

ژئوشیمی عناصر خاکی کمیاب در کانسارهای اکسید آهن - آپاتیت منطقه معدنی بافق

فرهاد محمدتراب^{۱*}

^۱ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

منطقه معدنی بافق در ایران مرکزی، در برگیرنده ذخایر اقتصادی متعددی از جمله ذخایر آهن و آپاتیت می‌باشد که در ترادفی از واحدهای رسوبی-آتشفشانی کامبرین زیرین قرار گرفته است. واحدهای رسوبی-آتشفشانی موجود در منطقه متشکل از ترادف سنگ‌های آتشفشانی ریولیتی-ریوداستیتی و سنگ‌های رسوبی با ترکیب دولومیت و ماسه سنگ‌های دولومیتی و شیلی است. این واحدهای سنگی در برخی نقاط تحت نفوذ توده‌های عظیم گرانیتی قرار گرفته یا به طور محلی توسط توده‌های کوچکی از جنس میکرو گابرو-دیوریت یا دایک‌های دیابازی قطع شده‌اند. ذخایر آهن-آپاتیت موجود بعضاً حاوی مقادیر نسبتاً بالایی از عناصر خاکی کمیاب (حد اکثر تا ۲٪ مجموع REE) بوده که به همراه دگرسانی وسیع در سنگ دیواره ناشی از فرآیندهای گسترده هیدروترمالی شکل گرفته‌اند. رابطه و همبستگی مثبت و قوی بین میزان P_2O_5 و محتوی عناصر خاکی کمیاب (REE) در این ذخایر دیده می‌شود. لذا مطالعات میکروسکوپی و استفاده از سیستم ریزپردازنده الکترونی (EMPA) نشان می‌دهد که اغلب عناصر خاکی کمیاب در کانی‌های فسفات‌ه مثل آپاتیت (به شکل محلول جامد) یا مونازیت (به شکل کانی مستقل) تمرکز یافته‌اند. از دیگر کانی‌های خاک‌های کمیاب موجود در این کانسارها، هرچند بسیار کمیاب‌تر، می‌توان به کانی‌هایی چون آلانیت، زینوتیم و پاریزیت اشاره کرد. مطالعات ژئوشیمیایی انجام شده تایید می‌نماید که این عناصر به دلیل نزدیکی زیاد شعاع یونی می‌توانند به راحتی جانشین Ca^{2+} در شبکه آپاتیت شوند. با مطالعه توسط میکروسکوپ الکترونی، مشخص شده است که برخی بلورهای آپاتیت یک حالت ناهمگنی بارز از نظر شدت روشنایی در تصاویر BSE از خود نشان می‌دهند. به گونه ای که برخی قسمت‌های بلور تیره‌تر و برخی قسمت‌های آن روشن‌تر دیده می‌شود. این اختلاف و ناهمگنی مشاهده شده در بلور آپاتیت اساساً ناشی از اختلاف غلظت عناصر خاکی کمیاب و برخی عناصر فرعی موجود در شبکه آپاتیت همچون F, Cl, Na, Si است. این نشان می‌دهد که در اثر فرآیندهای هیدروترمال بخش عمده ای از REE از قسمت‌هایی از بلور آپاتیت شسته شده و به صورت انکلوژیون یا بلورهای ریز مونازیت در این بخش‌های تیره رشد کرده است. مونازیت‌های تشکیل شده از مقدار توریم (Th) پائینی برخوردار هستند. مونازیت‌های با منشأ هیدروترمال می‌توانند به راحتی از روی محتوی ThO_2 پایین از مونازیت‌های با منشأ آذرین تفکیک شوند. تجزیه‌های نقطه‌ای انجام شده بر روی مونازیت‌های موجود در کانسارهای بافق نشان داده است که این مونازیت‌ها دارای ThO_2 کمتر از ۱ درصد می‌باشند، لذا بدین وسیله نقش سیالات هیدروترمال در تشکیل آن‌ها تایید می‌شود. امروزه با استفاده از آنالیز ایزوتوپ‌های رادیواکتیو Sm-Nd و با علم به اینکه با وجود متحرک بودن عناصر خاکی کمیاب در محیط‌های هیدروترمالی، ایزوتوپ‌های آن‌ها دستخوش تغییر و تحول نمی‌شوند، به راحتی می‌توان منشأ اولیه این عناصر را ردگیری کرد. ژئوشیمی آپاتیت و عناصر خاکی کمیاب به همراه مطالعات ایزوتوپ‌های رادیواکتیو Sm-Nd در این ذخایر، نقش فرآیندهای هیدروترمالی مرتبط با ماگماتیسیم پوسته‌ای و شسته شدن این عناصر از رسوبات هم عصر یا قدیمی‌تر را در تمرکز این عناصر تایید می‌کند.

