



زمین‌شناسی، کانه‌زایی و زمین‌شیمی رخداد معدنی مس آق‌کند (شمال زنجان، پهنه طارم - هشتجین)

مریم فیضی، محمد ابراهیمی، حسین کوهستانی* و میرعلی اصغر مختاری

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۲۵، پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۱۸

چکیده

منطقه آق‌کند در فاصله ۴۸ کیلومتری شمال زنجان واقع شده است و بخشی از زیرپهنه طارم- هشتجین در پهنه ساختاری البرز باختری- آذربایجان محسوب می‌شود. کانه‌زایی مس در این منطقه به صورت رگه کوارتز- فلوتورین مس‌دار در میزبان گدازه‌های بازالت آندزیتی ائوسن رخ داده است. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، کانه‌های فلزی در منطقه آق‌کند شامل کالکوپیریت و به مقدار کمتر اسپکیولاریت، کانیهای مرحله سوپرژن و کانیهای باطله کوارتز، فلوتورین و کلریت هستند. مهمترین بافتهای کانسنگ شامل دانه پراکنده، رگه- رگه‌چهای، پرشی، پرکننده فضای خالی، جان‌شینی، کوکاد، قشرگون، گل کلمی و پرماند است. شش مرحله کانه‌زایی در رخداد معدنی مس آق‌کند، قابل تشخیص است. این مراحل با رگه- رگه‌چهای فلوتورین (مرحله اول) آغاز و به ترتیب با تهنشست کوارتز و کالکوپیریت در رگه‌ها و سیمان گرمابی پرش‌ها (مرحله دوم)، رگه- رگه‌چهای کوارتز- اسپکیولاریت (مرحله سوم)، رگه‌چهای منفرد و یا دسته‌رگه‌چهای نیمه موازی تا متقاطع کوارتز (مرحله چهارم)، بافت رگه- رگه‌چهای و پرکننده فضاهای خالی کلریت (مرحله پنجم) و سرانجام تشکیل ملاکیت و هیدروکسیدهای آهن به صورت رگه- رگه‌چهای و پرکننده فضاهای خالی (مرحله ششم) ادامه یافته است. دگرسانی گرمابی به بخشهای سیلیسی و کلریتی شده پهنه‌های کانه‌دار محدود می‌شود. دگرسانی پروپلیتی (سریسیت، اپیدوت، کلسیت و کلریت) در خارج از بخشهای کانه‌دار رخ داده است. مقایسه الگوی عناصر کمیاب در گدازه‌های بازالت آندزیتی سالم و بدون کانه‌زایی ائوسن، گدازه‌های ریولیتی- ریوداسیتی الیگوسن و بخشهای کانه‌دار، نشان‌دهنده ارتباط احتمالی سیالات کانی‌ساز با گدازه‌های ریولیتی- ریوداسیتی الیگوسن است. هرچند شسته‌شدن برخی عناصر از گدازه‌های بازالت آندزیتی میزبان نیز می‌تواند در تشکیل کانی‌سازی منطقه مؤثر بوده باشد، ویژگیهای رخداد معدنی مس آق‌کند با کانسارهای اپی‌ترمال فلزات پایه قابل مقایسه است.

واژه‌های کلیدی: زمین‌شناسی، کانه‌زایی، زمین‌شیمی، آق‌کند، زنجان، طارم- هشتجین

مقدمه

طارم- هشتجین میزبان انواع مهمی از کانه‌زاییهای چند فلزی، آهن، مس، طلا، نقره و سرب و روی است (Ghorbani, 2007). از کانسارها و رخ دادهای معدنی مهم موجود در این کمربند می‌توان به آهن مروراید (Nabatian et al., 2007; Nabatian and Ghaderi, 2014)، آهن سرخه‌دیجج (Moayyed and Moazzen, 2001; Nabatian et al., 2009) و آهن ذاکر (Khanmohammadi et al., 2009)، مس- طلای رشت‌آباد (Khakzad and Hajalilou, 1999)، مس ماری (Hatami et al., 2011)، مس علی‌آباد

رخداد معدنی مس آق‌کند در فاصله ۴۸ کیلومتری شمال زنجان، در محدوده‌ای با مختصات $37^{\circ}43'00''$ عرض شمالی، در بخش جنوب‌خاوری ورقه $48^{\circ}20'13''$ طول خاوری و $1:100000$ هشتجین (Faridi and Anvari, 2000) واقع شده است. بر اساس تقسیمات پهنه‌های ساختاری- رسوبی ایران، این رخداد معدنی در پهنه البرز (Alavi, 1991) یا البرز- آذربایجان (Nabavi, 1976) و زیرپهنه طارم- هشتجین قرار می‌گیرد. از دیدگاه متالوژنی، کمربند فلززایی

هر نمونه در لیتیم متابرات/ تترابرات ذوب و سپس در اسید نیتریک حل شد. برای تعیین میزان فلزات پایه به صورت جداگانه حدود ۰/۵ گرم از هر نمونه در تیزاب سلطانی داغ (۹۵ درجه سانتی‌گراد) حل شد. حد پایین دقت اندازه‌گیری برای عناصر مختلف در جدول ۱ آورده شده است.

زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی

بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ هشتجین (Faridi and Anvari, 2000)، قدیمی‌ترین واحدهای سنگی موجود در منطقه آق‌کند، سنگهای مربوط به ائوسن (معادل سازند کرج) (Hirayama et al., 1966) شامل توفهای شیشه‌ای-خرده‌سنگی (واحد E^t) با میان‌لایه‌های گدازه‌های داسیتی، آندزیتی و بازالت آندزیتی (واحد E^{t1}) و توفهای بازیک با درون لایه‌های گدازه‌های تراکی‌بازالتی (واحد E^{v2}) است (شکل ۱). تحت تأثیر نیروهای فشارشی فاز پیرنه (Faridi and Anvari, 2000)، چین‌خوردگیهای فراوانی با راستای سطح محوری خاوری-باختری در این واحدها تشکیل شده است. واحدهای سنگی مربوط به الیگوسن، با ناپیوستگی زاویه‌دار بر روی واحدهای سنگی ائوسن قرار گرفته‌اند. این توالی معمولاً با توفهای پامیسی شروع شده است و به ترتیب با خروج گدازه‌های ریولیتی، ریوداسیتی و ته‌نشست‌های آواری موجی (واحد OI^{v1})، گدازه‌های تراکی‌بازالتی و تراکی‌آندزیتی (واحد OI^{v2}) و گدازه‌های بازالتی، آندزیتی و آندزیتی با ساخت ستونی (واحد OI^{ba}) ادامه می‌یابد (شکل ۱). سنگهای آذرین نیمه‌عمیق منسوب به الیگوسن (واحد OI^{sv}) ترکیب تراکی‌آندزیتی دارند (Faridi and Anvari, 2000) که به شکل دایک، سیل و لاکولیت درون واحدهای E^t و OI^{v1} تزریق شده‌اند (شکل ۱).

بر اساس بررسیهای صحرایی انجام شده، واحدهای آتشفشانی ائوسن به شکل گدازه (با ترکیب سنگ‌شناختی بازالت آندزیتی) بوده و به‌ندرت واحدهای توفی در بین آنها رخنمون دارند. این واحدها به‌طور عمده توسط فعالیتهای آتشفشانی اسیدی الیگوسن پوشیده شده و صرفاً رخنمونهای محدودی از آنها در مناطق پست و کم‌ارتفاع منطقه (داخل آب‌راه‌ها) که فرسایش بیشتری یافته‌اند، مشاهده می‌شود. این سنگها در نمونه دستی، دارای بافت پورفیریتیک شامل درشت بلورهای پلاژیوکلاز و کانیه‌های مافیک اپیدوتی‌شده در زمینه دانه‌ریز به

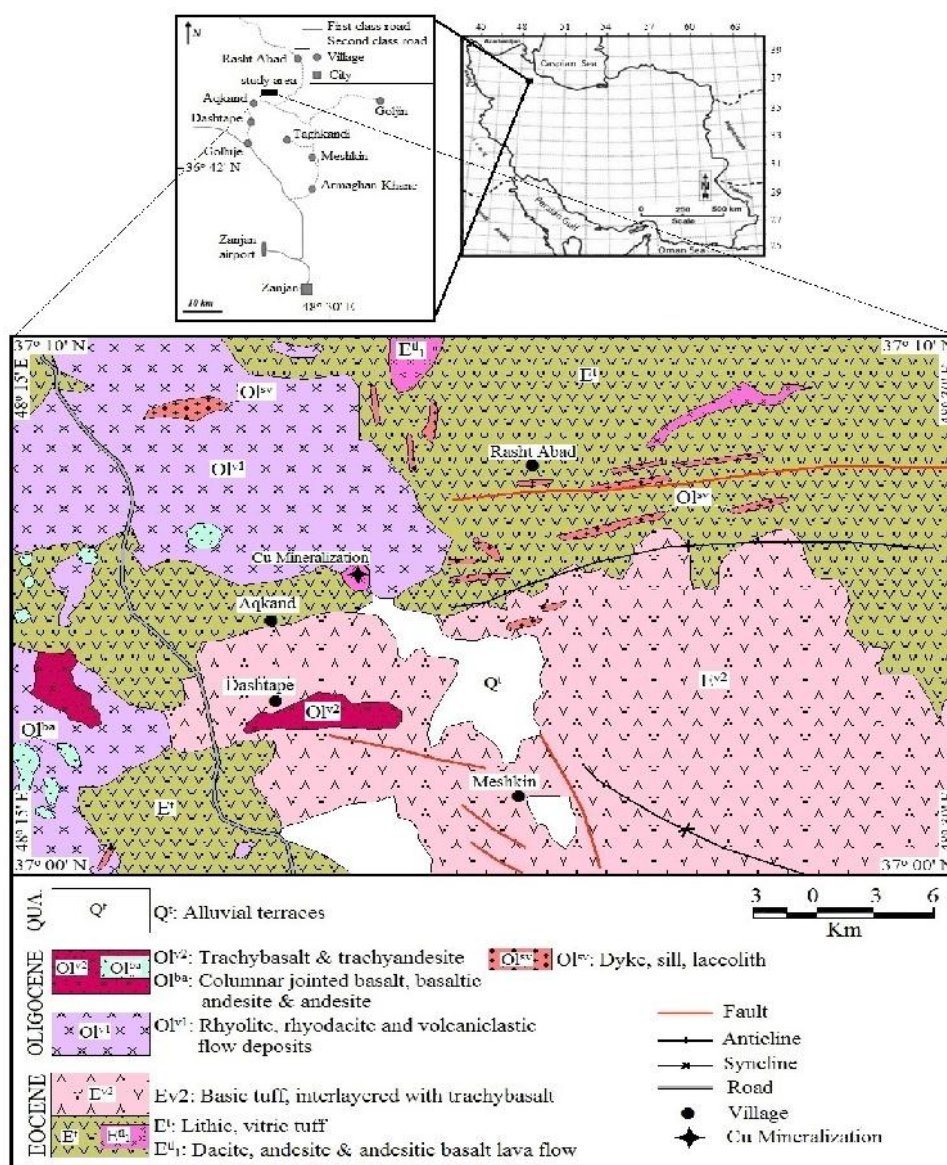
(Kouhestani and Mokhtari, 2013; Saeedi, 2015)، چندفلزی طلادار گلوچه (Mehrabi et al., 2009) و طلای لهنه (Mehrabi et al., 2010) (Rahmani., 2010) اشاره کرد. بررسیهای قبلی انجام‌شده در منطقه آق‌کند شامل تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ بندر انزلی (Davies, 1977) و ۱:۱۰۰۰۰۰ هشتجین (Faridi and Anvari, 2000) و همچنین فعالیتهای اکتشافی موضوعی در رابطه با اکتشاف پرلیت موجود در منطقه بوده‌اند. با وجود این، قبلاً بررسی علمی دقیقی بر روی کانه‌زایی مس این منطقه انجام نشده است. در این پژوهش، ویژگیهای زمین‌شناسی، کانه‌زایی و زمین‌شیمیایی این رخداد معدنی مورد بررسی قرار گرفته و نوع کانه‌زایی و خاستگاه آن تعیین شده است. بررسی دقیق این نوع کانه‌زایی می‌تواند عوامل کلیدی توزیع زمانی و مکانی برای اکتشاف کانه‌زاییهای مشابه در کمربند فلززایی طارم-هشتجین را معرفی کند و به‌عنوان الگوی اکتشافی مورد استفاده قرار گیرد.

