



واحد برشی و کانه‌زایی Th-REE در کانسار سه‌چاهون، منطقه معدنی بافق، ایران مرکزی

غلامرضا میرزابابائی^{۱*}، مهرداد بهزادی^۱، محمدرضا رضوانیان‌زاده^۲، محمد یزدی^۱ و محمد قنادی‌مراغه^۲

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(۲) پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۱۷، پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۱۸

چکیده

منطقه بافق میزبان بزرگ‌ترین کانسارهای مگنتیت-آپاتیت در ایران است. ویژگی‌های کانی‌شناختی واحد برشی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین رخدادهای زمین‌شناسی در منطقه بافق در ایران مرکزی و همچنین کانه‌زایی Th-REE در این واحد در کانسار سه‌چاهون مورد بررسی قرار گرفته است. سنگ‌های برشی اغلب در مجاورت و یا در داخل کانسار سه‌چاهون تشکیل شده و از نظر سنی، جوان‌تر است و متشکل از قطعاتی با لیتولوژی عمده سنگ‌های آتشفشانی و کانی‌های مگنتیت، تیتانومگنتیت، کلسیت، آمفیبول، اپیدوت، آپاتیت، اسفن و کانی‌های دیگر (کلریت، سرپانتین) است. سنگ‌های متعلق به این واحد اغلب دارای تمرکزهایی از کانی‌های Th-REE هستند که مربوط به کانه‌زایی عناصر کمیاب خاکی به‌صورت فسفات و توریم به‌صورت سیلیکات در این واحد سنگی است. بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی، سیلیکات‌های توریم در دو شکل بلورین، یکی منوکلینیک (هوتونیت) و دیگری تراگونال (توریت)، در همراهی با فلدسپارها، اکتینولیت، مگنتیت و کربنات به‌صورت پاراژنز در واحد برشی تشکیل شده‌اند. بررسی‌های زمین‌شناسی انجام‌شده بیانگر نقش سیالات مشتق از ماگماهای کالک‌آلکالن تشکیل‌شده در موقعیت کمان ماگمایی (حاشیه قاره‌ای فعال) به‌عنوان عامل تأمین عناصر کمیاب خاکی و توریم در واحد برشی است. بر اساس شواهد صحرایی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی، انتقال بخش قابل توجهی از توریم توسط کمپلکس‌های کربناتی در شرایط قلیایی و محیط احیایی صورت گرفته است.

واژه‌های کلیدی: کانه‌زایی Th-REE، واحد برشی، ماگمای کالک‌آلکالن، کانسار سه‌چاهون، منطقه بافق

مقدمه

2013; Rajabzadeh et al., 2013; Rajabi et al., 2014; Rostami and Tale Fazel, 2019). تاکنون چندین مدل زمین‌شناختی برای نحوه تشکیل این گونه کانسارها در این منطقه ارائه شده است؛ اما مدلی که بتواند جواب‌گوی تمامی ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه و تشکیل کانسارهای یادشده در

منطقه بافق میزبان بزرگ‌ترین کانسارهای مگنتیت-آپاتیتی ایران بوده که توسط بسیاری از زمین‌شناسان مورد بررسی قرار گرفته است (Haghipour, 1977; Haghipour and Pelissier, 1977; Förster and Jafarzadeh, 1994; Ramezani and Tucker, 2003; Torab, 2008; Mokhtari et al.,

نمونه‌گیری از پیت معدن، انبار باطله و مغزه‌های حفاری در کانسار سه‌چاهون از نمونه‌های متعلق به لیتولوژی‌های مختلف در کانسار و در نهایت انجام بررسی‌های میکروسکوپی کانی‌شناسی، آنالیزهای ژئوشیمیایی و نیز میکروپروپ بوده است. بررسی‌های میکروسکوپی در آزمایشگاه کانی‌شناسی دانشگاه شهید بهشتی، آنالیزهای ICP-OES در آزمایشگاه جابر سازمان انرژی اتمی، بررسی‌های ICP-MS توسط شرکت زرآزما و بررسی‌های میکروپروپ در مرکز تحقیقات و فراوری مواد معدنی ایران انجام شد.

زمین‌شناسی منطقه‌ای

نظر به اینکه این منطقه به‌عنوان میزبان کانسارهای مگنتیت-آپاتیت در ایران مشهور است، در مدل‌های زمین‌ساختی ارائه‌شده، به نوعی وابستگی با موضوع یادشده تا حدودی مشهود است. منطقه معدنی بافق در پهنه تکتونوماگمایی ایران مرکزی و در بلوک پشت‌بادام قرار گرفته است. پهنه تکتونوماگمایی ایران مرکزی هم در شرق (Arjmandzadeh et al., 2011) و هم در غرب با مناطق وابسته به محیط‌های فرورانشی کهن محدود شده است. تشکیلات تاشک به‌عنوان پی‌سنگ پرکامبرین منطقه بافق (Haghipour, 1977) مشتمل بر سنگ‌های دگرگونی با درجات پایین تا بالا شامل شیل اسلیتی، ماسه‌سنگ کوارتزی، گریواک و فیلیت است. سنگ‌های دگرگونی به‌صورت ناپیوسته توسط یک توالی آتشفشانی-رسوبی به سن کامبرین زیرین با ترکیب عمده دولومیت و سنگ‌های رسوبی پوشیده شده است (Haghipour, 1977). 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 گرانیات تا گرانودیوریت و گابرویدیوریت با شاخص کالک‌آلکالن هستند (Torab and Lehmann, 2007). کانسارهای مگنتیت-آپاتیت اغلب در واحد آتشفشانی-رسوبی میزبان شده‌اند (شکل ۱). از مهم‌ترین ویژگی‌های کانسارهای

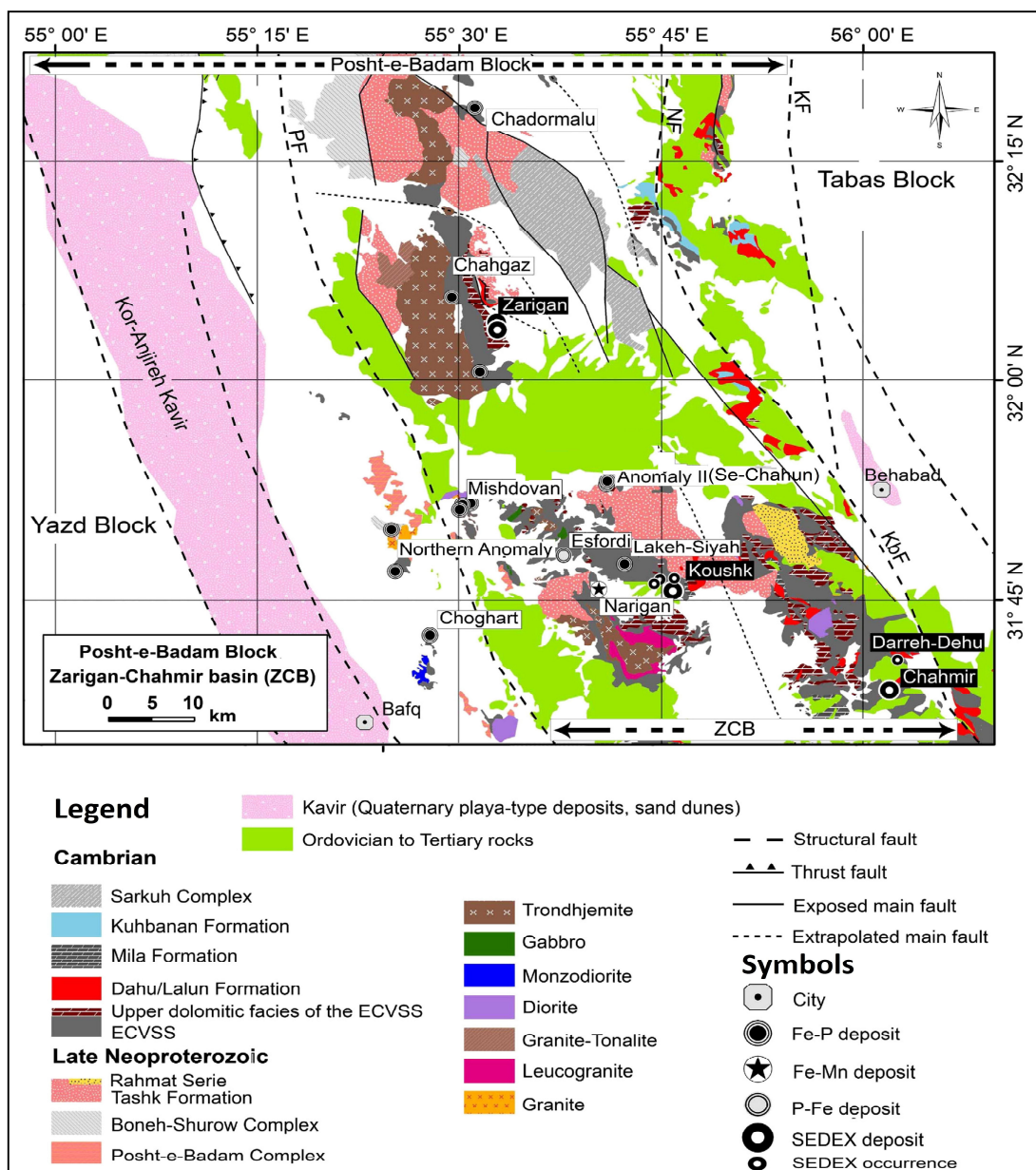
بستر آن باشد، تاکنون ارائه‌نشده است. با این حال، بسیاری از کانسارهای تشکیل‌شده در این منطقه و حتی مناطق خارج از این کانسارها، دربردارنده رخدادهایی مشترک است. پهنه برشی یکی از موارد مشهود در کانسارهای مگنتیت-آپاتیت منطقه بافق است که دارای مقادیر قابل توجهی فلدسپار، اکتینولیت، مگنتیت، آپاتیت و سیلیکات‌های توریم است. همان‌طور که گفته شد، کانه‌زایی Th-REE از جمله ویژگی قابل توجه در برخی از کانسارهای آهن منطقه بافق است (Khoshnoodi et al., 2017). توریم به‌طور وسیعی در طبیعت توزیع شده است و معمولاً همراه با اورانیوم و عناصر کمیاب خاکی یافت می‌شود. توریم در دماهای بالا معمولاً همراه با اورانیوم یافت می‌شود و همراه با عناصر کمیاب خاکی در مجموعه بزرگی از کانی‌ها اغلب شامل اکسیدها، سیلیکات‌ها و فسفات‌ها در پگماتیت‌ها، پهنه‌های اسکارنی و رگه‌هایی که اغلب در داخل یا در نزدیکی توده‌های نفوذی گرانیتی و سینیتی یافت می‌شوند، نهشته می‌شود. وجود سیلیکا و عناصر قلیایی احتمالاً موجب تشکیل کمپلکس‌های سیلیکاتی توریم (و اورانیوم) به‌شدت متحرک، می‌شود و به‌طور مشابه، وجود یون‌ها یا ترکیبات دخیل در کانه‌زایی از قبیل CO_2 ، PO_4 ، B ، Cl ، F^- احتمالاً تأثیر قابل توجهی در افزایش تحرک توریم در شرایط فشار و دمای بالا دارد (Fronde, 1956). در پژوهش حاضر، کانه‌زایی توریم در کانسار سه‌چاهون مورد بررسی قرار گرفته است. تاکنون برنامه جامعی برای دستیابی REE در کانسارهای ایران مرکزی تدوین و یا عملی نشده است که شاید یکی از عوامل مهم در این خصوص، نبود برنامه‌های مطالعاتی و پژوهشی جامع بوده است.