کلید واژه‌ها: عناصر خاکی کمیاب، آپاتیت، ژئوشیمی، آنالیز میکروسکوپ الکترونی، مطالعات ایزوتوپ، بافق

Email: fmtorab@yazd.ac

* نویسنده مسئول: فرهاد محمدتراب

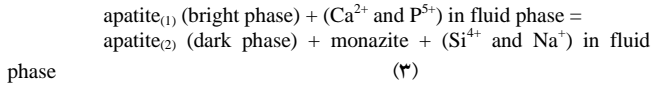
۱- مقدمه

به طور دگرشیب توسط سنگ‌های کامبرین زیرین که اساساً از ترادف واحدهای آتشفشانی-رسوبی تشکیل می‌شود، پوشیده شده است. سنگ‌های آتشفشانی موجود اساساً سنگ‌های ریولیتی، ریوداستیتی کالک آلکالن هستند و در بخش‌هایی از منطقه به طور محلی بازالت‌های اسپیلیتی نیز دیده می‌شود. جنس واحدهای رسوبی این ترادف اکثراً دولومیت و ماسه سنگ‌های آهکی است. در بعضی از مناطق سنگ‌های دگرگونی و واحدهای آتشفشانی-رسوبی به وسیله نفوذی‌های کامبرین زیرین قطع شده‌اند. این سنگ‌های نفوذی اکثراً ترکیبی گرانیتی داشته ولی بعضاً توده‌های نفوذی محلی با ترکیب گابرو-دیوریت نیز در منطقه مشاهده می‌شود. برخی پژوهشگران ماگماتیسیم کامبرین زیرین در منطقه بافق را اساساً به کافت‌های درون قاره‌ای مرتبط با مناطق کششی نسبت داده‌اند. در این نظریه، ماگماتیسیم موجود از نوع آلکالن با منشأ کربناتیته در نظر گرفته شده است (Forster and Jafarzadeh, 1994; Samani, 1988). هرچند، گواه روشنی بر وجود کربناتیت‌ها و منشأ کربناتیته به چشم نمی‌خورد و به نظر می‌رسد که بالا بودن عناصر آلکالن در برخی از سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی ناشی از دگرسانی‌های گسترده سدیک و پتاسیک در منطقه باشد. مطالعات ژئوشیمیایی اخیر به همراه

منطقه معدنی بافق در ایران مرکزی، در برگیرنده ذخایر اقتصادی متعددی از جمله ذخایر آهن و آپاتیت است. ایران مرکزی شامل چندین بلوک تکنونیک است که توسط گسل‌هایی با مقیاس ناحیه‌ای از یکدیگر مجزا شده‌اند. این بلوک‌ها از شرق به غرب شامل بلوک‌های لوت، طیس و یزد می‌باشند. بلوک‌های طیس و یزد به وسیله یک کمربند تکنونیک قوسی شکل با طولی بیش از ۸۰۰ کیلومتر و متوسط عرض ۸۰ کیلومتر از یکدیگر جدا شده‌اند که کمربند تکنونیک کاشمر-کرمان نام گرفته است (Ramezani and Tucker, 2003). بیش از ۳۴ ذخیره آهن-آپاتیت و آنومالی مغناطیسی در این کمربند تکنونیک شناسایی شده‌اند که اغلب آن‌ها بین دو شهر بافق و ساغد (منطقه معدنی بافق) قرار گرفته‌اند (شکل ۱). پی سنگ پرکامبرین در منطقه بافق را سنگ‌های دگرگونی با درجه متوسط تا شدید مثل شیست، گنیس، آمفیبولیت، کوارتزیت و مرمر (سازندهای بونه شور و سرکوه) و سنگ‌های فاقد و یا با دگرگونی ضعیف مثل ماسه سنگ‌های کوارتزیتی، گریواک و فلیت (سازند تشک) تشکیل می‌دهند (Haghipour, 1977). پی سنگ دگرگونی