روش مطالعه

برای بررسی زمین‌شناسی و کانه‌زایی منطقه مورد مطالعه، علاوه بر انجام بررسیهای صحرایی، تعداد ۲۴ مقطع نازک و ۱۱ مقطع نازک-صیقلی از واحدهای سنگی و بخشهای کانه‌دار تهیه و با استفاده از میکروسکپ‌های پلاریزان دومنظوره مدل GX در دانشگاه زنجان مورد بررسی قرار گرفت. سپس بر اساس تغییرات سنگ‌شناسی، دگرسانی و کانه‌زایی، تعداد ۶ نمونه از واحدهای سنگی میزبان و بخشهای کانه‌دار برای انجام آنالیزهای شیمیایی انتخاب شد. برای این منظور، ابتدا نمونه‌ها توسط خردکننده فولادی تا اندازه حدود ۵ مش (۴ میلی‌متر) خرد و سپس توسط آسیاب تنگستنی به مدت ۲ دقیقه تا اندازه حدود ۲۰۰ مش (۷۴ میکرون) پودر شدند. مراحل خردایش و پودر کردن نمونه‌ها در آزمایشگاه دانشگاه زنجان انجام شد. پس از آماده‌سازی، میزان ۲۰ گرم از پودر نمونه‌ها برای تعیین میزان عناصر کمیاب (Ba, Be, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, Hf, Li, Nb, Ni, Pb, Rb, Sc, Sr, Ta, Th, V, Y, Zn, Zr) و نادر خاکی به‌روش ICP-MS به آزمایشگاه شرکت کیمیا پژوه البرز در اصفهان، ارسال و مورد تجزیه قرار گرفت. برای تعیین میزان عناصر نادر خاکی حدود ۰/۲ گرم از

سنگها دارای فرسایش پوست‌پیزی بوده و در مواردی لایه‌بندی جریان‌ی نشان می‌دهند (شکل ۲-ب)، در نتیجه سرعت سرد شدن بالای این گدازه‌ها، سنگهای شیشه‌ای (اسیدین) حاصل شده‌اند. این سنگهای شیشه‌ای در نزدیکی آبهای گرم، تحت تأثیر قرار گرفته و در نتیجه آب‌گیری به پرلیت و پیچستون تبدیل شده‌اند. پرلیت‌ها و پیچستون‌ها بیشتر در بخشهای مرکزی منطقه و در بخش پایینی گنبدهای ریولیتی دیده می‌شوند (شکل ۲-ا).

رنگ خاکستری تیره هستند. واحدهای اسیدی الیگوسن اغلب به‌صورت ارتفاعات با مورفولوژی خشن در منطقه دیده می‌شود (شکل ۲-ا). این سنگها حفره‌دار و متخلخل است و اغلب به‌صورت گنبدی شکل دیده می‌شوند (شکل ۲-ا). بررسیهای صحرایی و میکروسکوپی انجام شده بیانگر ترکیب سنگ‌شناسی ریولیت-ریوداسیت (به‌صورت گدازه و توف)، پرلیت، پیچستون و ایگنیمبریت برای این سنگهاست. گدازه‌های ریولیتی-ریوداسیتی، ارتفاعات منطقه را به‌ویژه در شمال و شمال‌خاور روستای آق‌کند تشکیل داده‌اند. بخش عمده این

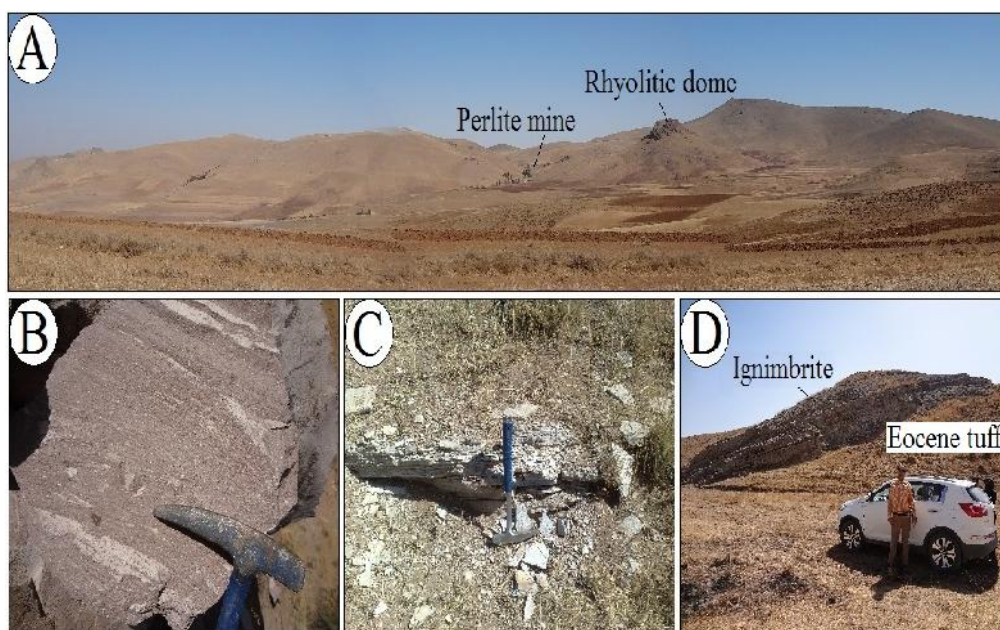


شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ناحیه‌ای ساده شده منطقه آق‌کند. با تغییرات از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ هشتجین، (Faridi and Anvari, 2000)

Fig. 1. Simplified regional geological map of the Aqkand area (modified from the Hashtjin geology map 1:100000, Faridi and Anvari, 2000)

مشاهده است (شکل ۲-۲). ایگنیمبریت‌ها در بخش‌های جنوب-جنوب‌خاوری منطقه، به‌صورت لایه‌هایی با ضخامت متوسط در زیر گدازه‌های ریولیتی و بر روی توف‌های ائوسن قرار گرفته‌اند (شکل ۲-۲). امتداد این واحد، خاوری-باختری با شیب حدود ۲۵ درجه به سمت شمال است.

توف‌های ریولیتی-ریوداسیتی بیشتر در بخش‌های قاعده‌ای گنبد‌های ریولیتی-ریوداسیتی دیده می‌شوند. این واحدها معمولاً لایه‌بندی نازکی داشته و به‌دلیل نرم فرسا بودن، متحمل فرسایش شدیدی شده‌اند. رخنمونهای محدودی از این واحدها به رنگ خاکستری روشن داخل آبراهه‌ها قابل



شکل ۲. A: دورنمایی از واحدهای آتشفشانی در منطقه آق‌کند (دید به سمت شمال). در بخش مرکزی تصویر، گنبد ریولیتی-ریوداسیتی و معدن پرلیت دیده می‌شود، B: نمایی نزدیک از لایه‌بندی موجود در گدازه‌های ریولیتی-ریوداسیتی، C: توف‌های ریولیتی-ریوداسیتی الیگوسن و D: لایه‌های ایگنیمبریتی در منطقه آق‌کند (دید به سمت شمال‌خاوری)

Fig. 2. A: View of volcanic units at the Aqkand area (view to the north). The rhyolitic-rhyodacitic dome and perlite mine are observed in the center of the photo, B: A close view of the bedding in rhyolite-rhyodacite lavas, C: Oligocene rhyolitic-rhyodacite tuffs, and D: Ignimbrite layers at the Aqkand area (view to the northeast)

کانه‌زایی

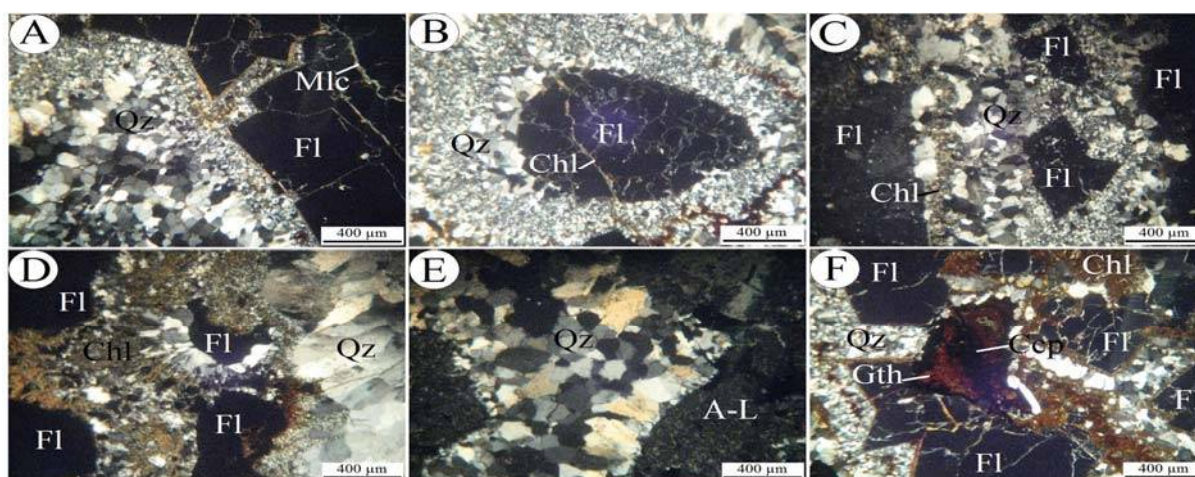
نیمه‌گردشده در مراحل بعدی کان‌زایی دیده می‌شود (شکل ۲-۴، B، C و D). مرحله دوم که اصلی‌ترین مرحله کان‌زایی در منطقه آق‌کند و شامل کالکوپیریت و کوارتز است که به‌صورت رگه‌ها و سیمان‌گرما‌ی برش‌ها رخ داده است (شکل ۲-۴، C، D، E و F). ضخامت رگه‌های کوارتزی تا حداکثر ۱۰ میلی‌متر تغییر می‌کند. کالکوپیریت اغلب به‌صورت بلورهای دانه‌درشت خودشکل تا نیمه خودشکل و در مواردی بی‌شکل حضور دارد. کوارتزها معمولاً به‌صورت بلورهای درشت خودشکل تا نیمه خودشکل دیده شده و بافت‌های شانه‌ای، نواری و قشرگون، پَرماند و گل‌کلمی نشان می‌دهند. این مرحله از کان‌زایی، مرحله قبلی را قطع کرده است.

بر اساس بررسی‌های صحرایی، کان‌زایی مس در منطقه آق‌کند به‌صورت رگه کوارتز-فلوئورین مس‌دار با رخنمون ۵۰ متر درازا و ۲ متر پهنا با راستای شمال‌باختری-جنوب‌خاوری و شیب نزدیک به ۷۰ درجه به سمت شمال‌خاوری در میزبان گدازه‌های بازالت آندزیتی ائوسن رخ داده است (شکل ۳). بر اساس بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی انجام شده، شش مرحله کان‌زایی در رخ‌داد معدنی آق‌کند قابل تفکیک است. مرحله اول کان‌زایی با فراوانی فلوئورین به‌صورت رگه-رگه‌های مشخص می‌شود (شکل ۲-۴). ضخامت رگه‌ها و رگه‌های فلوئورین تا حداکثر ۵ میلی‌متر تغییر می‌کند. آثار این مرحله از کان‌زایی به‌صورت خرده‌کانیهای زاویه‌دار تا



شکل ۳. نمایی از رگه کوارتز-فلوئورین مس‌دار در منطقه آق‌کند (دید به سمت جنوب‌باختر). گنبد ریولیتی در گوشه بالای سمت راست تصویر دیده می‌شود.

