Archive of SID

مجله علوم و فنون هسته‌ای، جلد ۸۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۸

سیماهای کانه‌زایی عناصر کمیاب و نادر خاکی در سنگ‌های برشی در کانسار سه‌چاهون براساس شواهد کانی‌شناختی ژئوشیمیایی

غلامرضا میرزابابایی*[۱]، محمد یزدی[۱]، محمدرضا رضوانیان‌زاده[۲]، مهرداد بهزادی[۱]، محمد قنادی‌مراغه[۲]

۱. بخش زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۶۹۴۱۱-۱۹۸۳۹، تهران ـ ایران

۲. پژوهشکده‌ی مواد و سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران ـ ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۶/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۰/۱۲

چکیده: بررسی کانی‌شناسی باطله و کان‌سنگ کانسار مگنتیت- آپاتیت سه‌چاهون مبین حضور کانی‌های میزبان Th و REE با رابطه‌های پاراژنتیک با کانی‌هایی مانند: آمفیبول‌ها، مگنتیت و کلسیت است. کانی‌های میزبان عنصرهای کمیاب و نادر خاکی هم در کان‌سنگ مگنتیت- آپاتیت و هم در بخش باطله‌ی معدن یافت می‌شوند و در فازی موسوم به فاز برشی تجمع قابل توجهی نشان می‌دهند. مقدارهای بالای عنصرهای کمیاب (توریم) و خاکی نادر سبک (LREE) شامل لانتان، سریم، پرازئودیمیم و نئودیمیم شاخصه‌ی این منطقه است که در تجزیه‌های صورت گرفته به وضوح قابل دریافت است و رخداد آن وابسته به سیال‌هایی است که پس از تشکیل کان‌سنگ مگنتیت- آپاتیت، باعث متاسوماتیسم سنگ‌های میزبان کانسار و بخشی از کان‌سنگ شده و عناصر کمیاب و خاکی نادر را در فازهای سیلیکاتی و فسفاتی در سنگ متمرکز نموده است. منشأ این سیال‌ها به خوبی مشخص نشده است؛ اما براساس شواهد زمین‌شیمیایی، منشأ احتمالی آن‌ها در وابستگی نزدیک با ماگماهای مشتق شده از توده‌های نیمه‌نفوذی تزریق شده در منطقه‌های فرورانش است. براساس شواهد پاراژنتیک و ژئوشیمیایی، قسمتی از این عناصر می‌توانسته توسط کمپلکس‌های کربناتی حمل شده و در محل تجمع و تشکیل سنگ‌های مزبور، تمرکز یافته باشد.

کلیدواژه‌ها: کانی‌شناسی، عناصر کمیاب و خاکی نادر، فاز برشی، کانسار سه‌چاهون

Mineralization aspects of trace and rare earth elements in the brecciated rocks in the Se-Chahun ore deposit: insights from mineralogical and geochemical evidence

G. Mirzababaei*[1], M. Yazdi[1], M.R. Rezvanianzadeh[2], M. Behzadi[1], M. Ghannadi Maragheh[2]

1. Department of Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti Uuniversity, P.O.Box: 19839-69411, Tehran - Iran

2. Materials and Nuclear Fuel Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran – Iran

Abstract: Mineralogical examination of the gangue and ore parts of the Se-Chahun magnetite-apatite ore deposit revealed the existence of Th and REE bearing minerals with paragenetic relationships with amphiboles, magnetite and calcite. Trace and REE host minerals are found in both of the gangue and the magnetite-apatite ore showing remarkable concentration in a phase referred to as the brecciated phase. This zone (phase) is characterized by high amounts of trace (Th) and light rare earth elements including La, Ce, Pr and Nd that were revealed in geochemical analysis. Mineralization of these elements is related to fluids appeared after magnetite mineralization in the region and resulted in metasomatism of the host rocks and a part of the ore and also concentration of the REE and trace elements as phosphates and silicates, respectively. There is not a clear key concerning the origin of these fluids but based on the geochemical evidence, the probable provenance is thought to be related to the magmas derived from the arc related subvolcanic bodies injected in subduction zones. Based on the paragenetic and geochemical evidence, a part of these elements is transported by carbonate complexes and accumulated in the brecciated rocks.

Keywords: Mineralogy, Trace and rare earth elements, Brecciated phase, Sechahun ore deposit

