



کانی‌شناسی، دگرسانی، میان‌بارهای سیال و زمین‌شیمی کانسار مس - طلای تپه‌خرگوش (جنوب غرب اردستان)

الهام هاشمیان^۱، حمایت جمالی^{۱*} و جمشید احمدیان^۲

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

(۲) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۹، پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۹

چکیده

کانسار تپه‌خرگوش در ۱۵ کیلومتری جنوب غرب اردستان قرار دارد. رخنمون‌های سنگی منطقه شامل آندزیت پورفیری، داسیت و ریولیت با سن ائوسن است که در میان آنها توف و ایگنمبریت نیز دیده می‌شود. در شمال محدوده نیز سنگ‌های رسوبی الیگو-میوسن دارای رخنمون هستند. رگه‌های سیلیسی کانه‌دار در سنگ‌های ائوسن (آندزیت پورفیری، داسیت و توف‌های ریولیتی) تشکیل شده‌اند. دگرسانی‌ها از نوع سریستیک، آرژلیک، پروپلیتیک و سیلیسی هستند. رگه‌های سیلیسی دارای ساخت و بافت‌های نواری، رگه-رگه‌چه‌ای، برشی و پرکننده فضاهای خالی بوده و حاوی کانه‌های اولیه پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت و طلا هستند. دمای همگن شدن میان‌بارهای سیال از ۱۳۷ تا ۱۹۴ درجه سانتی‌گراد و شوری از ۴ تا ۱۲/۵ درصد معادل وزنی نمک طعام متغیر است. ترکیب سنگ میزبان، نوع کانه‌ها، ساخت و بافت، ژئومتری، دمای تشکیل، انواع دگرسانی‌ها و زمین‌شیمی کانسار، مشابه کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین است.

واژه‌های کلیدی: کانه‌نگاری، دگرسانی، میان‌بارهای سیال، ژئوشیمی، اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین، تپه‌خرگوش، اردستان

مقدمه

رانشان می‌دهد (Shahabpour, 2007; Omrani et al., 2008; Pourkaseb, 2017)، جایگاهی مناسب برای تشکیل کانی‌سازی‌های مختلف است و از این میان می‌توان به کانسارهای مس پورفیری سرچشمه و میدوک در بخش جنوبی کمر بند (منطقه کرمان) و کانسارهای مس پورفیری علی‌آباد، ظفرقند و کهنک در بخش میانی کمر بند اشاره کرد. کانسارهای رگه‌ای طلا و فلزات پایه لاطلا، ندوشن و اردستان از دیگر کانسارهای شناخته‌شده در زون ارومیه-دختر است که همه از نشانه‌های پرتانسیل بودن این کمر بند از نظر کانه‌زایی است.

کانسار مس - طلای تپه‌خرگوش در ۱۵ کیلومتری جنوب غرب اردستان، بین طول شرقی "۵۲°۱۲'۴۴" تا "۵۲°۱۳'۴۵" و عرض شمالی "۳۳°۲۰'۱۸" تا "۳۳°۲۰'۴۸" واقع شده است. این منطقه در تقسیم‌بندی ساختاری ایران، جزئی از بخش میانی کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر محسوب می‌شود (Aghanabati, 2004). در ایران، کمان ماگمایی ارومیه-دختر که حاصل فرورانش نئوتیس به زیر خرده‌قاره ایران مرکزی است (Radfar, 1992) و ویژگی‌های زمین‌شیمیایی مناطق فرورانش

ICP-OES با دستگاه مدل Perkin-Elmer Optima 5400 و با روش انحلال چهار اسید به آزمایشگاه کیمیاپژوه البرز (حد تشخیص برای اغلب عناصر در حد ppb و برای بعضی عناصر ppm) ارسال شد. همچنین تعداد ۶ نمونه برای تجزیه طلا به روش جذب اتمی توسط دستگاه Perkin-Elmer Analyst 800 به روش استخراج با میکروارگانسیم‌ها به مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران فرستاده شد. از نمونه‌های کوارتز موجود در رگه‌ها، ۳ نمونه مقطع دو بر صیقلی تهیه و توسط دستگاه HF-S90Linkam، با کنترل حرارتی TMS92 و سردکننده نوع LNP در دانشگاه اصفهان مورد بررسی قرار گرفت. گستره دمایی دستگاه بین ۱۷۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد و دقت آن در دماهای پایین (200°C)، ۱- و در دماهای بالاتر ۰/۱+ درجه سانتی‌گراد است. همچنین برای تعیین ترکیب شیمیایی کانی‌ها و شناسایی کانی‌های ریز و کمیاب از روش ریزکاوا الکترونی مدل SX100 بر پایه دقت و قابلیت اطمینان WDS استفاده شده است. قطر پرتو تابشی ۳ میکرومتر، شدت جریان الکترون ۱۰-۲۰۰ نانوآمپر، زمان تابش ۱۰۰ ثانیه و دقت آنالیز هم در حد ppm بوده است. در کل ۳ مقطع صیقلی با قطر ۳۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت.

زمین‌شناسی منطقه

رخمون‌های سنگی منطقه تپه‌خرگوش بخشی از کمان ماگمایی ارومیه- دختر است که حاصل فرورانش اقیانوس نئوتتیس به زیر خرده‌قاره ایران مرکزی است (Radfar, 1992). براساس تعیین سن سنگ کل به روش پتاسیم- آرگون، سن سنگ‌های آتشفشانی بازیک بخش مرکزی این کمربند به الیگو- میوسن (۱۸/۶-۲۶/۵ میلیون سال) نسبت داده شده است (Yeganefar et al., 2013). سنگ‌های آتشفشانی ائوسن در محدوده کانسار تپه‌خرگوش شامل آندزیت تا آندزیت بازالیت همراه با سنگ‌های آتشفشانی اسیدی (داسیت و ریولیت)، توف و ایگنمبریت با لایه‌بندی نامنظم است که برون‌زد وسیعی در قسمت مرکزی منطقه مورد بررسی دارد و به‌طور جانبی در مجاورت واحد آندزیت پورفیری قرار دارد (شکل ۱). در واحد آندزیت

کانه‌زایی مس- طلائی تپه‌خرگوش اولین بار توسط شرکت کانی‌پژوهان اسپادانا در سال ۱۳۸۵ معرفی شد. فعالیت‌های اکتشافی انجام‌شده توسط این شرکت شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰، حفر ترانشه و گمانه‌های اکتشافی بوده است و در حال حاضر از بعضی از رگه‌ها استخراج صورت می‌گیرد. با وجود این، بررسی‌های علمی دقیق بر روی آن انجام نشده است. ساختارهای جنوب اردستان توسط ندیمی (Nadimi, 2010) و پترولوژی و ژئوشیمی سنگ‌های آتشفشانی جنوب اردستان توسط یگانه‌فر (Yeganefar, 2007) و صالحی (Salehi, 2015) مورد بررسی قرار گرفته است. نبود اطلاعاتی دقیق در خصوص کانی‌شناسی، زمین‌شیمی، شرایط تشکیل و نوع کانه‌زایی ما را بر آن داشت تا با بررسی دقیق دگرسانی، کاننگاری، زمین‌شیمی و میان‌بارهای سیال، نوع کانه‌زایی و شرایط تشکیل کانسار را تعیین کنیم که نتایج آن می‌تواند برای پیشبرد اهداف اکتشافی در منطقه مورد بررسی و نواحی مجاور مفید باشد.

روش مطالعه

در مطالعات صحرایی، ریخت‌شناسی، کانی‌شناختی رگه‌ها و پهنه‌های دگرسانی در طول نیم‌رخ‌های عمود بر امتداد رگه‌ها بررسی و از رگه‌ها و سنگ دیواره، نمونه‌برداری انجام شد. مطالعات آزمایشگاهی شامل بررسی‌های میکروسکوپی و تجزیه شیمیایی نمونه‌ها بوده است که با تهیه ۱۱ مقطع نازک (برای انجام بررسی‌های سنگ‌نگاری)، ۶ مقطع نازک صیقلی و ۸ مقطع صیقلی (برای انجام بررسی‌های کاننگاری و روابط باطله با کانگه) توسط میکروسکوپ پلاریزان انکساری-انعکاسی BX60Olympus با عدسی‌های ۵ تا ۱۰۰ در دانشگاه اصفهان مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی‌های دقیق‌تر کانی‌شناسی و تشخیص کانی‌های رسی و نوع دگرسانی، ۷ نمونه در آزمایشگاه زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس و مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران (کرج)، به روش XRD با دستگاه Philips مدل Xpert-Mpd به روش پودری و به صورت نیمه کمی آنالیز شد. تعداد ۳۲ نمونه کانسنگ برای اندازه‌گیری عناصر به روش