روش مطالعه

سیر علمی پژوهش حاضر به‌ترتیب شامل بررسی مطالعات پیشین در خصوص کانه‌زایی عناصر Th-REE در واحد برشی در حاشیه و درون برخی از کانسارهای مگنتیت-آپاتیت در ایران مرکزی، بررسی‌های صحرایی از جمله بررسی‌های میدانی و نیز

اکتینولیت است که اهمیت بررسی این واحد را بیش از پیش آشکار می‌کند.

ایران مرکزی، رخدادهای پهنه‌ای برشی متشکل از لیتولوژی‌های مختلف است. شاخصه منحصربه‌فرد این فاز، وجود مقادیری از عناصر Th-REE به‌ویژه توریم همراه با کانه‌زایی مگنتیت و



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده حوضه زیرگان-چاهمیر در بلوک پشت‌بادام که نشان‌دهنده موقعیت ذخایر در درون این حوضه است (Rajabi et al., 2012; Rajabi et al., 2014). CF: Chapedony Fault, KbF: Kuhbanan Fault, KF: Kalmard Fault, NF: Naeini Fault, PF: Posht-e-Badam Fault, ECVSS: Early Cambrian volcano-sedimentary sequence.

Fig. 1. Simplified geological map of the Zarigan-Chahmir basin (ZCB) in the Posht-e-Badam Block, showing the location of deposits within this basin (Rajabi et al., 2012; Rajabi et al., 2014). CF: Chapedony Fault, KbF: Kuhbanan Fault, KF: Kalmard Fault, NF: Naeini Fault, PF: Posht-e-Badam Fault, ECVSS: Early Cambrian volcano-sedimentary sequence

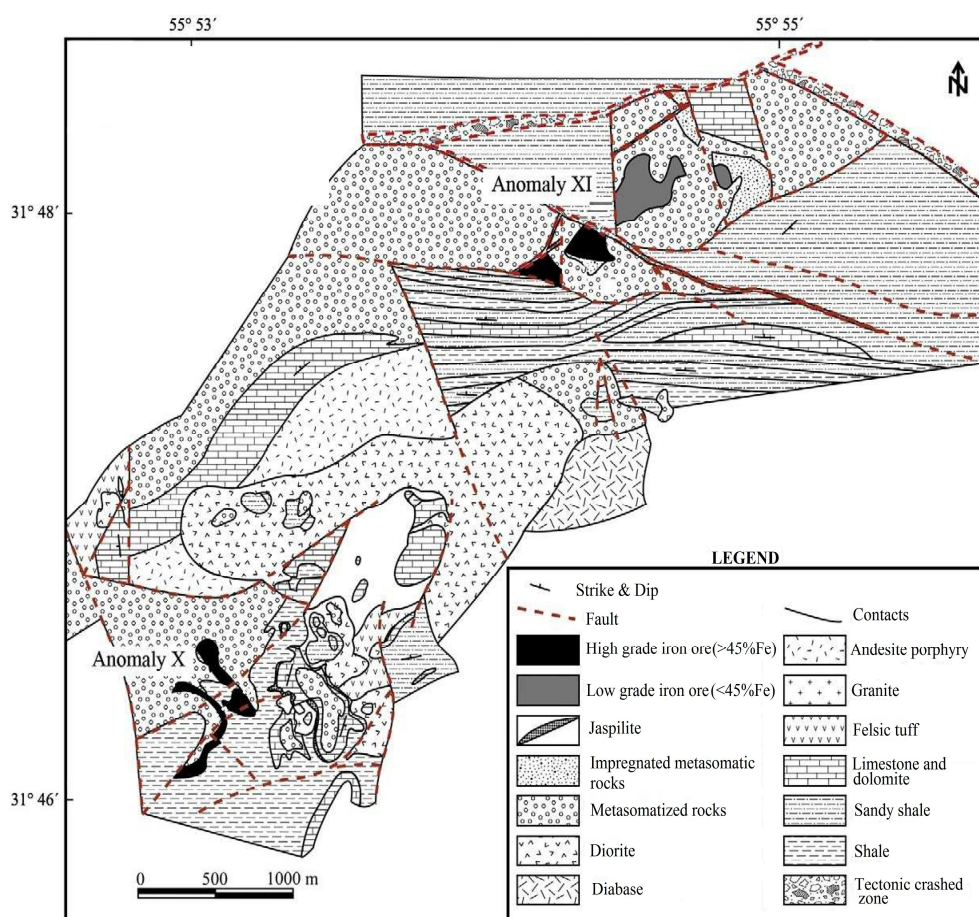
ناچیز است.

زمین‌شناسی کانسار سه‌چاهون

کانسار سه‌چاهون از دو توده معدنی بزرگ با نام آنومالی ۱۰ و آنومالی ۱۱ تشکیل شده است. در این کانسار، میزبان کانسنگ مگنتیتی شامل توف ریولیتی دگرسان، ریولیت و همچنین بخش‌هایی از ماسه سنگ‌های مربوط به محیط‌های کم عمق، آهک دولومیتی و شیل است که بیانگر قسمت میانی سازند ساغند است (شکل ۲).

ریولیت‌ها و توف‌های ریولیتی از مهم‌ترین سنگ‌های خروجی در کانسار سه‌چاهون هستند و به‌طور عمده در زیر رسوبات آبرفتی جوان مدفون بوده و رخنمون چندانی ندارند.

در این پژوهش به بررسی کانه‌زایی Th-REE در کانسار سه‌چاهون می‌پردازیم که در بخشی از سنگ‌های میزبان کانسار یعنی ریولیت صورت گرفته است. با توجه به اینکه در پژوهش بنیادی و همکاران (Bonyadi et al., 2011) کانه‌زایی عناصر کمیاب خاکی مورد بررسی قرار گرفته، در پژوهش حاضر، توجه عمده به کانه‌زایی توریم معطوف شده است که در سنگ‌های برشی و در همراهی با REE یافت می‌شوند؛ اگرچه هم‌پوشانی زمانی و پاراژنتیکی کاملاً منطبقی بین این عناصر دیده نمی‌شود. به‌عنوان مثال در بیشتر سنگ‌های برشی، Th و REE همراه با هم و کانی‌های میزبان (آپاتیت و سیلیکات‌های توریم) به‌صورت پاراژنتیکی وجود دارند. در برخی از سنگ‌های برشی، کانه‌زایی توریم مشاهده می‌شود؛ اما کانه‌زایی عناصر کمیاب خاکی تقریباً



شکل ۲. نقشه ساده‌شده زمین‌شناسی کانسار سه‌چاهون (National Iranian Steel Corporation, 1975; Bonyadi et al., 2011)

Fig. 2. Simplified geological map of the Se-Chahun deposit (National Iranian Steel Corporation, 1975; Bonyadi et al., 2011)

بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی، سنگ‌های ریولیتی از کانی‌های پلاژیوکلاز کمی دگرسان‌شده به کربنات و کانی‌های رسی، آلکالی‌فلدسپار ریزدانه و کوارتز تشکیل شده‌اند. در برخی قسمت‌ها، رخدادهایی از اکسید آهن در این سنگ‌ها مشاهده می‌شود که ممکن است حاصل اکسیداسیون کانی‌های حاوی آهن در این سنگ‌ها باشد. علاوه بر رگچه‌های اکسیدی، رگچه‌هایی مرکب از سیلیس، کربنات و اکسید آهن نیز دیده می‌شود. از آنجایی که ماهیت این سنگ‌ها توفی است، دارای زمینه‌ای بسیار ریزدانه و در بعضی قسمت‌ها حتی شیشه‌ای نیز هستند که حاصل تبلور سریع در نتیجه جای‌گیری در سطح زمین بوده است.