Fig. 3. View of Cu-bearing quartz-fluorite vein at the Aqkand area (view to the southwest). Rhyolitic dome is observed at the top right corner of the photo

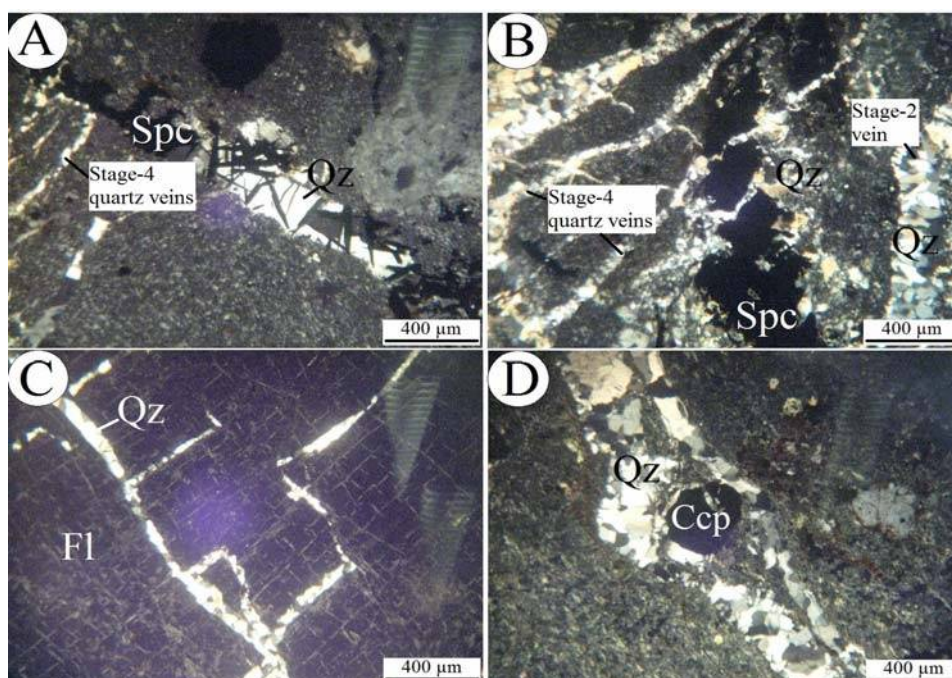


شکل ۴. مراحل اول و دوم کانه‌زایی در رخداد معدنی مس آق‌کند، A: رگه‌چه فلوئورین مرحله اول که توسط رگه‌چه‌های سیلیسی-سولفیدی مرحله دوم و رگه‌چه‌های مالاکیتی مرحله ششم قطع شده است، B: خرده کانی فلوئورین نیمه گردشده مربوط به مرحله اول کانه‌زایی در سیمان کوارتزی-سولفیدی مرحله دوم کانه‌زایی. کوارتز با بافت کوکاد نیز در اطراف این خرده کانی تشکیل شده است. رگه‌چه کلریتی مرحله پنجم نیز در تصویر دیده می‌شود که هر دو مرحله کانه‌زایی را قطع کرده است، C و D: رگه‌های کوارتزی-سولفیدی مرحله دوم که رگه‌چه فلوئورین مرحله اول را قطع کرده‌اند. این رگه‌ها حاوی قطعاتی از فلوئورین مرحله اول به صورت خرده کانیهای زاویه‌دار تا نیمه گردشده نیز هستند. در هر دو تصویر، فضای بین کوارتزها توسط کلریت‌های مرحله پنجم پر شده است. کوارتزها در تصویر C، بافت‌های قشرگون و گل‌کلمی و در تصویر D، بافت‌های گل‌کلمی و پرماند نشان می‌دهند. E و F: مرحله دوم کانه‌زایی به صورت سیمان گرمابی در فضای پرش‌های سنگ میزبان (E) و قطعات فلوئورین مرحله اول (F)، همه تصاویر در نور عبوری پلاریزه متقاطع گرفته شده‌اند. علائم اختصاری کانیها از ویتنی و اونز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (A-L= خرده‌سنگ بازالت آندزیتی، Ccp= کالکوپیریت، Chl= کلریت، Fl= فلوئورین، Gth= گوتیت، Mlc= مالاکیت، Qz= کوارتز)

Fig. 4. Stage-1 and stage-2 mineralization at the Aqkand Cu occurrence. A: stage-1 fluorite veinlet cutting by stage-2 quartz-sulfide and stage-6 malachite veinlets. B: Subrounded clast of stage-1 fluorite in quartz-sulfide cement of stage-2 mineralization. The clast is overgrown by cockade bands of quartz. Stage-5 chlorite veinlet crosscutting the previous stages is also observed. C and D: stage-2 quartz-sulfide veins crosscutting the stage-1 fluorite veinlet. The veins contain angular to subrounded clasts of stage-1 fluorite. In both photos, vugs are filled by stage-5 chlorite. Crustiform and colloform as well as colloform and plumose textures of quartz are also observed in C and D, respectively. E and F: stage-2 mineralization as hydrothermal cement in host rock breccia (E) and stage-1 fluorite clasts (F). All photomicrographs are taken in transmitted polarized-light, XPL. All mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (A-L= andesitic basalt lithic, Ccp= chalcopyrite, Chl= chlorite, Fl= fluorite, Gth= goethite, Mlc= malachite, Qz= quartz)

ضخامت رگه‌چه‌های کوارتزی تا ۲ میلی‌متر متغیر است. کانه‌زایی مرحله پنجم سبب تشکیل کلریت به‌صورت رگه‌چه‌ای و پرکننده فضاهای خالی شده است (شکل ۶-A و B). این رگه‌چه‌ها مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع می‌کنند. در مقاطع نازک، کلریت‌ها به رنگ سبز و قهوه‌ای تیره دیده شده و بعضاً بافت‌های شعاعی و اسفرولیتی نشان می‌دهند. مرحله ششم کانه‌زایی مربوط به فرآیندهای سوپرژن بوده و سبب تشکیل مالاکیت و هیدروکسیدهای آهن به صورت رگه-رگه‌چه‌ای و پرکننده فضاهای خالی شده است (شکل ۶-C و D).

مرحله سوم کانه‌زایی در رخداد معدنی مس آق‌کند شامل رگه-رگه‌چه‌های کوارتزی-اسپیکولاریتی بوده و مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع کرده‌اند (شکل ۵-A و B). ضخامت این رگه-رگه‌چه‌ها حدود ۲ میلی‌متر است. در مقاطع میکروسکوپی، اسپیکولاریت‌ها به‌صورت بلورهای درشت خودشکل تا نیمه‌خودشکل قابل مشاهده هستند. مرحله چهارم کانه‌زایی با فراوانی کوارتز به‌صورت رگه‌چه‌های منفرد و یا دسته رگه‌چه‌های نیمه‌موازی تا متقاطع مشخص می‌شود که مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع کرده است (شکل ۵-A، B، C و D). هیچ‌گونه کانی سولفیدی در این مرحله تشکیل نشده است.



شکل ۵. مراحل سوم و چهارم کانه‌زایی در رخداد معدنی مس آق‌کند. A و B: مرحله سوم کانه‌زایی به‌صورت رگه-رگه‌چه‌های کوارتزی-اسپیکولاریتی که رگه‌های مرحله دوم را قطع کرده (B) و خود توسط رگه‌چه‌های کوارتزی مرحله چهارم قطع شده‌اند (A). C: رگه‌چه‌های کوارتزی مرحله چهارم که فلوریت‌های مرحله اول را قطع کرده است و D: رگه‌چه‌های کوارتزی مرحله چهارم که کانی کالکوپیریت مرحله دوم را در بر گرفته است. همه تصاویر در نور عبوری پلاریزه متقاطع گرفته شده‌اند. علائم اختصاری کانیها از ویتنی و اونز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. (Ccp= کالکوپیریت، Fl= فلوریت، Qz= کوارتز، Spc= اسپیکولاریت)

Fig. 5. Stage-3 and stage-4 mineralization at the Aqkand Cu occurrence. A and B: stage-3 mineralization as quartz-specularite vein-veinlets which are crosscutting the stage-2 veins (B) and are crosscut by stage-4 quartz veinlets (A), C: stage-4 quartz veinlets crosscutting the stage-1 fluorite vein and D: stage-4 quartz veinlets surrounding the stage-2 chalcopyrite clast. All photomicrographs are taken in transmitted polarized-light, XPL. All mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Ccp= chalcopyrite, Fl= fluorite, Qz= quartz, Spc= specularite)

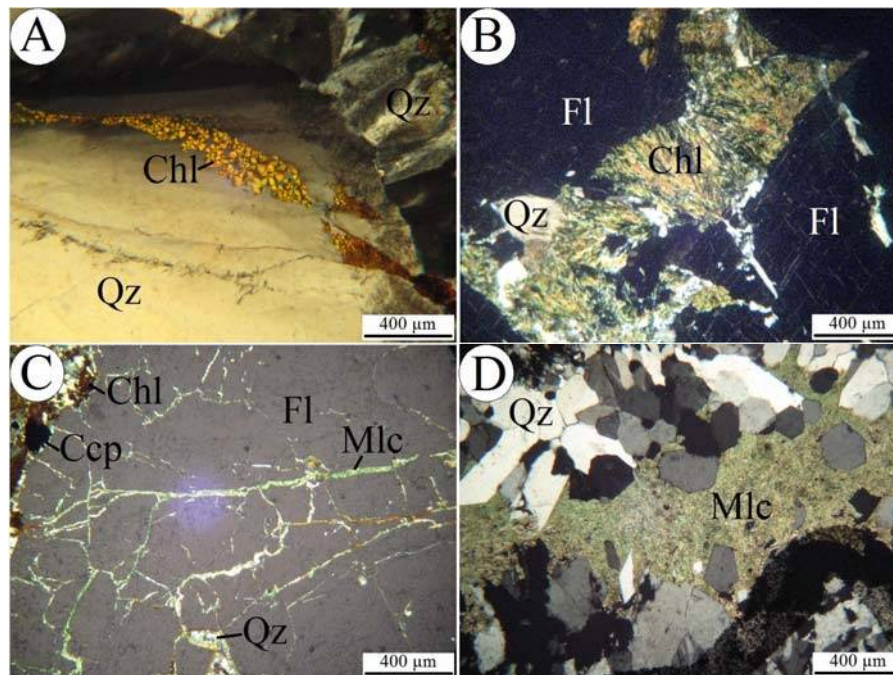
محدود می‌شود. دگرسانی پروپلیتیک در خارج از بخش‌های کانه‌دار و در میزبان بازالت‌های آندزیتی رخ داده است. دگرسانی سیلیسی به‌صورت رگه-رگه‌چه‌ای و یا سیمان

دگرسانی

دگرسانی گرمایی در رخداد معدنی آق‌کند دارای وسعت چندانی نبوده و به مناطق سیلیسی و کلریتی بخش‌های کانه‌دار

پلاژیوکلازها به‌طور بخشی به‌وسیله کانیهای سریسیت، اپیدوت و کلسیت (شکل ۷-A و B) و پیروکسن‌ها نیز به‌طور بخشی توسط کانیهای اپیدوت، کلسیت و کلریت جایگزین شده‌اند (شکل ۷-C و D). کوارتز حاصل از این دگرسانی به میزان کم در زمینه سنگ دیده می‌شود. این دگرسانی، محدودکننده بخشهای بیرونی سیستم دگرسانی گرمایی در منطقه بوده است و با هیچ یک از مراحل کانه‌زایی همراه نیست.

گرمایی پرش‌ها تشکیل شده است (شکل‌های ۴ و ۵). ضخامت رگه-رگه‌های کوارتز حداکثر به ۱۰ میلی‌متر می‌رسد. دگرسانی کلریتی به‌صورت رگه‌چه‌ای رخ داده و یا فضای بین سیمان سیلیسی-سولفیدی پرش‌ها را پر کرده است (شکل‌های ۴ و ۶). دگرسانی پروپلیتیک موجود در داخل گدازه‌های بازالت آندزیتی میزبان، معمولاً از شدت زیادی در منطقه برخوردار نیست، به طوری که بافت سنگها در این نوع دگرسانی معمولاً حفظ شده و یا به‌راحتی قابل شناسایی است.



شکل ۶. مراحل پنجم و ششم کانه‌زایی در رخداد معدنی مس آق‌کند. A: رگه‌چه کلریتی مرحله پنجم که رگه کوارتزی مرحله چهارم را قطع کرده است، B: کلریت مرحله پنجم که فضای خالی سیمان کوارتزی مرحله دوم را پر کرده است، C: رگه‌چه‌های مالاکیتی مرحله ششم که رگه فلئورین مرحله اول را قطع کرده‌اند. در گوشه سمت چپ بالای تصویر، فضای خالی رگه کوارتزی-سولفیدی مرحله دوم توسط کلریت مرحله پنجم پر شده است و D: مالاکیت مرحله ششم که فضای خالی سیمان کوارتزی-سولفیدی مرحله دوم را پر کرده است. همه تصاویر در نور عبوری پلاریزه متقاطع گرفته شده‌اند. علائم اختصاری کانیها از ویتنی و اونز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. (Ccp= کالکوپیریت، Chl= کلریت، Fl= فلئورین، Mlc= مالاکیت، Qz= کوارتز)

Fig. 6. Stage-5 and stage-6 mineralization at the Aqkand Cu occurrence. A: stage-5 chlorite veinlet crosscutting the stage-4 quartz vein, B: stage-5 chlorite filling the vugs of stage-2 quartz cement, C: stage-6 malachite veinlet crosscutting the stage-1 fluorite vein. At the top left corner of the photo, vugs of stage-2 quartz-sulfide vein are filled by stage-5 chlorite, and D: stage-6 malachite filling the vugs of stage-2 quartz-sulfide cement. All photomicrographs are taken in transmitted polarized-light, XPL. All mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Ccp= chalcopyrite, Chl= chlorite, Fl= fluorite, Mlc= malachite, Qz= quartz)