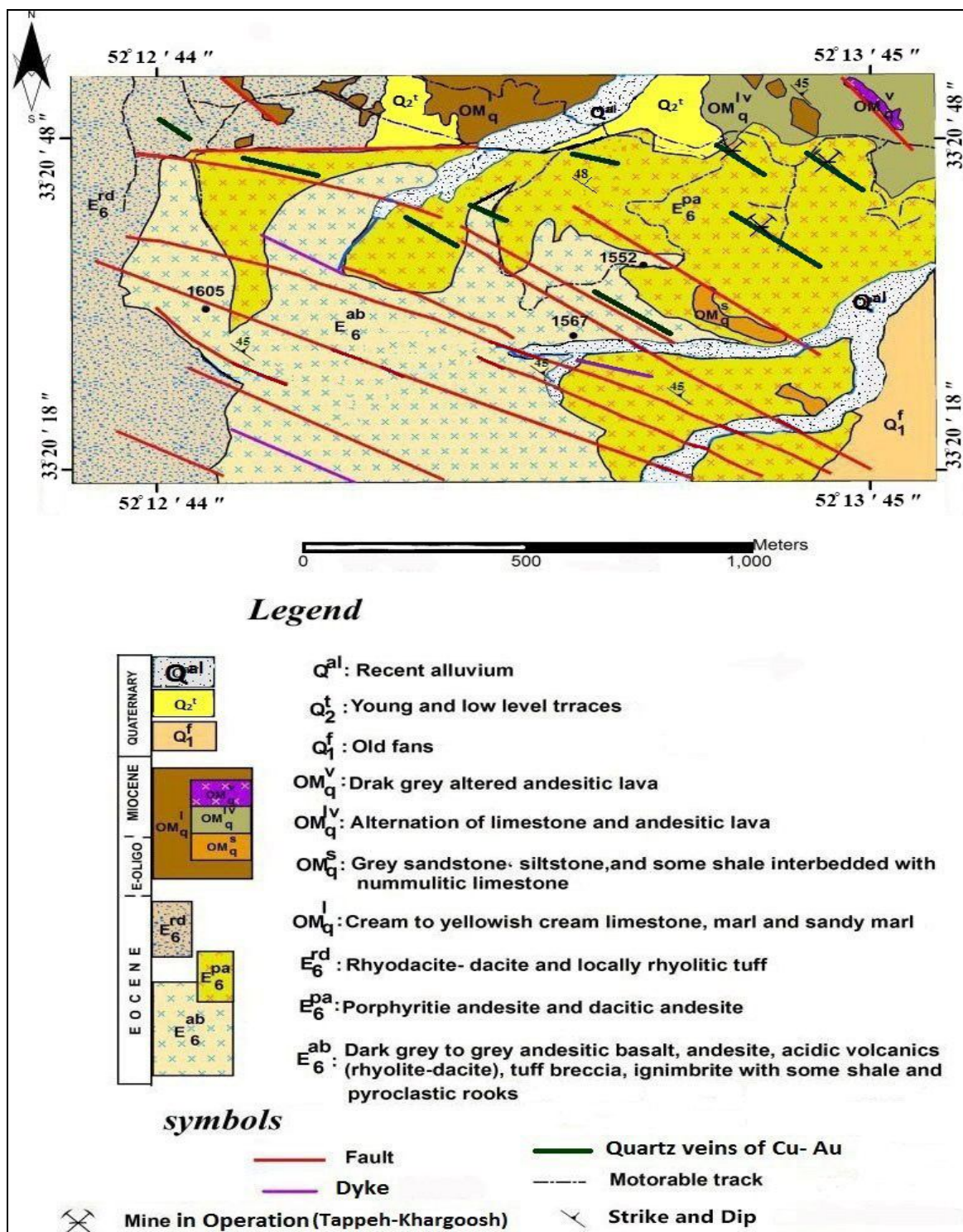
پورفیری حفرات بادامکی دیده می‌شوند که با کلسیت و کلریت پر شده‌اند. بر روی آنها واحد آندزیت پورفیری، داسیت و آندزیت‌های منتسب به اوایل تا اواسط ائوسن بالایی قرار دارد. این واحد ارتفاعات بلندی را در بخش مرکزی تا شمال‌غربی محدوده اکتشافی به وجود آورده است. رگه‌های کانه‌دار با روند WNW-ESE اغلب در این واحد قرار دارند. گدازه‌های ریولیتی و داسیتی در غرب و شمال‌غرب منطقه از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، کوارتز و به مقدار کمتر فلدسپار پتاسیک در زمینه ریزدانه و شیشه‌ای تشکیل شده است. در این واحد که جوان‌ترین واحد ائوسن است، رگه‌های مس‌دار به میزان بسیار کم دیده می‌شود. دایک‌های دیابازی با امتداد WNW-ESE و N-S در واحدهای ائوسن تزریق شده است. بر اساس مشاهدات صحرایی دایک‌های با امتداد N-S توسط دایک‌های با امتداد WNW-ESE قطع شده‌اند (شکل ۲). واحدهای رسوبی الیگو-میوسن (سازند قم) شامل سنگ آهک‌های کرم‌رنگ، مارن، ماسه‌سنگ و شیل با میان‌لایه‌هایی از سنگ آهک نومولیت‌دار هستند که در قسمت‌های شمالی منطقه دیده می‌شوند. آخرین نهشته‌های منطقه مربوط به تشکیل پادگانه‌های قدیمی و جدید و آبرفت‌های دوران چهارم است (شکل ۱). از نظر زمین‌ساختی گسل‌هایی با روند WNW-ESE منطقه مورد بررسی را تحت تأثیر قرار داده‌اند. وضعیت ساختمانی در منطقه تحت تأثیر گسل قم - زفره بوده و نقشی مهم در ایجاد چهارچوب ساختاری منطقه داشته است. حدود ۵۰ برداشت زمین‌ساختی از درزه‌ها، دایک‌ها و رگه‌های کانه‌دار انجام و سپس بر روی نمودارهای گل سرخی پیاده شد. درزه‌ها، رگه‌های کانه‌دار و دایک‌های منطقه اغلب دارای روند شمال‌غربی - جنوب‌شرقی هستند که کم‌وبیش به موازات روند کلی گسل پی‌سنگی قم - زفره (Tajmir Riahi et al., 2012) و متأثر از آن بوده است (شکل ۳).

کانه‌زایی

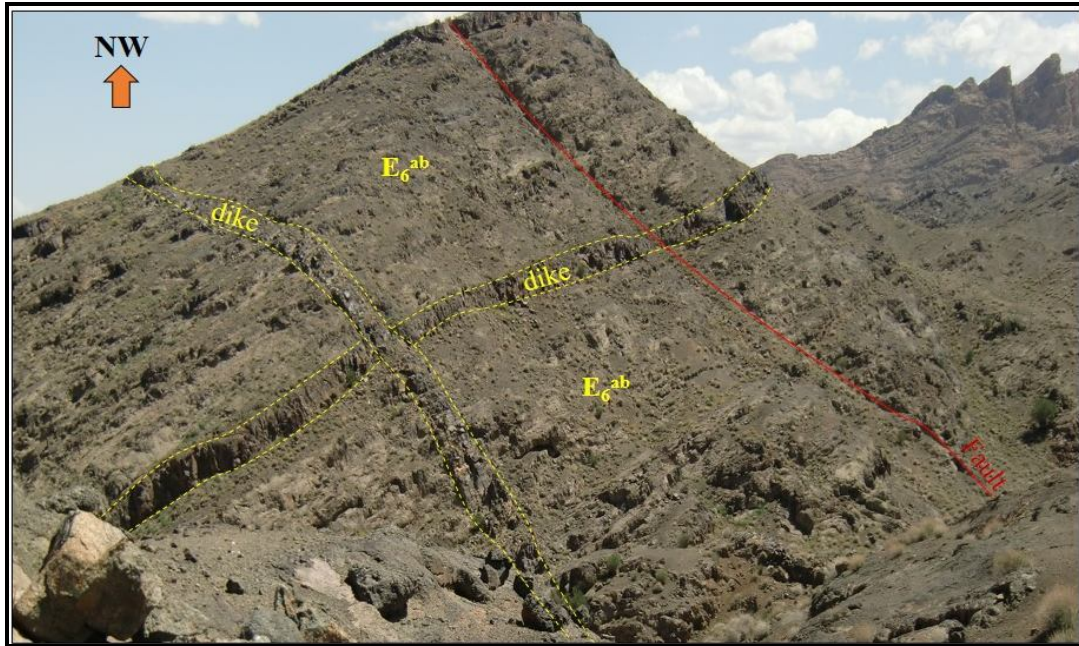
کانه‌زایی در کانسار تپه‌خرگوش، در اثر عبور سیالات گرمایی

در شکستگی‌ها و گسل‌های منطقه و در سنگ‌های درون‌گیر آندزیت پورفیری، داسیت، آندزیت و توف‌های ائوسن تشکیل شده است. شکل کانی‌سازی در کانسار تپه‌خرگوش اغلب به صورت رگه‌های بزرگ (تا ۲۰۰ متر طول و ۵ متر ضخامت) و رگه - رگه‌های سیلیسی به شکل نامنظم بوده است (شکل ۴-A و C) و بخش کوچکی نیز به شکل افشان در سنگ میزبان دیده می‌شود. در نمونه‌های تجزیه‌شده از رگه‌های سیلیسی، عیارهایی با نسبت بالایی از Cu (تا ۳/۸ درصد)، Au (تا ۰/۱۶ گرم در تن) و Ag (تا ۷۷/۶ گرم در تن) به دست آمده است. رگه‌های کانه‌دار با امتداد WNW-ESE و شیب ۷۵ تا ۸۰ درجه به سمت شمال‌شرق توسط عوامل ساختاری کنترل می‌شود. کنترل‌کننده‌های ساختاری به‌عنوان عوامل اصلی در نقل و انتقال سیالات عمل کرده‌اند. علاوه بر ساختارها، جریان سیالات گرمایی با شکستگی، تخلخل و نفوذپذیری سنگ میزبان نیز کنترل می‌شود (Rowland and Simmons, 2012). باطله اصلی رگه‌ها کوارتز، کلسدون و کلسیت است که بافت و ساخت‌های متنوعی نشان می‌دهند. این بافت‌ها شامل برشی، شانهای، پرکننده فضای خالی (شکل ۴-D) و موزاییکی هستند که از ویژگی‌های محیط اپی‌ترمال و نشان‌دهنده تشکیل در عمق کم و فشار پایین است (Guilbert and Park, 1986; Hedenquist and Arribas, 2017). رشد بلورهای کوارتز از دو دیواره رگه به صورت متقارن صورت گرفته و در بخش وسطی رگه، این بلورهای کوارتز به هم رسیده، در هم فرو رفته و بافت شانهای را به وجود آورده است (شکل ۴-B) که به‌طور معمول اندازه بلورها درشت و شکل‌دار هستند. کوارتزهای شانهای به‌عنوان بافت غیر جوشش توصیف شده‌اند (Moncada et al., 2012). بافت دیگر در رگه‌های کوارتزی، بافت موزاییکی است که تجمعاتی از کوارتز ریزبلور و یا کوارتزهای ریز بلوری که دارای مرز نامنظم بوده و درهم تنیده‌اند، هستند. همچنین ژئودهایی از کوارتزهای شعاعی همراه با حفرات خالی قابل تشخیص و مشاهده است که اغلب وسط حفره‌ها توسط کلریت، کلسیت و کانی‌های ثانویه مس (مالاکیت، آزوریت) پر

شده‌اند (شکل ۴- E و F). کلسیت‌ها بدون بافت تیغه‌ای هستند و رخ‌های رومییک را نشان می‌دهند که از نشانه‌های عدم جوشش است (Moncada et al., 2012).

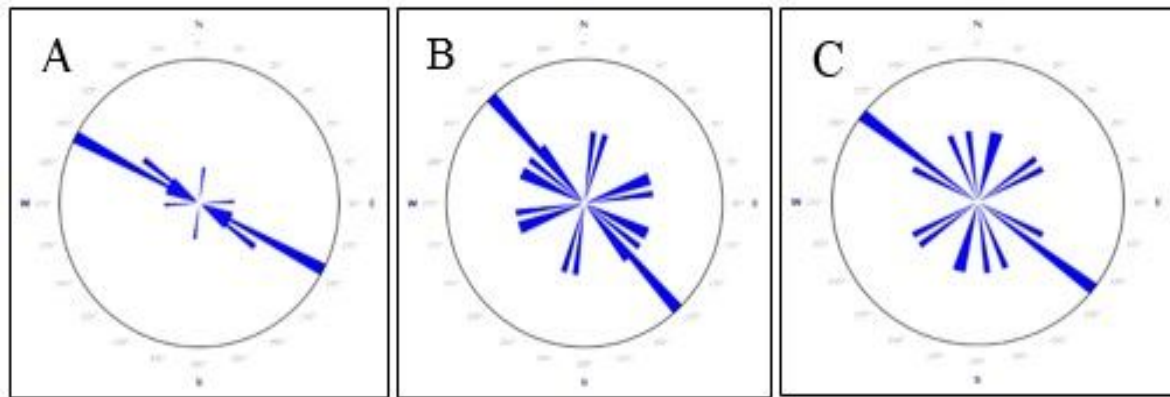


شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی محدوده تپه‌خرگوش با تغییرات از رادفر (Radfar, 1992)
 Fig. 1. Geological map of Tappeh-Khargoosh area (modified after Radfar, 1992)



شکل ۲. تقاطع دایک‌های دیابازی با دو روند WNW-ESE و N-S در منطقه تپه‌خرگوش

Fig. 2. Cross cutting of diabasic dikes with WNW-ESE and N-S trend in the Tappeh-Khargoosh area