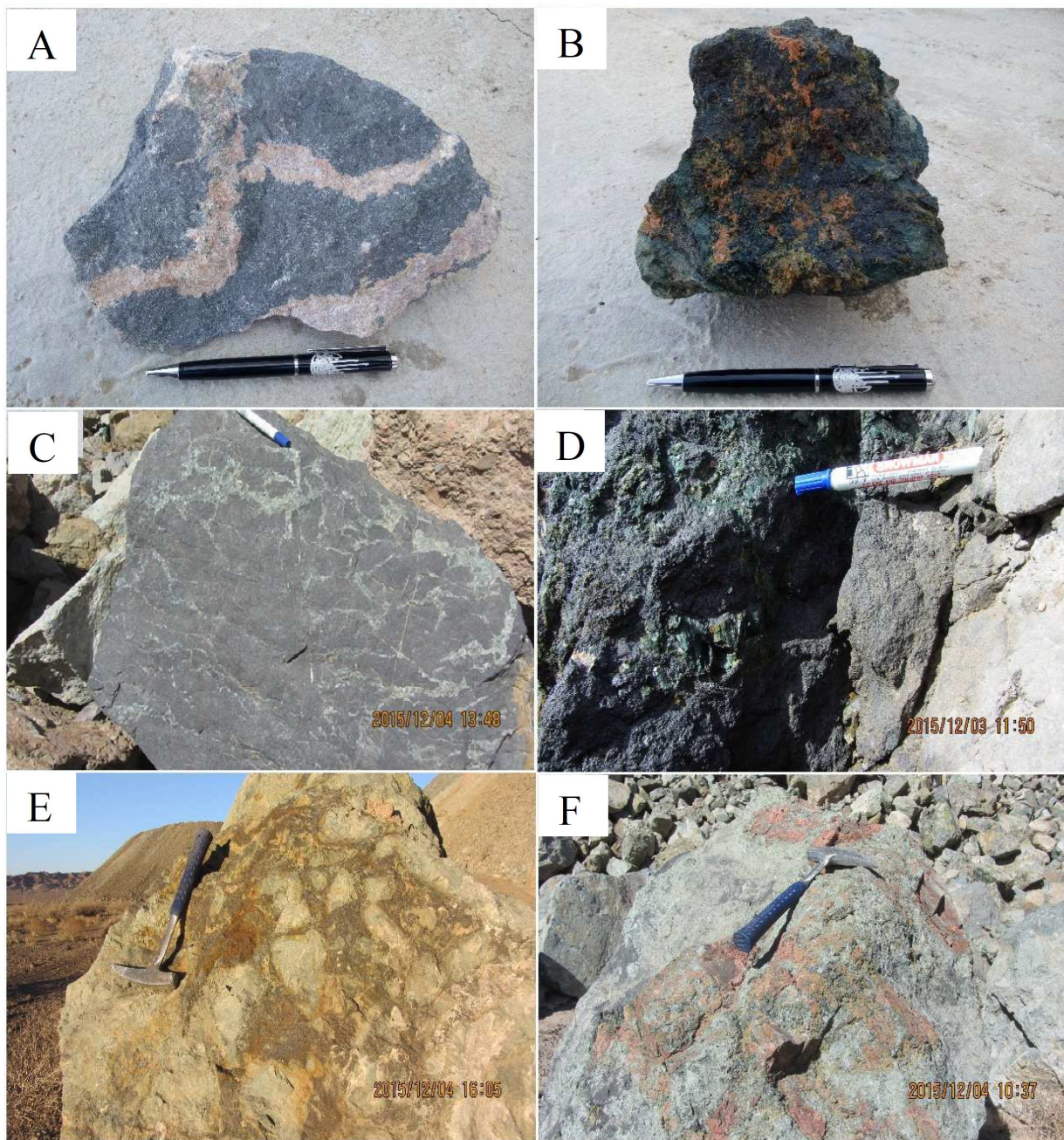
مطالعات میدانی

همان‌گونه که از نقشه زمین‌شناسی کانسار سه‌چاهون مشخص است، سنگ‌های متاسوماتیک دارای گسترش قابل‌توجهی در اطراف توده‌های معدنی هستند. این سنگ‌ها به‌طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: سنگ‌های متعلق به متاسوماتیسم سدیک و سنگ‌های متعلق به متاسوماتیسم سدیک-کلسیک. نوع سدیک قدیمی‌تر از نوع سدیک-کلسیک است (Bonyadi et al., 2011) و آثار آن هم در ریولیت میزبان و هم در کانسنگ مگنتیت دیده می‌شود. از کانی‌های مهم این نوع متاسوماتیسم می‌توان به آلپیت سفید (یا شیری رنگ) اشاره کرد (شکل ۳-۱). این نوع از آلپیت‌ها به‌ویژه در کانسنگ مگنتیت دیده می‌شوند. نوع دیگری از آلپیت‌ها نیز یافت می‌شوند که متعلق به متاسوماتیسم نوع سدیک-کلسیک هستند و به رنگ صورتی تا سرخ مشاهده می‌شوند (شکل ۳-۲)؛ اگرچه رخدادهایی از آلپیت سفیدرنگ در این نوع متاسوماتیسم نیز یافت می‌شود. اکتینولیت نیز به دو نوع عمده یافت می‌شود. نوع اول که همراه با رخداد دگرسانی سدیک-کلسیک است، هم‌زمان با کانه‌زایی آهن به‌صورت مگنتیت بوده است (شکل ۳-۳). رخنمون‌هایی از این واحد در چندین نقطه از کانسار سه‌چاهون مشاهده

می‌شود. اکتینولیت در واحد برشی از بلورهای ریز تا درشت و تا ابعاد حدود دو سانتی‌متر تشکیل شده است. کانه‌زایی نوع اول اکتینولیت همراه با کانسنگ مگنتیت هم در آنومالی ۱۰ (آنومالی غربی) و هم در آنومالی ۱۱ (آنومالی شرقی) مشاهده می‌شود (شکل ۳). نوع دوم اکتینولیت‌زایی در این کانسار جوان‌تر بوده و هم در کانسنگ مگنتیت دیده می‌شود (شکل ۳-۲). هم‌هم‌زمان با فاز گسترده دیگری است که شاخصه آن رخداد ساختار و توده‌های برشی در ابعاد نسبتاً وسیعی در بعضی از کانسارهای ایران مرکزی به‌ویژه سه‌چاهون است. سنگ‌های برشی عضوی شاخص در برخی از کانسارهای آهن منطقه بافق هستند که نسبت به کانسنگ‌های آهن جوان‌ترند و دارای قطعاتی از جنس توف، توف ریولیتی، خرده سنگ، قطعات کربناتی و قطعات مگنتیت در خمیره‌ای متشکل از آمفیبول، کربنات‌ها، سیلیس، کانی‌های ثانویه، آپاتیت و اپیدوت هستند (شکل ۳-۲ و ۳-۱). از آنجایی که هدف اصلی این پژوهش پرداختن به کانه‌زایی Th-REE به‌ویژه توریم در کانسار سه‌چاهون است و این عناصر اغلب در بخش برشی کانسار یافت می‌شوند، بنابراین در اینجا فقط این بخش از کانسار مورد توجه جدی قرار گرفته است.

کانی‌شناسی پهنه کانه‌زایی Th-REE

برای کانی‌شناسی پهنه کانه‌زایی Th-REE، تعداد ۴۰ مقطع نازک-صیقلی مورد بررسی قرار گرفتند. این بررسی‌ها مشتمل بر مطالعات کانی‌شناسی نوری و نیز مطالعات میکروپروپ^۱ بوده‌اند. کانی‌های موجود در این مجموعه سنگی شامل فلدسپارها (اغلب پلاژیوکلاز) (شکل ۴-۱)، اکتینولیت (شکل ۴-۲)، مگنتیت (شکل ۴-۳)، تیتانومگنتیت، اوژیت، کلسیت، اسفن (شکل ۴-۴ و ۴-۵)، کانی‌های توریم (شکل ۴-۶ و ۴-۷) و آپاتیت هستند. کانی‌های توریم ساختار سیلیکاتی دارند و از نظر بلورشناسی، تراگونال (توریت) و منوکلینیک (هوتونیت) هستند.



شکل ۳. متاسوماتیسم سدیک و سدیک-کلسیک در کانسار سه‌چاهون. A: آلبیت سفید تا صورتی‌رنگ در کانسنگ مگنتیت، B: آلبیت سرخ‌رنگ در سنگ‌های جوان‌تر از کانسنگ مگنتیت که دارای بافت برشی هستند، C: کانی‌های ریز اکتینولیت در متن مگنتیت که به‌صورت پارائنز با مگنتیت هستند، D: رخداد اکتینولیت در داخل کانسنگ مگنتیت که پارائنز با مگنتیت نیست، E و F: سیمای عمومی برش در کانسار سه‌چاهون. در تصاویر B، E و F قطعه سنگ قدیمی از ریولیت است؛ اما خمیره از مگنتیت، آلبیت، کلسیت، آپاتیت و اکتینولیت تشکیل شده است.

Fig. 3. Na and Na-Ca metasomatism at the Se-Chahun ore deposit. A: White to pinkish albite within the magnetite ore body, B: Red albite within the younger rocks characterized by brecciated texture, C: Fine-grained actinolite within the magnetite grains (paragenetic association), D: Actinolite hosted by magnetite (non-paragenetic association), E and F: common aspect of breccia at the Se-Chahun ore deposit. In B, E and F images, the breccia fragments are rhyolite and the matrix is formed of magnetite, albite, calcite, apatite and actinolite.

همان‌طور که در پژوهش‌های پیشین (Bonyadi et al., 2011; Khoshnoodi et al., 2017) نیز مشخص شده است، کانی‌های توریم مربوط به واحد برشی رخ داده در منطقه ایران مرکزی هستند که تمرکز بالایی به‌ویژه در حاشیه کانسارهای مگنتیت-آپاتیت در این منطقه نشان می‌دهند. در بررسی‌های میکروسکوپی، کانی‌های اکتینولیت دارای سطح توزیع زیادی بوده و در نور قطبی شده به رنگ‌های سبز و آبی دیده می‌شوند. آثار رخ در این کانی‌ها به‌خوبی مشاهده می‌شود. کانی‌های مزبور هم به حالت خودشکل لوزوی و هم به شکل‌های نامنظم دیده می‌شوند. شکل‌های نامنظم هم حاصل فرایندهای دگرشکلی در مقیاس محدود در سنگ هستند و هم می‌توانند حاصل متناسب‌نبودن زاویه برش سنگ با سطوح داخلی در سیستم بلورین کانی باشند. این کانی‌ها در بعضی از مقاطع در زمینه‌ای با ترکیب اغلب کربناتی قرار دارند. همچنین کانی‌های مگنتیت در بخش برشی بیانگر آخرین بخش از رخداد مگنتیت در کانسار سه‌چاهون هستند. این کانی‌ها در واحد برشی اغلب به‌صورت دانه‌ای هستند. کانی‌های مگنتیت اغلب غیر خودشکل بوده و در موارد معدودی دارای حاشیه‌های زاویه‌دار هستند. این کانی‌ها همراهی نزدیکی با آپاتیت و سیلیکات‌های توریم داشته و خود در بعضی از موارد نیز میزبان تیغه‌هایی از کانی‌های دیگر هستند که ساختار اکسیدی (هماتیت و تیتانومگنتیت) دارند. کانی‌های توریم شامل هوتونیت و توریت در نور ppl، به رنگ قهوه‌ای یا خاکستری دیده می‌شوند. هر دوی این کانی‌ها بنیان سیلیکات دارند و کاتیون اصلی بازیگر در ویژگی‌های فیزیکی آنها از جمله خواص پرتوزایی آنها، Th^{4+} است. دانه‌های توریت و هوتونیت دارای پراکندگی کم و تراکم بالا هستند؛ به‌عبارتی اغلب در دسته‌های چندتایی کنار هم قرار دارند، اگرچه به‌صورت منفرد نیز یافت می‌شوند. ارتباط این کانی‌ها با کانی‌های مگنتیت و اکتینولیت پاراژنتیک است و اثرات قطع‌شدگی یکی توسط دیگری مشاهده نمی‌شود. این کانی‌ها هم به‌صورت دانه‌ای (بلوری)، هم به‌صورت توده‌ای و هم به‌صورت رگه‌ای (نوع کمیاب) مشاهده می‌شوند. اسفن نیز

به‌ویژه در مراحل اول کانه‌زایی توریم در مقادیر قابل توجه یافت می‌شود و با سیلیکات‌های توریم پاراژنز است. میزان اسفن در مقاطعی که میزان مگنتیت بالاست، زیاد است؛ اما در مقاطعی که میزان سیلیکات توریم بالاست و مگنتیت تراکم چندانی ندارد، کمتر است.