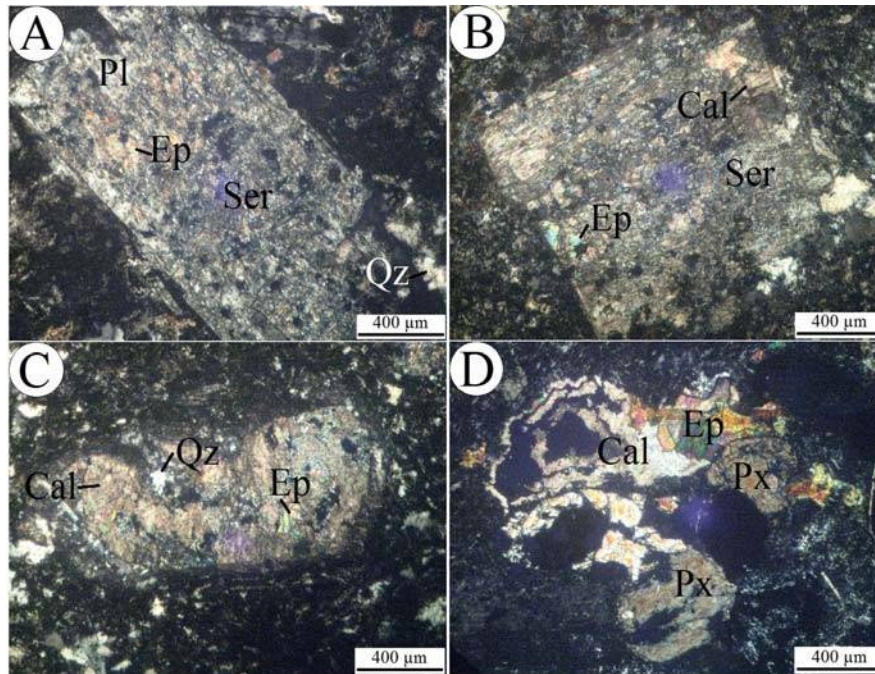
گوتیت و لپیدوکروسیت نیز در اثر فرآیندهای سوپرژن تشکیل شده‌اند. کوارتز، فلئورین و به میزان کمتر کلریت، کانی‌شناسی اصلی مواد باطله را در این رخداد معدنی تشکیل می‌دهند. بر اساس این بررسیها، بافت کانه‌ها و مواد باطله شامل رگه-

کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ

بررسیهای کانه‌نگاری نمونه‌های برداشت شده از پهنه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی مس آق‌کند نشان‌دهنده حضور فراوان کالکوپیریت به‌همراه مقدار کمی اسپیکیولاریت است. مالاکیت،

(شکل ۴-B)، گل کلمی و قشرگون (شکل‌های ۴-C و D و ۸-E و F) و پرماند (شکل ۴-D) است.

رگه‌چهای (شکل ۵ و شکل ۶-C)، برشی (شکل‌های ۴-E و ۸-A و B)، دانه‌پراکنده، پرکننده فضای خالی (شکل‌های ۶-B و D و ۸-C و D)، جانیشینی (شکل ۷-A، B، C و D)، کوکاد



شکل ۷. دگرسانی پروپلیتیک در رخداد معدنی مس آق کند. A و B: دگرسانی پلاژیوکلاز به سریسیت، کلسیت و اپیدوت، C و D: دگرسانی پیروکسن به کلسیت، اپیدوت و کوارتز. همه تصاویر در نور عبوری پلاریزه متقاطع گرفته شده‌اند. علایم اختصاری کانیها از ویتنی و اونز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. (Cal= کلسیت، Ep= اپیدوت، Pl= پلاژیوکلاز، Px= پیروکسن، Qz= کوارتز، Ser= سریسیت)

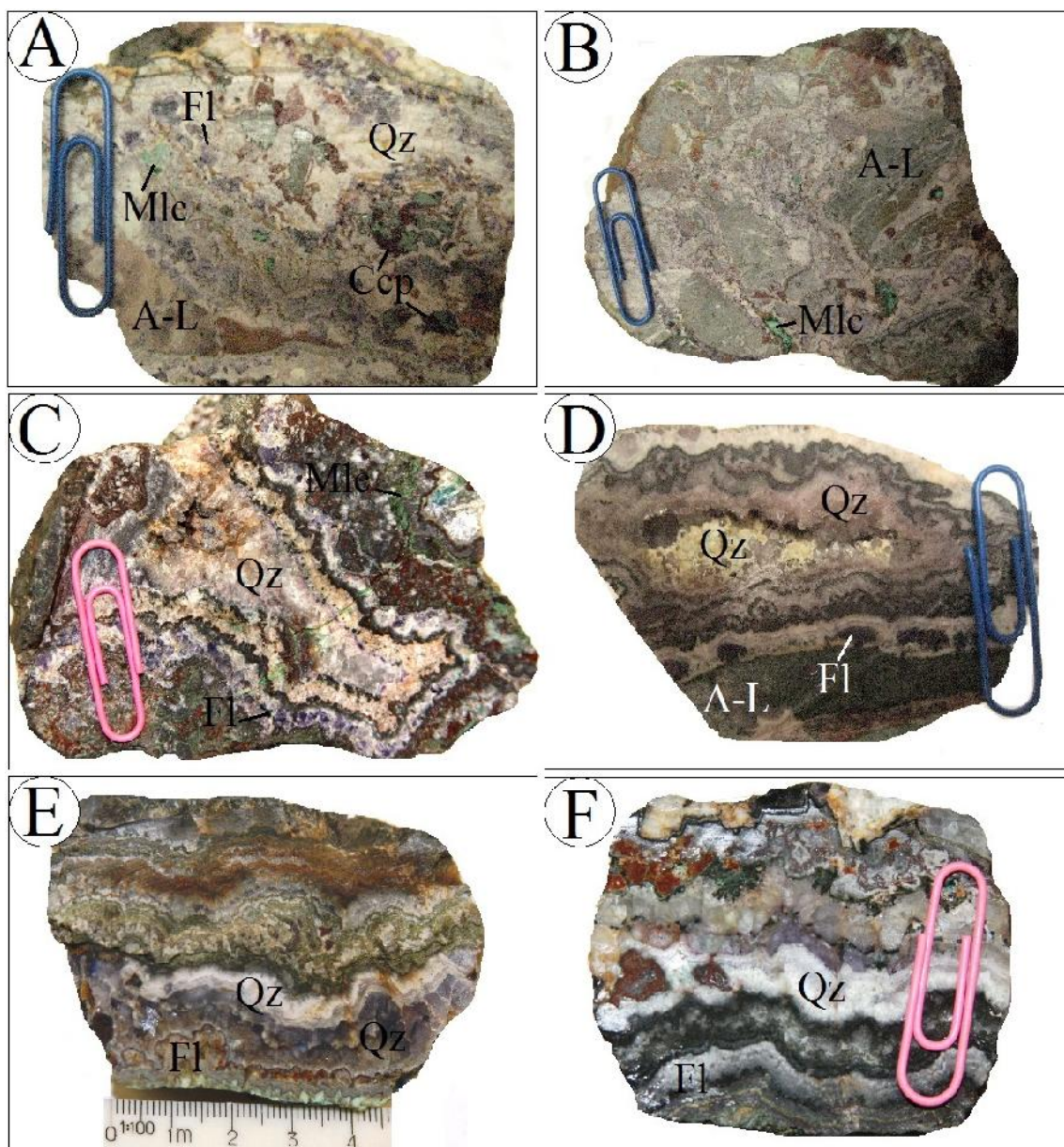
Fig. 7. Propylitic alteration at the Aqkand Cu occurrence. A and B: Alteration of plagioclase to sericite, calcite and epidote, C and D: Alteration of pyroxene to calcite, epidote and quartz. All photomicrographs are taken in transmitted polarized-light, XPL. All mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Cal= calcite, Ep= epidote, Pl= plagioclase, Px= pyroxene, Qz= quartz, Ser= sericite)

کوارتز باطله اصلی در رخداد معدنی مس آق کند است که هم‌زمان با مراحل اصلی کانه‌زایی تشکیل شده است. بر پایه اندازه بلورها، کوارتزهای موجود را می‌توان در دو دسته ریزبلور (کلسدون) و درشت بلور (Dong et al., 1995; Kouhestani et al., 2012; Ebrahimi et al., 2015) تقسیم‌بندی کرد (شکل ۱۰). کوارتزهای ریزبلور در رگه‌ها و سیمان گرمایی پرش‌ها و فضاها خالی با بافت گل کلمی مشخص می‌شوند (شکل ۱۰-A و B). کوارتزهای بلورین به صورت بلورهای درشت و خودشکل در نوارهای کوکاد و قشرگون در رگه‌ها و سیمان گرمایی پرش‌ها رخ داده‌اند (شکل ۱۰-C). بلورها به رنگ روشن، شیری سفید و یا خاکستری دیده می‌شود و اندازه‌های کمتر از ۱ میلی‌متر تا چند سانتی‌متر دارند. این کوارتزها معمولاً بافت پرماند دارند (شکل ۱۰-D).

کالکوپیریت به صورت بلورهای درشت نیمه خودشکل تا بی‌شکل دیده شده و در بیشتر موارد از حاشیه‌ها و در امتداد شکستگیها به گوتیت و لپیدوکروسیت دگرسان شده است (شکل ۹-A و B). در مواردی شدت دگرسانی به حدی است که این کانی به طور کامل به گوتیت تبدیل شده و یا تنها بقایایی از آن به صورت بافت بازمندی و یا جزیره‌ای (Ineson, 1989) باقی مانده است. اسپیکولاریت معمولاً به صورت بلورهای تیغه‌ای درشت خودشکل تا نیمه خودشکل تا اندازه یک سانتی‌متر در رگه-رگه‌چهای کوارتزی-اسپیکولاریتی دیده می‌شود (شکل ۹-C). مالاکیت حاصل فرآیندهای سوپرژن است و بیشتر به صورت رگه‌چهای و پرکننده حفرات و فضاها خالی دیده می‌شود (شکل ۹-D).

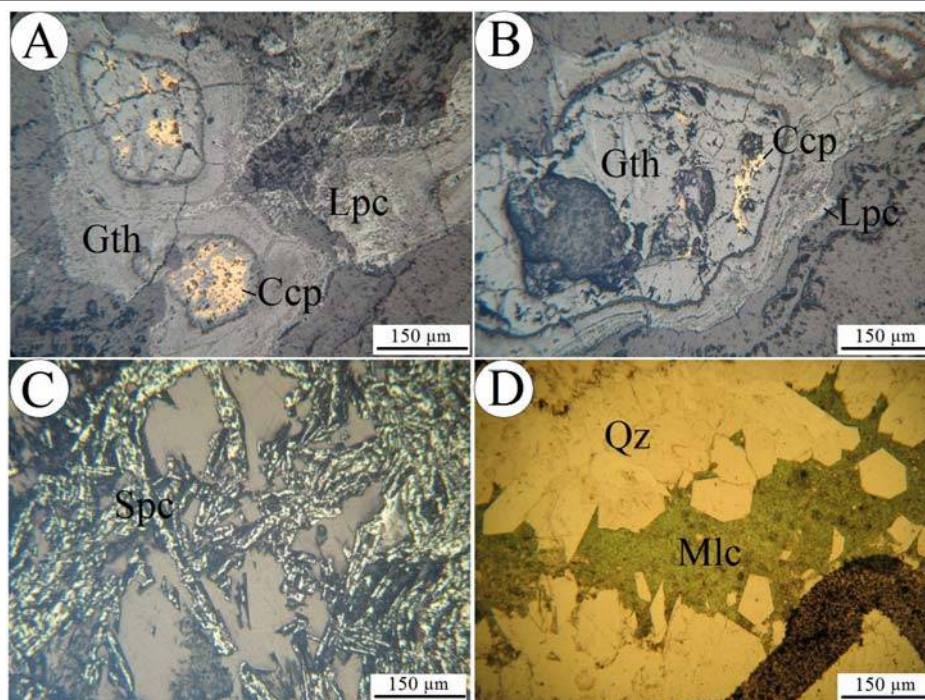
درشت در رگه- رگه‌چه‌های مرحله اول کانه‌زایی دیده می‌شود (شکل‌های ۴ تا ۶). کلریت معمولاً در رگه‌چه‌ها و یا فضای خالی سیمان کوارتزی- سولفیدی پرش‌ها دیده می‌شود (شکل ۶).