*Email: g.mirzababaei@gmail.com

www.SID.ir

Archive of SID

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه

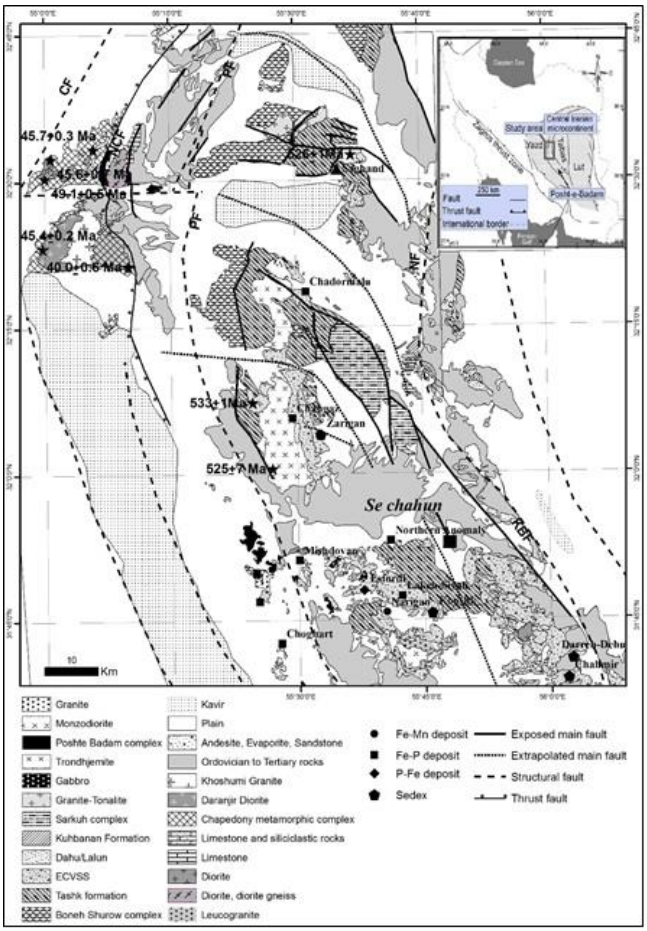
منطقه‌ی بافق میزبان بزرگ‌ترین کانسارهای آهن- آپاتیتی ایران است که توسط بسیاری از زمین‌شناسان مورد مطالعه قرار گرفته و تاکنون چندین مدل زمین‌شناختی برای نحوه‌ی تشکیل این‌گونه کانسارها در این منطقه ارایه شده است [۱-۶]. این مطالعه براساس بررسی‌های کانی‌شناختی و نیز نتایج تجزیه‌های شیمیایی بر روی مجموعه‌ی متنوعی از سنگ‌ها در کانسار سه‌چاهون است که به منظور تحلیل رخداد عناصر کمیاب و خاکی نادر، فرایندهای دخیل در انتقال این عناصر از سنگ منبع و تمرکز آن‌ها در سنگ‌های میزبان کانه‌زایی صورت گرفته است. همراهی کانی‌های سیلیکات و فسفات این عناصر با کانی‌های اکتینولیت و آلبیت، نشان‌دهنده‌ی وابستگی تمرکز عناصر خاکی نادر به فرایندهای متاسوماتیک در منطقه‌ی بافق است. بعضی از زمین‌شناسان، اکتینولیت‌زایی را مربوط به پدیده‌ی آتشفشانی ریولیتی زیردریایی آلبیتی و غنی از اکتینولیت در منطقه‌ی ایران مرکزی می‌دانند [۴]. همان‌طور که گفته شد کانه‌زایی عناصر خاکی نادر از جمله‌ی خصوصیت‌های قابل توجه در کانسارهای آهن منطقه‌ی بافق است. مقادیر عناصر کمیاب و خاکی نادر در برخی از کانسارهای منطقه‌ی بافق از جمله چغارت (خشنودی و دیگران [۷])، قابل ملاحظه است. بعضی از این عناصر به طور وسیعی در طبیعت توزیع شده‌اند و معمولاً در دماهای بالا در مجموعه‌ی بزرگی از کانی‌ها عمدتاً شامل: اکسیدها، سیلیکات‌ها، فسفات‌ها در پگماتیت‌ها و ... یافت می‌شوند. وجود سیلیکا و عناصر قلیایی احتمالاً موجب تشکیل کمپلکس‌های سیلیکاتیِ به شدت متحرک این عناصر می‌شود و به طور مشابه، وجود یون‌ها یا ترکیب‌های دخیل در کانه‌زایی از قبیل F^-، Cl، B، PO_4 و CO_2 احتمالاً تأثیر قابل توجهی در افزایش تحرک برخی از عناصر مزبور در شرایط فشار و دمای بالا دارد [۸]. هدفِ پژوهش حاضر، بررسی سیماهای کانه‌زایی و کانی‌شناسی عناصر کمیاب و خاکی نادر در کانسار سه‌چاهون، بررسی پراکندگی این عناصر در سنگ‌های برشی با توجه به نمودارهای بهنجار شده نسبت به کندریت و جبه‌ی اولیه و نیز بررسی تشابه موجود بین الگوی پراکندگی عناصر مذکور بر روی نمودارهای بهنجار شده برای سنگ‌های برشی و کان‌سنگ مگنتیت است.

۲. زمین‌شناسی منطقه

کانسار سه‌چاهون در منطقه‌ی بافق قرار گرفته است. زمین‌شناسی منطقه‌ی بافق توسط زمین‌شناسان بسیاری، مورد مطالعه قرار گرفته است [۳، ۶، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲]. نظر به این‌که این منطقه به عنوان میزبان کانسارهای آهن آپاتیتی در ایران مشهور است، در مدل‌های زمین‌ساختی ارایه شده به نوعی وابستگی با موضوع مذکور تا حدودی مشهود است. منطقه‌ی معدنی بافق در حوزه‌ی تکتونوماگمایی ایران مرکزی قرار گرفته است. گسترش خرده‌قاره‌ی ایران مرکزی وابسته به فاز کوهزایی پان آفریقایی و حرکت‌های صفحه‌ای وابسته به آن در حدود ۶۰۰ میلیون سال پیش است [۱]. تشکیلات تاشک به عنوان پی‌سنگ پرکامبرین منطقه‌ی بافق [۱۰]، متشکل از سنگ‌های دگرگونی با درجه‌های پایین تا بالا شامل: شیل اسلیتی، ماسه‌سنگ کوارتزیتی، گریواک و فیلیت است. سنگ‌های دگرگونی به صورت ناپیوسته توسط یک توالی آتشفشانی- رسوبی به سن کامبرین زیرین با ترکیب عمده‌ی دولومیت و سنگ‌های رسوبی پوشیده شده است [۱۰]. سنگ‌های آتشفشانی شامل ریولیت‌ها و ریوداسیت‌های کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا هستند. توالی‌های دگرگونی و آتشفشانی- رسوبی میزبان سنگ‌های نفوذی کامبرین هستند که دارای تنوع ترکیبی از گرانیت تا گرانودیوریت و گابرودیوریت با شاخص کالک‌آلکالن هستند. کانسار سه‌چاهون در واحد توف ریولیتی میزبانی شده است [۱۲] (شکل ۱). از مهم‌ترین خصوصیت‌های کانسارهای ایران مرکزی، رخداد یک فاز برشی متشکل از لیتولوژی‌های مختلف و هم‌چنین رخداد مقادیر قابل توجهی اکتینولیت در این کانسارها است که توسط بعضی از زمین شناسان مورد توجه قرار گرفته است [۷]. شاخصه‌ی منحصربه‌فرد این فاز، وجود مقادیری از عناصر کمیاب و خاکی نادر همراه با کانه‌زایی مگنتیت و اکتینولیت است که اهمیت مطالعه‌ی این فاز را بیش از پیش آشکار می‌کند. رنگ سبز اکتینولیت عمدتاً به خاطر وجود مقادیر بالای آهن در ترکیب آن است. رخداد این کانی در نقاط مختلفی از جهان گزارش شده است که تقریباً همگی این نقاط در بردارنده سنگ‌های دگرگونی شیستی (به ویژه شیست سبز) و نیز مناطق متأثر از رخدادهای متاسوماتیکی هستند. پوسته‌های اقیانوسی و یا اماکنی که دارای مقادیر بالایی الیوین بازالت هستند به عنوان یکی از مهم‌ترین اماکن رخداد اکتینولیت پس از اعمال فرایندهای دگرگونی به شمار می‌آیند.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱. نقشه‌ی زمین‌شناسی ساده شده‌ی منطقه‌ی بافق [۶، ۷، ۱۳].