هوتونیت سیلیکات توریم در فاز منوکلینیک بوده که در مقاطع مورد بررسی مشاهده می‌شود. هوتونیت از نروسیلیکات‌هاست و با مونازیت هم ساختار است. در بررسی‌های میکروسکوپی نیز سیستم بلورین منوکلینیک به‌خوبی مشاهده می‌شود. وجود هوتونیت در پژوهش‌های قبلی نیز گزارش شده است (Bonyadi et al., 2011). توریت از نروسیلیکات‌های توریم بوده که در سیستم بلورین تتراگونال متبلور می‌شود، با زیرکن و هافنون ایزومورف بوده و معمول‌ترین سیلیکات توریم است. این کانی با تراکم متنوع خود در مقاطع میکروسکوپی مشاهده می‌شود. این کانی اغلب خودشکل تا نیمه خودشکل بوده و با درجات کمی، اثرات خردشدگی در سطح نشان می‌دهد. بدون رخ واضح بوده و در محل شکستگی‌ها، اثرات سوختگی از خود نشان می‌دهد. در بررسی‌های صحرایی به‌وضوح مشخص شد که سنگ‌های برشی که دارای رگچه‌ها و رگه‌های کربناتی (شکل ۵-۵A) و همچنین دانه‌های کلسیت هستند (شکل ۵-۵B)، دارای شدت کانه‌زایی بیشتری نیز هستند. این مسئله از روی نتایج آنالیز شیمی به روش ICP-MS، به خوبی قابل دریافت است (جدول ۱). در بخش باطله کانسار بیشترین کانه‌زایی توریم مربوط به سنگ‌هایی است که دارای رگه‌ها و رگچه‌های کربناتی هستند؛ درحالی‌که، در نواحی مجاور کانسار کانه‌زایی مربوط به سنگ‌هایی است که دارای مگنتیت و پیریت هستند. کانی‌های توریم با تراکم زیاد در مجاورت و داخل این رگه‌ها در بررسی‌های میکروسکوپی تشخیص داده شده‌اند.

ژئوشیمی زون کانه‌زایی Th-REE

چنان‌که اشاره شد، کانسار سه‌چاهون توسط توف ریولیتی (Torab, 2008) میزبانی شده است. در پژوهش حاضر تعداد ۵

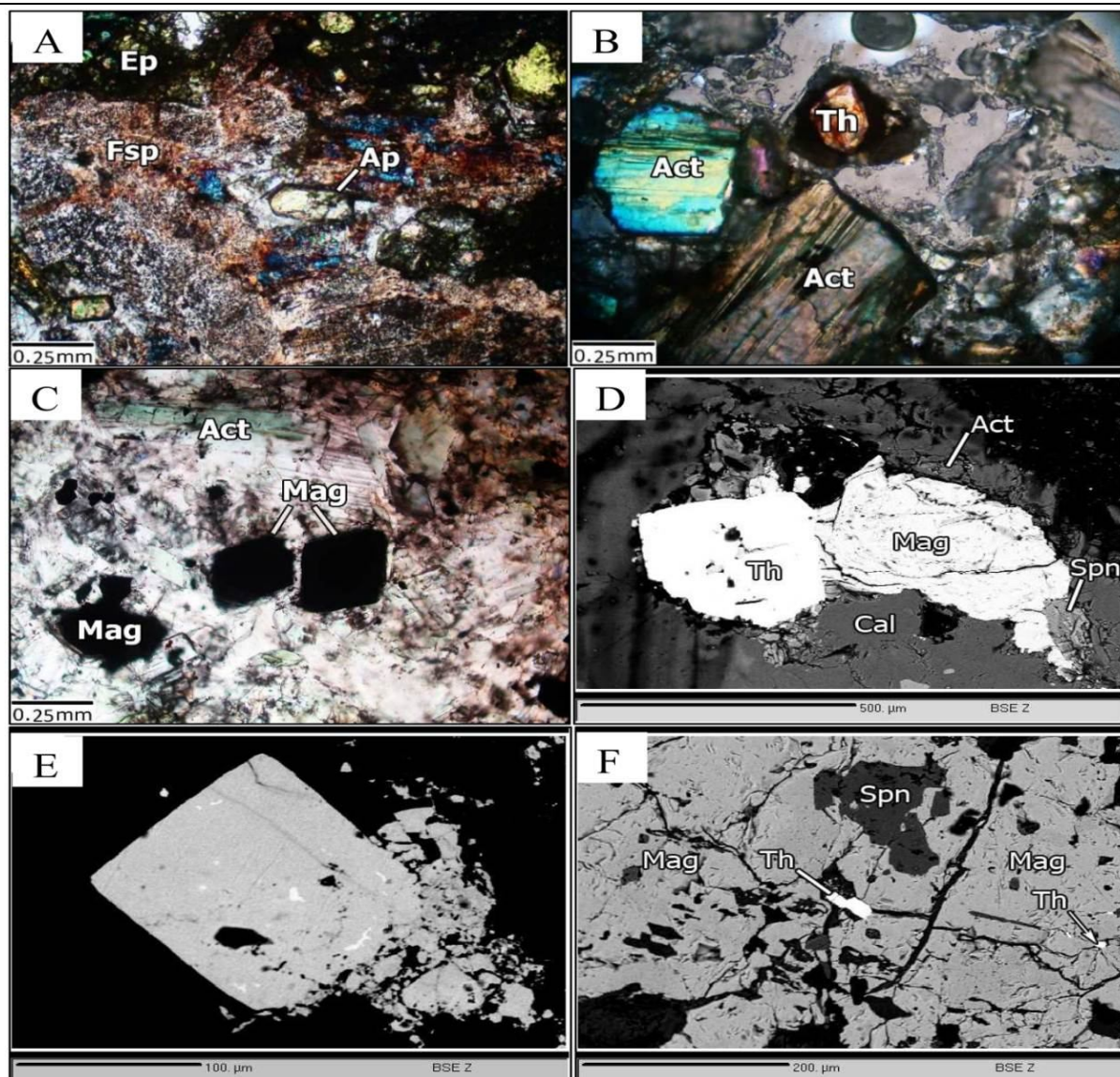
مناطق منشأ گرفته‌اند، آنومالی‌های منفی شاخصی برای این عناصر (بر روی نمودارهای عنکبوتی نرمالیزه نسبت به جبه) نشان می‌دهند (Foley et al., 2000; Klemme et al., 2005; Schmidt et al., 2009). همچنین آنومالی مثبت شاخصی برای LILE (به‌ویژه K و Rb) دیده می‌شود که می‌تواند مربوط به آرایش ماگمای حاصل از گوه گشته‌ای با سنگ‌های پوسته قاره‌ای باشد.

برای بررسی تمرکز عناصر اصلی، فرعی، کمیاب، کمیاب خاکی و توریم در کانسنگ برشی شده و برای پی‌بردن به منشأ واقعی این عناصر، نحوه پراکندگی، میزان تمرکز و فرایندهای دخیل در پراکنش آنها، تعداد ۲۰ نمونه از پهنه کانه‌زایی Th-REE انتخاب و در آزمایشگاه جابربن حیان سازمان انرژی اتمی (آنالیز ICP-OES) و آزمایشگاه شرکت زرآزما (آنالیز ICP-MS) آنالیز شدند. بررسی الگوی REE در نمونه‌های متعلق به پهنه برشی (جدول ۱) که از پدیده متاسوماتیسم تأثیر گرفته‌اند، نسبت به کندریت بیانگر غنی‌شدگی نسبی از LREE نسبت به HREE است. بر روی نمودار نرمالیزه نسبت به کندریت (Boynton, 1984) برای این سنگ‌ها، آنومالی منفی مشخصی برای یوروپیم مشاهده می‌شود (شکل A-۸). این سنگ‌ها همچنین دارای آنومالی منفی برای تیتانیوم و نیوبیم بر روی نمودار نرمالیزه نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) هستند (شکل B-۸). با کمی دقت در جزئیات و حتی کلیات این نمودار می‌توان دریافت که الگوی به‌دست آمده با کمی اختلاف مشابه همان الگوی REE هم نسبت به کندریت و هم نسبت به گوشته اولیه در ریولیت‌های کانسار سه‌چاهون است. در هر دو نوع سنگ، یوروپیم آنومالی منفی نشان می‌دهد که بیانگر تبلور پلاژیوکلاز در ماگمایی است که ریولیت از آن به‌دست آمده است. وجود شرایط احیایی برای هر دو نوع سنگ در زمان تشکیل هم ریولیت‌ها و هم سنگ‌های زون کانه‌زایی Th-REE نیز از عوامل دیگر این آنومالی منفی هستند.

نمونه ریولیت (توفریولیتی) مورد آنالیز قرار گرفتند؛ اما به دلیل تأثیر دگرسانی شدید در رخنمون مورد نمونه‌برداری و برای اطمینان بیشتر، از نتایج آنالیز میرزایی (Mirzaei, 2014) نیز استفاده شد. نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی انجام‌شده نشان‌دهنده وجود ویژگی عنصری مربوط به مناطق فرورانش در این نوع سنگ‌هاست. بر اساس نمودار Ta/Yb-Th/Yb (Gorton, 2000 and Schandle, 2000) (شکل A-۶) سنگ‌های ریولیتی در موقعیت زمین‌ساختی دارای شاخصه‌های عنصری مربوط به مناطق فرورانش قرار می‌گیرند. همچنین بر اساس نمودار K₂O/Yb-Ta/Yb (Pearce, 1982) (شکل B-۶)، سنگ‌های فلسیک در کانسار سه‌چاهون در موقعیت سنگ‌های کالک‌آلکالن تا شوشونیتی قرار می‌گیرند.