بافت پرمانند محصول رشد کشیده بلورهای کوارتز است (Yilmaz et al., 2010; Kouhestani, 2011; Kouhestani et al., 2012). فلئورین به‌صورت بلورهای



شکل ۸. انواع بافت ماده معدنی و مواد باطله در رخداد معدنی مس آق‌کند. A و B: بافت پرشی ماده معدنی، C و D: بافت پُرکننده فضای خالی به صورت بافتهای گل کلمی و قشرگون کانیهای معدنی و باطله. خرده کانیهای فلئورین با بافت پرشی نیز در تصویر D دیده می‌شود، E و F: بافت قشرگون و گل کلمی کانیهای معدنی و باطله. علایم اختصاری کانیها از ویتنی و اونز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. (A-L= andesitic basalt lithic، Ccp= chalcopyrite، Fl= fluorite، Mlc= malachite، Qz= quartz)

Fig. 8. Types of ore and gangue textures at the Aqkand Cu occurrence. A and B: Breccia texture of ore, C and D: Vug infill texture along with colloform and crustiform textures of ore and gangue minerals. Fluorite clast with breccia texture is also observed in D. E and F: Crustiform and colloform textures of ore and gangue minerals. All mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (A-L= andesitic basalt lithic, Ccp= chalcopyrite, Fl= fluorite, Mlc= malachite, Qz= quartz)



شکل ۹. تصویرهای میکروسکوپی (A تا C در نور بازتابی؛ D در نور عبوری پلاریزه) از مواد معدنی در رخداد معدنی مس آق کند. A و B: بلورهای بی‌شکل کالکوپیریت که توسط کانیهای برون‌زاد گوتیت و لپیدوکروسیت جانشین شده‌اند، C: بلورهای تیغه‌ای اسپکیولاریت و D: مالاکیت با بافت پرکننده فضای خالی بلورهای کوارتز. علائم اختصاری کانیها از ویتنی و اونز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. (Ccp= کالکوپیریت، Gth= گوتیت، Lpc= لپیدوکروسیت، Mlc= مالاکیت، Qz= کوارتز، Spc= اسپکیولاریت)

Fig. 9. Photomicrographs (A-C: reflected light, D: plane polarized transmitted light) of ore mineralogy at the Aqkand Cu occurrence. A and B: Anhedral crystals of chalcopyrite replaced by goethite and lepidocrocite supergene minerals, C: Bladed crystals of oligist, and D: Malachite with vug infill texture of quartz crystals. All mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Ccp= chalcopyrite, Gth= goethite, Lpc= lepidocrocite, Mlc= malachite, Qz= quartz, Spc= specularite)

مالاکیت، گوتیت و لپیدوکروسیت با بافتهای رگه‌چهای، پرکننده فضای خالی، جانشینی و بازماندی مشخص می‌شود.

داده‌های زمین‌شیمیایی بخشهای کانهدار و سنگهای میزبان هدف از این بررسیها، تعیین غنی‌شدگی و تهی‌شدگیهای عنصری مرتبط با دگرسانیهای گرمایی در سنگهای میزبان و بخشهای کانهدار است. تجزیه‌های شیمیایی به‌دست آمده از نمونه‌های منطقه آق کند در جدول ۱ آورده شده‌اند.

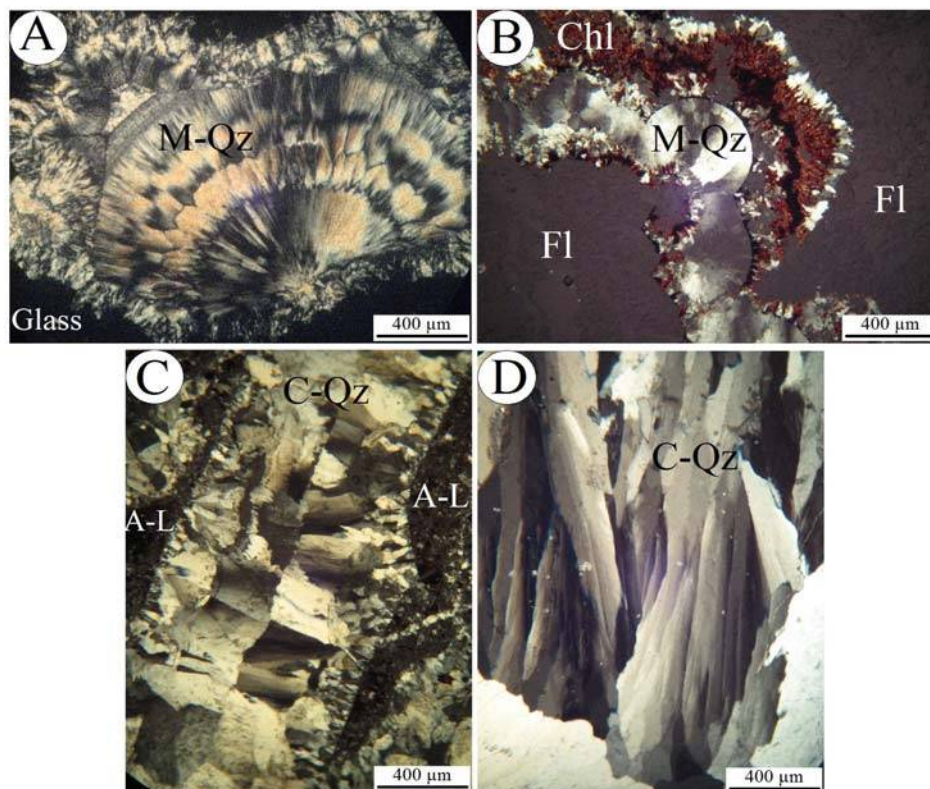
الگوی توزیع عناصر نادر خاکی

الگوی عناصر نادر خاکی برای بخشهای کانهدار در رخداد معدنی آق کند که نسبت به کندریت (Nakamura, 1974) به‌هنجار شده‌اند، در شکل ۱۲-A نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، الگوی این عناصر برای بخشهای کانهدار دارای یک شیب منفی با نسبت پایین

توالی پاراژنتیک کانیها در رخداد معدنی مس آق کند به شش مرحله قابل تقسیم است (شکل ۱۱). مرحله اول با حضور فلوتورین به صورت رگه-رگه‌چهای مشخص می‌شود. مرحله دوم با تشکیل بخشهای کوارتزی-سولفیدی (کالکوپیریت) به صورت رگه-رگه‌چهای و سیمان گرمایی پرش‌های حاوی خرده‌سنگهای سنگ میزبان و خرده کانیهای فلوتورین همراه است. بافتهای کوکاد، قشرگون، گل کلمی و پرمانند از بافتهای مهم کوارتزهای این مرحله به‌شمار می‌روند. مرحله سوم شامل رگه-رگه‌چهای کوارتزی-اسپکیولاریتی است. کوارتز تشکیل‌دهنده اصلی مرحله چهارم است که به صورت رگه‌چهای منفرد و یا دسته‌رگه‌چهای نیمه موازی تا متقاطع مشخص می‌شود. کلریت کانی اصلی مرحله پنجم است که به صورت رگه‌چهای و پرکننده فضاهای خالی دیده می‌شود. مرحله ششم مربوط به فرآیندهای سوپرژن بوده و با تشکیل

به غنی‌شدگی بیشتر آنها در بخشهای کانه‌دار منجر شده است (Rolland et al., 2003). آنومالی منفی Eu نیز می‌تواند در ارتباط با شرایط احیایی سیال و محیط نهشت کانه‌ها باشد (Parak, 1985; Whitford et al., 1988; Dokuz et al., 2005; Wang et al., 2006).

LREE/HREE به همراه آنومالی منفی Eu و آنومالی مثبت Ho است. بازالت آندزیتی حاوی کالکوپیریت دانه‌پراکنده، تمرکزهای پایین‌تری از عناصر نادر خاکی را در مقایسه با بخشهای کانه‌دار نشان داده است. در بخشهای کانه‌دار، غنی‌شدگی نسبی عناصر LREE می‌تواند در ارتباط با قابلیت تحرک این عناصر در مقایسه با عناصر HREE بوده باشد که



شکل ۱۰. انواع کوارتز در رخداد معدنی مس آق‌کند. A و B: کوارتزهای ریزبلور با بافت گل‌کلمی، C: کوارتزهای درشت بلور با بافت قشرگون و D: کوارتزهای درشت بلور با بافت پرماند. همه تصویرها در نور عبوری پلاریزه متقاطع گرفته شده‌اند. علایم اختصاری کانیها از ویتنی و اونز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. (A-L= خردسنگ بازالت آندزیتی، Chl= کلریت، Fl= فلوئورین، C-Qz= کوارتزهای درشت بلور، M-Qz= کوارتزهای ریزبلور)

Fig. 10. Types of quartz at the Aqkand Cu occurrence. A and B: Microcrystalline quartz with colloform texture. C: Coarse-grained quartz crystals with crustiform texture, and D: Coarse-grained quartz crystals with plumose texture. All photomicrographs are taken in cross-polar transmitted light. All mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (A-L= andesitic basalt lithic, Chl= chlorite, Fl= fluorite, C-Qz= Microcrystalline quartz, M-Qz= coarse crystalline quartz)

بخشهای کانه‌دار دارد؛ با این تفاوت که تمرکز برخی از عناصر در بخشهای کانه‌دار بالاتر است. همچنین، الگوی این عناصر در گدازه‌های بازالت آندزیتی سالم و بدون کانه‌زایی، شباهت کمی با الگوی آنها در بخشهای کانه‌دار دارد. الگوی عناصر نادر خاکی در گدازه‌های بازالت آندزیتی سالم و بدون کانه‌زایی، تنها با الگوی این عناصر در گدازه‌های مشابه دارای

الگوی عناصر نادر خاکی برای گدازه‌های بازالت آندزیتی سالم و بدون کانه‌زایی ائوسن و گدازه‌های ریولیتی-ریوداسیتی الیگوسن که نسبت به کندریت (Nakamura, 1974) به‌هنگار شده‌اند، در شکل B-۱۲ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، الگوی عناصر نادر خاکی در گدازه‌های ریولیتی-ریوداسیتی، شباهت زیادی با الگوی این عناصر در

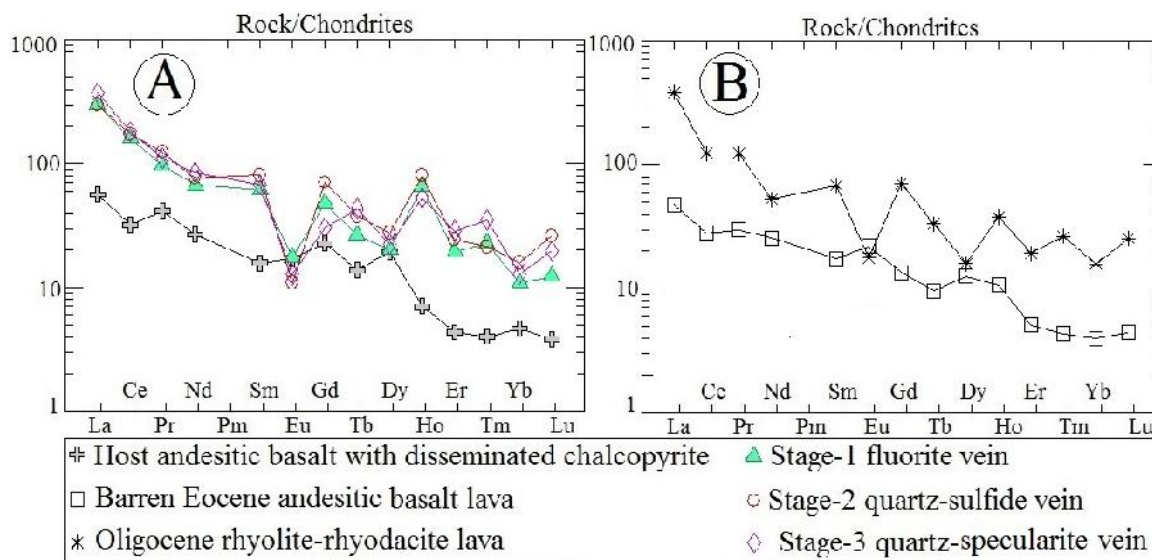
است که می‌تواند در ارتباط با عملکرد سیالات گرمابی باشد.

کالکوپیریت دانه‌پراکنده شباهت نشان می‌دهد، لکن میزان برخی از عناصر نادر خاکی در نمونه حاوی کانی‌سازی بالاتر

Mineralogy		Stages					
		Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	Stage 5	Stage 6
Ore	Chalcopyrite		—				
	Specularite			—			
	Malachite						—
	Goethite-Lepidocrocite						—
Gangue	Fluorite	—					
	Quartz		—	—	—		
	Chlorite					—	
Textures	Disseminated		—				
	Brecciated		—				
	Clastic		—				
	Vein and veinlets	—	—	—	—	—	—
	Open Space Filling					—	—
	Replacement-Relict						—
	Cockade		—				
	Crustiform		—				
Plumose		—					

شکل ۱۱- توالی پاراژنتیک، فراوانی نسبی و ساخت و بافت کانیها برای مواد معدنی و باطله در رخداد معدنی مس آق کند

Fig. 11. Paragenetic scheme showing the relative abundance, structure and texture of gangues and ore minerals at the Aqkand Cu occurrence



شکل ۱۲. A: الگوی عناصر نادر خاکی به‌هنگار شده نسبت به کندریت (Nakamura, 1974) برای بخش‌های کانه‌دار در رخداد معدنی مس آق کند و B: الگوی عناصر نادر خاکی به‌هنگار شده نسبت به کندریت (Nakamura, 1974) برای گدازه‌های بازالت آندزیتی سالم و بدون کانه‌زایی ائوسن و گدازه‌های ریولیتی-ریوداسیتی الیگوسن در رخداد معدنی مس آق کند

Fig. 12. A: Chondrite-normalized REE pattern (Nakamura, 1974) for the ore zones at the Aqkand Cu occurrence, and B: Chondrite-normalized REE pattern (Nakamura, 1974) for fresh and barren Eocene andesitic basalt lavas and Oligocene rhyolite-rhyodacite lavas at the Aqkand Cu occurrence

جدول ۱. نتایج تجزیه‌های شیمیایی عناصر کمیاب و نادر خاکی برای گدازه‌های بازالت آندزیتی ائوسن (نمونه AQ-14)، گدازه‌های ریولیتی-ریوداسیتی الیگوسن (نمونه AQ-24) و بخشهای کانه‌دار (نمونه‌های AQ-26، AQ-26a، AQ-30 و AQ-32) در رخداد معدنی مس آق‌کند. تمامی داده‌ها بر حسب گرم در تن (ppm) هستند.