۳. روش مطالعه

سیر علمی مطالعه‌ی حاضر به ترتیب شامل بررسی مطالعات پیشین در خصوص کانه‌زایی عناصر کمیاب و خاکی نادر هم در درون کان‌سنگ آهن و هم در فاز برشی در حاشیه و درون برخی از کانسارهای آهن- آپاتیت در ایران مرکزی، مطالعات صحرایی از جمله بررسی‌های میدانی و نیز نمونه‌گیری از کان‌سنگ آهن، پیت معدن، انبار باطله و مغزه‌های حفاری در کانسار سه‌چاهون، مطالعات میکروسکوپی کانی‌شناسی و در نهایت تجزیه‌های شیمیایی و تحلیل و تفسیر آن‌ها بوده است. به منظور بررسی موضوع تمرکز عناصر کمیاب و خاکی نادر در این کانسار، تعداد ۳۸ نمونه از سنگ‌های مختلف دارای رخنمون انتخاب و بخشی از پودر نمونه‌های به دست آمده برای تجزیه‌ی عنصری توسط طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده‌ی القایی[1] (ICP-MS) به آزمایشگاه ارسال شد.

۱.۳ بررسی‌های صحرایی

در بررسی‌های صحرایی در کانسار سه‌چاهون که هم در پیت معدن و هم در انبار باطله‌ی کانسار صورت گرفت، مشخص شد که بعضی از توده‌های سنگی دارای خصوصیت‌های برشی هستند، که گسترش قابل توجهی در حاشیه کانسار دارند. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که برش در این کانسار محصول فرایندهای دگرنهادی حاصل از تلفیق سیال‌های با منشأ پساکانساری با سنگ‌های میزبان است. در زمینه‌ی این سنگ‌ها، کانی‌های فلدسپاتی از جمله آلبیت و آلکالی‌فلدسپار فراوان یافت می‌شوند و همراه با آمفیبول‌ها، قلوه‌های متعلق به سنگ‌های قدیمی‌تر را در بر گرفته‌اند و بافت برشی سنگ را تشکیل داده‌اند (شکل ۲). وجود رگه‌های کلسیتی از شاخصه‌های بسیار واضح در برخی از سنگ‌های برشی است.

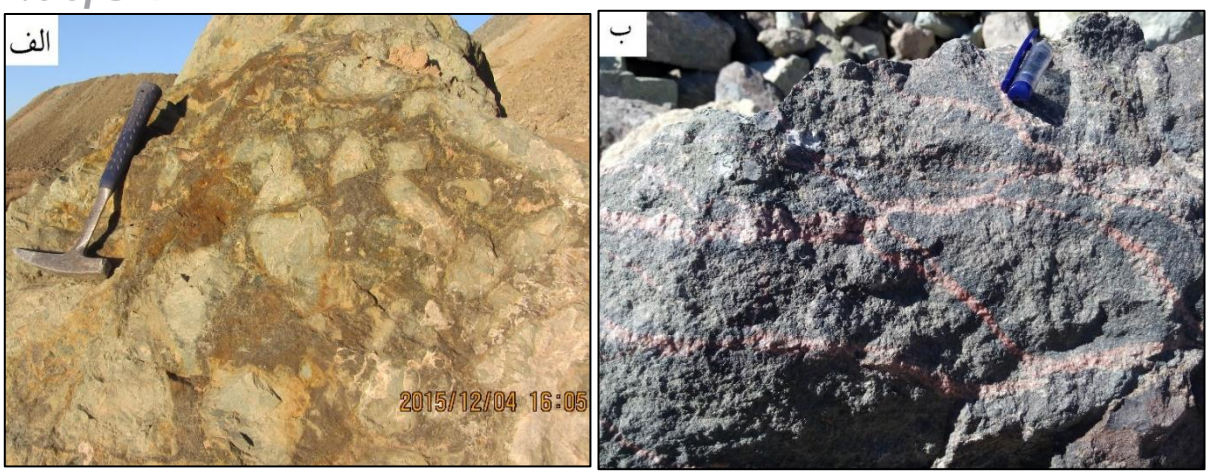
۲.۳ مطالعات کانی‌شناسی باطله (و کان‌سنگ) در کانسار سه‌چاهون