شکل ۳. نمودار گل‌سرخ‌ی A: دایک‌ها، B: درزه‌ها و گسل‌ها و C: رگه‌های کانهدار در منطقه تپه‌خرگوش

Fig. 3. Rose diagram of A: dikes, B: Joints and Faults, and C: Mineralized veins in the Tappeh-Khargoosh area

کانی‌شناسی

کانه‌های مس و آهن در منطقه تپه‌خرگوش به دو صورت اولیه و ثانویه حضور دارند که از نظر بافتی به صورت شکافه پرکن، رگه‌چه‌ای، کلو فروم، حفره پرکن و افشان دیده می‌شوند. کانی‌های اولیه شامل پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت، طلا و نقره است (شکل ۷) که در داخل رگه‌های کوارتز به

مقدار کم (کمتر از ۵ درصد حجم رگه) تشکیل شده‌اند. کانی‌شناسی و ساخت و بافت‌های مشابه در کانسار اپی‌ترمال آق‌کند در زون طارم-هشتجین نیز توسط فیضی و همکاران گزارش شده است (Feyzi et al., 2017). کانی‌های ثانویه تشکیل شده در سطح شامل کالکوسیت، کولیت، کوپریت، مالاکیت، کریزوکولا، آتاکامیت، هماتیت و گوتیت هستند

اکسیدی مس در سطح را می‌توان به کمبود نسبی پیریت و خشک‌بودن آب و هوای منطقه نسبت داد. در این حالت، اسید سولفوریک کافی برای شست‌وشوی مس تولید نمی‌شود و مس حاصل از اکسایش و تجزیه کانی‌های اولیه مس، به صورت کانی‌های سیلیکاتی، کربناتی و اکسیدی مس در محل تثبیت می‌شود.

دگرسانی

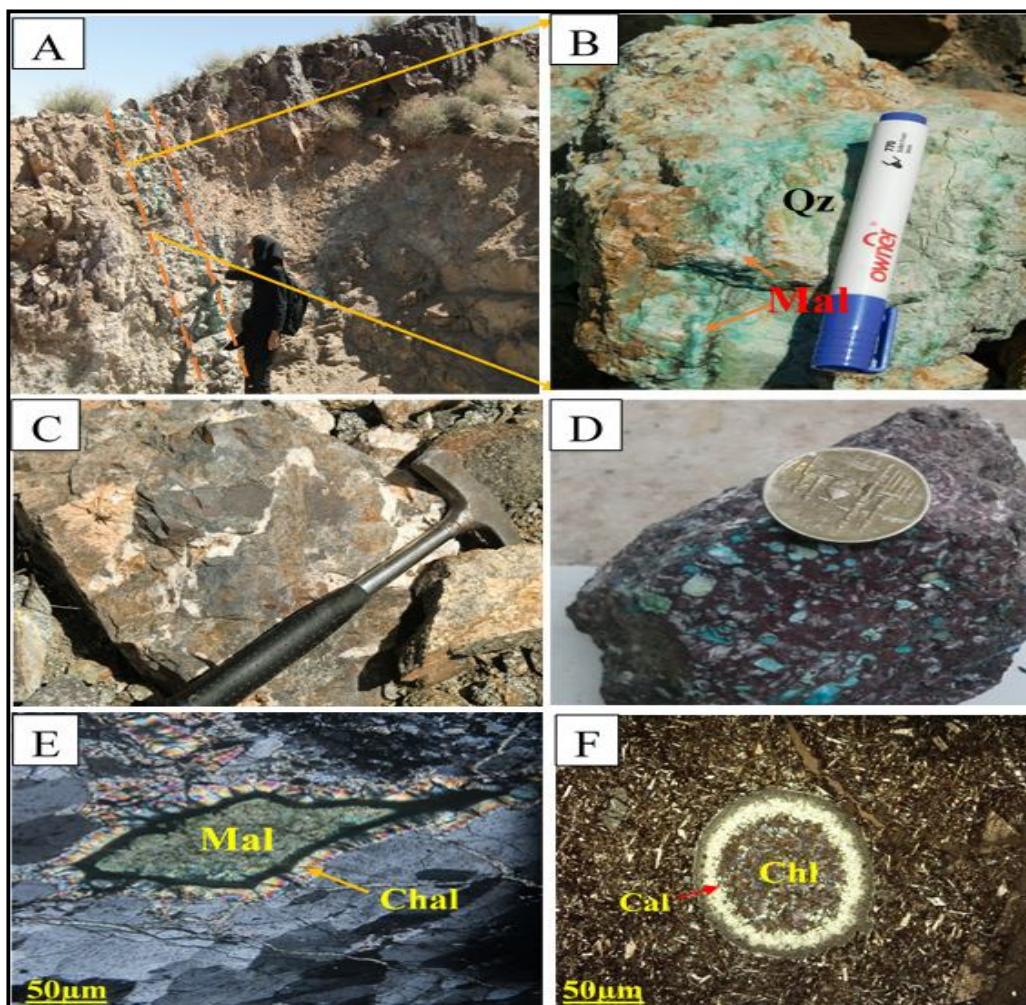
بر پایه نتایج بررسی‌های صحرایی، آزمایش‌های پراش پرتو ایکس و بررسی‌های میکروسکوپی، چهار نوع دگرسانی سیلیسی، سریستیک، آرژلیک و پروپلیتیک در منطقه تپه خرگوش شناسایی شده است. دگرسانی پروپلیتیک از گسترش نسبتاً زیادی برخوردار است؛ ولی سایر دگرسانی‌ها در حاشیه رگه‌های کانه‌دار و با وسعت بسیار کم دیده می‌شوند (در مجموع کمتر از ۲ متر). عواملی چون نفوذپذیری سنگ‌های میزبان، درز و شکستگی، ماهیت، ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی آنها نقشی مهم در گسترش دگرسانی گرمابی داشته است. دمای پایین سیالات کانه‌ساز که به وسیله بررسی میان‌بارهای سیال نیز تأیید شده است و خنثی بودن آنها از نظر pH می‌تواند از عوامل عدم گسترش وسیع پهنه‌های دگرسانی باشد (Hashemian, 2016). بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، دگرسانی‌های گرمابی به صورت انتخابی، رگه-رگه‌چهای و فراگیر، سنگ‌های میزبان را تحت تأثیر قراردادده است. با دور شدن از رگه‌ها از شدت دگرسانی کاسته می‌شود. در نزدیکی رگه‌ها، دگرسانی‌های سیلیسی و سریستی و در فاصله دورتر، دگرسانی آرژلیک و پروپلیتیک غالب است (شکل ۸).

با توجه به مشاهدات صحرایی و بررسی‌های میکروسکوپی، دگرسانی سیلیسی به صورت رگه-رگه‌چهای و فراگیر حضور داشته و اغلب با کانه‌زایی همراه است (شکل ۹-C و D). سیلیسی شدن به صورت بلورهای ریزدانه کوارتز در خمیره سنگ‌های آتشفشانی دیده می‌شود (شکل ۹-F و G) و در برخی موارد، محلول‌های سیلیسی توانسته‌اند بخش اعظم و یا

(شکل ۷). هماتیت و گوتیت با ساختارهای جعبه‌ای، کلوفرم و قله‌ای دیده می‌شوند (شکل ۵-G و H) که این ساخت‌ها از شواهد عمده تأثیر فرایندهای هوازدگی و تشکیل ثانویه کانه است (Craig and Vaughan, 1981). کالکوپیریت به صورت کانی باقی مانده و به مقدار کم در رگه‌های کوارتز دیده می‌شود. کالکوپیریت و بورنیت تحت تأثیر فرایند برون‌زاد به کانی‌های مختلفی مثل کوولیت و کالکوسیت تبدیل شده‌اند (شکل ۵-A، C و D). گاهی نیز بین بورنیت و کوولیت کانی کوپریت دیده می‌شود (شکل ۵-B). در زون اکسیدان، بورنیت خیلی سریع‌تر از کالکوپیریت تجزیه می‌شود (Ramdohr, 1980). به نظر می‌رسد با افزایش فوگاسیته اکسیژن محیط و تغییر شرایط از حالت احیا به اکسیدان، ابتدا کالکوپیریت به کوولیت و سپس به کالکوسیت تبدیل می‌شود (Sikka et al., 1991). بر پایه بررسی‌های ریزکاو الکترونی، در ترکیب شیمیایی کانی کالکوسیت که از هوازدگی کالکوپیریت به وجود آمده است، مقداری آهن و نقره نیز حضور دارد. کالکوسیتی که به این ترتیب تشکیل شده در نتیجه افزایش فوگاسیته اکسیژن و مهیا شدن شرایط اکسیدان به کوپریت تبدیل و نقره از ساختمان آن آزاد شده است که بررسی‌های ریزکاو الکترونی نیز آن را تأیید کرده است (شکل ۶ و جدول ۱). طلا به صورت آزاد و همراه با هماتیت‌هایی با بافت کلوفرمی دیده می‌شود (شکل ۵-H) و این احتمال وجود دارد که طلا در ساختار سولفیدها بوده و در اثر هوازدگی و اکسیداسیون آنها آزاد شده است. در بخش‌های سطحی‌تر در اثر اکسیده شدن کانی‌های آهن‌دار (پیریت و کالکوپیریت) هماتیت و گوتیت به صورت کلوفرم قابل مشاهده است. کانی‌های آزوریت، مالاکیت، آتاکامیت و کریزوکولا که در اثر هوازدگی کانی‌های اولیه مس به وجود آمده‌اند، به صورت رگه‌چهای و یا حفره پرکن دیده می‌شوند و نسبت به سولفیدهای ثانویه (کالکوسیت و کوولیت) در فواصل دورتری نسبت به کانی‌های اولیه خود یافت می‌شوند (شکل ۵-E و F). کانسنگ اکسیدی در سطح زمین گسترش زیادی دارد که دلیل اصلی عدم شست‌وشوی مس و تشکیل زیاد کانی‌های