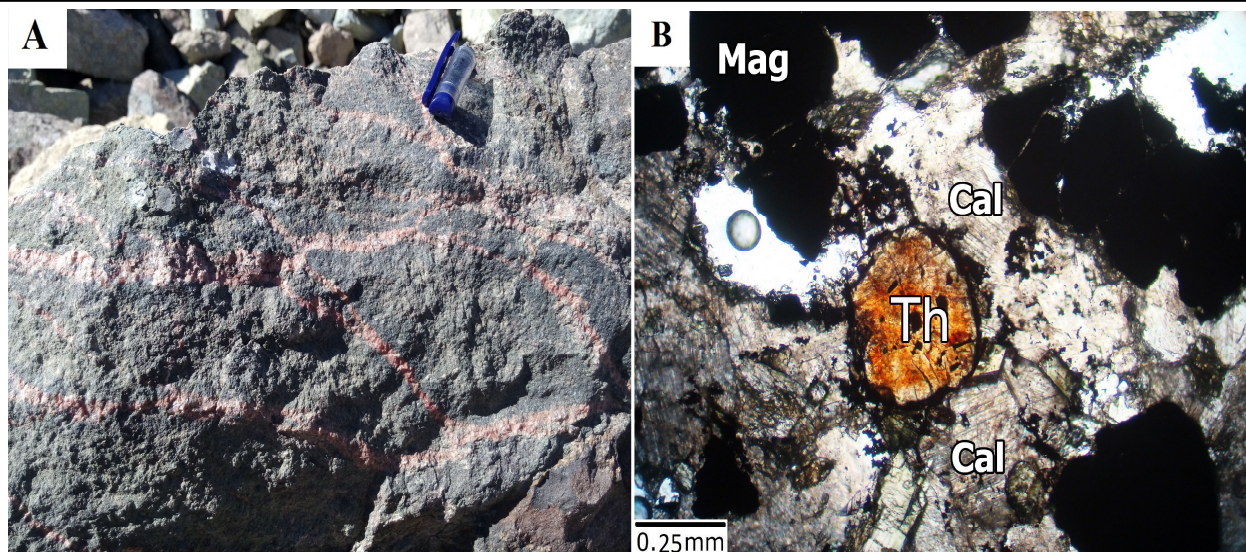
همچنین بررسی الگوی REE نرمالیزه ریولیت‌های کانسار سه‌چاهون نسبت به کندریت (شکل A-۷) و نسبت به گوشته اولیه (شکل B-۷) نشان‌دهنده غنی‌شدگی مشخصی از LREE نسبت به HREE است. بر روی نمودار نرمالیزه نسبت به کندریت (Boynton, 1984) برای ریولیت‌های سه‌چاهون، آنومالی منفی مشخصی برای یوروپیم مشاهده می‌شود. همچنین این ریولیت‌ها دارای آنومالی منفی برای تیتانیوم، نیوبیم و زیرکونیوم بر روی نمودار نرمالیزه نسبت به گوشته اولیه هستند (Sun and McDonough, 1989). عناصری همچون تیتانیوم، نیوبیم، تانتالیوم و زیرکونیوم از جمله عناصر با دامنه بالای مقاومت در برابر عوامل ثانویه^۱ تحرک پس از تشکیل در محیط اولیه هستند. عناصر کم تحرک یا عنصری که دارای دامنه بالای مقاومت در برابر عوامل انحلالی، دگرسانی و متاسوماتیکی هستند مانند تیتانیوم، نیوبیم و تانتالیوم، در شرایط حاکم بر مناطق فرورانش به مقادیر قابل توجهی انحلال نمی‌یابند و در کانی‌هایی مانند روتیل، چه در پوسته اقیانوسی فرورو و چه در گوه گشته‌ای متمرکز می‌شوند (Brenan et al., 1994; Green and Adam, 2003; Audétat and Keppler, 2005). بنابراین ماگماهای حاصل از محیط کمانی که از این

1. HFSE: High field strength elements



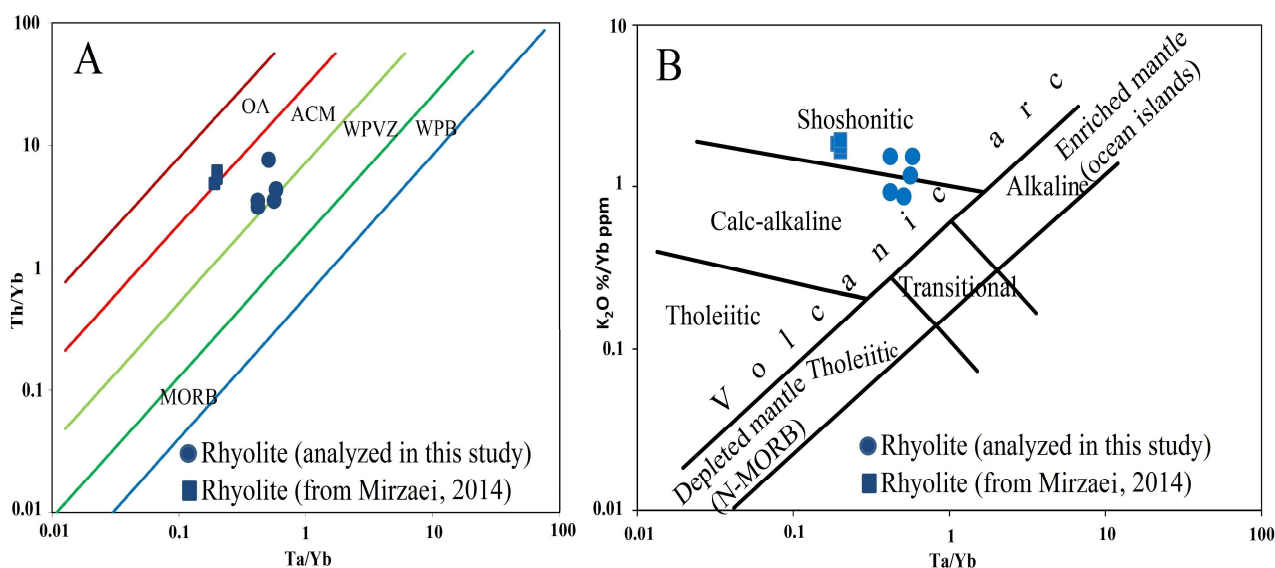
شکل ۴. A: دگرسانی سدیک-کلسیک (در کانسار سه‌چاهون) که به‌طور بخشی با وفور فلدسپارها (اغلب آلbite) مشخص می‌شود (نور XPL)، B: همراهی پاراژنتیک اکتینولیت و سیلیکات توریم (نور XPL) (نظر به ماهیت برشی سنگ، زمینه در این قسمت شسته شده است)، C: بلورهای خودشکل و درشت مگنتیت در برش متشکل از کربنات، آمفیبول، فلدسپار سدیک و اپیدوت (نور PPL)، D: تصویر BSE از همراهی پاراژنتیک سیلیکات توریم، مگنتیت، اسفن، اکتینولیت و کلسیت، E: تصویر BSE از بلور خودشکل توریت (لکه‌های سفید داخل بلورهای توریت نیز از جنس توریت هستند؛ اما محتوای سیلیس بالاتری نشان دادند) و F: رخداد بسیار محدود سیلیکات توریم در کانسنگ مگنتیت که احتمالاً بیانگر غنای محلی ماگمای عامل تشکیل مگنتیت از توریم است. Fsp: فلدسپار، Ep: اپیدوت، Ap: آپاتیت، Act: اکتینولیت، Th: سیلیکات توریم، Mag: مگنتیت، Spn: اسفن، Cal: کلسیت. اختصارات از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 4. A: Na-Ca alteration (at the Se-Chahun ore deposit), characterized by high feldspar (mainly albite) contents (XPL light), B: Paragenetic association of actinolite and Th silicate (XPL light) (given of the rocks nature, the matrix is leached), Automprph and coarse crystals of magnetite within the breccia. The breccia is composed of carbonate, amphibole, Na-feldspar and epidote (PPL light), D: BSE image of paragenetic association of Th silicate, magnetite, sphene, actinolite and calcite, E: BSE image of automorph thorite crystal (white taints are also of thorite composition but show more silica content), and F: Limited occurrences of Th silicate within the magnetite ore body showing perhaps the local enrichment of the magnetite parent magma in Th. Fsp: Feldspar, Ep: Epidote, Ap: Apatite, Act: Actinolite, Th: thorium silicate, Mag: Magnetite, Spn: Sphene, Cal: Calcite, Abbreviations after Whitney and Evans (2010)



شکل ۵. A: نمونه سنگ برشی در کانسار سه‌چاهون (با قطعات توف و نیز مگنتیت) که دارای رگه‌های کلسیتی است و کانه‌زایی Th را نشان می‌دهد و B: (نور PPL)، ارتباط پاراژنتیکی کانی‌های کلسیت و سیلیکات‌های توریم. Cal: کلسیت، Mag: مگنتیت، Th: سیلیکات توریم. اختصارات از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 5. A: Brecciated rock (with tuff and magnetite rock fragments) at the Se-Chahun ore deposit containing calcite veins characterized by Th mineralization, and B: (PPL light): paragenetic relationships between calcite minerals and Th silicates. (Abbreviations: Cal: Calcite, Mag: Magnetite, Th: Thorium silicate, Abbreviations after Whitney and Evans



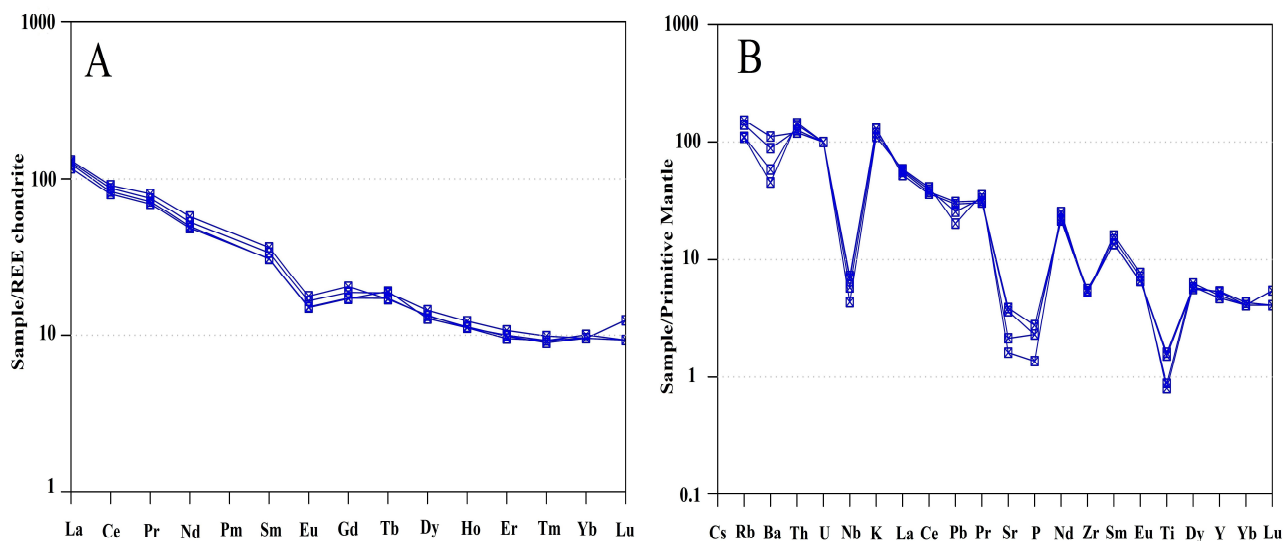
شکل ۶. موقعیت زمین‌ساختی سنگ‌های ریولیتی در کانسار سه‌چاهون بر روی نمودارهای A: $Th/Yb-Ta/Yb$ (Gorton and Schandle, 2000) و B: $K_2O/Yb-Ta/Yb$ (Pearce, 1982). OA: قوس اقیانوسی، ACM: حاشیه قاره‌ای فعال، WPVZ: زون آتشفشانی درون صفحه‌ای، WPB: بازالت درون صفحه‌ای، MORB: بازالت رشته میان اقیانوسی، اختصارات از گرتن و اسکندل (Gorton and Schandle, 2000)

Fig. 6. Position of the rhyolitic rocks at the Se-Chahun ore deposit on the A: Th/Yb vs Ta/Yb (Gorton and Schandle, 2000), and B: $K_2O/Yb-Ta/Yb$ (Pearce, 1982) discrimination diagrams. OA: oceanic arc, ACM: active continental margin, WPVZ: within plate volcanic zone, WPB: within plate basalts, MORB: mid ocean ridge basalt, Abbreviations after Gorton and Schandle (2000)

جدول ۱. تمرکز عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در نمونه‌های برشی از کانسار سه‌چاهون که به روش ICP-MS آنالیز شده‌اند.