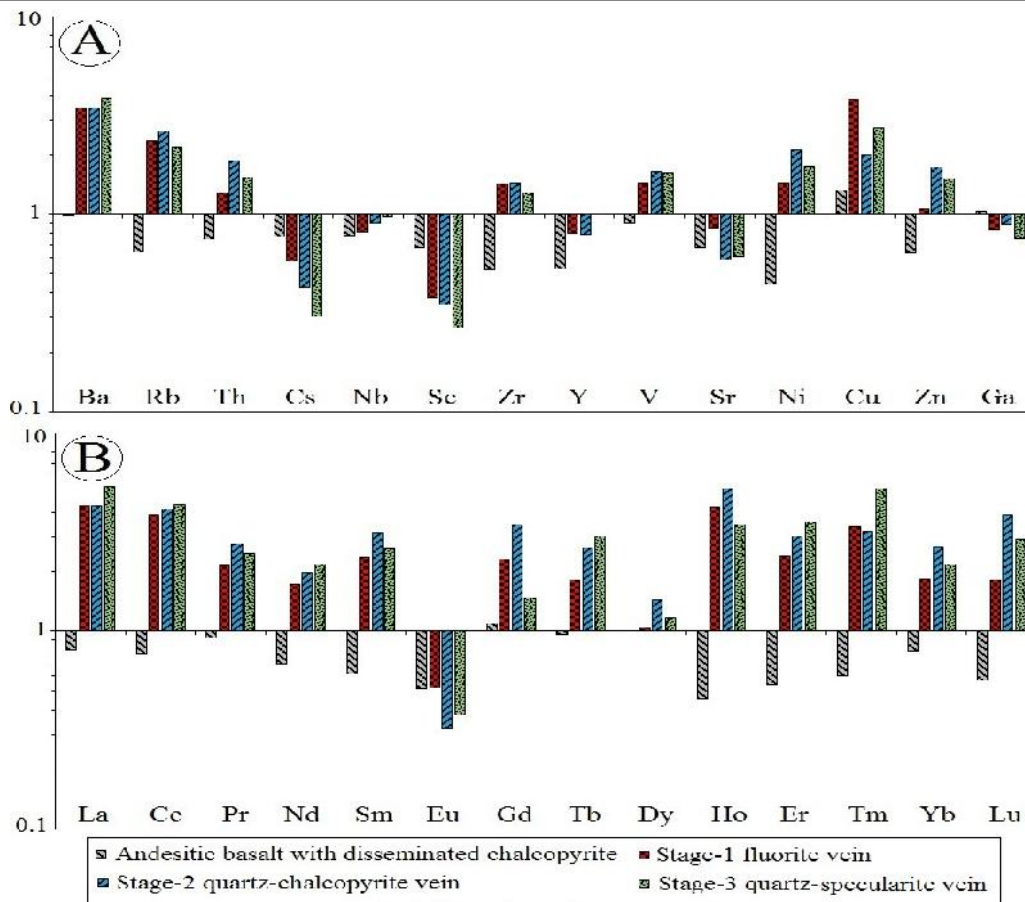
Table 1. Geochemical data of trace and rare earth elements for Eocene andesitic basalt lavas (sample AQ-14), Oligocene rhyolitic-rhyodacitic lavas (samples AQ-24) and ore zones (samples AQ-26, AQ-26a, AQ-30 and AQ-32) from the Aqkand Cu occurrence. All data in ppm.

	Ba	Y	Th	Zn	V	Cs	Co	Rb	Zr	Pb	Cu	Cr
D.L.	1	0.1	0.2	1	8	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
AQ-14	130.76	18.22	2.72	20.69	123.35	2.21	27.99	52.87	74.60	7.34	69.01	66.23
AQ-24	580.07	27.45	3.79	143.6	130.03	1.98	8.94	140.61	149.6	50.22	13.5	23.45
AQ-26	198.46	19.7	3.15	98.86	216.4	2.48	13.87	45.67	97.62	49.37	65.37	23.45
AQ-26a	689.8	29.87	5.38	164.8	345.8	1.87	29.46	167.34	265.8	54.64	187.9	89.46
AQ-30	684.75	29.47	7.84	268.7	397.4	1.37	49.4	186.7	268.4	78.58	98.7	127.4
AQ-32	769.4	37.64	6.48	234.6	389.5	0.98	38.24	154.8	239.4	69.46	135.7	138.7
	Sc	Li	Sr	Nb	Ga	Ni	Hf	Ta	Be	La	Ce	Pr
D.L.	0.2	0.2	0.5	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1	1	0.1	0.1	0.02
AQ-14	29.40	19.37	177.98	7.80	10.73	15.16	1.81	0.31	1.16	15.62	24.41	3.35
AQ-24	20.33	26.21	204.8	9.87	14.1	24.48	1.54	0.32	1.44	126.41	106.79	13.86
AQ-26	24.34	38.34	204.8	9.87	19.37	14.38	1.98	0.54	3.48	18.48	27.68	4.65
AQ-26a	13.47	28.67	254.7	10.23	15.64	46.57	3.45	0.65	2.18	98.67	139.48	10.78
AQ-30	12.4	40.58	176.4	11.34	16.7	68.4	6.48	0.78	3.79	98.7	149.27	13.82
AQ-32	9.48	39.45	183.4	12.34	14.26	56.34	5.39	1.34	2.31	123.4	156.4	12.34
	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
D.L.	0.3	0.05	0.2	0.05	0.01	0.05	0.02	0.03	0.01	0.05	0.01	
AQ-14	16.11	3.52	1.70	3.75	0.45	4.34	0.75	1.15	0.13	0.87	0.15	
AQ-24	33.14	13.76	1.37	19.47	1.57	5.47	2.64	4.32	0.79	3.47	0.86	
AQ-26	16.84	3.21	1.32	6.23	0.65	6.64	0.49	0.98	0.12	1.03	0.13	
AQ-26a	42.34	12.34	1.34	13.14	1.23	6.87	4.53	4.36	0.68	2.38	0.42	
AQ-30	48.61	16.47	0.84	19.47	1.78	9.48	5.64	5.48	0.64	3.48	0.89	
AQ-32	53.41	13.75	0.98	8.34	2.04	7.68	3.68	6.47	1.05	2.84	0.67	

AQ-26: Host andesitic basalt with disseminated chalcopyrite; AQ-26a: Stage-1 fluorite vein, AQ-30: Stage-2 quartz-sulfide vein; AQ-32: Stage-3 quartz-specularite vein.

تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر V، Ni، Cu و Zn غنی و از عناصر Sc، Y، Cs، Sr تهی شده‌اند. در این بخشها، عناصری مانند Nb و Ga تهی‌شدگی ضعیفی را نشان می‌دهند. همچنین، نمونه بازالت آندزیتی دارای کالکوپیریت دانه‌پراکنده در همه عناصر به‌جز Cu (و مقدار جزئی Ga) تهی شده است (شکل ۱۳-A). همان‌گونه که مشاهده می‌شود، غلظت اغلب عناصر در بخشهای کانه‌دار نسبت به نمونه بازالت آندزیتی دارای کالکوپیریت دانه‌پراکنده، غنی شده است. غلظت تمام عناصر نادر خاکی به‌جز Eu در بخشهای کانه‌دار نسبت به گدازه بازالت آندزیتی سالم، غنی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۱۳-B). مقایسه تمرکز عناصر نادر خاکی در گدازه‌های بازالت آندزیتی دگرسان‌شده و سالم بیانگر تهی‌شدگی اغلب این عناصر در گدازه‌های دگرسان‌شده است (شکل ۱۳-B).

تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر در بخشهای کانه‌دار برای بررسی تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر طی کانه‌زایی در رخداد معدنی آق‌کند، داده‌های مربوط به نمونه‌های کانه‌دار بر داده‌های مربوط به نمونه‌های سنگهای میزبان سالم به‌هنگار شد تا عناصر اضافه و یا کم‌شده به سنگ طی کانه‌زایی مشخص شود. لازم به ذکر است که این روش کیفی است و برای تعیین میزان کمی تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر، نیاز به محاسبات موازنه جرم است که در این پژوهش انجام نشده است. بررسی الگوی عناصر کمیاب در بخشهای کانه‌دار که نسبت به بازالت آندزیتی سالم و بدون کانه‌زایی ائوسن به‌هنگار شده‌اند (شکل ۱۳-A)، نشان می‌دهد که بخشهای کانه‌دار نسبت به گدازه‌های بازالت آندزیتی سالم، از عناصر Ba، Rb، Th، Zr،



شکل ۱۳. A: نمودار عناصر کمیاب برای بخشهای کانه‌دار در رخداد معدنی مس آق‌کند که نسبت به گدازه بازالت آندزیتی سالم و بدون کانه‌زایی ائوسن (نمونه AQ-14، جدول ۱) به‌هنگار شده‌اند و B: نمودار عناصر نادر خاکی برای بخشهای کانه‌دار در رخداد معدنی مس آق‌کند که نسبت به گدازه بازالت آندزیتی سالم و بدون کانه‌زایی ائوسن (نمونه AQ-14، جدول ۱) به‌هنگار شده‌اند.

Fig. 13. A: Histogram of trace elements in ore zones at Aqkand Cu occurrence, normalized against fresh and barren Eocene andesitic basalt lava (sample AQ-14, Table 1), and B: Histogram of rare earth elements in ore zones at Aqkand Cu occurrence, normalized against fresh and barren Eocene andesitic basalt lava (sample AQ-14, Table 1).

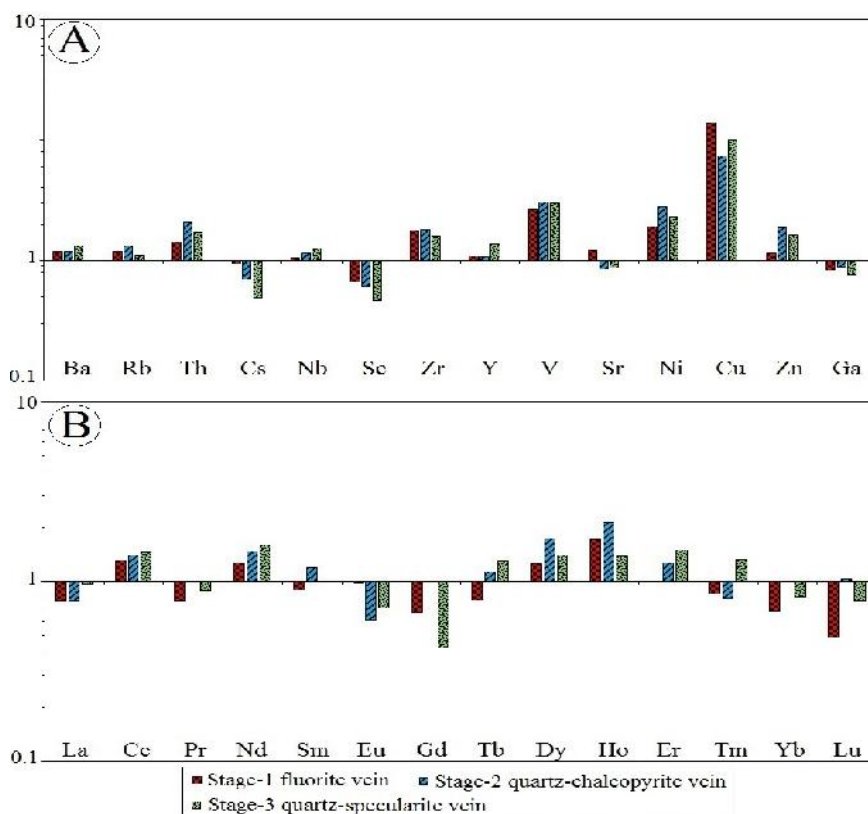
آق‌کند نشان می‌دهد که این رخداد معدنی را می‌توان در دسته کانسارهای اپی‌ترمال فلزات پایه طبقه‌بندی کرد. شواهدی از قبیل: (۱) بافت‌های رگه-رگه‌چهای، برشی، پرکننده فضای خالی، جانشینی، کوکاد، قشرگون، گل‌کلمی و پرماند در بخشهای کانه‌دار و مواد باطله و (۲) کانیهای باطله شامل فلئوئورین، کوارتز و کلریت نشان می‌دهد که کانه‌زایی مس در رخداد معدنی آق‌کند، نتیجه ته‌نشست مواد از یک سیال گرمایی زیر شرایط اپی‌ترمال است (Yilmaz et al., 2010; Kouhestani et al., 2012; Ebrahimi et al., 2015). بر اساس بررسیهای صحرایی، میکروسکپی و زمین‌شیمیایی، تکوین این رخداد معدنی را می‌توان به صورت یک توالی چهار مرحله‌ای خلاصه کرد (شکل ۱۵):

در مقایسه با گدازه‌های ریولیتی-ریوداسیتی الیگوسن، بخشهای کانه‌دار در اغلب عناصر کمیاب (به‌جز Cs, Sc, Sr و Ga) غنی شده‌اند (شکل ۱۴-A)؛ اما همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این غنی‌شدگی تنها برای عنصر مس قابل توجه بوده است و برای سایر عناصر چندان زیاد نیست. از طرف دیگر، بخشهای کانه‌دار نسبت به گدازه‌های ریولیتی-ریوداسیتی الیگوسن غنی‌شدگی (مانند Er و Ce, Nd, Tb, Dy, Ho) و تهی‌شدگی جزئی از عناصر نادر خاکی (مانند La, Pr, Eu, Gd, Tm, Yb) را نشان می‌دهند (شکل ۱۴-B).