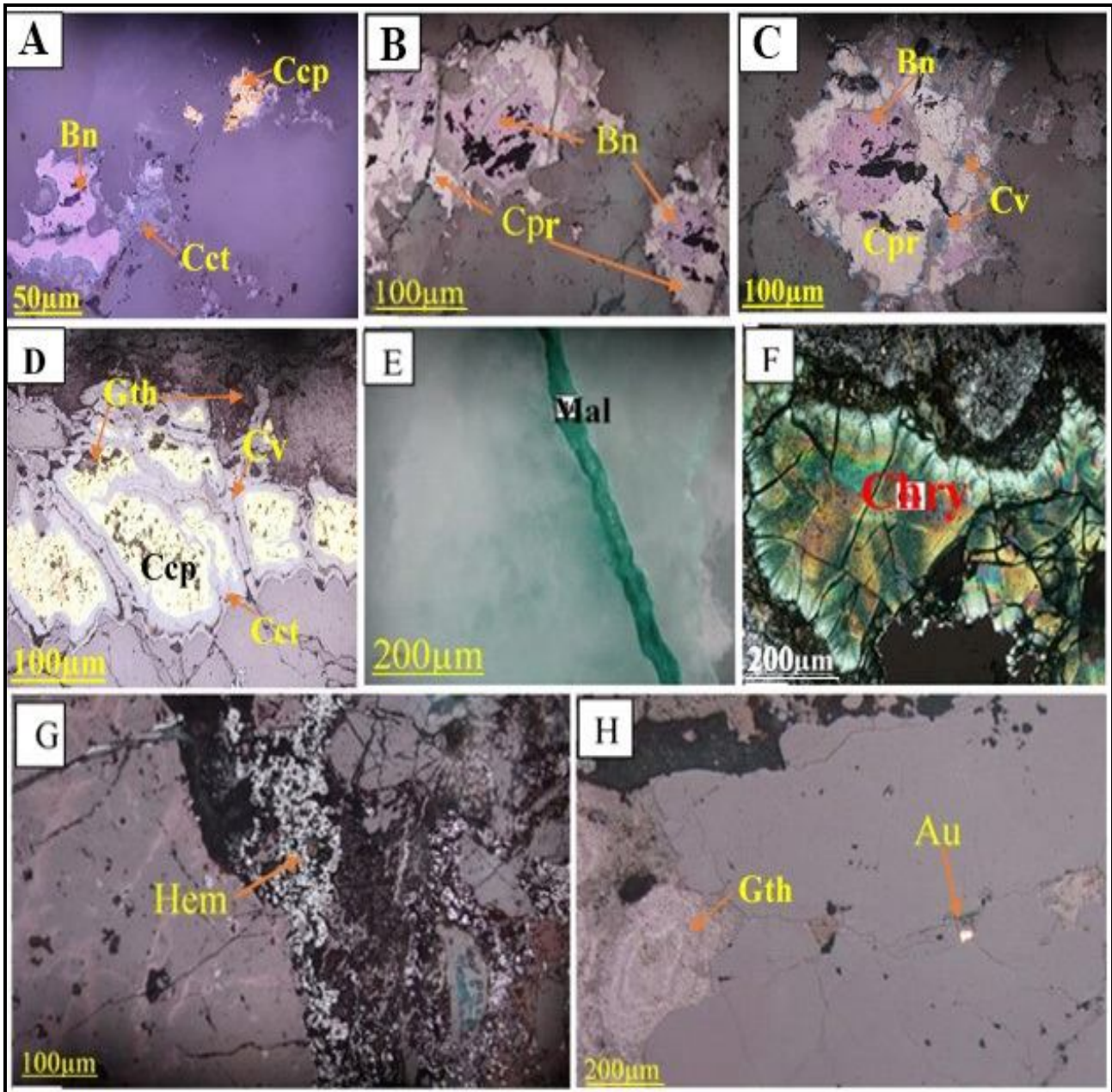
است (Guilbert and Park, 1986; White and Hedenquist, 1995)، در رگه‌های سیلیسی دیده می‌شود (شکل ۹-A، B و E). کوارتزهای بلورین در دما و عمق زیاد تشکیل می‌شود و در دمای پایین کوارتزهای ریز بلور و کلسدونی رخ می‌دهد (Hedenquist and Arribas, 2017).

تمامی حجم سنگ را تحت تأثیر قرار دهند. در مراحل نهایی، کلسدونی و کلسیت درشت‌بلور، فضای بین درشت‌بلورهای کوارتز مراحل قبل را پر کرده است (شکل ۹-I و H). فراوانی کوارتز منطبق بر افزایش نفوذپذیری ناشی از عملکرد نیروهای زمین‌ساختی است. ساخت و بافت‌های مختلف از قبیل شانه‌ای، نواری، برشی، حفره پرکن و شعاعی که بیانگر شرایط اپی‌ترمال



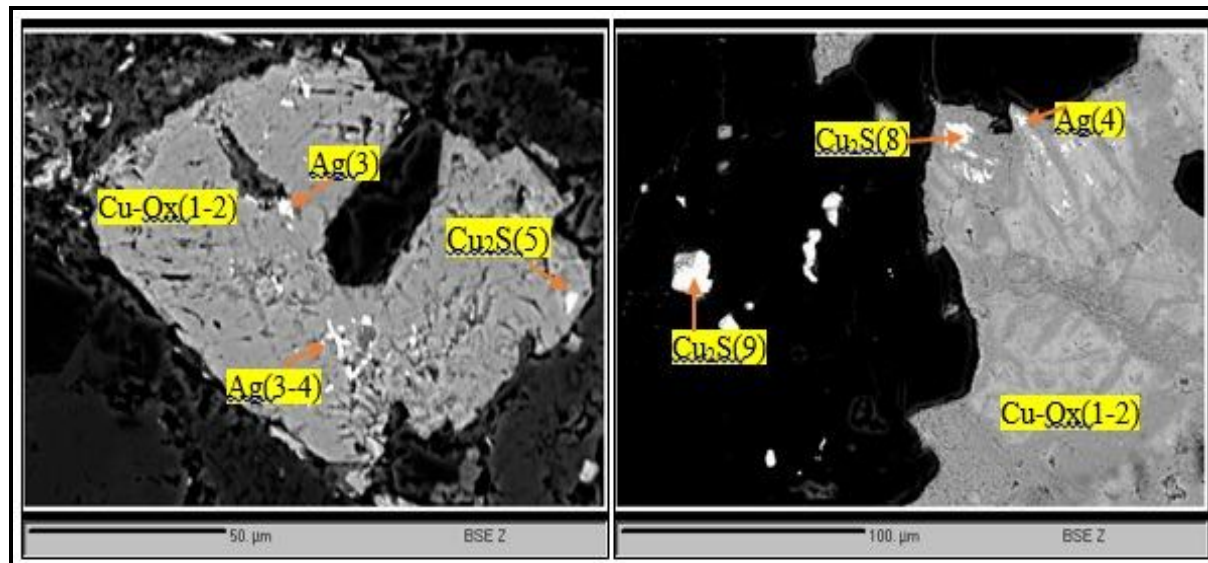
شکل ۴. شکل‌های مختلف کانه‌زایی در منطقه تپه‌خرگوش. A: کانی‌سازی رگه‌ای، B: نمای نزدیک از آن با بافت شانه‌ای، C: رگه‌چه سیلیسی همراه با کانه‌زایی به صورت پرکننده شکاف‌ها و فضای خالی، D: کانی‌سازی به صورت پرکننده حفرات بادامکی در آندزیت، E: حفره پرشده با کلسدونی و مالاکیت (XPL) و F: حفره پرشده با کلریت و کلسیت (XPL). Mal: مالاکیت، Chal: کلسدونی، Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Qz: کوارتز، علایم اختصاری بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 4. Different styles of mineralization in the Tappeh- Khargoosh area. A: mineralized vein, B: Close-up of it with banded texture, C: mineralized quartz veinlets as open space and crack filling, D: mineralization as amygdals filling in andesite, E: an amygdal filled with chalcedony and malachite (XPL), and F: an amygdal filled with chlorite and calcite (Xpl). Mal: Malachite, Chal: Chalcedony, Chl: Chlorite, Cal: Calcite, Qz: Quartz, (symbols from Whitney and Evans, 2010)



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی از انواع کانه‌های اولیه و ثانویه در کانسار تپه‌خرگوش (در نور XPL). A تا D: کالکوپریت و بورنیت اولیه در حال تجزیه به کوپریت، کالکوسیت، کوولیت، هماتیت و گوئیت با بافت کلوفرمی، E: ملاکیت پرکننده شکستگی، F: کریزوکولا به صورت پرکننده حفره، G: هماتیت قلوهای و H: طلای آزاد در شکاف آغشته به هیدروکسید آهن. در سمت چپ تصویر گوئیت کلوئیدی دیده می‌شود. Gth: گوئیت، Hem: هماتیت، Bn: بورنیت، Ccp: کالکوپریت، Cct: کالکوسیت، Cv: کوولیت، Mal: ملاکیت، Chry: کریزوکولا، Cpr: کوپریت، Au: طلا، علایم اختصاری براساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 5. Microphotographs of primary and secondary ore minerals in Tappeh-Khargoosh deposit (XPL). A to D: Primary chalcopyrite and bornite are decomposed into cuprite, chalcocite, covellite, hematite and goethite with colloform texture, E: malachite as fracture filling, F: chrysocolla as cavity filling, G: kidney hematite, and H: native gold in microfracture which contaminated by Fe-hydroxide. Colloidal goethite can be seen on the left side of picture. Gth: Goethite, Hem: Hematite, Bn: Bornite, Ccp: Chalcopyrite, Cct: Chalcocite, Cv: Covellite, Mal: Malachite, Chry: chrysocolla, Cpr: cuprite, Au: Gold, (symbols from Whitney and Evans, 2010)



شکل ۶. تصویر BSE از تجزیه کالکوسیت به کانی‌های اکسیدی مس و نقره در منطقه تپه‌خرگوش

Fig. 6. BSE images of chalcocite decomposing to copper oxides and silver in the Tappeh-Khargoosh area

جدول ۱. نتایج آنالیز تجزیه نقطه‌ای مربوط به نقاط ۱ تا ۹ شکل ۶ (مقادیر بر حسب درصد است) در منطقه تپه‌خرگوش

Table 1. Microprobe analysis results of points 1 to 9 in Fig.6 (wt.%) in the Tappeh-Khargoosh area

Point No	S	Mn	Fe	Cu	As	Ag	Cd	Au	Pb	Bi	Total	Mineral
1	0.04	0	0.3	47.89	0.01	0	0.02	0.05	0.07	0	48.44	Cu-oxide
2	0.05	0	0.21	50.63	0	0.02	0	0	0.04	0.22	51.24	Cu-oxide
3	0.09	0.01	0.19	8.53	0	83.43	0	0.14	0	0.04	92.45	Ag-Cu alloy
4	0.03	0.01	0.16	8.65	0	84.53	0.01	0.57	0	0	94.03	Ag-Cu alloy
5	20.47	0.01	0.31	77.75	0	0	0.01	0	0.02	0	98.7	Chalcocite
8	20.52	0	0.01	78.06	0	0.03	0.01	0	0	0	98.63	Chalcocite
9	20.14	0.01	0.02	78.62	0	0.01	0	0	0	0	98.81	Chalcocite

دگرسانی انتخابی، پلاژیوکلازها به‌طور بخشی به سریسیت تبدیل شده‌اند که می‌تواند بیانگر کاهش CaO در طی فرایندهای دگرسانی باشد (Alikhani et al., 2014). به‌طور کلی سریسیت و کوآرتز همراه با کانی‌های رسی و اندکی آدولاریا و پیریت، ویژگی عمده این دگرسانی در کانسار تپه‌خرگوش

در کانسار تپه‌خرگوش، دگرسانی ضعیف سریسیتی به رنگ خاکستری روشن و اغلب با پهنای کمتر از نیم متر در دیواره بلافاصل برخی از رگه‌های سیلیسی دیده می‌شود. این دگرسانی به صورت انتخابی، فراگیر و رگه-رگه‌چهای، سنگ‌های میزبان آندزیتی و پیروکلاستیکی را تحت تأثیر قرار داده است. در

هستند (شکل ۱۰- A، B و C). دگرسانی سریستیک به سمت بیرون، به تدریج به دگرسانی آرژیلیک تبدیل می‌شود. پتاسیم مورد نیاز این دگرسانی برای تشکیل سریست معمولاً از هیدرولیز فلدسپات‌های موجود در سنگ تأمین می‌شود