بلورهای ریز موناژیت تبلور یافته و در همین بخش‌های تیره رشد کرده است (شکل ۴- B). این عمل را می‌توان ناشی از متاسوماتیسم آپاتیت دانست (بنیادی و مهرایی، ۱۳۹۰)

جانمایی و رشد بلورهای موناژیت بر روی بلورهای آپاتیت مستلزم واکنش عمومی زیر است (Harlov et al., 2002; Torab and Lehmann, 2007):



جایی که در آن آپاتیت_(۱)، آپاتیت اولیه غنی از REE، و آپاتیت_(۲)، آپاتیت تهی شده از REE است.

اغلب موناژیت‌های موجود از مقدار توریم (Th) پایینی برخوردار هستند. موناژیت‌های با منشأ هیدروترمال و منشأ آذرین از روی محتوی ThO_2 قابل تفکیک هستند به گونه‌ای که موناژیت‌های هیدروترمال دارای ThO_2 به مراتب کمتر از ۱ درصد و موناژیت‌های با منشأ آذرین دارای ThO_2 بین ۳ تا ۵ درصد یا در مواردی حتی بیشتر می‌باشند (Schandl and Gorton, 2004). تجزیه‌های شیمیایی انجام شده بر روی موناژیت‌های موجود در کانسارهای بافق نشان داده است که این موناژیت‌ها دارای ThO_2 کمتر از ۱ درصد می‌باشند، لذا بدین وسیله نقش سیالات هیدروترمال در تشکیل آن‌ها تایید می‌شود. مطالعات ایزوتوپی امروزه با استفاده از آنالیز ایزوتوپ‌های رادیواکتیو Sm-Nd به راحتی می‌توان منشأ اولیه این عناصر را ردگیری کرد (Gleason et al., 2000). مطالعات ایزوتوپی انجام شده بر روی ایزوتوپ‌های Sm و Nd در برخی سنگ‌ها و کانسنگ‌های آهن و آپاتیت منطقه بافق، عدم وجود ارتباط زایشی بین کانسنگ‌های مذکور و سنگ‌های آذرین و ولکانیک موجود در منطقه را نشان می‌دهد. محاسبه مقدار ϵ_{Nd} نشان می‌دهد که اغلب سنگ‌های آذرین در برگیرنده کانی سازی، مقدار ϵ_{Nd} مثبت ولی کانسنگ موجود (مگنتیت-آپاتیت) به خصوص رگه خالص آپاتیت، ϵ_{Nd} منفی از خود نشان می‌دهد که در شکل ۶ این مقدار در مقابل میزان P_2O_5 نمونه‌ها نشان داده شده است. این بررسی آشکارا نشان می‌دهد که هیچ ارتباط زایشی مشخصی از نظر منشأ عناصر کانسار ساز با سنگ‌های آذرین موجود در منطقه به خصوص برای رگه آپاتیتی وجود ندارد. جهت بررسی بیشتر، میزان ϵ_{Nd} در کانسنگ آپاتیتی منطقه بافق با فسفریت موجود در سازند سلطانیه (هم عصر کانی سازی) مورد مقایسه قرار گرفت. اطلاعات ایزوتوپی حاصل از فسفریت سازند سلطانیه از (Gubanov, 2002 Flitsyn and) اخذ شده است. شباهت نزدیک در میزان ϵ_{Nd} می‌تواند مؤید این مطلب باشد که آپاتیت‌های منطقه معدنی بافق می‌تواند از فسفریت‌های هم عصر و یا قدیمی‌تر خود تحت فرآیندهای هیدروترمالی منشأ گرفته باشد. با اضافه شدن جزء آهن موجود در کانسنگ (مگنتیت-آپاتیت)، میزان ϵ_{Nd} افزایش یافته و حالت بینابینی بین آپاتیت خالص (با منشأ سنگ‌های پوسته‌ای) و سنگ‌های آذرین با ϵ_{Nd} مثبت (با منشأ سنگ‌های گوشه‌ای) پیدا می‌کند.