بررسی مقطع‌های نازک و نازک صیقلی تهیه شده از بخش باطله (و بخش کان‌سنگ) کانسار سه‌چاهون مبین رخداد مقادیر قابل توجهی از کانی‌هایی علاوه بر مگنتیت است که به ترتیب فراوانی شامل: اکتینولیت، فلدسپار (پلاژیوکلاز)، کلسیت، آپاتیت، کوارتز و ... است. سنگ‌های متعلق به فاز برشی در منطقه‌ی بافق، شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های متعلق به فرایندهای دگرنهادی (متاسوماتیکی) هستند که در بخشی از سنگ ماهیت اولیه از بین رفته است و در قسمت‌هایی دیگر، قلوه‌هایی با ترکیبی نسبتاً پایدارتر، قابل شناسایی هستند. از سنگ‌های متعلق به فاز مزبور، مقاطع نازک تهیه شده و مورد مطالعه‌ی کانی‌شناسی قرار گرفتند. در مطالعات میکروسکوپی نیز وجود سیلیکات‌های برخی عناصر کمیاب (هوتونیت و توریت) با خصوصیت‌های برجسته از جمله برجستگی بسیار زیاد نسبت به بسیاری از سیلیکات‌های دیگر مشاهده شد که از کانی‌های کمیاب در طبیعت به شمار می‌روند. سنگ‌های متعلق به این فاز علاوه بر فلدسپار، اکتینولیت، هوتونیت و توریت، دارای آپاتیت، اسفن و زیرکن (شکل ۳) نیز است.

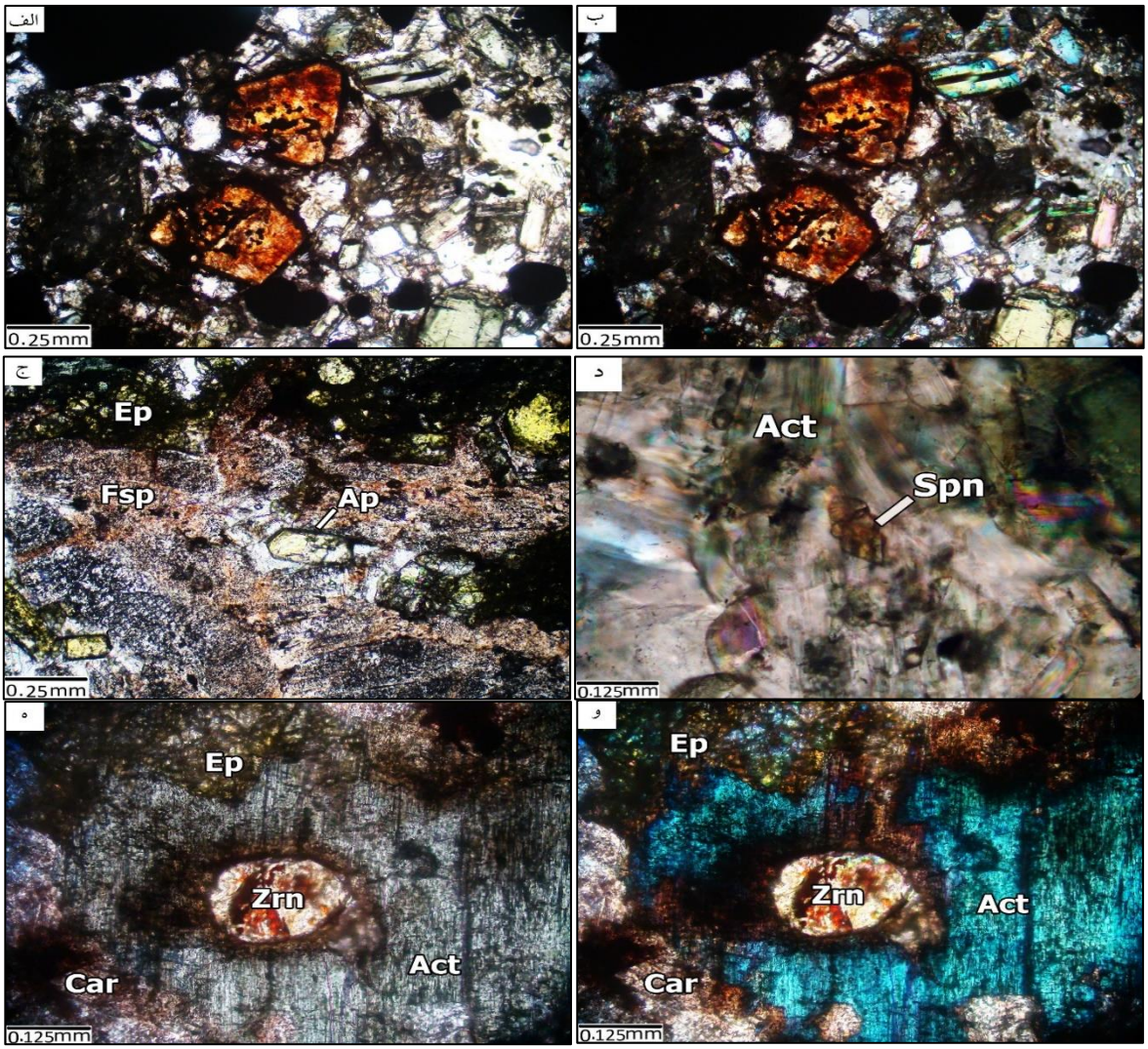
1. Induced coupled plasma mass spectrometer

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲. الف) سیمای عمومی سنگ‌های متعلق به فاز برشی در کانسار سه‌چاهون که به عنوان بخشی از باطله‌ی کانسار به شمار می‌رود؛ ب) یکی از سیماهای سنگ‌های برشی که دارای مقادیر بالایی کلسیت به صورت رگه‌ای است. از مهم‌ترین ویژگی این شکل از برش، وجود رگه‌های کلسیتی (نوارهای صورتی رنگ) در اطراف قلوه‌های قدیمی در برش است. در مطالعات کانی‌شناسی صورت گرفته، مقطع‌هایی که محل برش آن‌ها در فاصله‌ی کمی از این رگه‌های کلسیتی قرار دارد، دارای تراکم بیش‌تری از برخی کانی‌های میزبان عناصر کمیاب هستند.