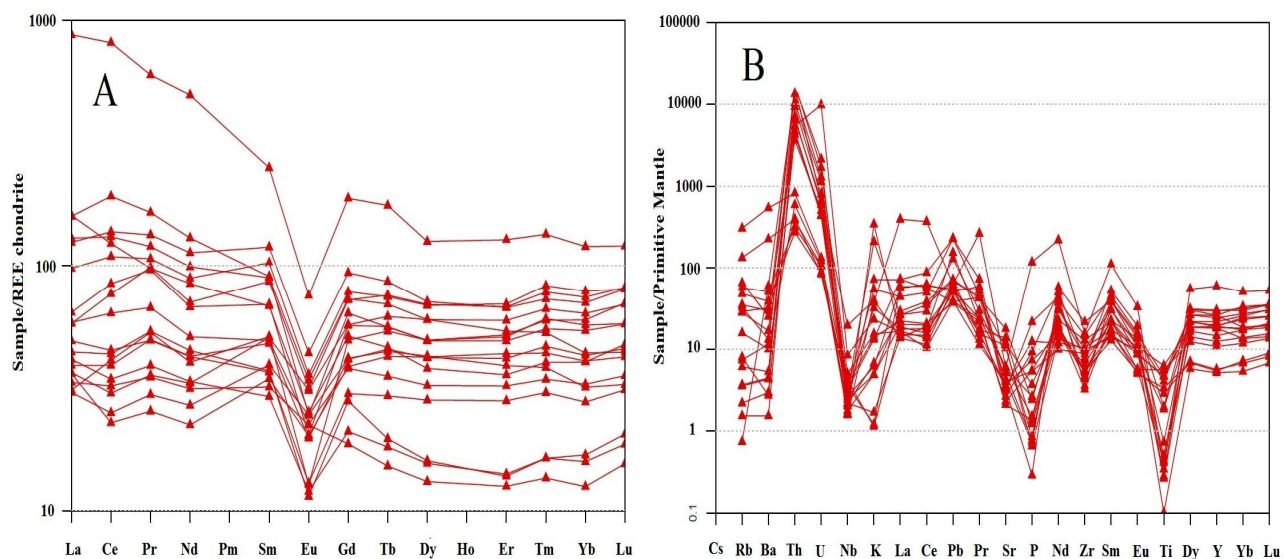
Table 1. Trace and rare Earth elements of the brecciated samples of the Se-Chahun ore deposit analyzed using ICP-MS.

Sample	Pb	Y	Zr	Hf	Nb	Ta	Ti	Sc	Rb	La	Ce
1	9.11	56.3	144	3.06	2.13	0.5	570	14.3	84.7	18.1	51.5
2	4.8	23.3	108	2.86	1.17	0.74	130	6.95	194	10.3	26
3	2.63	49	60.7	1.94	2.64	0.66	7189	8.93	10	15.2	36.3
4	3.58	117	73.3	1.63	3.56	0.65	5241	19.4	17.8	11.3	24.3
5	3.97	82	116	2.96	13.9	1.3	8140	15.3	41.4	9.39	20.2
6	2.75	86.6	98.2	1.83	5.99	0.57	5995	16.9	20.7	11.2	18.4
16	5.09	88.4	112	4.09	1.73	0.56	2394	22.3	2.32	19.9	68.1
17	3.91	110	39.8	1.72	2.54	0.44	6145	14.8	0.47	40.1	106
18	2.77	98.3	58.9	3.06	1.56	0.41	538	36.4	0.97	9.6	33.1
19	3.6	136	82.6	3.13	1.86	0.32	2551	20.7	2.25	38.6	111
20	2.71	66.1	52.4	1.96	2.29	0.71	342	17.3	4.68	49.7	99.5
24	4.19	24.6	59.7	1.44	2.99	0.71	3715	18.7	1.39	12.8	27.7
25	3.75	25.6	49	1.45	1.26	0.21	4344	14.9	5.04	13.7	35.1
27	4.89	133	87.4	3.84	1.53	0.54	364	34.9	3.85	17.9	61.8
28	10.9	82.7	36.1	1.45	2.02	0.42	6088	12.9	18.4	12.1	31.5
36	16.2	118	164	4.77	2.34	0.87	943	6.5	30.3	30.2	87.9
37	4.47	270	174	3.49	1.12	0.58	445	2.95	22.2	270	653
38	16.2	86.1	240	6.11	1.44	0.5	653	2.61	36.2	49.3	155
Sample	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Er	Tm	Yb	Lu
1	8.2	30.6	9.62	1.65	9.82	1.67	10.4	6.76	1.11	6.83	1.14
2	4.26	18.8	6.21	1.64	4.84	0.72	4.23	2.64	0.44	2.62	0.5
3	6.02	25.4	7.14	0.95	7.75	1.39	9.08	5.88	0.98	5.78	1
4	4.34	19.8	9.88	2.27	14.8	2.93	19.3	11.3	1.72	9.15	1.42
5	3.62	16.1	7.64	1.8	10.8	2.11	13.7	8.17	1.24	6.64	1.05
6	3.1	13.4	6.72	1.48	10	2.01	13.6	9.15	1.42	8.49	1.36
16	11.7	40.6	13.5	1.49	14.7	2.66	15.8	10.3	1.78	11.3	1.85
17	14.6	59.3	17.4	2.5	18.9	3.29	19.3	12.5	2.15	13.3	2.23
18	6.49	24.1	9.96	0.94	12.8	2.55	15.9	10.9	1.93	12.5	2.26
19	16.3	67.7	23.2	3.22	24.2	4.08	22.9	14.1	2.36	14.7	2.58
20	11.9	50.6	13.3	1.85	13.3	2.19	12.2	7.5	1.3	8.41	1.53
24	4.75	20.1	5.68	0.88	5.44	0.86	5.01	2.96	0.53	3.52	0.66
25	6.55	26.9	7.23	0.84	7.23	0.93	5.14	2.9	0.53	3.31	0.6
27	12	42.4	16.8	2.32	18.7	3.58	22.3	14.2	2.52	15.5	2.62
28	6.06	25.5	9.34	1.45	10.7	2.15	13.5	8.74	1.51	8.95	1.47
36	13	53.3	20	2.63	20.2	3.53	22.1	14.6	2.68	16.4	2.58
37	72.9	297	48.8	5.53	48.8	8.34	40.4	26.8	4.35	25	3.87
38	20.1	77.8	17.6	1.8	16.5	2.65	15.9	10.7	1.96	11.9	1.86



شکل ۷. A: نمودارهای عنکبوتی عناصر کمیاب خاکی نرمال شده نسبت به کندریت در کانسار سه‌چاهون (مقادیر کندریتی از بوینتون (Boynton, 1984) و B: نمودارهای عنکبوتی عناصر کمیاب خاکی و عناصر فرعی نسبت به گوشته اولیه برای ریولیت‌های سه‌چاهون. مقادیر گوشته‌ای از سان و مکدوناف (Sun and McDonough, 1989)، داده‌های ریولیتی از میرزایی (Mirzaei, 2014)

Fig. 7. A: Chondrite normalized patterns of REE for rhyolites at the Se-Chahun ore deposit (chondritic normalizing factors from Boynton, 1984), and B: Comparative primitive mantle-normalized trace and REE elements variation diagrams for the Se-Chahun rhyolites (mantle normalizing factors from Sun and McDonough 1989) (rhyolitic data from Mirzaei, 2014)



شکل ۸. A: نمودارهای عنکبوتی عناصر کمیاب خاکی نرمال شده نسبت به کندریت در کانسار سه‌چاهون (مقادیر کندریتی از بوینتون (Boynton, 1984) و B: نمودارهای عنکبوتی عناصر کمیاب خاکی و عناصر فرعی نسبت به جبه اولیه برای زون کانه‌زایی توریم در کانسار سه‌چاهون. مقادیر گوشته‌ای از سان و مکدوناف (Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8. A: Chondrite normalized patterns of lanthanides for Thorium mineralization zone at the Se-Chahun ore deposit (normalizing factors from Boynton, 1984), and B: Comparative primitive mantle-normalized trace and REE elements variation diagrams for thorium mineralization zone (normalizing factors from Sun and McDonough 1989)

همچنین آنومالی منفی تیتانیوم و نیوبیم بیانگر وابستگی سیالات عامل در انتقال و تجمع توریم به ماگماهای مشتق‌شده از زون‌های فروورانشی است. تشابه مزبور در الگوهای REE نرمالیزه بیانگر خاستگاه و یا وابستگی خاستگاه عناصر کمیاب، کمیاب خاکی و توریم به ماگماهای مولد ماگمای ریولیتی است که بر اساس آن، انتقال و ته‌نشینی سیالات مزبور در شرایط مشابه صورت گرفته است. در سیستم‌های گرمایی، REE برای تشخیص منبع سیالات کانه‌زا و فرایندهای برهم‌کنش سیال-سنگ استفاده می‌شوند. به‌علت نقطه ذوب بالا و پایداری ژئوشیمیایی، REE هنگام دگرگونی به سختی متحرک می‌شوند. بنابراین الگوی REE این سنگ‌ها، ویژگی‌های سنگ اولیه را نشان می‌دهد (Daux et al., 1994). همچنین داده‌های REE، ویژگی‌های REE سیال کانه‌زا در تعادل با سنگ هنگام کانه‌زایی را نشان می‌دهد (Liu et al., 2013).

