشکل هستند و اندازه آنها از ۵ تا ۲۰ میکرومتر تغییر می‌کند.

با توجه به شکل ۱۰، الگوی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب آپاتیت‌های ناحیه مورد مطالعه، همانندی زیادی با آپاتیت در کانسارهای آهن آپاتیت‌دار ناحیه بافق (میشدوان و چاه‌گر) (Daliran, 2002) و Kiruna و Durango دارد. شب ملایم LREE در نمونه‌های آپاتیت ناحیه زنجان، ناحیه بافق و کایرونا دیده می‌شود، ولی در منطقه Durango چنین فرایندی دیده نمی‌شود و تفریق LREE به HREE در آن بالاست (شکل ۱۰- a). همان‌گونه که در شکل ۱۰- b نیز دیده می‌شود، الگوی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب آپاتیت‌های موجود در کانسارهای مگنتیت آپاتیت‌دار ناحیه زنجان، همانندی زیادی با کانسارهای نوع کایرونا نشان می‌دهد.

عوامل زیادی روی پراکندگی REE تأثیر می‌گذارد که از میان آنها می‌توان به بار یونی، دما، فشار و  $fO_2$  اشاره کرد (Henderson, 1996; Roeder et al., 1987). همچنین اکسایش Eu و Ce، بر رفتار ژئوشیمیایی آنها تأثیر دارد. در بسیاری از سنگ‌های آذرین، عنصر Eu بی‌هنجاری منفی نشان می‌دهد که دلیل آن می‌تواند مربوط به تمرکز  $Eu^{2+}$  در پلاژیوکلاز در طی مراحل اولیه تبلور تفریقی باشد. بنا به نظر Frietsch & Perdhal (1995) این دلیل عامل اصلی در آپاتیت کانسارهای نوع کایروناست و در نتیجه آن در این نوع از کانسارها، عنصر Eu بی‌هنجاری منفی از خود نشان می‌دهد. از آنجایی که سنگ میزبان کانسارهای اکسید آهن- آپاتیت ناحیه زنجان، توده نفوذی با ترکیب کوارتز مونزونیتی تا کوارتز مونزودیوریتی است و همچنین با توجه به شواهد صحرایی، این کانسارها در ارتباط با توده‌های نفوذی یادشده هستند، بنابراین بی‌هنجاری منفی Eu در آپاتیت‌های منطقه مورد مطالعه، احتمالاً مربوط به تبلور پلاژیوکلاز در طی مراحل اولیه تبلور ماگمایی است (نباتیان، ۱۳۹۱). با توجه به ویژگی‌های ژئوشیمیایی توده‌های نفوذی طارم (نباتیان، ۱۳۹۱)، مانند ماهیت پتاسیم بالا تا شوشونیتی این توده‌ها و همچنین نمودارهای تعیین محیط زمین‌ساختی، می‌توان چنین گفت که مجموعه نفوذی طارم، در مراحل پس از برخورد قاره‌ای تشکیل شده است.

توده‌های نفوذی طارم از دید ویژگی‌های ایزوتوپی و ژئوشیمیایی، مرتبط با گوشته و دارای ویژگی پتاسیم بالا تا شوشونیتی هستند (نباتیان، ۱۳۹۱). بر پایه شواهد ژئوشیمیایی مانند غنی‌شدگی از عناصر LILE و LREE و مقادیر ایزوتوپی Nd-Sr-Pb، ماگمای مادر توده‌های یادشده از ذوب گوشته بالایی ایجاد شده است (نباتیان، ۱۳۹۱). پس از برخورد صفحات ایران و عربی، و در طی بالآمدگی گوشته سست‌کره‌ای، بالآمدگی و کشش در سنگ‌کره قاره‌ای رخ داده و موجب کاهش فشار روی سنگ‌کره قاره‌ای می‌شود. به این ترتیب، شرایط لازم برای ذوب بخشی سنگ‌کره قاره‌ای، که پیش‌تر در طی فرورانش غنی شده است، فراهم می‌آید و ماگمای مونزونیتی میزبان کانسارهای آهن- آپاتیت تشکیل می‌شود.

**کربناتیت‌ها:** سامانه‌های کربناتیتی می‌توانند تا چندین درصد نسبت به REE غنی‌شدگی نشان دهند (Castor & Hedrick, 2006) (شکل ۱۱). (Orris & Grauch, 2002) فهرست بیش از ۱۰۰ رخداد کربناتیتی را بیان کرده‌اند که دارای کانی‌های REE هستند. درباره چگونگی تشکیل کانی‌های REE در کربناتیت‌ها، می‌توان به (Woolley, 1989) و (Mariano (1989) و Wall & Mariano (1996) اشاره کرد.

بلور آپاتیت می‌تواند در مراحل مختلف گسترش سامانه کربناتیتی تشکیل شود و بر پایه آن نیز محتوای REE موجود در آپاتیت تغییر می‌کند (Andersen, 1986 & 1987; Roeder et al., 1987; Morteani & Perinfalk, 1996; Wall & Mariano, 1996). بلورهای آپاتیت موجود در کربناتیت‌ها معمولاً در LREE نسبت به HREE غنی‌شدگی دارند (شکل ۱۱). همان‌گونه که در این شکل نیز دیده می‌شود، آپاتیت‌های موجود در این نوع از کانسارها نسبت به عنصر Eu بی‌هنجاری منفی نشان نمی‌دهند. مقدار REE در کانسارهای اکسید آهن- آپاتیت ناحیه زنجان نسبت به مقدار آنها در کانسارهای کربناتیت بالاتر است. میزان LREE موجود در

با توجه به تجزیه‌های انجام‌شده روی آپاتیت‌های این ناحیه، محتوای عناصر فرعی در این کانسارها به نسبت پایین است، به گونه‌ای که مقدار Sr آنها پایین و به طور میانگین میزان آن از ۲۰۰ تا ۴۰۰ ppm متغیر است. همچنین میزان عنصر Rb موجود در آنها در حد چند دهه ppm است. همچنین میزان غنی‌شدگی عناصر Th و Pb در این نمونه‌ها تقریباً برابر با ۱۰۰ ppm و میزان U موجود در آنها نیز پایین است.

تمرکز و پراکندگی عناصر خاکی کمیاب در کانسارها بستگی به فرایندهای پتروژنتیکی آنها دارد که این فرایندها شامل غنی‌شدگی آنها در سیال‌های ماگمایی و یا گرمایی، تجمع یا تفریق آنها درون فازهای کانیایی، اکسایش و احیا و همچنین پراکندگی دوباره آنها در طی فرایندهای هوازدگی است (Castor & Hedrick, 2006). غنی‌شدگی LREE در سنگ‌های آذرین بستگی به تجمع HREE درون کانی‌هایی مانند گارنت و پیروکسن در طی ذوب بخشی سنگ مادر و یا تبلور تفریقی مذاب دارد (Castor & Hedrick, 2006). افزون بر آن، بی‌هنجاری کم Eu/chondrite یک ویژگی معمول در سنگ‌های آذرین است که در طی تبلور ماگما عنصر Eu درون کانی پلاژیوکلاز تجمع یافته است (Castor & Hedrick, 2006). به طور کلی، نسبت  $Eu/Eu^*$  با نسبت سنگ‌های منشأ گرفته از گوشته مانند کربناتیت نزدیک به هم، ولی میزان آن در سنگ‌های آذرین منشأ گرفته از ذوب بخشی پوسته‌ای پایین است (Castor & Hedrick, 2006).

اگر مقدار عنصر Sr در برابر Y رسم شود، نموداری همانند شکل ۹ به دست می‌آید که این نمودار می‌تواند در رده‌بندی انواع کانسارهای REE و همچنین تفسیر منشأ آنها کمک بسزایی کند (Belousova et al., 2002). با توجه به نمودار Sr در برابر Y (Belousova et al., 2002)، نمونه‌های آپاتیت ناحیه زنجان، در محدوده کانسارهای نوع کایرونا (Frietsch & Perdahl, 1995) قرار می‌گیرند.