نوع کانه‌زایی و مدل تشکیل رخداد معدنی مس آق‌کند ویژگیهای زمین‌شناسی، کانه‌زایی، ترکیب کانی‌شناسی، ساخت و بافت کانسنگ و الگوی دگرسانی در رخداد معدنی مس

مزبور به‌عنوان موتور حرارتی عمل کرده و سبب چرخش آبهای جوی در منطقه شده‌اند. این آبها علاوه بر توسعه دگرسانی در منطقه، سبب شسته‌شدن مس از سنگهای مسیر (توالی ائوسن) و تمرکز مجدد آنها به‌صورت رگه‌های کانه‌دار شده است (شکل ۱۵-C). احتمال این‌که بخشی از ماده معدنی و سیالات گرمایی از توده‌های گرانیتوئیدی الیگوسن منشأ گرفته باشد، نیز وجود دارد. مرحله چهارم با بالآمدگی ناحیه‌ای و توسعه فرآیندهای هوازدگی و فرسایش همراه است (شکل ۱۵-D).

مرحله نخست با تشکیل توالیهای سنگی ائوسن (Faridi and Anvari, 2000) شامل طبقات توف و میان‌لایه‌های گدازه همراه است (شکل ۱۵-A). در مرحله دوم، مجموعه سنگهای ائوسن منطقه در اثر نیروهای فشارشی، چین‌خورده و شکستگیهایی در آنها ایجاد شده است (شکل ۱۵-B). مرحله سوم با نفوذ توده‌های گرانیتوئیدی الیگوسن به‌داخل توالیهای آتشفشانی ائوسن مشخص می‌شود (شکل ۱۵-C). معادل خروجی این توده‌ها در سطح به‌صورت گنبد‌های ریولیتی-ریوداسیتی و واحدهای آذرآواری معادل (ایگنیمبریت، توف و گدازه‌های ریولیتی-ریوداسیتی) نمایان است. تزریق ماگمای



شکل ۱۴. A: نمودار عناصر کمیاب برای بخشهای کانه‌دار در رخداد معدنی مس آق‌کند که نسبت به گدازه ریولیتی-ریوداسیتی سالم الیگوسن (نمونه AQ-24، جدول ۱) به‌هنجار شده‌اند و B: نمودار عناصر نادر خاکی برای بخشهای کانه‌دار در رخداد معدنی مس آق‌کند که نسبت به گدازه ریولیتی-ریوداسیتی سالم الیگوسن (نمونه AQ-24، جدول ۱) به‌هنجار شده‌اند.

Fig. 14. A: Histogram of trace elements in ore zones at Aqkand Cu occurrence, normalized against fresh Oligocene rhyolitic-rhyodacitic lava (sample AQ-24, Table 1), and B: Histogram of rare earth elements in ore zones at Aqkand Cu occurrence, normalized against fresh Oligocene rhyolitic-rhyodacitic lava (sample AQ-24, Table 1).

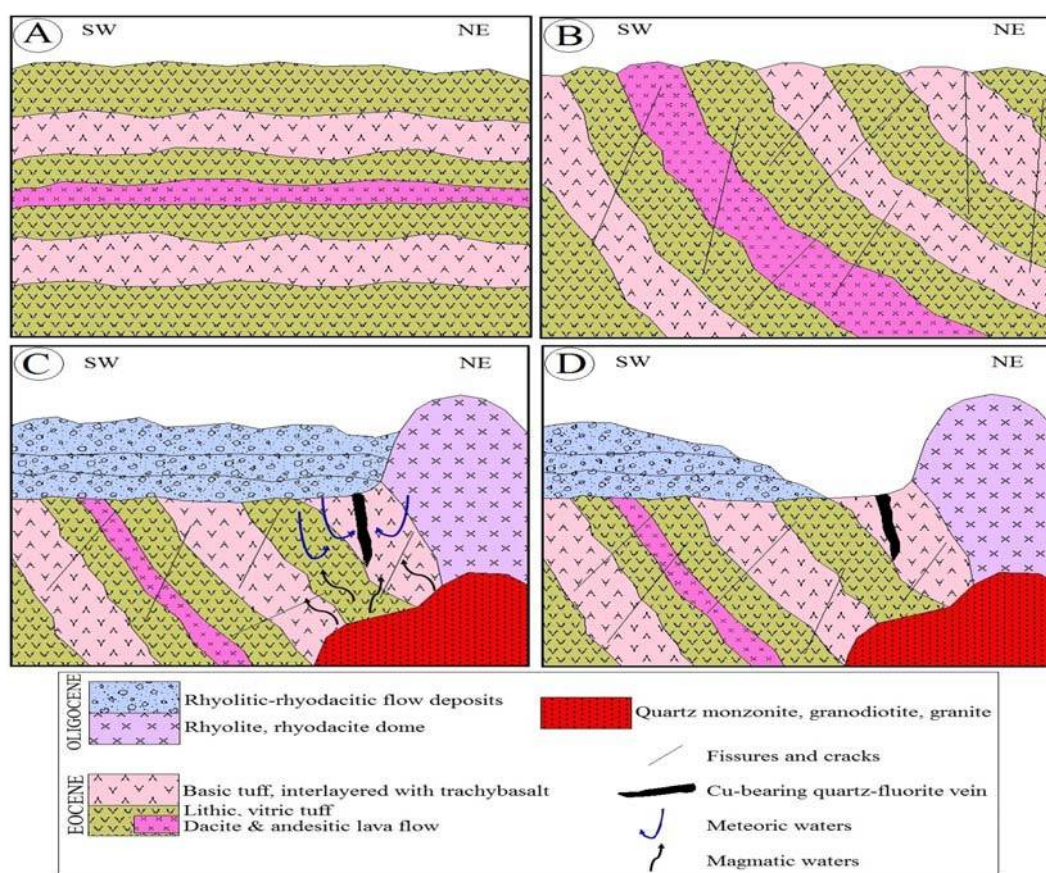
تشکیل‌شده در رخداد معدنی مس آق‌کند، همگی حاکی از آن است که این رخداد معدنی از نوع کانسارهای اپی‌ترمال فلزات پایه است. ویژگیهای کانه‌زایی و دگرسانی در این رخداد معدنی

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده از مشاهدات صحرائی، ساخت و بافت، سنگ میزبان، هم‌یافتی، زمین‌شیمی و دگرسانیهای

آن‌هاست که آپوفیزهای آنها در مناطق مجاور مانند رشت‌آباد، جلیل‌آباد و گلجین به صورت توده‌های گرانیتوئیدی رخنمون دارد. از طرف دیگر، تهی‌شدگی عناصر نادر خاکی در گدازه‌های بازالت آندزیتی سالم و دگرسان‌شده و غنی‌شدگی آنها در بخشهای کانه‌دار، نشان‌دهنده واکنش بالای سیال به سنگ و تحرک این عناصر از سنگ میزبان به بخشهای کانه‌دار (تراوش جانبی، Alderton et al., 1980) است. از این‌رو، دگرسانی گدازه‌های بازالت آندزیتی و شسته‌شدن عناصر از آنها نیز باید در تشکیل کانی‌سازی منطقه مؤثر بوده باشد.

شباهت زیادی با کانسارهای چندفلزی و گرانبه‌های موجود در کمر بند طارم- هشتجین مانند مس- طلای رشت‌آباد، چندفلزی طلا دار گلوچه و طلای لهنه دارد. در هر حال، این مقایسه نیازمند اطلاعات دقیق ایزوتوپی (پایدار و سن‌سنجی) برای بسیاری از این کانسارها و رخ داده‌های معدنی است. الگوهای به‌هنگار شده عناصر نادر خاکی برای بخشهای کانه‌دار، گدازه‌های بازالت آندزیتی سالم و بدون کانه‌زایی ائوسن و گدازه‌های ریولیتی- ریوداسیتی الیگوسن، بیانگر ارتباط سیالات کانی‌ساز با گدازه‌های ریولیتی- ریوداسیتی الیگوسن و مشتق شدن آنها از ماگمای این گدازه‌ها و یا معادل‌های درونی



شکل ۱۵. نمایی شماتیک از مراحل تکوین و تکامل کانه‌زایی در رخداد معدنی مس آق‌کند. A: تشکیل واحدهای آتشفشانی ائوسن، B: چین‌خوردگی و تشکیل درز و شکاف در واحدهای سنگی ائوسن، C: نفوذ توده‌های گرانیتوئیدی الیگوسن به داخل واحدهای ائوسن. رخنمون این توده‌ها در سطح به صورت گندهای ریولیتی- ریوداسیتی و واحدهای آذرآواری معادل آن نمایان است. نفوذ این توده‌ها و گندها سبب چرخش آبهای جوی و شکل‌گیری کانه‌زایی مس به صورت رگه‌های کوارتز- فلوئورین مس‌دار درون گدازه‌های بازالت آندزیتی ائوسن شده است و D: بالآمدگی ناحیه‌ای و توسعه فرآیندهای هوازدگی و فرسایش

Fig. 15. Schematic representation of mineralization evolution stages at Aqkand Cu occurrence. A: Formation of Eocene volcanic units, B: Folding and development of fissures and cracks in Eocene rock units, C: Oligocene granitoid plutons intruded into the Eocene units. These bodies are exposed as rhyolitic-rhyodacitic domes as well as its equivalent volcanoclastic units. Intrusion of these plutons and domes caused circulation of meteoric waters and formation of copper mineralization as Cu-bearing quartz-fluorite veins within Eocene andesitic basalt lavas, and D: Regional exhumation and development of weathering and erosion processes

باشد. تعمیم شواهد به‌دست آمده از این بررسیها به مناطق مشابه در پهنه البرز می‌تواند به شناسایی این نوع از کانی‌زاییها منجر شود.

قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوهش و همچنین نویسندگان از آقای ع. ا. آتشنا به‌خاطر همراهی در انجام بررسیهای صحرایی قدردانی می‌نمایند. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از سردبیر و داوران محترم مجله زمین‌شناسی اقتصادی به‌خاطر راهنماییهای علمی که به غنای بیشتر مقاله حاضر انجامیده است، تشکر نمایند.