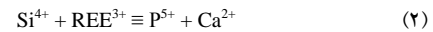
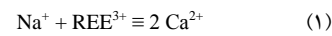
۴- بحث و نتیجه گیری

همبستگی بسیار بالایی بین P و REE در کانسنگ‌های آهن و آپاتیت منطقه بافق دیده می‌شود. این همبستگی بالا نه تنها دلالت بر حضور عناصر خاکی کمیاب در شبکه آپاتیت دارد بلکه نشان می‌دهد مهم‌ترین کانی مستقل خاکی کمیاب نیز یک کانی فسفات است که توسط مطالعات میکروسکوپی موناژیت تشخیص داده شده است. سایر کانی‌های خاکی کمیاب موجود همچون آلانیت، زینوتیم و پاریزیت

تعیین سن U-Pb انجام شده بر روی واحدهای سنگی دلالت بر منشأ ماگماتیک کالک-آلکان در منطقه در اثر فرورانش پوسته اقیانوسی قدیمی به زیر خرد قاره ایران مرکزی در کامبرین زیرین دارد (Ramezani and Tucker, 2003).

۲- مطالعه کانی‌های خاک‌های کمیاب

ارتباط تنگاتنگ و نزدیکی بین مقدار فسفر و میزان عناصر خاکی کمیاب در کانسارهای آهن و آپاتیت منطقه بافق به چشم می‌خورد. شکل ۲ این ارتباط را به صورت نمودار همبستگی بین میزان P_2O_5 و درصد کل عناصر خاکی کمیاب (REE) در کانسنگ‌های منطقه بافق به خوبی نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود ضریب همبستگی $r = +0.985$ گواه بر این ارتباط زایشی نزدیک است. مطالعات ژئوشیمیایی انجام شده تایید می‌نماید که بخش عمده‌ای از عناصر خاکی کمیاب به صورت محلول جامد در شبکه آپاتیت جای گرفته است. REE می‌تواند بر اساس واکنش‌های دو گانه زیر جانشین Ca در شبکه آپاتیت شود (شکل ۳):



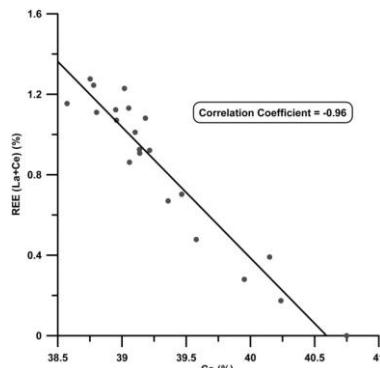
موازنه بار الکتریکی لازمه در جانمایی‌های مذکور با حضور عناصری چون Na^+ و Si^{4+} و ورود آن‌ها به شبکه آپاتیت صورت می‌گیرد (Roeder et al., 1987; Harlov et al., 2002). مهم‌ترین کانی مستقل خاکی کمیاب موجود در منطقه یعنی کانی موناژیت (Monazite) با فرمول عمومی $(\text{Ce,La,Th})\text{PO}_4$ خود یک کانی فسفات است. مطالعات میکروسکوپی نشان داده است که اغلب، موناژیت‌های موجود به صورت انکلوژیون در سطح آپاتیت شکل گرفته‌اند (شکل ۴- A, B). هرچند این کانی در اثر تبلور مجدد و رشد ثانویه به صورت کانی مستقل نیز مشاهده می‌شود (شکل ۴- C). کانی‌های خاکی کمیاب دیگر مطالعه شده در منطقه شامل کانی‌های زینوتیم (Xenotime)، آلانیت (Allanite) و پاریزیت (Parisite) است که بسیار نادر بوده و در برخی از نقاط همراه با رگچه‌های سیلیسی و کربناته و در آخرین مراحل فرآیندهای هیدروترمالی شکل گرفته‌اند (Torab and Lehmann, 2007) (شکل ۴- D, E, F).