تمرکز و پراکندگی الگوی عناصر خاکی کمیاب می‌تواند به عنوان ردیاب سنگ‌شناختی، برای تقسیم‌بندی آپاتیت‌ها مورد استفاده قرار گیرد. (Roeder et al. (1987) نشان دادند که آپاتیت‌های با گرایش کربناتیتی، نسبت به  $\Sigma REE$  غنی‌شدگی از خود نشان می‌دهند و نسبت Y/REE در آنها پایین است. مطالعات انجام‌شده توسط Fleischer & Altschuler (1986) بیانگر آن است که آپاتیت‌های موجود در کانسارهای آهن، رفتار همانندی از خود نشان می‌دهند و به مانند کربناتیت‌ها، سنگ‌های آلکالن و اولترامافیک، نسبت به REE غنی‌شدگی دارند. در ادامه، برای رده‌بندی ژنتیکی آپاتیت‌های موجود در کانسارهای اکسید آهن- آپاتیت زنجان، ویژگی‌های ژئوشیمیایی ۳ نوع از کانسارهای دارای آپاتیت مورد بررسی قرار گرفته است:

**کانسارهای آهن آپاتیت‌دار:** کانسارهای آهن آپاتیت‌دار شامل کانسارهای نوع کایرونا با میزان کم Ti و کانسارهای آهن نوع نلسونیت با مقدار Ti بالا هستند که مقدار REE در آنها میان چند دهه درصد تا ۱۰ درصد تغییر می‌کند. الگوی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب نسبت به کندریت در این دو نوع کانسار، همانند هم است، نسبت به LREE غنی‌شدگی و در Eu بی‌هنجاری منفی از خود نشان می‌دهند (Kolker, 1982; Roeder et al., 1987; Barker, 1995; Frietsch & Perdahl, 1995). گفتمنی است که استثنائاتی نیز ممکن است در این نوع از کانسارها نسبت به غنی‌شدگی در LREE وجود داشته باشد. برای نمونه می‌توان به کانسار آهن Avnik (نوع کایرونا) در کشور ترکیه اشاره کرد. مطالعات انجام‌شده توسط (Frietsch & Perdahl (1995) در کانسار Avnik نشان از آن دارد که این کانسار نسبت به LREE غنی‌شدگی نداشته و تفریق LREE در آن صورت نگرفته است.

بر پایه (Frietsch & Perdahl (1995) و Kerr (1998) غنی‌شدگی نسبت به عناصر خاکی کمیاب، یکی از ویژگی‌های اصلی کانسارهای مگنتیت- آپاتیت نوع کایرونا است که این عناصر می‌توانند درون کانی آپاتیت تمرکز یافتند و کانی فرعی همچون مونازیت را تشکیل دهند.



(کانسارهای مگنتیت-آپاتیت) به‌ویژه در ایران مرکزی، در ناحیه بافق با گسترش زیاد وجود دارد. افزون بر آن، کانی‌زایی مگنتیت-آپاتیت، در پهنه البرز باختری-آذربایجان و در ناحیه زنجان روی داده است که این ناحیه می‌تواند به‌دلیل داشتن عناصر خاکی کمیاب مورد توجه قرار گیرد. در این ناحیه، کانی‌زایی مگنتیت-آپاتیت، همراهی زمانی و مکانی با توده نفوذی کوارتزموزنویت با سن ائوسن بالایی دارد و بیشترین تمرکز این کانی‌زایی‌ها در کانسارهای سرخه‌دیزج، علی‌آباد، مروارید، ذاکر، اسکند و گلستان‌آباد وجود دارد. همان‌گونه که در جدول ۳ نیز دیده می‌شود، کانی‌زایی مگنتیت-آپاتیت در ناحیه زنجان، تناژ بالایی ندارد، ولی به‌دلیل داشتن عیار بالا (۰/۴ تا ۱/۶٪ REE) و قابل مقایسه بودن با دیگر کانسارهای REE می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. بنابراین، این کانسارها و توده‌های همانند آنها در پهنه البرز باختری-آذربایجان می‌توانند به‌دلیل داشتن کانی‌زایی عناصر خاکی کمیاب، برای اکتشاف مورد توجه قرار گیرند. این عناصر در فناوری‌های نوین ارزش فنی و اقتصادی بالایی دارند که توجه نکردن به آنها، نادیده گرفتن ثروت ملی خواهد بود. با توجه به اهمیت و کاربردهای فراوان عناصر خاکی کمیاب در همه زمینه‌ها، این عناصر در ایران ناشناخته و مطالعات روی آنها محدود بوده و تنها موارد کمی همچون معدن فسفات اسفوردی در استان یزد، به‌عنوان منبع این عناصر به‌طور رسمی گزارش شده است. با توجه به ارزش بالای این عناصر، ضروری است پس از شناخت منابع آنها در ایران، به استخراج و فناوری این عناصر پرداخت و از ذخایر ارزشمند این عناصر، برای رسیدن به فناوری‌های پیشرفته استفاده کرد.

### سپاسگزاری

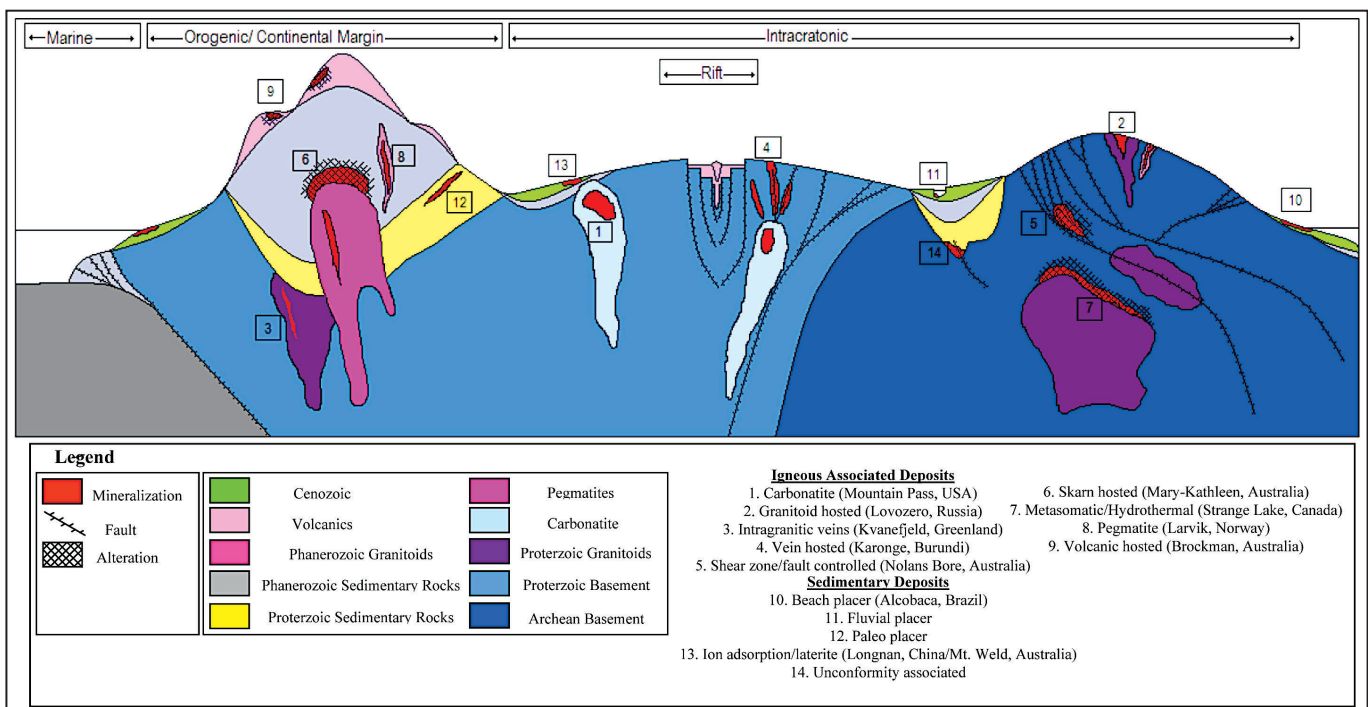
نویسندگان از سرکار خانم دکتر دلیران، برای تهیه تصاویر BSE از بلورهای موناژیت و آپاتیت سپاسگزاری می‌کنند.

آپاتیت‌های ناحیه زنجان همانند کربناتیت‌ها، نسبت به HREE غنی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۱۱).

**فسفریت:** آپاتیت‌هایی که در محیط‌های رسوبی تشکیل می‌شوند، نسبت به فلئوئور غنی هستند و مقداری کربنات و هیدروکسیل نیز می‌تواند در آنها تشکیل شود (Frietsch, 1978). بنا به باور Parak (1973)، الگوی پراکندگی REE در کانسارهای نوع کایرونا همانند سنگ‌های رسوبی است، ولی این اظهار نظر Parak به‌وسیله نتایج تجزیه‌ای حاصل از آپاتیت‌های نوع کایرونا و کانسارهای رسوبی رد شد. همان‌گونه که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، مقدار REE در فسفریت‌ها، پایین‌تر از مقدار آن در کانسارهای آهن نوع کایرونا و ناحیه زنجان است و این کانسارها (فسفریت‌ها) در عنصر Y غنی‌شدگی و در Ce بی‌هنجاری منفی نشان می‌دهند. این ویژگی بیانگر ویژگی‌های ترکیبی آب‌های دریایی است (Altschuler, 1980; Humphris, 1984). چرا که Ce تنها REE است که می‌تواند به‌صورت یک عنصر چهار ظرفیتی اکسید و از آب دریا جدا شود و در گرگهک‌های منگنز تمرکز یابد (Appel, 1983; Appel, 1983; Bau & Moller, 1991; Lottermoser, 1992). این ویژگی‌های ژئوشیمیایی بیانگر آن است که نمی‌توان یک منشأ دریایی را برای کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت در نواحی زنجان، بافق و کایرونا در نظر گرفت.