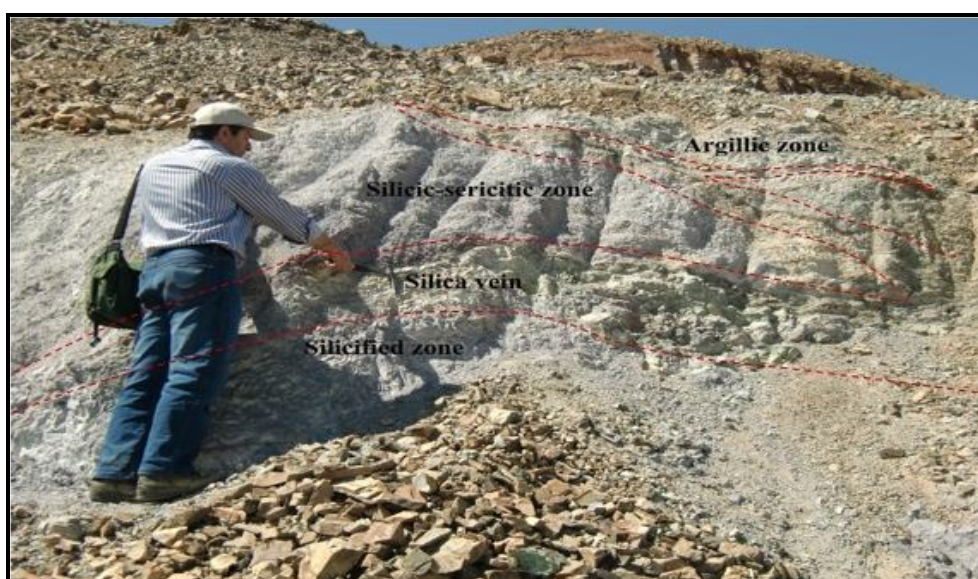
(Lowell and Guilbert, 1970). حضور آدولاریا و سریست از ویژگی‌های کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون پایین است (Hedenquist, 1987).

هستند (شکل ۱۰- A، B و C). دگرسانی سریستیک به سمت بیرون، به تدریج به دگرسانی آرژیلیک تبدیل می‌شود. پتاسیم مورد نیاز این دگرسانی برای تشکیل سریست معمولاً از هیدرولیز فلدسپات‌های موجود در سنگ تأمین می‌شود

Minerals	Gangue	Hypogene	Supergene
Quartz	—————	—————	-----
Calcite	—————	-----	
Pyrite		—————	
Chalcopyrite		—————	
Bornite		—————	-----
Gold		—————	---
silver		—————	---
Covellite			—————
Chalcocite		—————	—————
Cuprite			—————
Hematite			—————
Goethite			—————
Malachite			—————
Azurite			—————
Chrysocolla			—————
Atacamite			—————

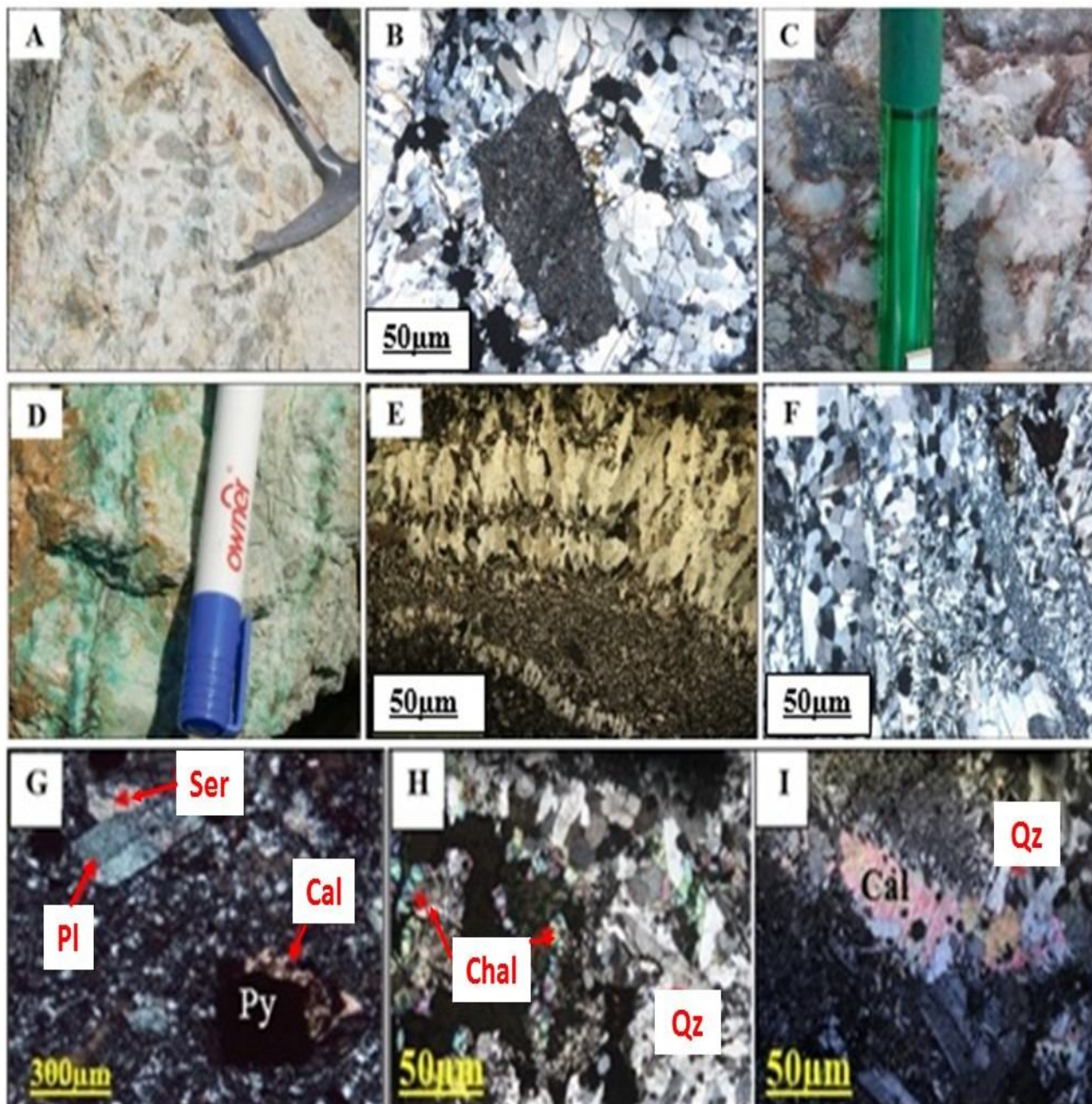
شکل ۷. توالی پاراژنتیک در کانسار تپه‌خرگوش

Fig. 7. Paragenetic sequence of Tappeh- Khargoosh deposit



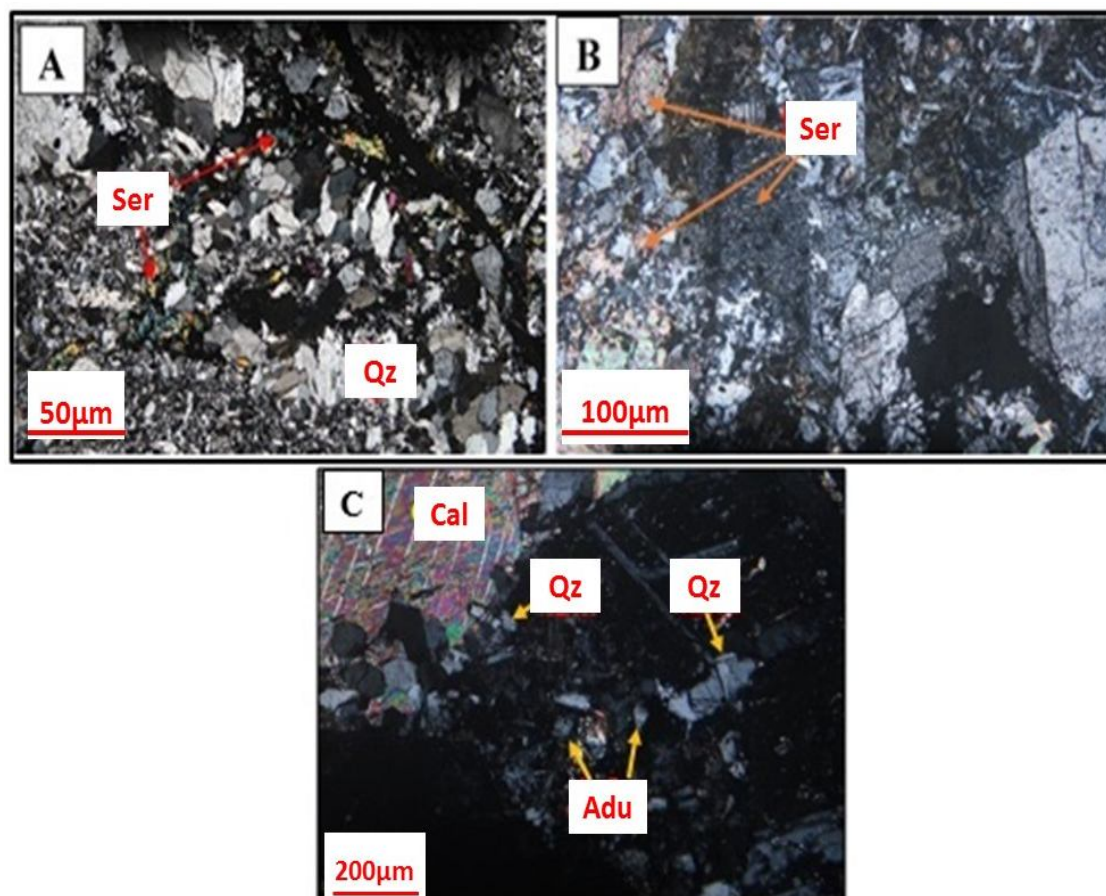
شکل ۸. پهنه‌بندی دگرسانی در حاشیه رگه سیلیسی کانهدار در شمال منطقه تپه‌خرگوش (دید به سمت جنوب‌غرب)

Fig. 8. Alteration halos around the mineralized quartz vein in the north of Tappeh-Khargoosh area (View to the SW)



شکل ۹. انواع ساخت و بافت در پهنه‌ها و رگه‌های سیلیسی منطقه تپه‌خرگوش. A و B: بافت برشی در نمونه دستی و زیر میکروسکوپ، C: رشد شعاعی کوارتز در حفرات و شکستگی‌های سنگ میزبان، D: بافت نواری در نمونه دستی و E و F: زیر میکروسکوپ، G: کوارتزهای ریزبلور به صورت پراکنده در متن سنگ آندزیتی، H: پرشدگی فضای بین درشت‌بلورهای کوارتز با کلسدونی، و I: پرشدگی حفرات توسط درشت‌بلورهای کوارتز و کلسیت. همه عکس‌های میکروسکوپی در نور XPL تهیه شده‌اند. Qz: کوارتز، Ser: سریسیت، Cal: کلسیت، Chal: کلسدون، PI: پلاژیوکلاز، Py: پیریت، علائم اختصاری بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 9. Structures and textures of silicified zones and quartz veins of Tappeh-Khargoosh area. A and B: Brecciated texture in hand sample and under microscope, C: The radiate growth of quartz in cavities and fractures of host rock, D: Banded texture in hand sample, E and F: under microscope, G: Disseminated fine-grained quartz in the andesite, H: The open spaces between the large quartz crystals filled with calcedony, and I: The cavities filled with quartz and calcite. All microscopic pictures had been taken in XPL. Qz: Quartz, Ser: Sericite, Cal: Calcite, Chal: Calcedony, Pl: plagioclase, Py: pyrite, (symbols from Whitney and Evans, 2010)