شکل ۳. الف) (نور ppl) و ب) (نور xpl): رخداد سیلیکات‌های برخی عناصر کمیاب (کانی‌های سرخ رنگ شامل هوتونیت و توریت) در زمینه‌ای از آمفیبول در کنار اکتینولیت؛ ج) (نور xpl): رخداد آپاتیت در فاز برشی در زمینه‌ی فلدسپارهای دگرسان (عمدتاً آلبیت)، د) (نور xpl): اسفن یا تیتانیت در کنار آمفیبول؛ ه) (نور ppl) و و) (نور xpl): نمای نزدیکی از زیرکن که مبین رخداد این کانی به حالت خودشکل با حواشی مشخص است.

www.SID.ir

Archive of SID

در بررسی‌های میکروسکوپی مقطع‌های نازک و نازک صیقلی و تصویرهای حاصل این مسأله قابل دریافت است که کانی‌های عناصر کمیاب و خاکی نادر دارای ویژگی‌های خاصی هستند که دو مورد شاخص از آن‌ها عبارت‌اند از: برجستگی واضح و منحصربه‌فرد در مطالعات میکروسکوپی و نیز وجود رابطه‌های پاراژنتیک بین این کانی‌ها و اکتینولیت و کلسیت در فاز برشی. براساس مطالعات انجام شده و نیز مطالعات پیشین، بین کانی‌های مزبور از جمله اکتینولیت، آلبیت، کلسیت، دانه‌های مگنتیت در فاز برشی و تعداد دیگری کانی، ارتباط پاراژنتیکی وجود دارد. با این حساب و همان‌طور که در بخش ژئوشیمی اشاره خواهد شد، بیش‌ترین مجموع عیار عناصر کمیاب و خاکی نادر مربوط به سنگ‌های متاسوماتیتی است که دارای رگه‌های کربناتی هستند (شکل ۲). این نوع سنگ بیش‌تر در ناهنجاری ۱۰ سه‌چاهون نمود دارد. بررسی رابطه‌های سنی در واحدهای سنگی مختلف در کانسار نشان می‌دهد که سنگ میزبان عناصر خاکی نادر، همان سنگ‌های میزبان کانسار در زمان تشکیل کانسار بوده‌اند که بعدها مورد هجوم سیالاتی قرار گرفته‌اند که دارای مقادیر زیادی از کمپلکس‌هایی بوده‌اند که عناصر خاکی نادر را انتقال داده و به صورت سیلیکات یا فسفات ته‌نشین نموده‌اند. از ویژگی‌های شاخص در برخی از رخنمون‌های سنگ برشی، وجود رخدادهایی از کانی پیریت است. پیریت هم به صورت رگه‌ای و هم به صورت دانه‌ای یافت می‌شود. پیریت رگه‌ای ظاهراً در مراحل انتهایی پدیده‌ی دگرنهادی در سنگ تزریق شده است. اثرات تجزیه‌ی پیریت به هماتیت و سایر اکسیدهای آهن به طور واضح مشاهده نمی‌شود، اما تبدیل مگنتیت به هماتیت به وضوح دیده می‌شود.

۳.۳ تجزیه‌ی کان‌سنگ و باطله در کانسار سه‌چاهون

براساس نتایج به دست آمده، بخش‌هایی از کان‌سنگ مگنتیت دارای تمرکز شاخصی از عناصر کمیاب و خاکی نادر است. علاوه بر کان‌سنگ مگنتیت، سنگ‌های برشی در حاشیه‌ی کانسار که متأثر از فرایندهای دگرنهادی (متاسوماتیکی) بوده‌اند، تمرکزهای قابل توجهی از عناصر خاکی نادر نشان می‌دهند (شکل ۴). هر کدام از این نوع سنگ‌ها، تنوع کانی‌شناختی مختص به خود را دارد (جدول ۱). در کان‌سنگ مگنتیت، کانه‌زایی آپاتیت به میزان متغیری رخ داده است به نحوی که در بخش‌هایی از معدن، میزان فسفر به بیش از ۲ درصد عنصری نیز می‌رسد. گفتنی است که در تجزیه‌های انجام شده مشخص شد که مجموع عناصر کمیاب و خاکی نادر تمرکز قابل توجهی نشان می‌دهد. براین اساس، علاوه بر لیتولوژی میزبان، نمودارهای بهنجار شده جهت تشخیص تغییرات عناصر کمیاب برای سنگ‌های برشی ترسیم گردید. براساس مطالعات کانی‌شناسی، بخشی از سنگ اولیه، متاسوماتیت‌ها، ریولیت یا توف ریولیتی بوده است. نمودار بهنجار شده‌ی عناصر کمیاب و خاکی نادر نسبت به کندریت (شکل ۴) برای زون کانه‌زایی عناصر کمیاب و خاکی نادر مبین غنی‌شدگی این نوع سنگ‌ها از عناصر مزبور و تهی‌شدگی از عناصری هم‌چون اروپیم، نیوبیم و تیتانیم است. ناهنجاری منفی اروپیم مبین شرایط کاهشی و مقادیر کم نیوبیم و تیتانیم خاص سنگ‌هایی است که در محیط‌های زمین‌ساختی وابسته به فرورانش تشکیل شده‌اند.