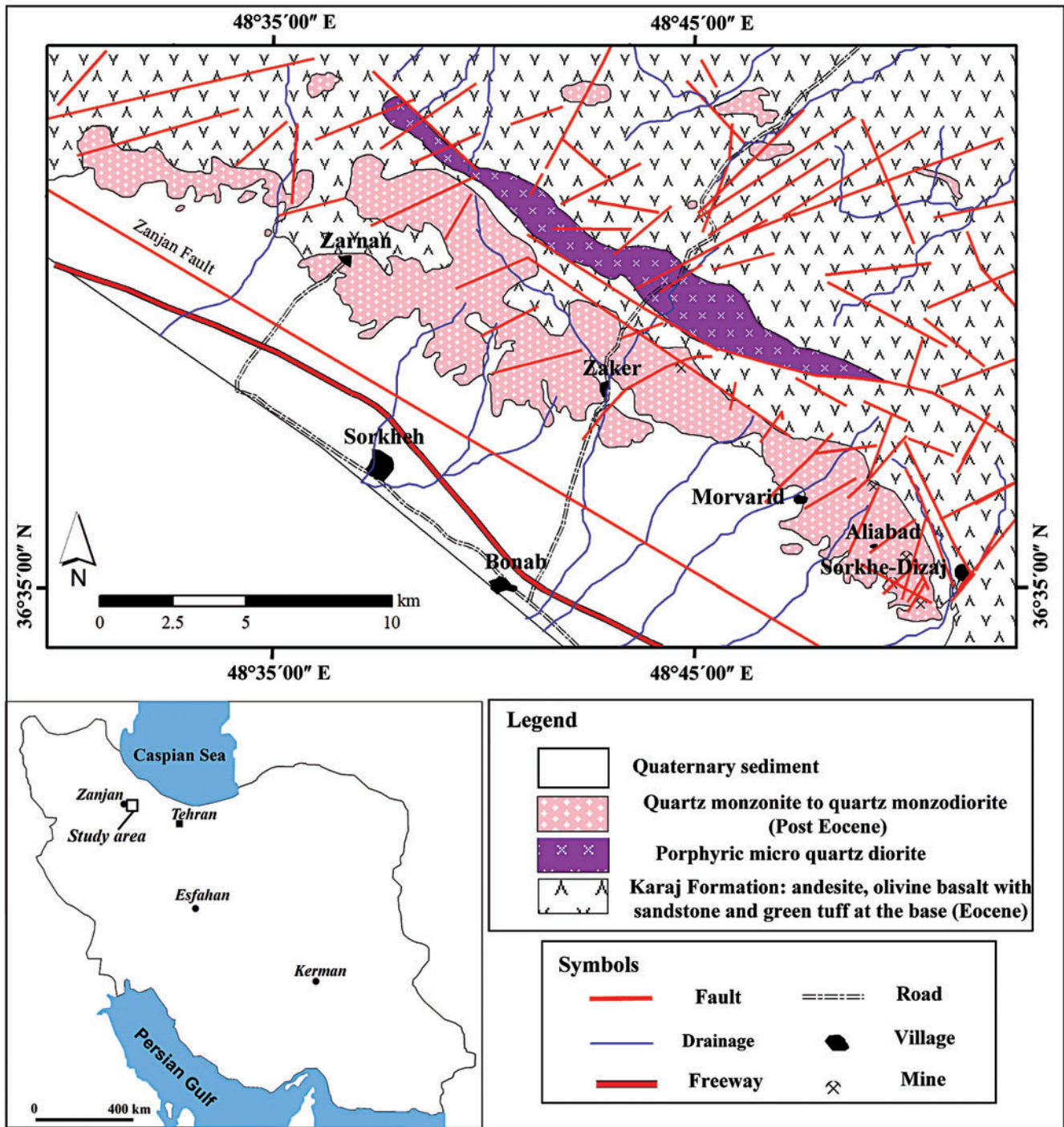
### ۵- نتیجه‌گیری

کانسارهای عناصر خاکی کمیاب شامل کربناتیت‌ها، پلاسرها، سنگ‌های آذرین پراآلکانل گرانیتی و سینیتی، کانسارهای آهن دارای REE، پگماتیت‌ها، رگه‌های فلورین و کوارتز گرمابی، کانسارهای اسکارن، لاتریت‌های بازمانده غنی در REE و کانسارهای بازمانده REE هستند. کانسارهای مگنتیت-آپاتیت، یکی از این کانسارها هستند که مقادیر قابل‌توجهی REE دارند. در ایران، این نوع کانی‌زایی



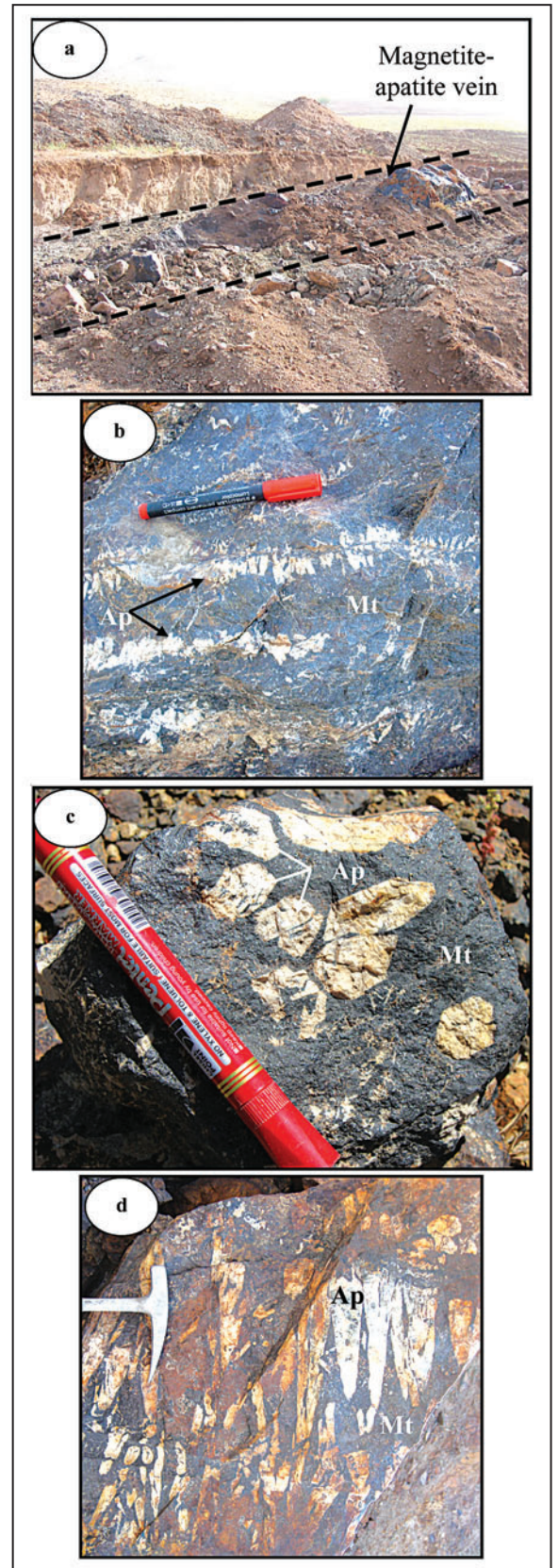
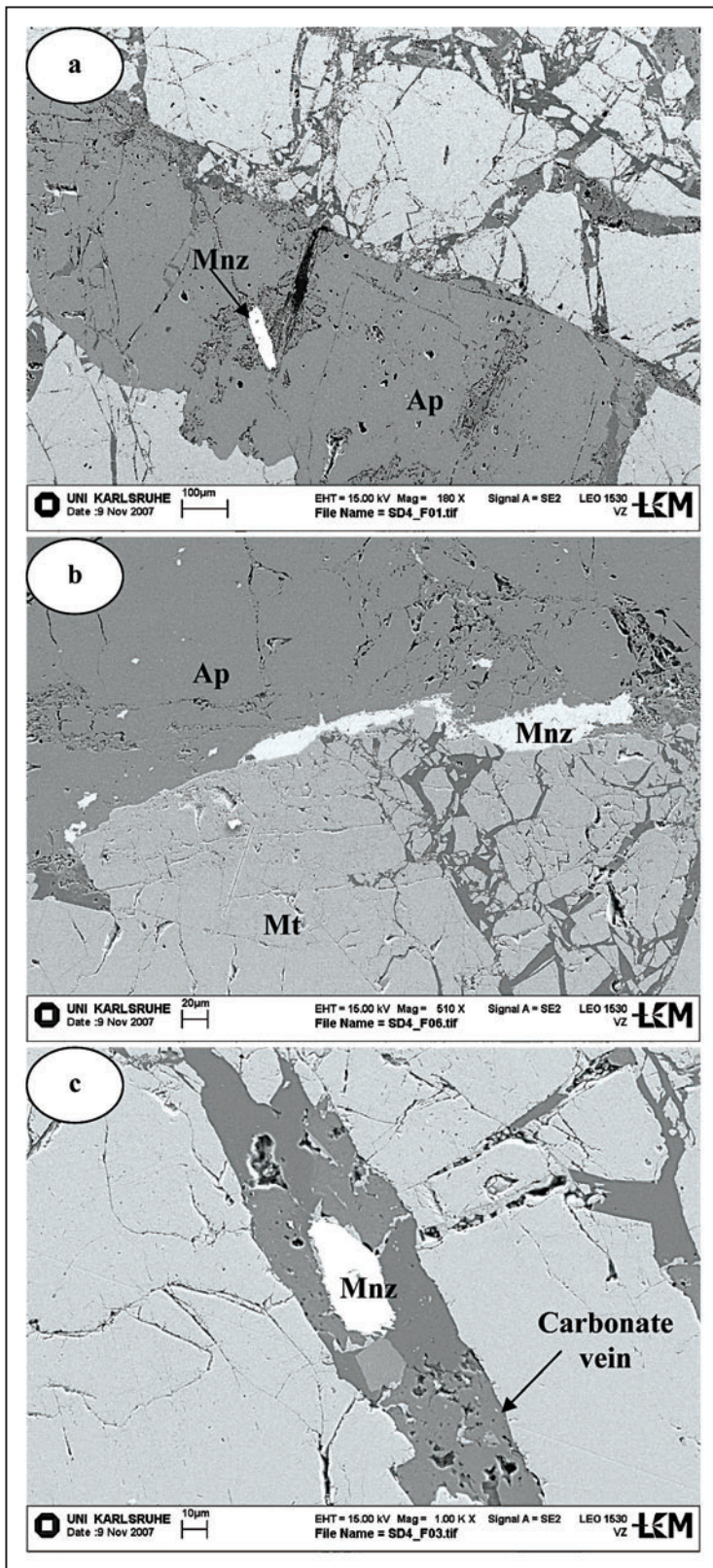
شکل ۱- شکل نمادین از کانسارهای REE که موقعیت‌های زمین‌ساختی و زمین‌شناسی این کانسارها در آن نشان داده شده است. توجه شود که برای نمایش انواع کانسارهای REE در این شکل، مقیاس در نظر گرفته نشده است. منابع استفاده شده برای نشان دادن انواع کانسارهای REE عبارتند از:

1. Mariano, 1989; 2. Salvi & Williams-Jones, 2005; 3. Salvi & Williams-Jones, 2005; 4. Mariano, 1989; 5. Hussey, 2003; 6. Giere, 1996; 7. Halpin, 2010; 8. Halpin, 2010; 9. Ramsden et al., 1993; 10. Neary & Highley, 1984; 11. Halpin, 2010; 12. Halpin, 2010; 13. Wu et al., 1996 & Morteani & Preinfalk, 1996; 14. Harper, 1987.



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ناحیه مورد مطالعه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (برگرفته از امینی (۱۳۷۹) با تغییرات جزئی).

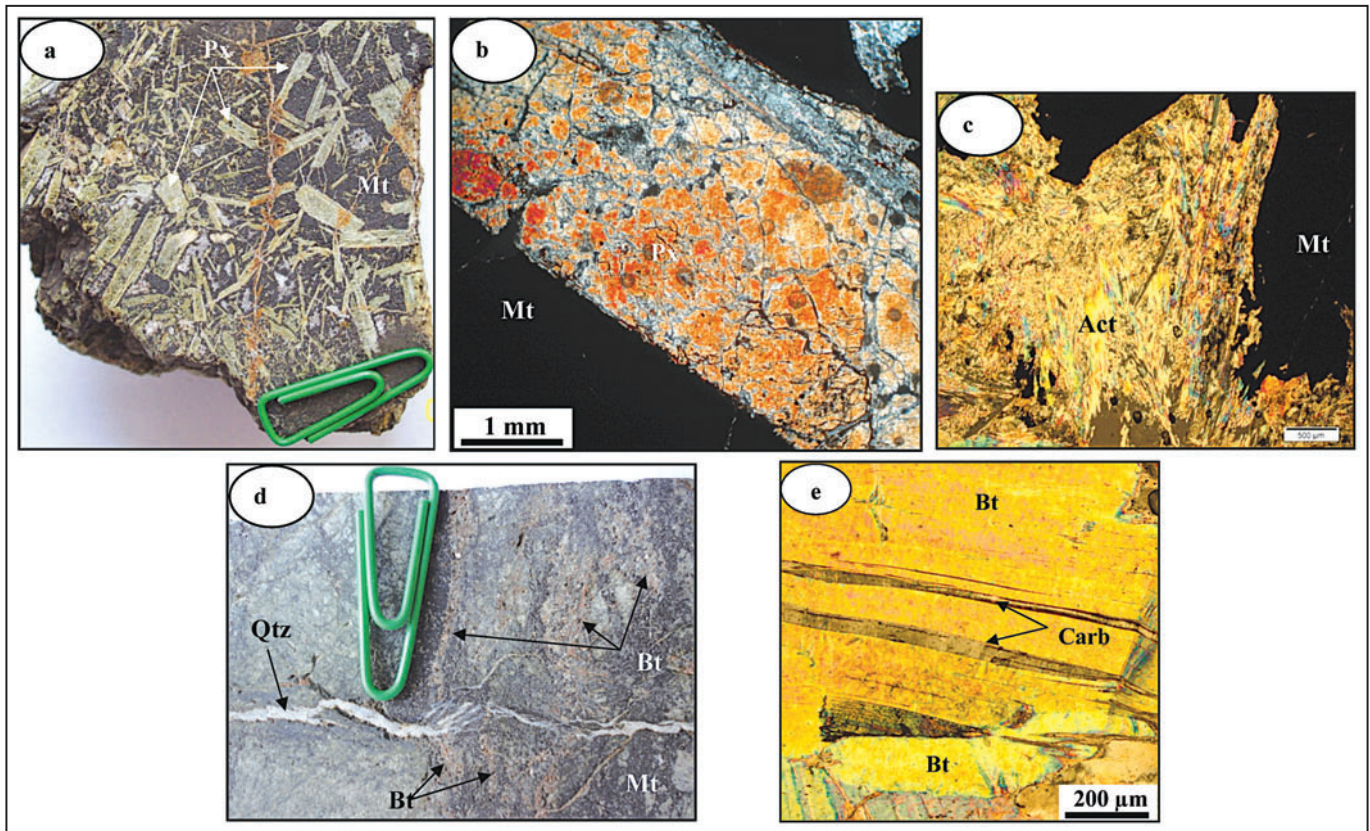




شکل ۴- کانی موناژیت (Mnz) در کانسارهای اکسید آهن آپاتیت ناحیه زنجان به ۳ حالت دیده می‌شود: (a) میانبار درون بلورهای آپاتیت (Ap)؛ (b) به حالت میان‌بلوری مگنتیت (Mt) و آپاتیت (Ap)؛ (c) درون رگه- رگچه‌های کربناتی تأخیری (Carbonate Vein).

شکل ۳- (a) کانی‌سازی رگه‌ای مگنتیت- آپاتیت در ناحیه زنجان؛ (b) بافت نواری حاصل از کانی‌های مگنتیت (Mt) و آپاتیت (Ap)؛ (c) بلورهای خودشکل و شش‌وجهی آپاتیت (Ap) به همراه مگنتیت (Mt) در بخش‌های کانی‌زایی شده؛ (d) بلورهای کشیده و خودشکل آپاتیت (Ap) که تا اندازه ۲۰ سانتی‌متر نیز دیده شده‌اند.