بحث و نتیجه‌گیری

تاکنون چندین نظریه در مورد ماهیت واحد برشی و عوامل زمین‌شناختی حاکم بر تشکیل آن ارائه‌شده است. یکی از دیدگاه‌ها آن است که پهنه برشی در واقع پهنه‌ای پروکسیمال از کراتوفیرهای مگنتیت‌دار است که در محیط زیردریایی تشکیل شده است (Mohseni and Aftabi, 2012). با این وجود، تاکنون سازوکاری منطقی که نشان‌دهنده منشأ عناصر کمیاب از جمله توریم در منطقه باشد، ارائه نشده است. اگرچه ممکن است توسط بعضی از محققان برای کانی‌های آپاتیت حاوی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی، منشأ رسوبی در نظر گرفته‌شده باشد (Mohseni and Aftabi, 2012) که در آن منشأ فسفر در کانسار سه‌چاهون از دولومیت‌های سازند سلطانی به سن نئوپروتریوئیک-پالئوزوئیک زیرین است (Mohseni, 2007). با این حال، منشأ توریم هنوز به‌خوبی مشخص نشده است. مختاری و همکاران (Mokhtari et al., 2013)، منشأ ماگمایی برای REE در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت در بلوک پشت‌بادام در نظر گرفته‌اند. خشنودی و همکاران

(Khoshnoodi et al., 2017) منشأ توریم را ماگمای ریولیتی در نظر گرفته‌اند؛ یعنی برای آن یک منشأ ماگمایی قائل شده‌اند. پوسته اقیانوسی دارای میانگین عیار در حدود ۲/۲ پی‌پی‌ام توریم است که به‌نظر نمی‌رسد منبع اصلی توریم بوده باشد؛ به‌ویژه آنکه توریم تحرک‌پذیری بسیار کمی در فرایندهای دگرسانی و متاسوماتیکی دارد. برعکس، پوسته قاره‌ای دارای میزان متوسط حدود ۱۲ پی‌پی‌ام توریم است که در صورت فراهم‌بودن شرایط تحرک‌پذیری مناسب می‌تواند نقشی تعیین‌کننده در تأمین منشأ توریم داشته باشد. به‌ویژه آنکه توریم در واحد برشی متمرکز شده است که لیتولوژی آن به‌طور کامل و به‌صورت مستقیم با پوسته اقیانوسی ارتباطی ندارد. در این واحد تنوعی از خرده سنگ‌های توفی، کربنات‌ها، مگنتیت، آپاتیت و آمفیبول وجود دارد که می‌توانند دارای منشأهای غیر مرتبط با پوسته اقیانوسی باشند. از طرف دیگر سنگ‌های ریولیتی نیز در این منطقه به‌وفور یافت می‌شوند که می‌توانند منشأ مورد بحثی برای توریم باشند. این نظر زمانی پررنگ‌تر می‌شود که قیاس بین الگوهای تمرکز عناصر بر روی نمودارهای نرمالیزه عناصر هم‌نسبت به کاندريت و هم‌نسبت به جبهه اولیه برای هر دو گروه سنگ‌های ریولیتی میزان و سنگ‌های برشی با شاخصه کانه‌زایی Th-REE را در نظر بگیریم. هر دو گروه از سنگ‌ها آنومالی منفی نیوبیم و تیتانیوم نشان می‌دهند. همچنین هر دو گروه از سنگ‌ها آنومالی منفی کاملاً مشخصی برای یوروبیم نشان می‌دهند.

چنان‌که قبلاً گفته‌شد، در نواحی دیگری از منطقه آهن‌خیز بافق، کانسارهایی وجود دارند که دارای عیارهای بالایی از عناصر کمیاب و کمیاب خاکی هستند (Mokhtari et al., 2013; Deymar et al., 2019; Khoshnoodi et al., 2017). الگوهای REE آپاتیت‌ها، کانسنگ‌های آهن-آپاتیت و کانسنگ‌های آهن مشابه هستند (Mokhtari et al., 2013) و بیشتر کانسارهای آهن-آپاتیت در ایران مرکزی الگوهای REE مشابهی دارند که نشان‌دهنده ارتباطی ژنتیکی برای تمام این کانسارهاست (Mokhtari et al., 2013). در پژوهش

خشنودی (Khoshnoodi, 2016)، کانه‌زایی و منشأ توریم در کانسار چغارت مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس خشنودی (Khoshnoodi, 2016)، سیالات تفریق‌یافته از ماگماهای کالک‌آلکالن (در موقعیت حاشیه قاره‌ای فعال) منشأ توریم در کانسار چغارت بوده‌اند. این ماگماها خاص مناطق فرورانشی هستند که در صدهای متغیری از تفریق‌یافتگی را نشان می‌دهند. بنابراین منشأ توریم هرچه باشد، تمرکز آن وابسته به رخداد فازی بحرانی برای تمرکز یادشده یا همان واحد برشی بوده است. واحد برشی پس از کانه‌زایی اصلی مگنتیت اتفاق افتاده است. بنابراین سیالات در گیر در تشکیل آن نیز مربوط به مراحل جوان‌تری از تکوین کانسار هستند. تفریق سیالات از ماگماهای کالک‌آلکالن که اخیراً پیشنهاد شده است، می‌تواند منشأ مناسبی برای توریم و نیز عناصر کمیاب و کمیاب خاکی به‌شمار آید. ماگماهای کالک‌آلکالن خاص مناطق فرورانشی هستند و به میزان زیادی در ارتباط ترکیبی با پوسته زمین به ویژه پوسته زیرین هستند. ماگماهای مزبور، اغلب حاصل ذوب‌بخشی ماگماهای پیشین جای‌گیری کرده در قاعده پوسته‌ای هستند که خود حاصل ذوب‌بخشی گوشته بالایی در محل گوه گوشته‌ای بین صفحه اقیانوسی فرورو و صفحه قاره‌ای فراگیر بوده‌اند. در محل ذوب‌بخشی، قسمتی از سنگ‌های دیواره را سنگ‌های فلسیک قاره‌ای تشکیل می‌دهند و دارای محتوای بالایی از عناصر با شعاع یونی بزرگ همچون توریم هستند که می‌تواند منشأ مناسبی برای توریم در این گونه ماگماها باشد. رسوبات قاره‌ای انتقال‌داده شده بر روی پوسته اقیانوسی فرورو نیز می‌توانند وارد منطقه ذوب‌بخشی در گوه گوشته‌ای شوند و بخشی از توریم موجود در ماگما را تشکیل دهند. بر اساس نتایج آنالیزهای موجود (شکل ۶)، کانسار سه‌چاهون در موقعیت حاشیه قاره‌ای فعال قرار گرفته است. منشأ توریم در این دیدگاه، به‌طور عمده رسوبات فرورانده‌شده به درون جبه در نظر گرفته می‌شوند (Hawkesworth et al., 1997). بر اساس شواهد

موجود، منشأ اصلی توریم در سنگ‌های تشکیل‌شده در مناطق فرورانش، رسوبات با منشأ قاره‌ای بر روی پوسته اقیانوسی در حال فرو رفتن در جبه (Hawkesworth et al., 1997) بوده‌اند که بخشی از آنها وارد منطقه ذوب در صفحه اقیانوسی و یا در بالای صفحه اقیانوسی فرورو در گوه گوشته‌ای شده‌اند. جدایش سیالات غنی از توریم از ماگماهای اولیه یادشده (که در اینجا ماگماهای تشکیل‌شده در قاعده پوسته و با گرایش اسیدی هستند) در مراحل پس‌امگمایی و انتقال این سیالات در امتداد همان ساختارهای زمین‌شناسی پیشین که ماگماهای ریولیتی از طریق آنها به سطح زمین رسیده‌اند، به غنای سنگ‌های اولیه (در پهنه برشی) از عناصر Th-REE به‌ویژه توریم منجر شده است. بر اساس شواهد صحرایی از جمله وجود و تراکم بالای رگه‌ها و رگچه‌های کلسیتی در بخش‌هایی از سنگ برشی که دارای کانه‌زایی Th-REE هستند، شواهد کانی‌شناسی از جمله وجود کانی‌های کلسیت پاراژنز با هوتونیت و توریت و نیز شواهد ژئوشیمیایی، می‌توان نتیجه گرفت که بخش قابل‌توجهی از توریم توسط کمپلکس‌های کربناتی و در شرایط قلیایی انتقال‌یافته است. بر اساس تیتایوا (Titayeva, 1994)، در کانه‌زایی پس‌امگمایی، توریم در محلول‌های کالک‌آلکالن ممکن است به‌صورت کمپلکس کربناته با فرمول $\text{Th}(\text{CO}_3)_n^{-(2n-4)}$ انتقال‌یابد. گذشته از ماهیت قلیایی سیال عامل انتقال توریم، وجود مگنتیت (و پیریت) پاراژنز با هوتونیت و توریت در پهنه برشی و دگرسان در کانسار سه‌چاهون، پیشنهادکننده آن است که سیال، احیایی بوده است. این مسئله از روی بررسی‌های ژئوشیمی از جمله آنومالی منفی یوروپیم برای نمونه‌های سنگ‌های برشی نیز تأیید می‌شود. تبلور پلاژیوکلاز در آشیانه ماگمایی نیز می‌تواند آنومالی منفی یوروپیم در ماگماهای بعدی ایجاد کند و خود این مسئله نیز تأکیدی بر این موضوع است که عامل کانه‌زایی Th-REE در کانسار سه‌چاهون سیالات مشتق شده از ماگما بوده‌اند.

References

- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., Medina, J.M. and Homam, S.M., 2011. Two-sided asymmetric subduction; implications for tectonomagmatic and metallogenic evolution of the Lut Block, eastern Iran. *Journal of Economic Geology*, 3(1): 1–14. (in Persian)
- Audétat, A. and Keppler, H., 2005. Solubility of rutile in subduction zone fluids, as determined by experiments in the hydrothermal diamond anvil cell. *Earth and Planetary Science Letters*, 232(3–4): 393–402.
- Bonyadi, Z., Davidson, G.J., Mehrabi, B., Meffre, S. and 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(3–4): 253–269.
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements; meteorite studies. In: P. Henderson, (Editor), *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 63–114.
- Brenan, J.M., Shaw, H.F., Phinney, D.L. and Ryerson, F.J., 1994. Rutile-aqueous fluid partitioning of Nb, Ta, Hf, Zr, U and Th: implications for high field strength element depletions in island arc basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 128(3–4): 327–339.
- Daux, V., Crovisier, J.L., Hemond, C. and Petit, J.C., 1994. Geochemical Evolution of Basaltic Rocks Subjected to Weathering: Fate of the Major Elements, Rare Earth Elements, and Thorium. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(22): 4941–4954.
- Deymar, S., Behzadi, M., Yazdi, M. and Rezvanianzadeh, M.R., 2019. Relation of alkali-metasomatism and Ti-REE-U (Th) mineralization in the Saghand mining district, Central Iran. *Journal of Economic Geology*, 10(2): 471–496. (in Persian with English abstract)
- Foley, S.F., Barth, M.G. and Jenner, G.A., 2000. Rutile/melt partition coefficients for trace elements and an assessment of the influence of rutile on the trace element characteristics of subduction zone magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(5): 933–938.
- Förster, H. and Jafarzadeh, A., 1994. The Bafq mining district in Central Iran - a highly mineralized Infracambrian volcanic field. *Economic Geology*, 89(8): 1697–1721.
- Fronde, C., 1956. Mineral composition of gummite. *American Mineralogist*, 41(7–8): 539–568.
- Gorton, M.P. and Schandl, E.S., 2000. From Continents to Island Arcs: A Geochemical Index of Tectonic Setting For Arc-Related and Within-Plate Felsic to Intermediate Volcanic Rocks. *The Canadian Mineralogist*, 38(5): 1065–1073.
- Green, T.H. and Adam, J., 2003. Experimentally-determined trace element characteristics of aqueous fluid from partially dehydrated mafic oceanic crust at 3.0 GPa, 650–700 °C. *European Journal of Mineralogy*, 15(5): 815–830.
- Haghipour, A., 1977. Geological map of the Biabanak-Bafq area, scale 1:500,000. Geological Survey of Iran.
- Haghipour, A. and Pelissier, G., 1977. Geology of the Saghand Sector. In: A. Haghipour, N. Valeh, G. Pelissier and M. Davoudzadeh (Editors), *Explanatory Text of the Ardekan Quadrangle Map*. Geological Survey of Iran, Tehran, pp. 10–68.
- Hawkesworth, C.J., Turner, S.P., McDermott, F., Peate, D.W. and Van Calsteren, P., 1997. U-Th Isotopes in Arc Magmas: Implications for Element Transfer from Subducted Crust. *Science*, 276(5312): 551–555.
- Khoshnoodi, K., 2016. Mineralogy, geochemistry and mineralization of radioactive elements with special emphasis on thorium in the Choghart ore deposit in the Bafq region, central Iran. Ph.D. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 216 pp.
- Khoshnoodi, K., Behzadi, M., Gannadi-maragheh, M. and Yazdi, M., 2017. Alkali Metasomatism and Th-REE Mineralization in the Choghart deposit, Bafq district, Central Iran. *Geologia Croatica*, 70(1): 53–69.
- Klemme, S., Prowatke, S., Hametner, K. and Gunther, D., 2005. Partitioning of trace elements between rutile and silicate melts: implications for subduction zones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(9): 2361–2371.
- Mirzaei, Z., 2014. Petrography and geochemistry of rhyolite rocks in the Se-Chahun iron oxide deposit, Bafq mining district, Central Iran.