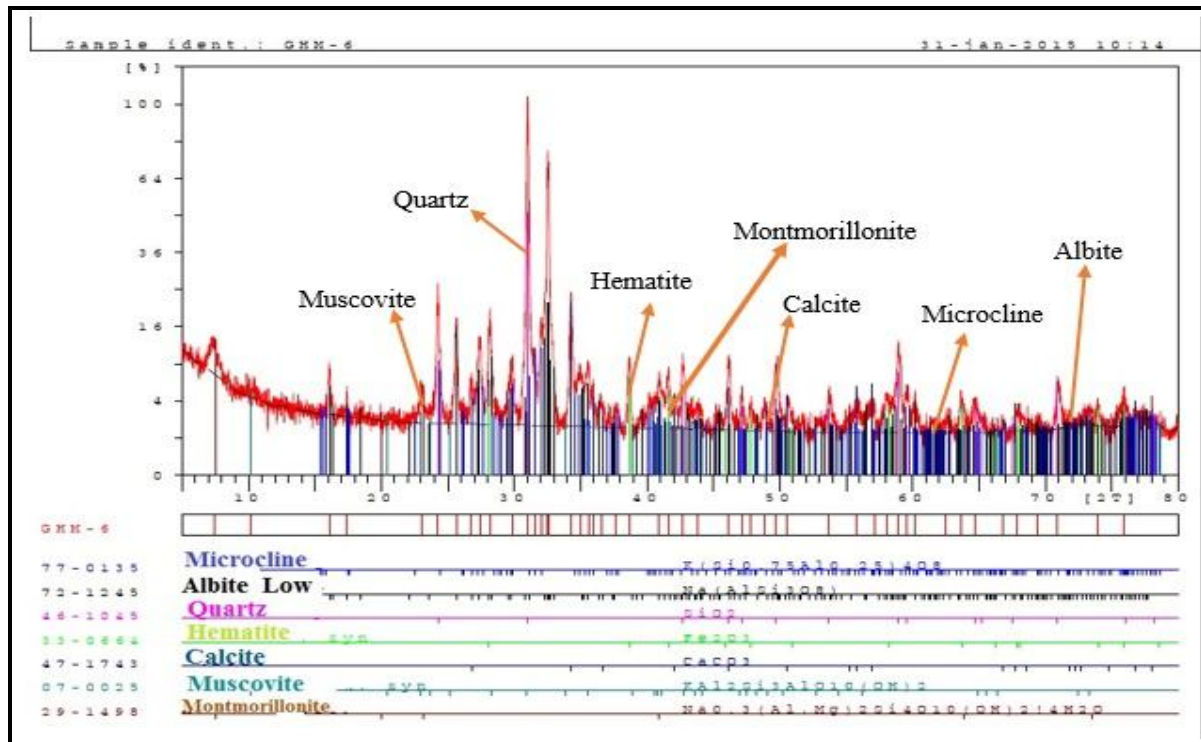


شکل ۱۰. دگرسانی سریسیتی به صورت A: رگه‌چهای (XPL)، B: انتخابی در درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و فراگیر در زمینه سنگ (XPL) و C: بلورهای ریز لوزی شکل آدولاریا همراه با کوارتز و کلسیت (XPL) در منطقه تپه‌خرگوش. Ser: سریسیت، Qz: کوارتز و Adu: آدولاریا، علایم اختصاری بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 10. Sericite alteration as: A: Veinlet (XPL), B: selectively in coarse-grained plagioclase and pervasively in the groundmass (XPL), and C: fine rhombic crystals of adularia associated with quartz and calcite (XPL) of Tappeh-Khargosh area. Ser: Sericite, Qz: Quartz, Adu: Adularia, (symbols from Whitney and Evans, 2010)

آنالیز شده از این نوع دگرسانی به روش پراش پرتو ایکس، کانی‌های کوارتز، مسکویت، کائولینیت، مونت‌موریلونیت، ایلیت و هماتیت شناسایی شده است (شکل ۱۱). رخداد کانی ایلیت و مونت‌موریلونیت در زون آرژیلیک به تغییر در شرایط pH از اسیدی به خنثی، تغییر در ترکیب شیمیایی محلول‌ها یا نسبت آب به سنگ در سامانه گرمایی نسبت داده شده است (Simpson et al., 2001). در دگرسانی آرژیلیک، کانی‌های رسی بیشتر درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و فلدسپات پتاسیک را جانشین کرده است و اغلب در سنگ‌های آتشفشانی به ویژه توف‌ها و آندزیت دیده می‌شوند (شکل ۱۱).

دگرسانی آرژیلیک حدواسط به صورت محلی و به طور پراکنده در مناطقی که دارای سولفیدهای اکسید شده هستند، دیده می‌شود. به نظر می‌رسد تشکیل این نوع دگرسانی بیشتر در ارتباط با هوازدگی برون‌زاد کانی‌های سولفیدی باشد. با توجه به اینکه بررسی پهنه‌های دگرسانی بر پایه نمونه‌های سطحی بوده است و از گسترش قائم انواع دگرسانی‌ها اطلاعی در دست نیست؛ لذا نمی‌توان قضاوتی در مورد عمق این دگرسانی و تغییرات مربوط به آن، به ویژه عملکرد محلول‌های پایین‌رو به عمل آورد. به عبارت دیگر، بر پایه داده‌های موجود نمی‌توان دگرسانی مزبور را به فرایندهای هیپوژن یا سوپرژن نسبت داد. در نمونه‌های



شکل ۱۱. نمودار پراش پرتو ایکس از پهنه دگرسانی آرژیلیک-سرسیستیک در منطقه تپه‌خرگوش. کانی‌های میکروکلین، آلبیت، کوارتز، هماتیت، کلسیت، مسکویت و مونت‌موریلونیت در آن شناسایی شده است.

Fig. 11. X-ray diffraction diagram of argillic-serisitc alteration zone in the Tappeh-Khargoosh area. Microcline, Albite, Quartz, Hematite, Calcite, muscovite and montmorillonite detected.

فراوانی کم دارد؛ ولی با دور شدن از رگه‌ها بر میزان آن افزوده می‌شود. این کانی به‌صورت جانشینی به جای آمفیبول و پلاژیوکلاز، رگه‌چهای و گاه به‌صورت پرکننده حفرات سنگ (آمیگدالوئیدال) دیده می‌شود (شکل ۱۲-A و C). این نوع دگرسانی علاوه بر کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین از کانسارهای مس نوع ماتو نیز گزارش شده است (Kojima et al., 2008).

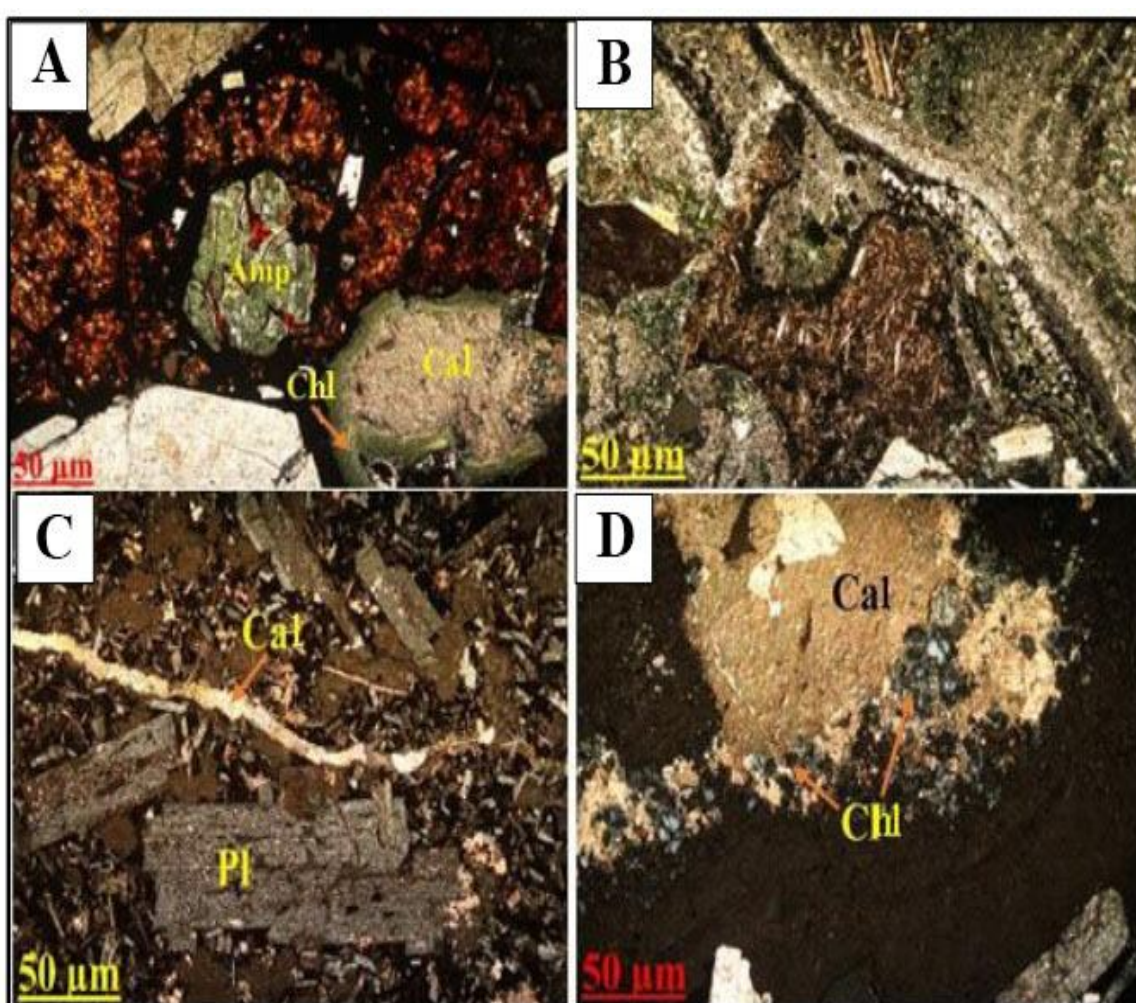
میان‌بارهای سیال

برای مطالعه میان‌بارهای سیال، سه مقطع دوبر صیقل با ضخامت ۰/۳-۰/۵ میلی‌متر از رگه‌های کوارتز کانه‌دار هیپوزن (ستون دوم شکل ۷)، مورد بررسی قرار گرفت. میان‌بارهای سیال موجود در کوارتز اغلب اولیه بوده و به مقدار کم نیز میان‌بارهای سیال ثانویه دیده می‌شود. میان‌بارهای سیال اولیه که با فاصله زیاد