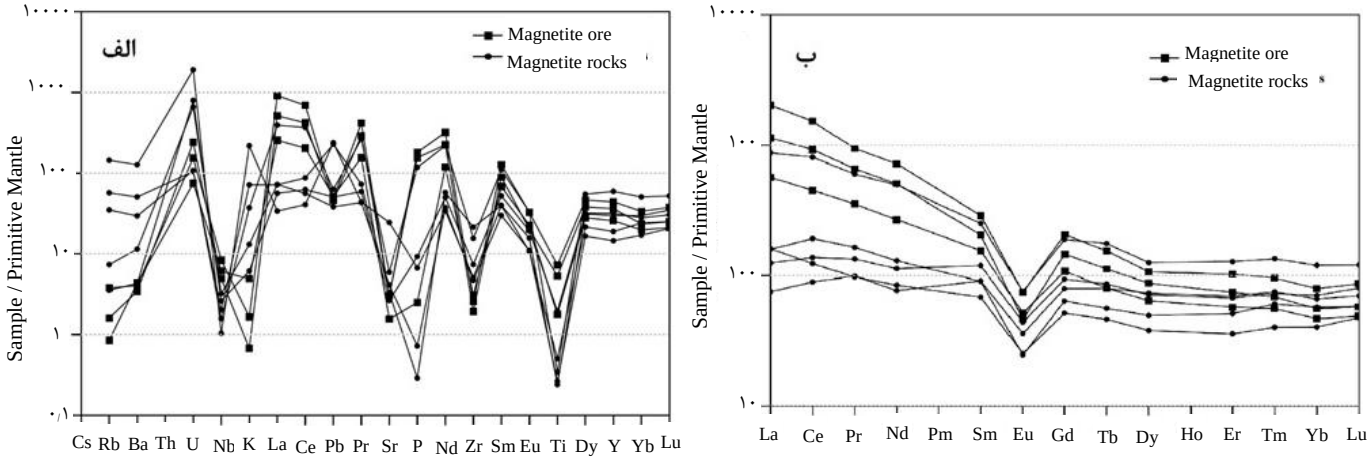
در شکل ۴ نمودارهای عنکبوتی عناصر کمیاب و خاکی نادر بهنجار شده نسبت به جبه‌ی اولیه و کندریت برای تعدادی از نمونه‌های کان‌سنگ مگنتیت و حوزه‌ی برشی در کانسار سه‌چاهون نشان داده شده است. این عناصر (به استثنای باریم و پتاسیم) تحرک‌پذیری نسبتاً کم‌تری در مقایسه با سایر عناصر در حوزه‌ی دگرسانی (و متاسوماتیسم) دارند، از این‌رو میزان تمرکز آن‌ها در سنگ‌های متأثر از متاسوماتیسم، مورد بررسی قرار گرفته است. الگوی تمرکز این عناصر در این نوع سنگ‌ها مشابه الگوی تمرکز این عناصر در سنگ‌های خاص منطقه‌های فرورانش است، که با مقادیر کم تیتانیم و نیوبیم مشخص می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱. تنوع کانی‌شناختی در سنگ‌های مختلف از کانسار سه‌چاهون

نوع سنگ / خصوصیت‌ها	کانی‌شناسی	خصوصیت‌های شاخص
ریولیت	پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار، کوارتز	سنگ دانه‌ریز و زمینه‌ی دانه‌ریز تا کمی شیشه‌ای است
دایک‌های بازیک	پلاژیوکلاز، کانی‌های مافیک و مات، اکسیدهای ثانویه‌ی آهن	مقادیر بالای تیتانیم
متاسوماتیت‌های با مقادیر بالای آپاتیت	اکتینولیت، سرپانتین، آپاتیت، کلریت، اکسیدهای آهن، زیرکن	وفور مقادیر بالای آپاتیت در زمینه‌ی سنگ
کان‌سنگ مگنتیت	مگنتیت، آپاتیت، کلسیت، اکسیدهای فریک، سرپانتین، تالک	این کانی‌ها متعلق به چند فاز هستند
مگنتیت متاسوماتیت‌ها	مگنتیت، اکتینولیت، آپاتیت، کلسیت، آلبیت، هوتونیت، توریت، اسفن، کلریت	روابط پاراژنزی بین مگنتیت، سیلیکات توریم و اکتینولیت
آلبیت آمفیبول متاسوماتیت‌ها	آلبیت و اکتینولیت، کلسیت	



شکل ۴. نمودارهای عنکبوتی عناصر کمیاب و خاکی نادر بهنجار شده نسبت به الف) جبه‌ی اولیه [۱۴] و ب) کندریت [۱۵] برای تعدادی از نمونه‌های حوزه‌ی برشی و کان‌سنگ مگنتیت در کانسار سه‌چاهون.

۴. بحث و بررسی

پدیده‌های متاسوماتیکی، از جمله‌ی پدیده‌هایی هستند که گسترش زیادی در منطقه‌ی بافق و به ویژه در اطراف کانسارهای آهن- آپاتیت نشان می‌دهند. این پدیده از جمله انواع سدیک، با فراوانی آلبیت مشخص می‌شود. متاسوماتیسم سدیک با حضور کانی‌های سدیم‌دار مشخص می‌شود که به طور مشخص دارای ارتباط جانشینی با کانی‌های ماگمایی اولیه هستند [۱۶]. براساس کینارد [۱۷]، غنی‌شدگی سدیم همراه با تمرکز آهن، زیرکونیم، نیوبیم، قلع، روی، اورانیم، توریم و عناصر نادر سنگین و کمیاب است. ارتباط کانه‌زایی عناصر کمیاب با آلبیتیت‌ها در منطقه‌هایی از دنیا مانند کانسارهای موجود در اوکراین مرکزی و جنوب استرالیا به خوبی مطالعه شده است و نتایج این مطالعات مبین وابستگی کانه‌زایی عناصر کمیاب و خاکی نادر با فرایندهای آلبیت‌زایی است [۱۸]. متاسوماتیسم آلکالن در منطقه‌ی بافق در حوزه‌های دگرسانی در اطراف کانسارهای آهن رخ داده است. آمفیبولیتی‌شدن، و آلبیتی‌شدن، عمده‌ترین محصول‌های متاسوماتیسم آلکالن در منطقه هستند که منجر به تشکیل آمفیبول (عمدتاً اکتینولیت) و آلبیت به مقادیر زیاد و اژرین (آلکالی- پیروکسن) به مقادیر بسیار محدودِ عمدتاً مشاهده شده در اطراف کانسارهای آهن می‌شود.