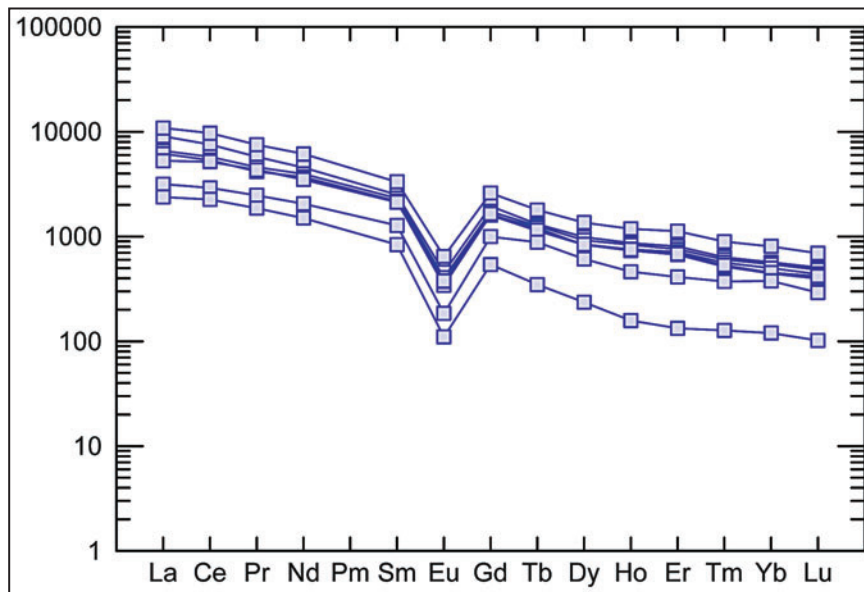
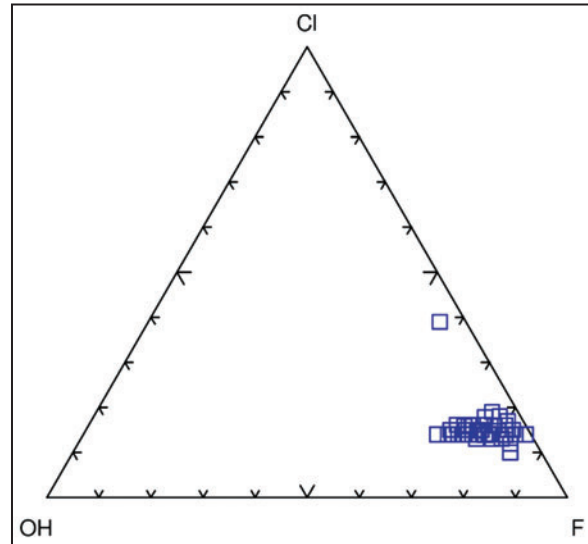
شکل ۵- (a) هم‌رشدی بلورهای پیروکسن (Px) و مگنتیت (Mt)؛ (b) تصویر میکروسکوپی از بلور کلینوپیروکسن (Cpx) با بافت پگماتیته همراه با مگنتیت (Mt)؛ (c) هم‌رشدی بلورهای اکتینولیت (Act) و مگنتیت (Mt)؛ (d) رگه- رگچه‌های بیوتیت (Bt) که مگنتیت (Mt) را قطع کرده‌اند و در مراحل بعدی، رگچه سیلیسی (Qtz) مجموعه کانی‌زایی اولیه را قطع کرده است؛ (e) تصویر میکروسکوپی از رگچه بیوتیتی (Bt) که رگه- رگچه‌های کربناتی (Carb) آن را قطع کرده است.

Minerals	Sodic-Calcic alteration & Mineralization	Potassic Alteration	Low-T (Propylitic) Alteration
Large Pyroxene			
Actinolite			
Magnetite			
Apatite			
Monazite			
Pyrite			
Chalcopyrite			
Biotite			
K-Feldspar			
Epidote			
Chlorite			
Quartz			
Tourmaline			
Carbonate			

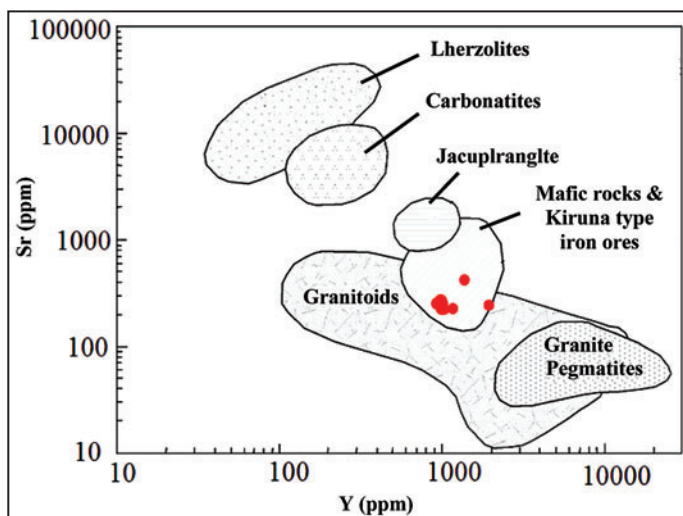
شکل ۶- ترتیب زمانی دگرسانی‌های تشکیل شده در ناحیه کانی‌زایی اکسید آهن-آپاتیت زنجان.



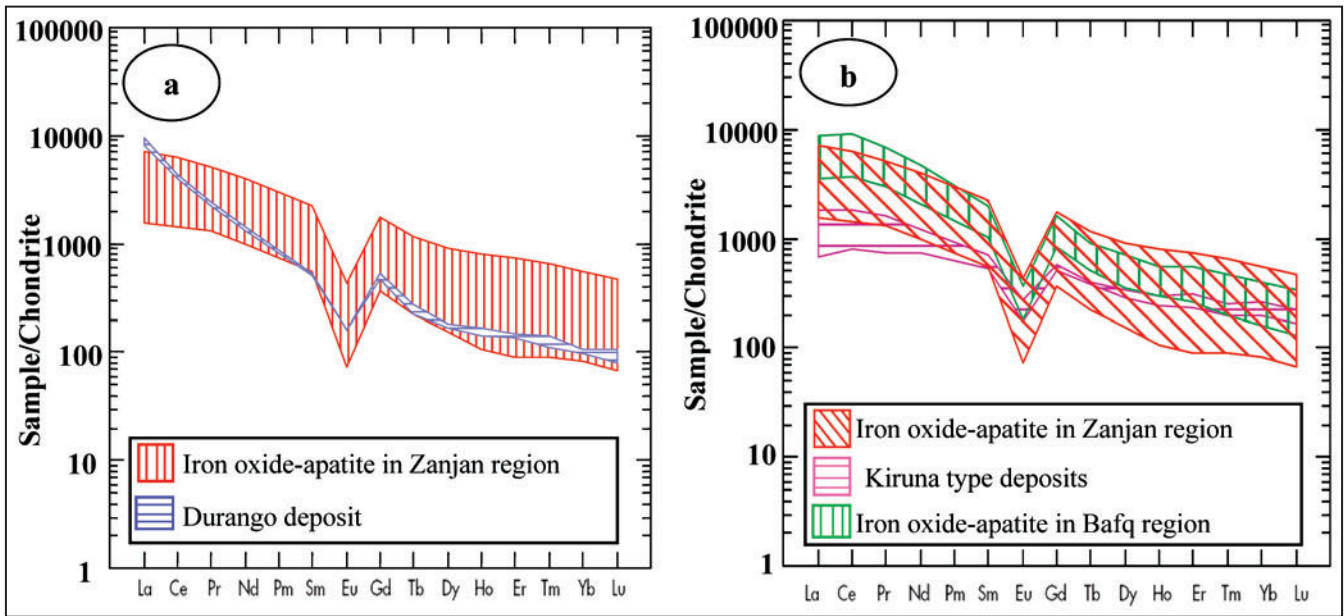
شکل ۷- نمودار سه تایی F-Cl-OH بر حسب درصد اتمی از آپاتیت‌های موجود در کانسارهای اکسید آهن- آپاتیت ناحیه زنجان (داده‌ها بر پایه Piccoli & Candela (2002) محاسبه شده است).



شکل ۸- الگوی پراکنده‌گی REE بهنجار شده در آپاتیت‌های موجود در کانسارهای اکسید آهن- آپاتیت ناحیه زنجان.

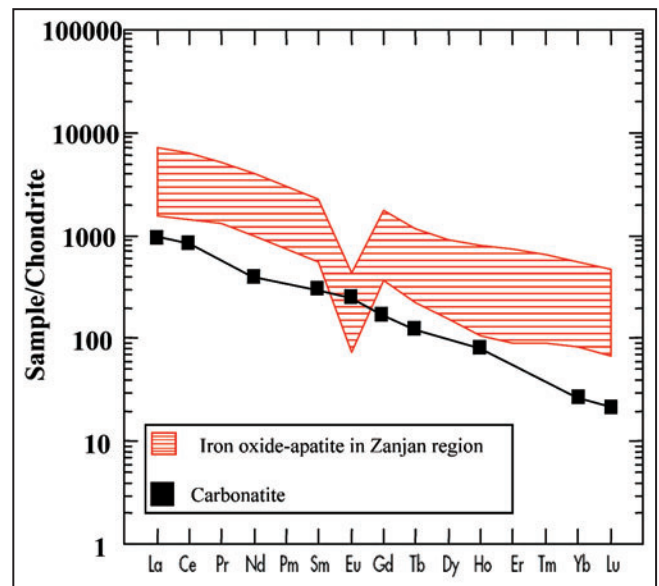


شکل ۹- نمودار Y در برابر Sr برای رده‌بندی انواع کانسارهای REE، همان‌گونه که دیده می‌شود آپاتیت‌های موجود در کانسارهای اکسید آهن- آپاتیت ناحیه زنجان در محدوده کانسارهای نوع کایرونا قرار می‌گیرند.