- Journal of Biodiversity and Environmental Sciences, 5(6): 329–337.
- Mohseni, S., 2007. Investigation on the Rapitan banded iron formation and mineralization in central Iranian iron ore field. M.Sc. Thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran, 284 pp.
- Mohseni, S. and Aftabi, A., 2012. Comment on Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Se-chahun iron oxideapatite deposit, Bafq district. In: Z. Bonyadi, G.J. Davidson, B. Mehrabi, S. Meffre and F. Ghazban (Editors), Insights from paragenesis and geochemistry. Chemical Geology, Amsterdam, pp. 378–381.
- Mokhtari, M.A., Hossein Zadeh, G. and Emami, M.H., 2013. Genesis of iron-apatite ores in Posht-e-Badam Block (Central Iran) using REE geochemistry. Journal of Earth System Science, 122(3): 795–807.
- National Iranian Steel Corporation (NISCO), 1975. Detailed exploration of Se-Chahun iron ore deposit in Central Iran. National Iranian Steel Corporation (NISCO), Tehran, Report 1, 117 pp.
- Pearce, J.A., 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. John Wiley and Sons, New York, 724 pp.
- Rajabi, A., Canet, C., Rastad, E. and Alfonso, P., 2014. Basin evolution and stratigraphic correlation of sedimentary-exhalative Zn Pb deposits of the Early Cambrian Zarigan Chahmir Basin, Central Iran. Ore Geology Reviews, 64(6): 328–353.
- Rajabi, A., Rastad, E., Alfonso, P. and Canet, C., 2012. Geology, ore facies and sulfur isotopes of the Koushk vent-proximal sedimentary-exhalative deposit, Posht-e-Badam block, Central Iran. International Geology Review, 54(14):1635–1648
- Rajabzadeh, M.A., Hoseini, K. and Moosavinasab, Z., 2013. Mineralogical and geochemical studies on apatites and phosphate host rocks of Esfordi deposit, Yazd province, to determine the origin and geological setting of the apatite. Journal of Economic Geology, 6(2): 331–353. (in Persian with English abstract)
- 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(7): 622–665.
- Rostami, M. and Tale Fazel, E., 2019. Geochemistry, mineralization and alkali-Fe oxide alteration of the Lake Siah iron-apatite deposit (northeastern Bafq), Bafq-Saghand metallogenic province. Journal of Economic Geology, 10(2): 587–616. (in Persian with English abstract)
- Schmidt, A., Weyer, S., John, T. and Brey, G.P., 2009. HFSE systematics of rutile-bearing eclogites: new insights into subduction zone processes and implications for the earth's HFSE budget. Geochimica et Cosmochimica Acta, 73(2): 455–468
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematic of Oceanic Basalt: Implication for Mantle Composition and Processes. In: A.D. Saunders and M.J. Norry (Editors), Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, pp. 313–345.
- Titayeva, N.A., 1994. Nuclear geochemistry. Chemical Rubber Company, Florida, 304 pp.
- Torab, F.M., 2008. Geochemistry and Metallogeny of Magnetite-apatite Deposits of the Bafq Mining District, Central Iran. Ph.D. Thesis, Clausthal University of Technology, Harz, Germany, 131 pp.
- Torab, F.M. and Lehmann, B., 2007. Magnetite-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: apatite geochemistry and monazite geochronology. Mineralogical Magazine, 71(3): 347–363.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, 95(1): 185–187.



Brecciated unit and Th-REE mineralization in the Se-Chahun ore deposit, Bafq mining district, Central Iran

Gholamreza Mirzababaei^{1*}, Mehrdad Behzadi¹, Mohammad Reza Rezvanianzadeh², Mohammad Yazdi¹, Mohammad Ghannadi Maragheh²

1) Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2) Nuclear Science and Technology Research Institute, Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran

Submitted: July 08, 2017

Accepted: Jan. 08, 2018

Keywords: *Th-REE mineralization, brecciated unit, calc-alkaline magma, Se-Chahun ore deposit, Bafq region*

Introduction

The Bafq region hosts the most important magnetite-apatite deposits of Iran. The geology of this region has been studied by many researchers (e.g., Haghipour, 1977). The ore deposits are mainly hosted by a volcano-sedimentary unit. The presence of a brecciated unit at the margin of the magnetite-apatite ore deposits is discussed by several authors. This unit contains remarkable concentration of Th and REE minerals paragenetically associated with magnetite, actinolite, calcite and albite. Mineralogical properties of the brecciated unit as one of the most important geological events in the magnetite-apatite ore deposits of the Bafq region, and Th-REE mineralization hosted by this zone at the Se-Chahun ore deposit is discussed.

Materials and methods

The present study has been carried out in four stages including: field work, microscopic studies, ICP-MS and ICP-OEA analysis as well as EPMA analysis. The field work included observations, investigations, radiometry, spectrometry and sampling from different lithologies in both open pits and drilled cores. The microscopic studies were carried out in order to identify the minerals and examine the textural properties of these minerals found in the brecciated unit. The ICP-MS and ICP-OEA analysis were carried out on the samples taken from the ore bodies and the radioactive parts of the mine. The EPMA analysis

was also carried out to achieve a more precise hint at the occurrences of the Th and REE minerals and also to investigate the paragenetic relationships between the minerals probed.

Results

The brecciated unit is generally formed at the margin of or within the ore deposits mentioned. The matrix of the brecciated unit at the Se-Chahun ore deposit is composed of different minerals including magnetite, titanomagnetite, actinolite, albite, apatite, titanite, calcite, epidote, chlorite and Th silicates. The coarse rock fragments are mainly of the rhyolitic rocks and metasomatic fragments. Based on the mineralogical studies, the brecciated unit is the host of Th-REE minerals. The Th-silicates are formed in two crystallized forms including monoclinic (huttonite) and tetragonal (thorite). Thorium occurrence is found in three types: granular, massive and veinlet. The geological investigations indicate the role of solutions derived from magmatic arc originated in calc-alkaline magmas as a source for Th(-REE) in the brecciated unit. Based on the field, mineralogical and geochemical evidence, a remarkable part of Th has been transported by carbonate complexes in basic and reduced solutions. Apatite and monazite show a notable concentration within the brecciated unit. Monazites are found mostly as single crystals not always hosted by apatite crystals. Two types of actinolite are recognized, 1. Older than Th

*Corresponding authors Email: g.mirzababaei@gmail.com

mineralization within the magnetite ore and 2. A younger generation paragenetically associated with Th silicate. Two types of albites are recognized: an early (white) albite found within the magnetite ore; a late (red) albite also found within the brecciated zone in association with Th occurrences.

Metals such as Th and REE, at the Se-Chahun magnetite-apatite ore deposit are thought to be predominantly derived from the associated magmas, via magmatic-hydrothermal fluids exsolved upon emplacement into the crust. Two main sources exist for the origin of the metals (Th and REE): 1: sediments on the downgoing slab subducted into the mantle wedge (located between the downgoing slab and the overriding plate); 2: assimilation of crustal rocks within the magma chamber and also during ascending of the magmas. Th-REE have been transported mainly by carbonate complexes in alkaline and reduced environments. The presence of a reduced environment during Th-REE mineralization is evidenced by paragenetic association of magnetite and pyrite (and minor chalcopyrite) supported by negative Eu anomaly. Presence of an alkaline environment is also supported by the presence of calcite crystals, veins and veinlets paragenetically associated with Th-REE minerals.

Discussion

A limited number of models have been suggested to explain the provenance of the brecciated unit. Mohseni and Aftabi (2012), among others, suggested that this zone is a proximal zone of magnetite-bearing keratophyres formed in submarine environments. By contrast, no clear source for thorium silicate is suggested. Recently, Khoshnoodi (2016) discussed the subject in one of the largest iron-apatite ore deposits in the region, the Choghart. According to his suggestions, the solutions derived from the calc-alkaline magmas are the source of thorium.

According to our suggestions, the lower continental crust and also the continental derived sediments on the sea floor adjacent to the subduction zones can be proposed as one of the most important sources for limited amounts of thorium found within the magmatic arc magmas. It is proposed that these magmas and associated mineralization are not limited to the margin of the magnetite-apatite ore deposits. Until now, the importance of the Bafq mining district has been due to its discovered magnetite-apatite resources. Further exploration programs supported by mineralogical and geochemical studies may lead to opening new ways in exploration of uncovered ore deposits in the Bafq district containing more economical resources.

Acknowledgements

This research was supported by the Shahid Beheshti University of Tehran and the Atomic Energy Organization of Iran. The authors are truly grateful to the anonymous reviewers of the journal of economic geology for their constructive comments.

References

- Haghipour, A., 1977. Geological map of the Biabanak-Bafq area, scale 1:500,000. Geological Survey of Iran.
- Khoshnoodi, K., 2016. Mineralogy, geochemistry and mineralization of radioactive elements with special emphasis on thorium in the Choghart ore deposit in the Bafq region, central Iran. Ph.D. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 216 pp.
- Mohseni, S. and Aftabi, A., 2012. Comment on Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Se-chahun iron oxideapatite deposit, Bafq district. In: Z. Bonyadi, G.J. Davidson, B. Mehrabi, S. Meffre and F. Ghazban (Editors), Insights from paragenesis and geochemistry. Chemical Geology, Amsterdam, pp. 378–381.