از مهم‌ترین مسأله‌های قابل بحث در این موضوع، بررسی عیار عناصر کم تحرک مانند نیوبیم و تیتانیم است که در نتایج تجزیه‌ی ژئوشیمی به خوبی قابل دریافت است. بررسی ژئوشیمی ریولیت‌های موجود در کانسار سه‌چاهون که در واقع میزبان کان‌سنگ مگنتیت- آپاتیت در کانسار هستند نشان می‌دهد که این ریولیت‌ها در منطقه‌ی فرورانش تشکیل شده و به سطح زمین آمده‌اند. با وجود این احتمال این موضوع نیز وجود دارد که سیال منشأ عناصر کمیاب و خاکی نادر به نوعی در ارتباط با این ماگماها باشد. همان‌طور که اشاره شد، تجزیه‌های انجام شده حاکی از عیار کم برای نیوبیم و عیار منفی برای تیتانیم است که مشابه میزان و نسبت این عناصر

www.SID.ir

Archive of SID

(به مقادیر خاص منطقه‌های زمین ساختی دیگر) در مناطق فرورانش است [اگرچه شواهدی هم‌چون قرارگیری کانسار در زیر یک بخش ژاسپیلیتی و وجود چکه‌سنگ‌ها در بخش‌هایی از کانسار (محسنی و آفتابی، ۲۰۰۷ [۴])، احتمال وابستگی کامل کانسار به محیط‌های ماگمایی را با کمی تردید مواجه می‌کند]. عناصر کم‌تحرک یا عناصری که دارای دامنه‌ی بالای مقاومت در برابر عوامل انحلالی، دگرسانی و متاسوماتیکی هستند، مانند تیتانیم، نیوبیم و تانتالیم، در شرایط حاکم بر مناطق فرورانش به مقادیر قابل توجهی انحلال نمی‌یابند و در کانی‌هایی مانند روتیل چه در پوسته‌ی اقیانوسی فرورو و چه در گوه‌ی گوشته‌ای متمرکز می‌شوند [۱۹، ۲۰]. بنابراین ماگماهای حاصل از محیط قوسی که از این مناطق منشأ گرفته‌اند، ناهنجاری‌های منفی شاخصی برای این سه عنصر (بر روی نمودارهای عنکبوتی بهنجار شده نسبت به جبه) نشان می‌دهند [۲۱-۲۳].

وابستگی شدید کانه‌زایی عناصر کمیاب به صورت سیلیکات (هوتونیت و توریت) و فسفات (آپاتیت و مونازیت) با کانی‌سازی اکتینولیت و آلبیت در فاز برشی در کانسار سه‌چاهون از جمله‌ی مسائلی است که منجر به بسط موضوع در این نوشتار شده است. در واقع براساس مطالعات کانی‌شناسی، بین کانی‌هایی هم‌چون: مگنتیت، اکتینولیت، پلاژیوکلاز و کلسیت (به استثنای رگچه‌های کلسیتی ثانویه که سنگ‌های فاز برشی را قطع می‌کنند) ارتباط پاراژنتیکی به وضوح قابل تشخیص است. از مهم‌ترین ویژگی‌های این نوع کانه‌زایی آن است که در بخش‌هایی از باطله‌ی کانسار، مقدار عناصر مزبور در فاز برشی، با افزایش اندک مگنتیت، افزایش نشان می‌دهد؛ اما با تراکم رگچه‌های کلسیتی که متعلق به فاز برشی می‌باشند، افزایش بارزتر است. براساس بررسی‌های انجام شده، وجود کانی‌های مگنتیت و پیریت به صورت پاراژنتیک با سیلیکات‌های برخی از این عناصر (هوتونیت و توریت)، نشان‌دهنده‌ی شرایط کاهشی در زمان تمرکز برخی از این عناصر بوده است. هم‌چنین وجود رگچه‌های کلسیت در داخل حوزه‌های برشی و نیز وجود بلورهای کلسیت به صورت پاراژنز با کانی‌های میزبان عناصر کمیاب، می‌تواند نقش احتمالی کمپلکس‌های کربناته در انتقال این عناصر را بارزتر کند. گفتنی است که در منطقه‌ی بافق چندین کانسار (مانند چغارت [۷]) وجود دارند که دارای مقادیر قابل توجهی از عناصر کمیاب و خاکی نادر در کنار کان‌سنگ مگنتیت- آپاتیت هستند. بخش زیادی از این مواد وارد باطله‌ی کانسارها شده و عملاً جداسازی و استخراج این عناصر را با مشکل مواجه کرده است.