۳- رابطه آپاتیت- موناژیت

همانطور که ذکر شد، موناژیت مهم‌ترین و فراوان‌ترین کانی خاکی کمیاب مشاهده شده در کانسنگ است. تحت مطالعات انجام شده توسط میکروسکوپ الکترونی و تهیه تصاویر BSE (Back Scattered Electron)، برخی بلورهای آپاتیت یک حالت ناهمگنی بارز از نظر شدت روشنایی از خود نشان می‌دهند به گونه‌ای که در تصویر BSE برخی قسمت‌های بلور تیره‌تر و برخی قسمت‌های آن روشن‌تر دیده می‌شود (شکل ۴- A, B). این اختلاف و عدم همگنی مشاهده شده در بلور آپاتیت اساساً ناشی از اختلاف غلظت عناصر خاکی کمیاب و برخی عناصر فرعی موجود در شبکه آپاتیت همچون Si, Na, Cl, F است (شکل ۵). عناصر خاکی کمیاب وزن اتمی بالایی دارند و لذا الکترون بازگشتی بیشتر و در نتیجه تصویر BSE روشن‌تری تولید می‌کنند. لذا به طور عکس بخش‌های فقیر از REE در تصویر تیره‌تر دیده می‌شوند. همان طور که مشاهده می‌شود، رشد انکلوژیون‌های موناژیت در بخش‌های تیره‌تر کاملاً مشهود است. این نشان می‌دهد که در اثر فرآیندهای هیدروترمال بخش عمده‌ای از REE از قسمت‌هایی از بلور آپاتیت شسته شده (بخش‌هایی که پس از عمل شسته شدن و تحرک REE تیره شده‌اند) و به صورت انکلوژیون یا

ماگماتیسیم پوسته‌ای و شسته شدن این عناصر از رسوبات هم عصر یا قدیمی‌تر (احتمالاً فسفریت‌های رسوبی) را در تمرکز این عناصر تایید می‌کند. در این ارتباط شورا به‌های تبخیری کامبرین آغازین نقش به‌سزایی در تشکیل کمپلکس‌های ژئوشیمیایی و حمل عناصر دارند (صادقی و دیگران، ۱۳۸۸).

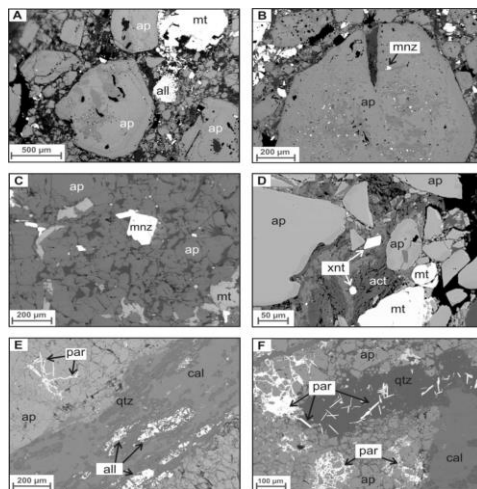
شکل ۷ مدل شماتیکی از نحوه تشکیل این ذخایر، ارتباط آن‌ها با سنگ در برگیرنده، نقش رسوبات تبخیری قدیمی در تشکیل شورا به‌ها و کمپلکس‌های ژئوشیمیایی، آلتراسیون‌های رایج و چگونگی تمرکز عناصر خاکی کمیاب در ذخایر تشکیلی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- رابطه میزان عناصر خاکی کمیاب و محتوی کلسیم در شبکه آپاتیت

مبنی بر جانمایی REE به جای Ca در بلور آپاتیت

(داده‌ها بر اساس آنالیز ریزپردازنده الکترونی (EMPA))



شکل ۴- تصاویر BSE ریزپردازنده الکترونی (EMPA):

A و B- بلورهای نیمه شکل دار آپاتیت (ap) حاوی بخش‌های تیره و روشن و رشد بلورهای ریز موناژیت (mnz) در بخش تیره، به همراه مگنتیت (mt)،