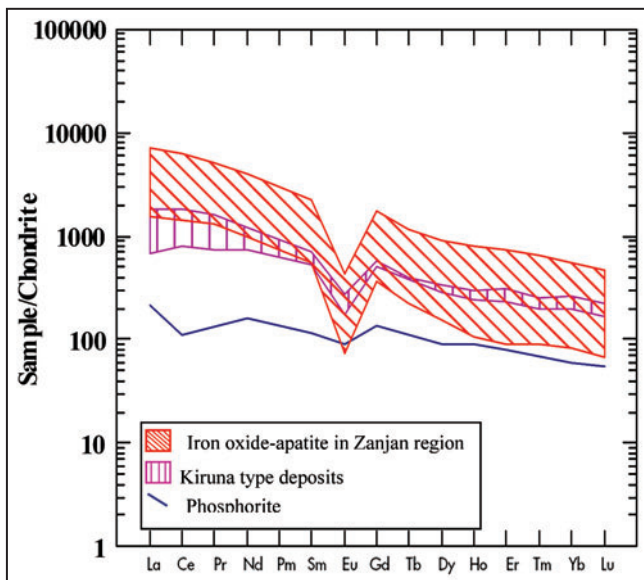


شکل ۱۰- الگوی پراکندگی REE بهنجارشده در آپاتیت‌های موجود در (a) کانسارهای اکسید آهن آپاتیت ناحیه زنجان و کانسار Durango و (b) کانسارهای اکسید آهن آپاتیت ناحیه زنجان، کانسارهای اکسید آهن آپاتیت در ناحیه بافق و کانسارهای نوع کایرونا.

شکل ۱۱- الگوی پراکندگی REE بهنجارشده در آپاتیت‌های موجود در کانسارهای اکسید آهن آپاتیت ناحیه زنجان و کانسارهای کربناتیته.



شکل ۱۲- الگوی پراکندگی REE بهنجارشده در آپاتیت‌های موجود در کانسارهای اکسید آهن آپاتیت ناحیه زنجان، کانسارهای نوع کایرونا و کانسارهای فسفریت.





جدول ۱- نتایج تجزیه نمونه‌های آبی‌ت از منطقه زرخان برای عناصر کمیاب و خاکي کمياب به روش ICP-MS

ID	Ap1-SD	Ap2-SD	Ap1-A	Ap2-A	Ap1-M	Ap2-M	Ap1-Z	Ap2-Z
Ag	1	1	1	1	1	1	1	1
Ba	13.2	35.2	16.2	14.8	6.2	5.8	7.8	8.1
Co	4.5	1.1	4.6	1.5	17.8	18.2	4.3	5.6
Cr	50	20	25	28	11	12	15	18
Cs	0.12	0.03	0.05	0.07	0.04	0.05	0.5	0.4
Cu	49	10	28	22	27	28	20	25
Ga	18.4	22.9	21.3	22.4	22.3	22.5	2.3	20.1
Hf	1.1	1.8	1.1	1.4	1.1	1.2	1.2	1.1
Mo	2	2	2	2	2	2	2	2
Nb	0.3	0.5	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
Ni	5	5	5	5	5	5	5	5
Pb	21	5	94	102	95	94	101	102
Rb	0.4	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4
Sn	1	1	1	1	1	1	1	1
Sr	433	255	224	236	235	232	226	224
Ta	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.02	0.03
Th	107.5	156.5	108.6	110.5	110.2	111.3	108.4	110.2
Tl	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
U	14.1	19.2	12.41	10.68	11.1	12.3	11.2	10.3
V	43	44	52	49	51	43	52	48
W	4	4	4	4	4	4	3	3

ID	Ap1-SD	Ap2-SD	Ap1-A	Ap2-A	Ap1-M	Ap2-M	Ap1-Z	Ap2-Z
Zn	20	9	13.5	14.2	15	14.1	11.2	10.1
Zr	5	15	7	9	5	4	7	5
La	2150	2570	1560	1460	1250	1250	749	565
Ce	4630	5940	3530	3280	3160	3170	1780	1380
Pr	548	714	435	396	410	410	235	177
Nd	2130	2870	1850	1725	1655	1630	960	700
Sm	383	509	355	332	327	325	195	128
Eu	26.4	37.4	23.4	19.8	21.6	21.9	10.7	6.39
Gd	401	534	356	332	328	339	205	111
Tb	49.1	67.1	47.3	45.3	42.4	42.98	33	13
Dy	251	345	234	210	212	214	155	59.9
Ho	49.2	67	47.2	42.7	41.6	42.5	26.1	8.93
Er	133	186	125	118	111	113	68	22
Tm	16.2	22.8	15.35	14.35	13.17	13.57	9.5	3.24
Yb	96.7	137	92.4	84.8	75.5	76.9	64	20.4
Lu	12.85	17.6	12.25	11.14	10.08	10.6	7.4	2.59
Y	1410	1960	1063	1284	1046	1031	1035	1023
Eu/Er*	0.206	0.219	0.201	0.182	0.202	0.202	0.164	0.164
ΣLREE	9867.4	12640.4	7753.4	7212.8	6823.6	6806.9	3929.7	2956.39
ΣHREE	2419.05	3336.5	1992.5	2142.29	1879.75	1883.55	1603	1264.06
ΣREE	12286.5	15976.9	9745.9	9355.09	8703.35	8690.45	5532.7	4220.45

جدول ۲- نتایج تجزیه نمونه‌های آبی‌ت در منطقه زرخان به روش EPMA بر حسب درصد.

Sample	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	FeO	MnO	CaO	Na <sub>2</sub> O	Cl	F	Total
AC-6-7	40.39	0.00	0.20	0.04	54.45	0.13	0.99	2.91	99.11
AC-6-8	39.93	0.02	0.07	0.02	53.85	0.17	0.98	3.04	98.07
AC-6-10	40.99	0.03	0.11	0.03	53.59	0.19	1.04	3.06	99.03
AC-6-11	39.96	0.02	0.12	0.06	54.07	0.16	1.05	2.85	98.30
AC-6-12	39.84	0.00	0.03	0.05	54.07	0.17	1.01	3.09	98.26
AC-6-13	41.38	0.03	0.52	0.03	54.19	0.11	1.00	2.88	100.15
AC-6-14	40.48	0.03	0.49	0.06	53.19	0.24	1.06	3.17	98.72
AC-6-25	41.38	0.04	0.06	0.07	54.25	0.13	0.94	3.21	100.07
AC-7-6	39.41	0.03	0.00	0.04	54.49	0.21	1.09	2.94	98.21
AC-7-9	39.96	0.01	0.10	0.07	54.55	0.11	1.12	2.77	98.68

Sample	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	FeO	MnO	CaO	Na <sub>2</sub> O	Cl	F	Total
AC-7-12	40.45	0.07	0.18	0.05	54.01	0.15	1.12	2.84	98.87
SD 41-1	40.56	0.07	0.14	0.07	53.05	0.40	1.11	3.01	98.41
SD 41-4	42.41	0.10	0.09	0.04	53.83	0.24	0.91	2.98	100.60
SD 41-5	40.01	0.06	0.07	0.03	53.52	0.29	0.90	3.03	97.90
SD 41-16	39.19	0.07	0.27	0.08	53.30	0.27	1.27	2.88	97.32
SD 41-18	41.47	0.07	0.10	0.06	53.07	0.26	1.14	3.02	99.19
SD 41-19	40.93	0.06	0.20	0.09	52.43	0.35	2.63	2.11	98.80
SD 41-21	38.67	0.05	0.12	0.05	53.56	0.36	1.19	2.85	96.85
SD 41-22	40.60	0.03	0.11	0.05	55.05	0.05	0.68	3.18	99.75

جدول ۳- ویژگی‌های برخی از کانسارهای REE مهم در دنیا و ایران.

Deposit Name	Location	Resource (Tonnes)	Grade	Geology	Current mine	Reference
Mountain Pass	California, USA	29 Mt	8.9% REO Provent & probable at 1989	Carbonatite host, Fe rich minerals ie, siderite, magnetite, hematite as host	Y	Orris & Grauch (2002)
Bayan Obo	Inner Mongolia, China	48-100 Mt 1 Mt	6% REE <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.13% Nb	Approximately 40% of the global resource of REE is in this deposit. Possible carbonate (limestone) sediment origin or igneous carbonatite origin. Fe rich 1500 Mt@ 35% Fe	Y	Orris & Grauch (2002)
Araxa	Minas Gerais, Brazil	>450 Mt 0.8 Mt laterite	4.4% REO, 2.5% Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 13.5% REO, 2% Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 0.05% U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Carbonatite with residual enrichment due to laterite	N	Orris & Grauch (2002)
Mushgai Khudag	South Govi, Mongolia	200 Mt 6.1 Mt	1.5% REE including 1.37% REO	Magnetite-apatite rock. Apatite has high REE potassic alkaline volcanic and carbonatite host.	N	Orris & Grauch (2002)
Strange Lake	Quebec, Labrador, Canada	52 Mt 55Mt	0.52% REE, 0.31% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.29% Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pegmatite host in peralkaline host.	N	Orris & Grauch (2002)
Olympic Dam	South Australia, Australia	2000 Mt	0.5% REE, 0.24-0.45% La + Ce; 0.3285% REO	Olympic Dam Breccia Complex- granite breccia	N	Orris & Grauch (2002)
Champ	Idaho, USA	Unknown	0.1% REE in P ore. Phosphate mining ceased in 1986	Mudstone	-	Orris & Grauch (2002)
Lovozero	Russia	Unknown	0.01% REO	Peralkaline syenite	Y	Hedrick et al. (1997)
Se-Chahun	Bafq, Iran	Unknown	0.39-0.89% REE	Magnetite-apatite ores hosted by altered rhyolitic tuff and intercalated shallow-water sandstone, dolomitic limestone and shale	-	Bonyadi et al. (2011)
Mishdovan	Bafq, Iran	Unknown	1.75% REE	Magnetite-apatite ores hosted by volcano-sedimentary sequence which comprises rhyolitic tuff with intercalated carbonate lenses in its lower sections	-	Daliran (2002)
Sorkhe Dizaj, Morvarid, Aliabad, Zaker	Zanjan, Iran	Unknown	0.42-1.59% REE	Magnetite-apatite ores hosted by quartz monzonitic rocks with calc-alkaline affinity	N	This study