دگرسانی پروپلیتیک با حضور کانی‌های کلریت، کلسیت، آلبیت، اپیدوت و کوارتز قابل شناسایی است. کلریت و کلسیت بیشتر جانشین کانی‌های اولیه مانند آمفیبول و پلاژیوکلاز شده و یا به‌صورت رگه‌چهای سنگ میزان را مورد هجوم قرار داده‌اند (شکل ۱۲-B). گاهی نیز با پرشدن حفرات سنگ توسط کلسیت و کلریت مشخص می‌شود (شکل ۱۲-D). وجود کانی‌های کربناته نظیر کلسیت در این دگرسانی بیانگر عملکرد سیال دگرسان‌ساز با pH قلیایی و نزدیک به خنثی و همچنین غنی از گاز CO₂ است (Mauk and Simpson, 2007). غلظت بالای CO₂ موجب گسترش قلمرو پایداری کلسیت در راستای کاهش نسبت $a_{Ca^{2+}}/a_{H^+}$ و کم‌شدن فازهای کالک‌سیلیکاتی می‌شود که امروزه اثر آن در سامانه‌های زمین‌گرمایی به‌خوبی شناخته شده است (Mauk and Simpson, 2007). کلریت در نزدیکی رگه‌های کوارتز

از لحاظ تعداد فازها، سه نوع میان‌بار شامل میان‌بارهای تک فازی بخار (V)، میان‌بارهای تک فازی مایع (L) و میان‌بارهای دو فاز مایع و بخار (L+V) غنی از مایع در نمونه‌ها تشخیص داده شد (شکل ۱۳). نبود هم‌زمان میان‌بارهای دو فاز مایع و غنی از مایع و غنی از بخار، از نشانه‌های عدم رخداد جوشش در منطقه است (Moncada et al., 2012).

از یکدیگر قرار گرفته‌اند، نسبتاً بزرگ (۸ تا ۱۰ میکرون) و تقریباً شکل‌دار هستند و میان‌بارهای سیال ثانویه که با فاصله کم از یکدیگر قرار دارند، خیلی کوچک (کمتر از ۵ میکرون) هستند. میان‌بارهای موجود در نمونه‌ها به شکل کروی، بیضوی، کشیده و نامنظم دیده می‌شوند. میان‌بارهایی با شکل کشیده، می‌تواند نشان‌دهنده تنش‌های زمین‌ساختی حاکم بر منطقه باشد.



شکل ۱۲. دگرسانی پروپلیتیک در سنگ‌های با بافت هیالوپورفیریتیک در منطقه تپه‌خرگوش. A: آمفیبول‌ها توسط کلریت و اکسیدهای آهن جانشین و حفرات توسط کلسیت و کلریت پر شده است (XPL)، B: دگرسانی کلریتی فراگیر و نامنظم در سنگ آتشفشانی (XPL)، C: رگه‌های کلسیت همراه با کلسیت‌های پراکنده در خمیره (XPL) و D: رگه‌های کلریت غنی از آهن (پنین) همراه با کلسیت (XPL). Cal: کلسیت، Pl: پلاژیوکلاز، Chl: کلریت، Amp: آمفیبول، علائم اختصاری بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 12. Propylitic alteration in rocks with hyaloporphyritic textures in the Tappeh-Khargoosh area. A: Amphibole have been replaced by iron oxides and chlorite and cavities filled with calcite and chlorite (XPL), B: pervasive and disordered chlorite alteration in volcanic rocks (XPL) C: calcite veinlets with scattered calcite in the groundmass, (XPL), and D: iron-rich chlorite (penin) veinlets with calcite (XPL). Cal: Calcite, Pl: Plagioclase, Chl: Chlorite, Amp: Amphibole, (symbols from Whitney and Evans, 2010)

کمپلکس‌های کلریدی و دارای شوری پایین است (Mehvari et al., 2010). بر اساس تغییرات شوری در مقابل دمای همگن شدن (Wilkinson, 2001)، فرایند غالب در تشکیل رگه‌های کوارتز کانه‌دار، رقیق‌شدگی سیالات گرمابی توسط سیالات سطحی بوده است (شکل ۱۷). شوری متوسط تا پایین میان‌بارهای سیال در نمونه‌های کوارتز نیز می‌تواند نشان‌دهنده اضافه‌شدن سیالات با منشأ جوی در فرایند کانی‌سازی رگه‌ای باشد. کاهش شوری سیال با کاهش دما از نشانه‌های رقیق‌شدگی سیالات گرمابی نسبتاً شور با سیالات جوی سردتر با شوری پایین است. بر اساس مقادیر شوری و دمای همگن شدن، نمونه‌های منطقه تپه‌خرگوش در محدوده کانسارهای اپی‌ترمال قرار می‌گیرند.

زمین‌شیمی

برای بررسی زمین‌شیمیایی عناصر، ۳۲ نمونه از پهنه‌ها و رگه‌های کانه‌دار برداشت و به روش جذب اتمی برای عنصر طلا و ICP-OES برای بقیه عناصر تجزیه شد. پس از بررسی دقت تجزیه داده‌ها (حد تشخیص برای اغلب عناصر در حد ppb و برای بعضی از عناصر در حد ppm بوده است)، توسط روش‌های آماری مختلف مورد تحلیل و تفسیر قرار گرفت و از ضریب همبستگی و آنالیز خوشه‌ای برای شناخت ارتباط ژنتیکی متقابل موجود بین عناصر مختلف استفاده شد (جدول ۳).

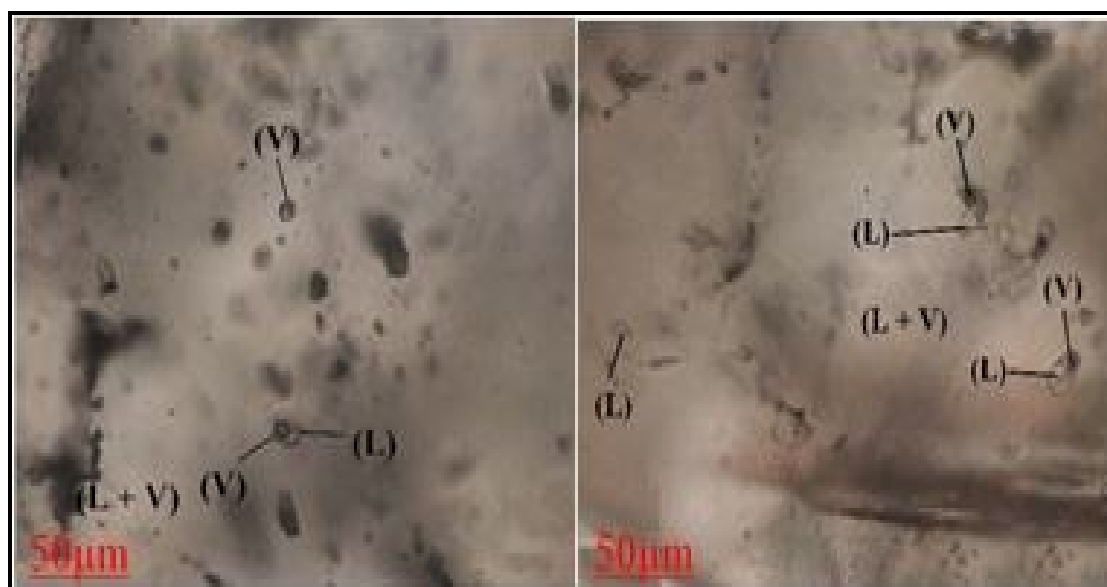
ضریب همبستگی بالای طلا و مس (۰/۸۷۹) نشان‌دهنده شرایط مشابه حمل (توسط کمپلکس‌های سولفیدی) و ته‌نشینی آنهاست که با شناسایی کانه طلا در نمونه‌های حاوی کانی‌های مس تأیید شده است (شکل ۵). عناصر سرب-روی-نقره نیز ضریب همبستگی مثبت بالایی را با همدیگر نشان می‌دهند که نشان‌دهنده رفتار ژئوشیمیایی مشابه آنها در منطقه تپه‌خرگوش است که در خیلی از کانسارهای اپی‌ترمال انتظار می‌رود. عناصری مثل Cr, Fe, V که جزو عناصر سنگ‌ساز به حساب می‌آیند، ضریب همبستگی مثبت با همدیگر و منفی با عناصر سرب، روی و نقره نشان می‌دهند.

بررسی‌های ریزدماسنجی تنها بر روی میان‌بارهای سیال اولیه دوفازی انجام شد. میان‌بارهای سیال اولیه بررسی شده در تمام نمونه‌ها دارای دو فاز مایع و بخار بودند که همگی به فاز مایع همگن شدند. نتایج حاصل از ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده است. در حین بررسی پتروگرافی و هنگام سرمایش، اثری از فازهای جامد مشاهده نشد که نشانگر شوری پایین سیالات کانی‌ساز است. میزان شوری بر اساس دمای ذوب آخرین بلور یخ محاسبه شد. پس از انجام آزمایش‌های سرمایش، دمای ذوب آخرین بلور یخ در میان‌بارها بین ۲- تا ۹- درجه سانتی‌گراد به دست آمد که با توجه به نمودار بودنار (Bodnar, 1993) سیستم غالب برای سیالات منطقه تپه‌خرگوش از نوع H₂O-NaCl تعیین شد که بیانگر شوری معادل ۴ تا ۱۲/۵ درصد وزنی نمک طعام است. البته با توجه به مقادیر نقطه یونکتیک (۳۴- تا ۳۹- درجه سانتی‌گراد) که از دمای یونکتیک H₂O-NaCl (۲۰/۸- درجه سانتی‌گراد) کمی پایین‌تر است، احتمالاً کاتیون‌های دیگری مثل CaCl₂ هم به مقدار کم در این سیستم حضور داشته است (Shepherd et al., 1985). بعد از انجام عمل سرمایش با انجام فرایند گرمایش، دمای همگن شدن میان‌بارهای سیال نیز ۱۳۷ تا ۱۹۴ درجه سانتی‌گراد به دست آمد (جدول ۲). برای تعیین چگالی سیال از نمودار دمای همگن شدن-شوری به همراه خطوط کانتوری با چگالی ثابت استفاده شده است (Bodnar, 1993). طبق این نمودار، چگالی میان‌بارهای سیال نمونه‌های مورد بررسی بین ۰/۹ تا ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد (شکل ۱۴). بر اساس دمای همگن شدن و درصد وزنی نمک طعام در میان‌بارهای سیال، می‌توان به کمپلکس مؤثر در حمل فلزات پی برد (Pirajno, 2009). نمونه‌های منطقه مورد بررسی در محدوده مربوط به کمپلکس‌های سولفیدی قرار می‌گیرند (شکل ۱۵) و با توجه به نمودار هاستون و لارج (Huston and Large, 1989)، H₂S یا HS⁻ مهم‌ترین آنیون‌های حمل‌کننده در کمپلکس‌های سولفیدی هستند (شکل ۱۶). نبود بلورهای دختر مثل هالیت و سیلویت بیانگر وجود محلول‌های گرمابی فقیر از

جدول ۲. نتایج حاصل از ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال دو فازی اولیه در رگه‌های کوارتز کانه‌دار در منطقه تپه‌خرگوش (T_{lm} : دمای ذوب نهایی، T_{fm} : دمای ذوب اولیه، Th : دمای همگن‌شدن)