ژئومتری رگه‌های زون‌های کانه‌دار در رخداد معدنی آق‌کند و دیگر کانسارها و نشانه‌های معدنی موجود در کمربند طارم-هشتجین نشان می‌دهد که ساختارهای گسلی، معبر اصلی برای عبور جریان سیالات کانه‌ساز بوده‌اند. از طرف دیگر، کانسارهای مزبور درون واحدهای آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی ائوسن (معادل سازند کرج) و در ارتباط فضایی نزدیک با توده‌های نفوذی الیگوسن و یا معادل‌های بیرونی آنها تشکیل شده‌اند. از این رو، بررسی زون‌های گسلی موجود در مجموعه‌های سنگی یادشده به‌ویژه در مناطقی که مورد هجوم توده‌های نفوذی الیگوسن قرار گرفته‌اند، از نظر اکتشاف کانسارهای اپی‌ترمال فلزات پایه و گرانبها می‌تواند حایز اهمیت

References

- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnant in northeastern Iran. Geological Society of America Bulletin, 103(8): 983–992.
- Alderton, D.H.M., Pearce, J.A. and Potts, P.J., 1980. Rare earth element mobility during granite alteration: evidence from south-east England. Earth and Planetary Science Letters, 49(1): 149–165.
- Davies, R.G., 1977. Geological map of Bandar-e-Anzali, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.
- Dokuz, A., Tanyolu, E. and Genc, S., 2005. A mantle and a lower crust derived bimodal suite in the Yusufeli Artvin area, NE Turkey: Trace element and REE evidence for subduction-related rift origin of early Jurassic Demirkent intrusive complex. International Journal of Earth Sciences, 95(3): 370–394.
- Dong, G., Morrison, G. and Jaireth, S., 1995. Quartz textures in epithermal veins, Queensland; classification, origin and implication. Economic Geology, 90(6): 1841–1856.
- Ebrahimi, M., Kouhestani, H. and Shahidi, E., 2015. Investigation on type and origin of iron mineralization at Mesgar occurrence, south of Zanjan, using petrological, mineralogical and geochemical data. Journal of Economic Geology, 7(1): 111–127. (in Persian with English abstract)
- Faridi, M. and Anvari, A., 2000. Geological map of Hashtjin, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Ghorbani, M., 2007. Economic geology, mineral deposit and natural resources of Iran. Arian Zamin, Tehran, 492 pp. (in Persian)
- Hatami, A., Ebrahimi, M. and Yasami, N., 2011. Study of mineralization at Mari Cu deposit, north of Zanjan. 2nd Symposium of Iranian Society of Economic Geology, University of Lorestan, Khorramabad, Iran. (in Persian with English abstract)
- Hirayama, K., Samimi, M., Zahedi, M. and Hushmand-Zadeh, A., 1966. Geology of the Tarom District, Western Part (Zanjan area north-west Iran), Geological Survey of Iran, Tehran, Report 8, 31 pp.
- Ineson, P.R., 1989. Introduction to practical ore microscopy. Longman Scientific and Technical, London, 181 pp.
- Khakzad, A. and Hajalilou, B., 1999. Investigation on Pb, Zn and Cu mineralization in northwest of Zanjan and east of Mianeh and their relation to pervasive hydrothermal alteration. 3rd Symposium of Geological Society of Iran, University of Shiraz, Shiraz, Iran. (in Persian with English abstract)
- Khanmohammadi, N., Khakzad, A. and Izadyar, J., 2009. Mineralography, structural and textural studies and genesis of Zaker iron-apatite deposit (northeast of Zanjan). Geological Survey of Iran, Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 76 (1): 119–126. (in Persian with English abstract)
- Kouhestani, H., 2011. Geology, Alteration, Isotope Geochemistry and Origin of Chah Zard Ag–Au Deposit Southwest of Yazd. Ph.D.

- Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 285 pp (in Persian with English abstract).
- Kouhestani, H., Ghaderi, M., Zaw, K., Meffre, S. and Emami, M.H., 2012. Geological setting and timing of the Chah Zard breccia-hosted epithermal gold-silver deposit in the Tethyan belt of Iran. *Mineralium Deposita*, 47(4): 425–440.
- Kouhestani, H. and Mokhtari, M.A.A., 2013. Geological and mineralization characteristics of Aliabad Cu occurrence, Tarom area, east of Zanjan. 17th Symposium of Geological Society of Iran and the 1st International Congress on Zagros Orogen, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. (in Persian)
- Mehrabi, B., Choghaneh, N. and Tale Fazel, E., 2009. Petrology, mineralogy and alteration studies of anomaly no. 4 of Gulloje polymetal deposit (northwest of Zanjan). 1st Symposium of Iranian society of Economic Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (in Persian with English abstract)
- Mehrabi, B., Tale Fazel, E., Ghasemi Siani, M. and Eghbali, M.A., 2010. Investigation on mineralization and genetic model of Gulloje Cu-Au vein deposit (north of Zanjan), using mineralogical, geochemical and fluid inclusion data. *Journal of Sciences*, 35(4): 185–199. (in Persian with English abstract)
- Moayyed, M. and Moazzen, M., 2001. Iron mineralization associated with Oligocene epizonal plutonic bodies at Zaker-Sorkhe Dizaj area (southwest of Tarom). 5th Symposium of Geological Society of Iran, University of Tehran, Tehran, Iran. (in Persian)
- Nabatian, G. and Ghaderi, M., 2014. Mineralogy and geochemistry of rare earth elements at iron oxide-apatite deposits of Zanjan area. *Geological Survey of Iran, Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 93 (3): 157–170. (in Persian with English abstract)
- Nabatian, G., Ghaderi, M., Rashidnejad Omran, N., and Daliran, F., 2007. Iron-apatite mineralization at Sorkhe Dizaj, Aliabad and Morvarieh deposits, southeast of Zanjan. 15th Symposium of Crystallography and Mineralogy of Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (in Persian with English abstract)
- Nabatian, G., Ghaderi, M., Rashidnejad Omran, N. and Daliran, F., 2009. Geochemistry and origin of apatite-bearing iron oxide deposit of Sorkhe Dizaj, SE Zanjan. *Journal of Economic Geology*, 1(1): 19–46. (in Persian with English abstract)
- Nabavi, M.H., 1976. An introduction to the Iranian geology. Geological Survey of Iran, Tehran, 110 pp. (in Persian)
- Nakamura, N., 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary Chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(5): 755–773.
- Parak, T., 1985. Phosphorus in different type of ore, sulfides in the iron deposits, and the type and origin of ores at Kiruna. *Economic Geology*, 80(3): 646–665.
- Rahmani, Sh., 2010. Gold exploration of Lohneh-Zardeh area (1:25000), Tarom zone. Geological survey of Iran, Tehran, Report 121, 83 pp. (in Persian)
- Rolland, Y., Cox, S., Boullier, A.M., Pennacchioni, G. and Mancktelow, N., 2003. Rare earth and trace element mobility in mid-crustal shear zones: insights from the Mont Blanc Massif (Western Alps). *Earth and Planetary Science Letters*, 214(1–2): 203–219
- Saeedi, A., 2015. Petrology and geochemistry of Aliabad Mousavi-Khanchy intrusions (Tarom area, Zanjan province) with considering on Cu mineralization. M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 152 pp. (in Persian with English abstract)
- Wang, Q., Wyman, D.A., Xu, J.F., Zhao, Z.H., Jian, P., Xiong, X.L., Bao, Z.W., Li, C.F. and Bai, Z.H., 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 89(3–4): 424–446.
- Whitford, D.J., Korsch, M.J., Porritt, P.M. and Craven, S.J., 1988. Rare earth element mobility around the volcanogenic polymetallic massive sulfide deposit at Que River, Tasmania, Australia. *Chemical Geology*, 68(1–2): 105–119.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95: 185–187.
- Yilmaz, H., Oyman, T., Sonmez, F.N., Arehart, G.B. and Billor, Z., 2010. Intermediate sulfidation epithermal gold-base metal deposits in Tertiary subaerial volcanic rocks, Sahinli/Tespil Dere (Lapseki/western Turkey). *Ore Geology Reviews*, 37(3): 236–258.



Geology, mineralization and geochemistry of the Aqkand Cu occurrence (north of Zanjan, Tarom-Hashtjin zone)

Maryam Feyzi, Mohammad Ebrahimi, Hossein Kouhestani* and Mir Ali Asghar Mokhtari

Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Submitted: Aug. 16, 2015

Accepted: Mar. 08, 2016

Keywords: *Geology, mineralization, geochemistry, Aqkand, Zanjan, Tarom-Hashtjin*

Introduction

The Aqkand Cu occurrence, 48 km north of Zanjan, is located in the Tarom subzone of the Western Alborz-Azerbaijan structural zone. Apart from small scale geological maps of the area, i.e., 1:250,000 geological maps of Bandar-e-Anzali (Davies, 1977) and 1:100,000 geological maps of Hashtjin (Faridi and Anvari, 2000) and a number of unpublished perlite exploration reports, prior to this research no work has been done on Cu mineralization at Aqkand. The present paper provides an overview of the geological framework, the mineralization characteristics, and the results of geochemistry study of the Aqkand Cu occurrence with an application to the ore genesis. Identification of these characteristics can be used as a model for exploration of this type of copper mineralization in the Tarom area and elsewhere.

Materials and methods

Detailed field work has been carried out at different scales in the Aqkand area. About 35 polished thin and thin sections from host rocks and mineralized and altered zones were studied by conventional petrographic and mineralogic methods at the University of Zanjan. In addition, a total of 6 samples from ore zones at the Aqkand occurrence were analyzed by ICP-MS for trace elements and REE compositions at Kimia Pazhuh Alborz Co., Isfahan, Iran.

Results and Discussion

The oldest units exposed in the Aqkand area are Eocene volcanic rocks which are overlain unconformably by Oligocene acidic rocks. The

Eocene units consist of lithic and vitric tuff with intercalations of andesitic basalt lavas (equal to Karaj Formation, Hirayama et al., 1966). The andesitic basalt lavas show porphyritic texture consisting of plagioclase and altered ferromagnesian minerals set in a fine-grained groundmass. The Oligocene acidic rocks consist of rhyolite-rhyodacite, perlite, pitchstone and ignimbrite. These rocks are exposed as domes and lava flows. The rhyolite-rhyodacite lavas usually show onion-skin weathering and locally display flow bands. Rapid cooling of rhyolitic-rhyodacitic lavas has resulted in the formation of volcanic glasses (obsidian). Hydration of these volcanic glasses by hydrothermal fluids caused perlite formation which is located in the lower parts of the rhyolitic-rhyodacitic domes.

Copper mineralization at Aqkand occurs as Cu-bearing quartz-fluorite veins in Eocene andesitic basalt lavas. The main ore vein reaches up to 50 m in length and average of 2 m in width. It has NW-trend and mostly dips NE. Six stages of mineralization can be distinguished at the Aqkand Cu occurrence. Stage-1 is characterized by <5 mm fluorite vein-veinlets. Clast of this stage have been recognized in the hydrothermal cements of stage-2. Stage-2 is the most abundant, widespread, and economically important ore forming stage at Aqkand and is represented by quartz and chalcopyrite veins (up to 10 mm wide) and breccias cement. Stage-3 is marked by <2 mm wide vein and veinlets of quartz with oligist that usually cut stage-2 mineralization, and, in turn, are cut by stage-4 quartz veins. Stage-4 is represented by 2 mm wide individual or sets of quartz veins. No sulfide minerals are recognized with stage-4. Stage-5 is dominated by chlorite as vein-veinlets and vug infill. Malachite, azurite and

Fe-hydroxides formed during the supergene stage (Stage-6). They are usually show vein-veinlet and vug infill textures.

The hydrothermal alteration assemblages at Aqkand grade from proximal quartz and chlorite to distal sericite, epidote, calcite and chlorite (propylitic alteration). The quartz and chlorite alteration types are spatially and temporally closely associated with Cu mineralization. The propylitic alteration marks the outer limit of the hydrothermal system.

The ore minerals at Aqkand formed as vein-veinlet and hydrothermal breccia cements, and show vein-veinlet and disseminated textures. Chalcopyrite is the main ore which is accompanied by minor oligist. Malachite, goethite and lepidocrocite are supergene minerals. Quartz, fluorite and chlorite are present in the gangue minerals that represent vein-veinlet, breccia, vug infill, replacement, colloform, cockade, crustiform and plumose textures.

Comparison of Chondrite normalized (Nakamura, 1974) REE patterns of Eocene fresh and barren andesitic basalt lavas, Oligocene rhyolitic-rhyodacitic lavas and the mineralized samples at Aqkand indicate that ore-forming fluids are probably related to Oligocene rhyolitic-rhyodacitic lavas. However, leaching of some elements from the host andesitic basalt lavas may have also been involved in mineralization.

The geological, mineralogical, geochemical, textural and structural characteristics of the

Aqkand occurrence reveals that copper mineralization at Aqkand is an example of epithermal base metal mineralization within the Tarom-Hashtjin zone.

Acknowledgements

The authors are grateful to the University of Zanjan Grant Commission for research funding. Mr. A.A. Atashnema is also appreciated for his help during the field work. Journal of Economic Geology reviewers and editor are also thanked for their constructive suggestions on alterations to the manuscript.

References

- Davies, R.G., 1977. Geological map of Bandar-e-Anzali, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.
- Faridi, M. and Anvari, A., 2000. Geological map of Hashtjin, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Hirayama, K., Samimi, M., Zahedi, M. and Hushmand-Zadeh, A., 1966. Geology of the Tarom District, Western Part (Zanjan area north-west Iran), Geological Survey of Iran, Tehran, Report 8, 31 pp.
- Nakamura, N., 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary Chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(5): 755–773.