### کتابنگاری

- امینی، ب.، ۱۳۷۹- نقشه زمین‌شناسی طارم با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، بازنگاری و استاندارد از نقشه هیراپاما و همکاران، سازمان زمین‌شناسی کشور. حاجی‌علی‌اوغلی، ر. و مؤذن، م.، ۱۳۸۸- بررسی خاستگاه گارنت‌های ناهمگن در سنگ‌های قلیایی فلدسپاتویددار توده نفوذی کلبر در شمال آذربایجان (شمال باختری ایران)، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دوره ۱۷، شماره ۲، ص. ۲۱۷-۲۰۳.
- درویش‌زاده، ع.، ۱۳۶۲- بررسی فسفات بافق «اسفوردی»، نشریه دانشکده علوم، دانشگاه تهران، جلد سیزدهم، شماره اول و دوم، ص. ۲۴-۲۰.
- رحمانی، ش.، امامی، م. ه. و مختاری، ع. ا.، ۱۳۸۱- اکتشاف عناصر کمیاب و نادر خاکی در سنگ‌های گرانیتویدی، بیست و یکمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور. رحمانی، ش.، عابدیان، ن. و مختاری، ع. ا.، ۱۳۸۳- زمین‌شناسی و ژئز کانسارهای اکسیدهای آهن-آپاتیت زون طارم (زنجان)، بیست و سومین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- زعیم‌نیا، ف.، کنعانیان، ع. و صلواتی، م.، ۱۳۸۹- سنگ‌زایی سنگ‌های قلیایی جنوب املش در جنوب دریای خزر، شمال ایران، فصلنامه علوم زمین، سال بیستم، شماره ۷۸، ص. ۶۹-۷۸.
- سامانی، ب. و باباخانی، ع.، ۱۳۶۹- تکوین زمین‌شناسی ناحیه بافق- ساغند و مدل متالوژنی کانسارهای آهن-آپاتیت و موادپرتوزا، خلاصه مقالات نهمین گردهمایی علوم زمین، ص. ۲۴-۲۵.
- سامانی، ب.، ۱۳۷۸- فلززایی عناصر نادر خاکی در پرکامبرین ایران مرکزی (بخش دوم)، نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران، شماره ۲۰، ص. ۲۱-۱۵.
- علیپور، م.، رسا، ا.، مهرپرتو، م. و باباخانی، ع.، ۱۳۸۵- اندازه‌گیری موزایت و کانی‌های همراه به روش تغلیظ کانی‌های سنگین در پلاس مروس (ایران، یزد)، فصلنامه علوم زمین، سال پانزدهم، شماره ۶۰، ص. ۳۱-۲۲.
- نباتیان، ق.، ۱۳۸۷- کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژئز کانسار آهن آپاتیت‌دار سرخه دیزج، جنوب شرق زنجان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۲۳۳ ص.
- نباتیان، ق.، ۱۳۹۱- زمین‌شناسی، ژئوشیمی و تکامل کانسارهای اکسید آهن آپاتیت در کمربند آتشفشانی-نفوذی طارم، البرز باختری، رساله دکترا، دانشگاه تربیت مدرس، ۳۷۵ ص.
- نباتیان، ق.، قادری، م.، رشیدنژاد عمران، ن. و دلبران، ف.، ۱۳۸۸- ژئوشیمی و خاستگاه کانسار اکسید آهن آپاتیت‌دار سرخه دیزج، جنوب خاوری زنجان، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، شماره ۱، ص. ۴۶-۱۹.



## References

- Allen, M. B., Ghassemi, M. R., Shahrabi, M. & Qorashi, M., 2003- Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. *Journal of Structural Geology*, 25, 659- 672.
- Altschuler, Z. S., 1980- The geochemistry of trace elements in marine phosphorites, I. Characteristic abundance and enrichment. *Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Spec. Publ.*, 29: 1930.
- Andersen, T., 1986- Compositional variation of some rare earth minerals from the Fen complex (Telemark, SE Norway): Implications for the mobility of rare earths in a carbonate system. *Mineralogical Magazine*, 50, 503-509.
- Andersen, T., 1987- Mantle and crustal components in a carbonatite complex, and the evolution of carbonatite magma: REE and isotopic evidence from the Fen complex, southeast Norway. *Chemical Geology*, 65, 147-166.
- Appel, P. W. U., 1983- Rare earth elements in the early Archaean Isua iron-formation, West Greenland. *Precambrian Research*, 20, 243- 258.
- Azizi, H. & Jahangiri, A., 2008- Cretaceous subduction-related volcanism in the northern Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Journal of Geodynamics*, 45, 178–190.
- Barker, D. S., 1995- Crystallization and alteration of quartz monzonite, Iron Springs Mining District, Utah: Relation to associated iron deposits. *Economic Geology*, 90, 2197-2217.
- Bau, M. & Möller, P., 1991- REE systematics as source of information on minerogenesis. In: Pagel, M., Leroy, J.L., eds., *Source, Transport and Deposition of Metals*, Balkema, Rotterdam, 17-20.
- Belousova, E. A., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y. & Fisher, N. I., 2002- Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace-element compositions and their relationship to host rock type. *Journal of Geochemical Exploration*, 76, 45-69.
- Berberian, M. & King, G. C. P., 1981- Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210–265.
- Berberian, M., 1983- The southern Caspian: a compressional depression floored by a trapped, modified oceanic crust. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20, 163-183.
- Bonyadi, Z., Davidson, G. J., Mehrabi, B., Meffre, S. & Ghazban, F., 2011- Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Se-Chahun iron oxide-apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights from paragenesis and geochemistry. *Chemical Geology*, 281, 253-269.
- Castor, S. B. & Hedrick, J. B., 2006- Rare earth elements, in Kogel, J.E., Trivedi, N.C., Barker, J.M., Krukowski, S.T., eds., *Industrial minerals and rocks: Society for Mining, Metallurgy and Exploration*, 769-791.
- Christie, T., Brathwaite, B. & Tulloch, A., 1998- Mineral commodities report 17, Rare earths and related elements. New Zealand Institute of Geological and Nuclear Sciences Ltd.
- Daliran, F., 2002- Kiruna type iron oxide-apatite ores and apatites of the Bafq district, Iran, with an emphasis on the REE geochemistry of their apatites; in Porter, T.M. (ed), *Hydrothermal iron oxide copper gold and related deposits: A global perspective*, 2, PGC Publishing, Adelaide, 303-320.
- Fleischer, M. & Altschuler, Z. S., 1986- The lanthanides and yttrium in minerals of the apatite group – an analysis of the available data. *Neues Jahrbuch Mineralogische Monatshefte*, 10, 467-480.
- Forster, H. & Jafarzadeh, A., 1994- The Bafq mining district in Central Iran: a highly mineralized Infracambrian volcanic field: *Economic Geology*, 89, 1667-1721.
- Frietsch, R. & Perdahl, J. A., 1995- Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna type iron ores and some other iron ore types. *Ore Geology Reviews*, 9, 489–510.
- Frietsch, R., 1978- On the magmatic origin of iron ores of the Kiruna type, *Economic Geology*, 73, 478-485.
- Giere, R., 1996- Formation of rare earth minerals in hydrothermal systems, in Jones, A.P., Wall, F., Williams, C.T., eds., *Rare Earth Minerals; Chemistry, Origin and Ore deposits*, Mineralogical Society Series, 7, 104-150.
- Halpin, K. M., 2010- The characteristics and origin of the Hoidas Lake REE deposit, MSc thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, 257 pp.
- Harben, P. W. & Kužvart, M., 1996- *Industrial minerals: a global geology*. Industrial Minerals Information Ltd, London.
- Harper, C. T., 1987- Rare earth elements and their occurrence in northern Saskatchewan; in *Summary of Investigations 1987*, Saskatchewan Geological Survey; Saskatchewan Energy and Mines, Miscellaneous Report, 87-4.
- Hassanzadeh, J., Ghazi, A. M., Axen, G. & Guest, B., 2002- Oligomiocene mafic-alkaline magmatism north and northwest of Iran: evidence for the separation of the Alborz from the Urumieh–Dokhtar magmatic arc. *Geological Society of America Abstracts with Programs* 34, 331.
- Hedrick, J. B., Sinha, S. P. & Kosynkin, V. D., 1997- Loparite, a rare earth ore (Ce, Na, Sr, Ca)(Ti, Nb, Ta, Fe<sup>+3</sup>)O<sub>3</sub>. *Journal of Alloys and Compounds*, 250, 467-470.
- Henderson, P., 1984- *Rare earth elements geochemistry. Development in geochemistry*, 2. Elsevier, Amsterdam.