در زمینه‌ای از بلورهای دانه ریز آپاتیت و کانی‌های باطله

C- رشد بلور نیمه خود شکل موناژیت (mnz) در رگه آپاتیت برشی شده

D- بلورهای شکل دار زینوتیم (xnt) در میان باطله، کانسنگ مگنتیت (mt) -

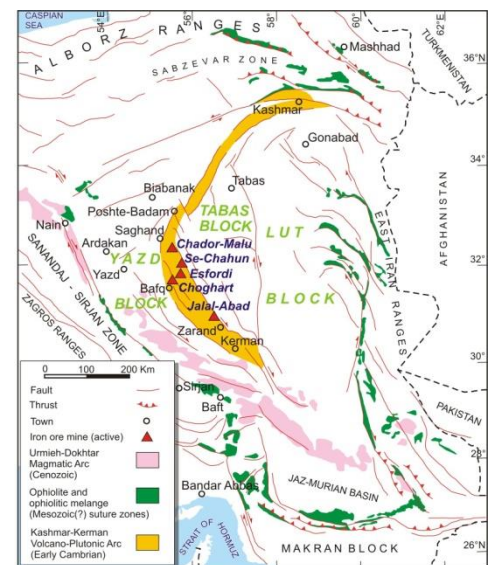
آپاتیت (ap)

E و F- رشد بلورهای آلانیت (all) و پارزیت (par) در رگه‌های کلسیت و کوارتز به

همراه کانسنگ برشی شده آپاتیت

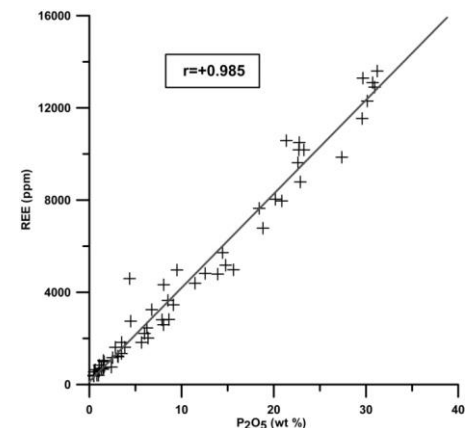
بسیار کمیاب‌تر بوده و نقش کمتری در غلظت عناصر خاکی کمیاب در این کانسارها دارند. عدم تجانس ترکیبی موجود در بلورهای آپاتیت از نظر محتوی REE نشان دهنده نقش سیالات گرمایی در شستشوی عناصر خاکی کمیاب از شبکه آپاتیت و تمرکز و تبلور آن به شکل کانی موناژیت است. این کانی نه تنها به شکل انکلوژیون در داخل آپاتیت بلکه در اثر تبلور و رشد مجدد بصورت بلورهای مستقل شکل دار نیز یافت می‌شود. وجود غلظت پائین Th در موناژیت‌ها مؤید تشکیل آن‌ها در درجه حرارت پائین و نقش سیالات گرمایی در تشکیل آن‌ها است که آن‌ها را از موناژیت‌های با منشأ آذرین متمایز می‌کند.

ژئوشیمی آپاتیت و عناصر خاکی کمیاب به همراه مطالعات ایزوتوپی رادیوکتیو Sm-Nd در این ذخایر، نقش فرآیندهای هیدروترمالی مرتبط با



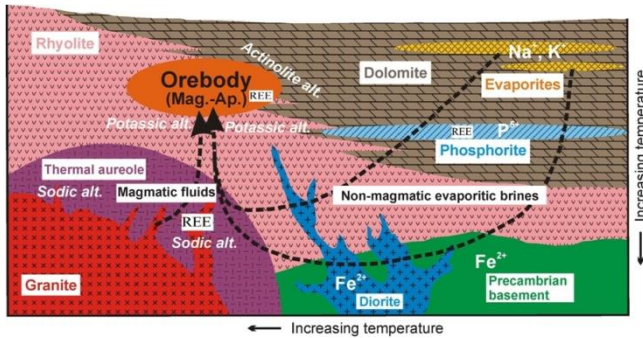
شکل ۱- نقشه بلوک‌های ایران مرکزی و کمربند تکنوتیکی کاشمر- کرمان به همراه