۵. نتایج

بررسی کانی‌شناسی باطله و کان‌سنگ در کانسار سه‌چاهون، مبین رخداد کانه‌زایی عناصر کمیاب و خاکی نادر در فاز برشی و کان‌سنگ است که تمرکز آن در فاز برشی تا حد اقتصادی نیز مطرح است. در مطالعات پیشین [۲]، کانه‌زایی عناصر کمیاب و خاکی نادر عمدتاً در کان‌سنگ مگنتیت مورد توجه جدی قرار گرفته است؛ اما در پژوهش حاضر مشخص شد که علاوه بر کان‌سنگ مگنتیت، سنگ‌های برشی که در واقع حاصل پدیده دگرنهادی بوده‌اند و خارج از محدوده‌ی کان‌سنگ مگنتیت نیز گسترش درخور توجهی دارند دارای تمرکز قابل توجهی از این عناصر هستند. تشابه الگوی‌های ژئوشیمیایی پراکنش عناصر کمیاب و خاکی نادر در نمونه‌های کان‌سنگ مگنتیت با نمونه‌های فاز برشی مبین این حقیقت است که سیال عامل حمل این عناصر در هر دو سنگ، منشأ یکسانی داشته است. بین سیلیکات‌ها (هوتونیت و توریت) و فسفات‌های حاوی عناصر کمیاب و خاکی نادر شامل آپاتیت و مونازیت، با اکتینولیت، مگنتیت و کلسیت در سنگ‌های برشی، رابطه‌های پاراژنتیک برقرار است. در بخش‌هایی از باطله‌ی کانسار، تمرکز این عناصر با میزان مگنتیت در فاز برشی افزایش می‌یابد اما با فراوانی کلسیت، افزایش چشمگیرتری دارد. بررسی تجزیه‌های انجام شده حاکی از عیار کم برای نیوبیم و عیار منفی برای تیتانیم است که خاص مناطق فرورانش است. احتمال دارد که بخشی از عناصر کمیاب در کانسار سه‌چاهون توسط کمپلکس‌های کربناته حمل شده باشد که از جمله‌ی شواهد آن می‌توان به بالا بودن عیار عناصر مزبور در نقاطی دانست که کلسیت پاراژنز با سیلیکات‌های عناصر کمیاب به فراوانی یافت می‌شود. اهمیت کانسارهای منطقه‌ی بافق علاوه بر آهن می‌تواند مربوط به کانه‌زایی عناصر کمیاب و خاکی نادر در این کانسارها باشد. کانی‌شناسی و کانه‌زایی عناصر کمیاب (به ویژه توریم) در کانسار چغارت از جمله‌ی مطالعاتی است که در این زمینه انجام شده است [۷]. مطالعه دقیق‌تر کانسارهای آهن-آپاتیت ایران مرکزی از دیدگاه کانه‌زایی عناصر کمیاب و خاکی نادر می‌تواند به عنوان یکی از ابزارهای مؤثر در بازشناسایی توان اقتصادی کانسارهای مزبور در آینده‌ای نه چندان دور نقش تعین‌کننده‌ای داشته باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

مراجع

1. H. Becker, H. Forster, H. Softfl, *Zeitschriffti ir Geophysikv*, **39**, 953-963 (1973).
2. Z. Bonyadi, G.J. Davidson, B. Mehrabi, S. Meffre, F. Ghazban, *Chemical Geology*, **281**, 253–269 (2011).
3. H. Förster, A. Jafarzadeh, *Economic Geology*, **89**, 1697-1721 (1994).
4. S. Mohseni, A. Aftabi, Investigation on the Rapitan banded iron formation and mineralization in central Iranian iron ore field: Unpublished M. Sc. thesis, *Shahid Bahonar University of kerman*, **284** (in Persian) (2007).
5. F. Moore, S. Modabberi, *Journal of sciences*, **14**, 259-270 (2003).
6. A. Rajabi, C. Canet, E. Rastad, P. Alfonso, *Ore Geology Reviews*, **64**, 328-353 (2014).
7. K. Khoshnoodi, M. Behzadi, M. Gannadi-Maragheh, M. Yazdi, *Geologia Croatica*, **70**, 53-69 (2017).
8. C. Frondel, *Am Mineral*, **41**, 539-568 (1956).
9. H. Borumandi, Petrographische und lagerstättenkunliche untersuchung der Esfordi-Formation zwischen Mishdovan und Kushk bei Bafq (Zentral Iran), Diss, *RWTH Aachen*, **174** (1973).
10 A. Haghipour, *Geological Survey of Iran* (1977).
11 A. Haghipour, G. Pelissier, *Geological Survey of Iran*, **8**, 10-68 (1977).
12. F.M. Torab, Geochemistry and Metallogeny of Magnetite- apatite Deposits of the Bafq Mining District, Central Iran: Ph.D Thesis, Clausthal University of Technology, *Faculty of Energy and Economic Sciences*, 131 (2008).
13. J. Ramezani, R. Tucker, *American Journal of Science*, **303**, 622-665 (2003).
14. S.S. Sun, W.F. McDonough, *Geological Society of London*, **42**, 313-345 (1989).
15. W.V. Boynton, *Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam*, 63-114 (1984).
16. F. Pirajno, Hydrothermal processes and mineral systems, *Springer*, 1250 (2009).
17. J.A. Kinnaird, *Journal of African Earth Science*, **3**, 229-252 (1985).
18. A. Kontonikas-Charos, C.L. Ciobanu, N.J. Cook, *Journal of Lithos*, **208-209**, 178-201 (2014).
19. A. Audétat, H. Keppler, *Earth and Planetary Science Letters*, **232**, 393–402 (2005).
20. T.H. Green, J. Adam, *European Journal of Mineralogy*, **15**, 815–830 (2003).
21. S.F Foley, M.G. Barth., G.A. Jenner, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **64**, 933–938 (2000).
22. A. Schmidt, S. Weyer, T. John, G.P. Brey, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **73**, 455–468 (2009).
23. S. Klemme, S. Prowatke, K. Hametner, D. Gunther, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **69**, 2361–2371 (2005).

www.SID.ir