- Henderson, P., 1996- The rare earth elements: introduction and review, in Jones, A.P., Wall, F., Williams, C.T., eds., *Rare Earth Minerals; Chemistry, Origin and Ore deposits*, Mineralogical Society Series, 7, 1-17.
- Humphris, S. E., 1984- The mobility of the rare earth elements in the crust. In: Henderson, P., ed., *Rare Earth Element Geochemistry. Developments in Geochemistry*, 2. Elsevier, Amsterdam, 317-373.
- Hussey, K. J., 2003- Rare earth element mineralisation in the eastern Arunta region. Northern Territory Geological Survey, Record, 2003-2004.
- Irvin, T. N. & Baragar, W. R. A., 1971- A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 523-548.
- Jami, M., Dunlop, A. C. & Cohen, D. R., 2007- Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite-magnetite deposit, Central Iran: *Economic Geology*, 102, 1111-1128.
- Jones, A. P., Wall, F. & Williams, C. T., 1996- *Rare Earth Minerals: Chemistry, Origin and Ore Deposits*. Mineralogical Society Series, 7. London: Chapman and Hall.
- Kerr, I. D., 1998- Mineralogy, chemistry and hydrothermal evolution of the Pea Ridge Fe-oxide-REE deposit, Missouri, USA. MSc thesis (unpubl), Univ Windsor, Ontario, 112p.
- Kolker, A., 1982- Mineralogy and geochemistry of Fe-Ti oxide and apatite (nelsonite) deposits and evaluation of the liquid immiscibility hypothesis. *Economic Geology*, 77, 1146-1158.
- Kryvdik, S. T. & Mykhaylov, V., 2001- The potential of the rare earth mineralization of Islamic Republic of Iran; National Academy of Science of Ukraine, 48P.
- Larsen, A. O., 1996- Rare earth minerals from the syenite pegmatites in the Oslo Region, Norway, in Jones, A.P., Wall, F., Williams, C.T., eds., *Rare Earth Minerals; Chemistry, Origin and Ore deposits*, Mineralogical Society Series, 7, 151-164.
- Lottermoser, B. G., 1992- Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes. *Ore Geology Reviews*, 7, 25-41.
- Mariano, A. N., 1989- Nature of economic mineralization in carbonatites and related rocks. In Bell, K. (ed), *Carbonatites, Genesis and Evolution*, 149-176.
- Moinvaziri, H., 1985- *Volcanisme tertiaire et quaternaire en Iran*, These d'Etat, Université Paris-Sud, Orsay.
- Morteani, G. & Preinfalk, C., 1996- REE distribution and REE carriers in laterites formed on the alkaline complexes of Araxa and Catalao, Brazil; in Jones, A.P., Wall, F., Williams, C.T., eds., *Rare Earth Minerals; Chemistry, Origin and Ore deposits*, Mineralogical Society Series, 7, 227-252.
- Nabatian, Gh., Ghaderi, M., Rashidnejad-Omran, N. & Daliran, F., 2008- Apatite-iron oxide ore at Sorkhe Dizaj deposit, northwest Iran, 33<sup>rd</sup> International Geological Congress, Oslo, Norway.
- Neary, C. R. & Highley, J. E., 1984- The economic importance of the rare earth elements, in Henderson, P., ed., *Rare Earth Element Geochemistry*, 423-466.
- Orris, G. J. & Grauch, R. I., 2002- Rare earth element mines, deposits, and occurrences. Open-File Report 02-189. Reston, VA: USGS.
- Parak, T., 1973- Rare earths in the apatite iron ores of Lappland together with some data about the Sr, Th and U content of these ores, *Economic Geology*, 68, 210-221.
- Piccoli, P. M. & Candela, P. A., 2002- Apatite in igneous systems. In: Kohn, M.J., Rakovan, J., Hughes, J.M., eds., *Phosphates: geochemical, geobiological, and materials importance*. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48. Mineralogical Society of America, Washington, D.C., 255-292.
- Ramsden, A. R., French, D. H. & Chalmers, D. I., 1993- Volcanic-hosted rare metal deposits at Brockman, Australia. *Mineralium Deposita*, 28, 1-12.
- Roeder, P. K., MacArthur, D., Ma, X., Palmer, G. R. & Mariano, J. N., 1987- Cathodoluminescence and microprobe study of rare earth elements in apatite. *American Mineralogist*, 72, 801-811.
- Salvi, S. & Williams-Jones, A. E., 2005- Alkaline granite – syenite deposits, in Linnen, R.L. Samson, I.M., eds., *Rare element geochemistry and mineral deposits*, GAC Short Course Notes, 17, 315-341.
- Sawka, W. N., Heizler, M. T., Kistler, R. W. & Chappell, B. W., 1990- Geochemistry of highly fractionated I- and S-type granites from the tin-tungsten province of Western Australia. In: Stein H.J., Hannah J.L., eds. *Ore-bearing granite systems, petrogenesis and mineralizing processes*, 161-179. Geological Society of America, Special Paper 246.
- Wall, F. & Mariano, A. N., 1996- Rare earth minerals in carbonatites: A discussion centred on the Kanganakunde carbonatite, Malawi; in Jones, A.P., Wall, F., Williams, C.T., eds., *Rare Earth Minerals; Chemistry, Origin and Ore deposits*, Mineralogical Society Series, 7, 193-225.
- Watters, W. A. & Alavi, N., 1973- Reported occurrence of carbonatite in southern Iran, in Williams, G.J., ed., *Contribution to the geology of mineral resources in Iran*. Geol. Survey of Iran, Rep, 21, 57- 62.
- Woolley, A. R., 1987- *Alkaline Rocks and Carbonatites of the World. Part 1: North and South America*. Austin: University of Texas Press.
- Wu, C., Yuan, Z. & Bai, G., 1996- Rare earth deposits in China, in Jones, A.P., Wall, F., Williams, C.T., eds., *Rare Earth Minerals; Chemistry, Origin and Ore deposits*, Mineralogical Society Series, 7, 281-306.



# Mineralogy and Geochemistry of Rare Earth Elements in Iron Oxide – Apatite Deposits of the Zanjan Region

Gh. Nabatian<sup>1</sup> & M. Ghaderi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 2012 April 08

Accepted: 2012 November 21

## Abstract

Iron oxide - apatite deposits are one of the most important REE resources that occurred in the Posht-e-Badam and Zanjan regions of Iran. REE mineralization in the Zanjan region is associated with Sorkhe Dizaj, Aliabad, Morvarid, Zaker, Oskand and Golestanabad iron oxide-apatite mineralization. The deposits are located in the Tarom area, which is a part of western Alborz - Azarbaijan zone. The Eocene volcanic sequences such as olivine basalt, trachyandesite, andesite as well as volcanoclastic rocks are the main units in the area which are intruded by the late Eocene plutonic rocks. Plutonic rocks in the region include porphyric micro-quartzdiorite and quartz-monzonite to quartz-monzodiorite. Magnetite-apatite mineralization in the Zanjan region is related to quartz-monzonitic to quartz-monzodioritic rocks. The mineralization is observed in the form of vein and stockwork (irregular veins and veinlets of magnetite-apatite). In the Tarom magnetite-apatite deposits, apatite crystals are associated with magnetite some of which have sizes up to 20 cm. Monazite is the main REE-bearing mineral at these deposits occurring as inclusion in the apatite. The apatite minerals contain 0.4-1.6 wt% REE, and have an REE distribution pattern with a strange LREE/HREE enrichment. The results of this research indicate that the iron oxide - apatite mineralization in the Zanjan region is formed by a quartz-monzonitic magma with calc-alkaline affinity, which occurred in a magmatic arc setting. This research shows that the magnetite - apatite mineralization in the Zanjan region is an important REE concentration in Iran.

**Keywords:** Magnetite-Apatite Mineralization, Western Alborz - Azarbaijan, REE, Calc-Alkaline, Tarom Subzone.

For Persian Version see pages 157 to 170

\*Corresponding author: M. Ghaderi; E-mail: mghaderi@modares.ac.ir