موقعیت مهمترین ذخایر آهن- آپاتیت منطقه باقی

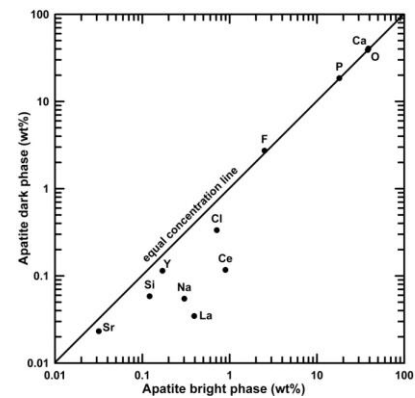


شکل ۲- نمودار همبستگی بین میزان REE و P₂O₅ در کانسنگ‌های آهن و آپاتیت منطقه

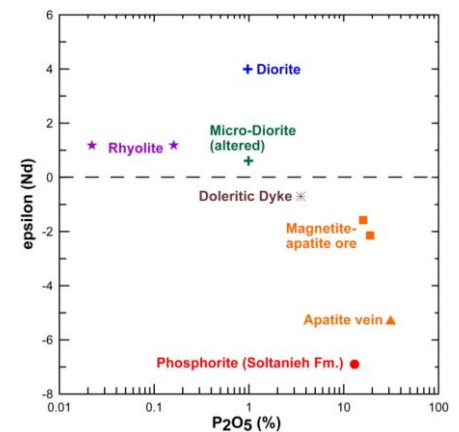
معدنی باقی



شکل ۷- مدل شماتیک نشان دهنده نحوه تشکیل ذخایر آهن-آپاتیت منطقه معدنی بافق و ارتباط آن با سنگ دیواره، رسوبات تبخیری و آلتراسیون‌های رایج و منشأ و نحوه تمرکز عناصر خاکی کمیاب.



شکل ۵- مقایسه بین غلظت عناصر در بخش‌های تیره و روشن بلورهای آپاتیت



شکل ۶- تغییرات ϵ_{Nd} در مقابل محتوی P_2O_5 در سنگ‌ها و کانسنگ‌های مختلف منطقه بافق

کتابنگاری

- بنیادی، ز.، مهرابی، ب.، ۱۳۹۰- متاسوماتیزم آپاتیت در کانسار آهن سه چاهون، بافق، استان یزد، مجموعه مقالات سی امین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- صادقی، ر.، مهرابی، ب.، بنیادی، ز.، ۱۳۸۸- ارتباط شوراچه‌های تبخیری کامبرین آغازین با ژئوشیمی و ژنر آهن آنومالی شمالی در شمال بافق (ایران مرکزی)، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد سی و پنجم، شماره ۴، ۱۵۵-۱۶۶.

References

- Felitsyn, S., and Gubanov, A.P., 2002- Nd isotope composition of early Cambrian discrete basins, *Geological Magazine*, 139, 159-169.
- Forster, H., and Jafarzadeh, A., 1994- The Bafq mining district in Central Iran - a highly mineralized Infracambrian volcanic field, *Economic Geology*, 89, 1697-1721.
- Gleason, J.D., Marikos, M.A., Barton, M.D., and Johnson, D.A., 2000- Neodymium isotopic study of rare earth element sources and mobility in hydrothermal Fe oxide (Fe-P-REE) systems, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 1059-1068.
- Haghipour, A., 1977- Geological map of the Biabanak-Bafq area (scale 1:500,000). *Geological Survey of Iran*.
- Harlov, D.E., Andersson, U.B., Förster, H.J., Nyström, J.O., Dulski, P., and Broman, C., 2002- Apatite-monzite relations in the Kiirunavaara magnetite-apatite ore, northern Sweden, *Chemical Geology*, 191, 47-72.
- Ramezani, J., and Tucker, R.D., 2003- The Saghand region, Central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics, *American Journal of Science*, 303, 622-665.
- Roeder, P.L., MacArthur, D., Ma, X.P., Palmer, G.R., and Mariano, A.N., 1987- Cathodoluminescence and microprobe study of rare-earth elements in apatite, *American Mineralogist*, 72, 801-811.
- Samani, B.A., 1988- Metallogeny of the Precambrian in Iran, *Precambrian Research*, 39, 85-106.
- Schandl, E.S., and Gorton, M.P., 2004- A textural and geochemical guide to the identification of hydrothermal monazite: Criteria for selection of samples for dating epigenetic hydrothermal ore deposits, *Economic Geology*, 99, 1027-1035.
- Torab, F.M., and Lehmann, B., 2007- Magnetite-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: apatite geochemistry and monazite geochronology, *Mineralogical Magazine*, 71, 347-363.