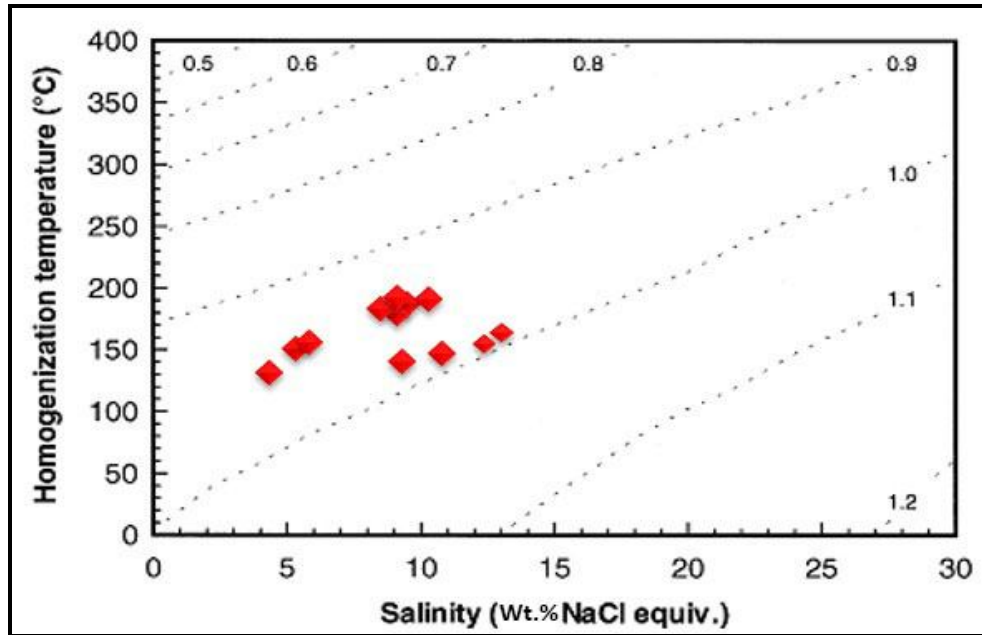
Table 2. Microthermometry of two-phase primary fluid inclusions in mineralized quartz veins in the Tappeh-Khargoosh area. (T_{lm} : Last melting temperature, T_{fm} : First melting temperature, Th : Homogenize temperature)

number	Size (μm)	T_{lm}	T_{fm}	Th	Salinity
					Wt.% NaCl equ.
1	8	-7.1	*	192	10
2	8	-6	-34	187	9
1	7	-5.7	*	167	8/7
1	7	-6.1	*	194	9/1
1	7	-7.2	-39	190	10/2
1	7	-3.8	*	157	5
1	5	-4.2	*	162	6/2
1	10	-8	-39	148	11/9
2	8	-9	-38	151	13
1	8	-2	-39	137	4
1	8	-7	-38	142	9/9
1	8	-8.5	*	149	12/5



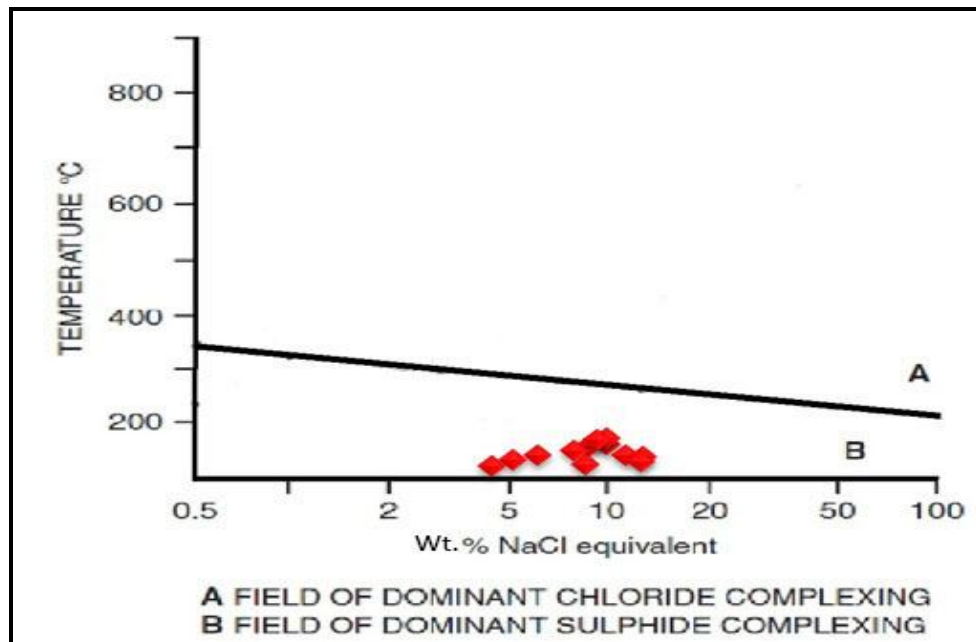
شکل ۱۳. میان‌بارهای تک فازی غنی از مایع (L) و بخار (V) و دو فازی حاوی مایع و بخار (L+V) در کوارتزهای منطقه تپه‌خرگوش

Fig. 13. Liquid (L) and vapor (V) rich single phase and two-phase (L+V) fluid inclusions in quartz veins of Tappeh-Khargoosh area



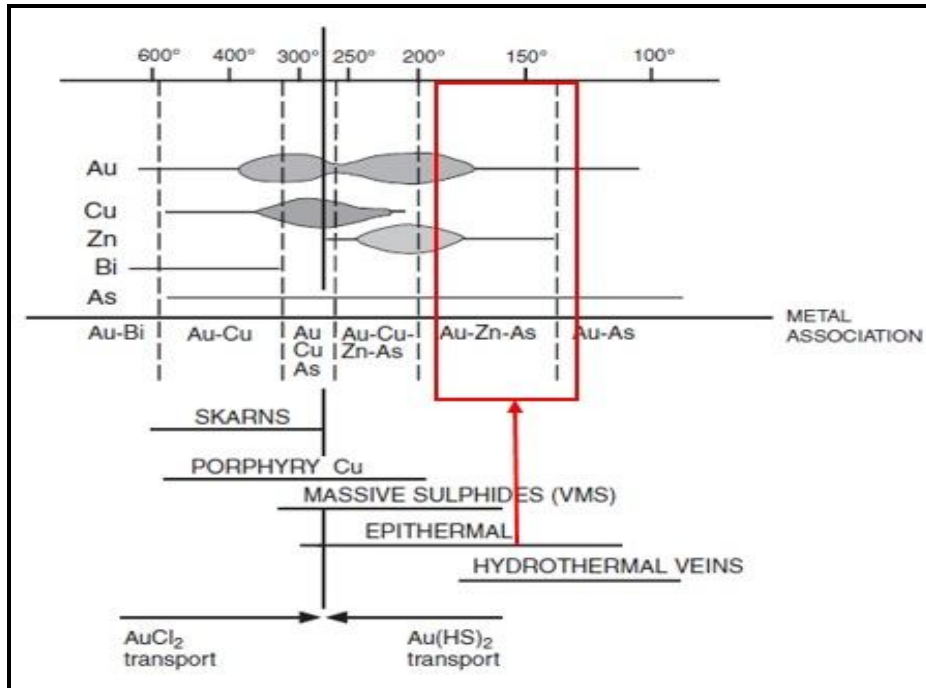
شکل ۱۴. نمودار دمای همگن‌شدن در برابر شوری به همراه خطوط کانتوری با چگالی ثابت (Bodnar, 1993). چگالی سیال در کانسار تپه‌خرگوش از ۰/۹ تا ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر است.

Fig. 14. Homogenization temperature - salinity diagrams with contour lines of constant density (Bodnar, 1993). Density of fluid inclusions change from 9.0 to 1 g/cm³ in Tappeh-Khargoosh deposit.



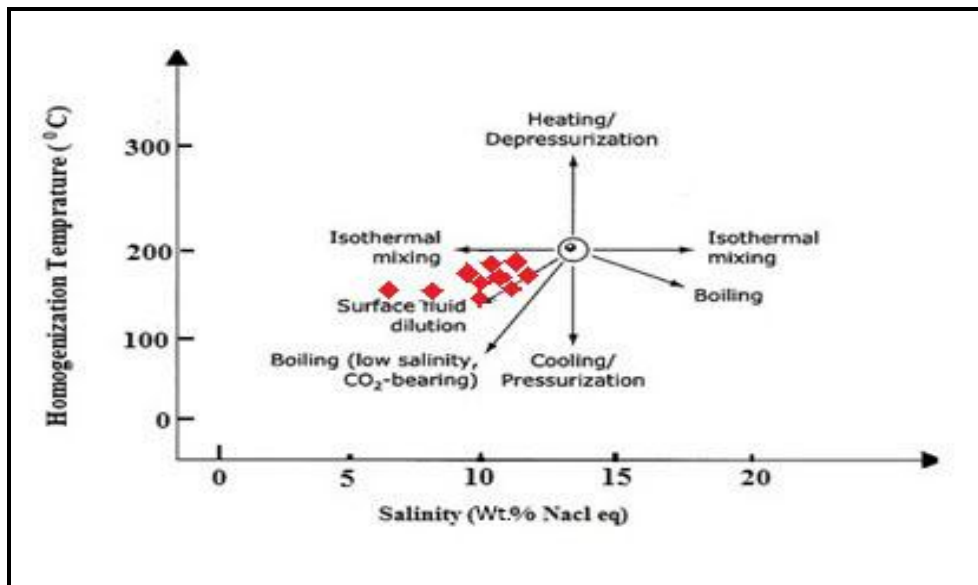
شکل ۱۵. نمودار دمای همگن‌شدن - شوری سیالات برای تعیین کمپلکس مؤثر در حمل عناصر کانسارساز (Pirajno, 2009) در منطقه تپه‌خرگوش. در محدوده A کمپلکس‌های کلریدی و در محدوده B کمپلکس‌های سولفیدی نقش اساسی را ایفا می‌کنند.

Fig. 15. Homogenization temperature- salinity diagram to determine effective complexes in transporting of ore forming elements (Pirajno, 2009) in the Tappeh-Khargoosh area. Chloride complexes play a major role in field A and sulfide complexes in field B.



شکل ۱۶. بازه دمایی پایداری کمپلکس‌های $AuCl_2$ و $Au(HS)_2$ و سیستم‌های کانیایی مرتبط با آن (Huston and Large, 1989). کمپلکس‌های سولفیدی در منطقه تپه‌خرگوش نقش اساسی را در حمل مس و طلا ایفا کرده است.

Fig. 16. Temperature stability fields of $AuCl_2$ and $Au(Hs)_2$ complexes and associated mineral systems (Huston and Large, 1989). In the Tappeh-Khargoosh area, sulfide complexes has played a major role in transporting of copper and gold.



شکل ۱۷. مدل شماتیک برای نشان دادن روندهای به‌دست آمده از فرایندهای مختلفی که دما و شوری یک میان‌بار سیال با ترکیب A را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Wilkinson, 2001). رقیق‌شدن توسط سیالات سطحی مهم‌ترین عامل مؤثر در ته‌نشینی کوارتز در منطقه تپه‌خرگوش بوده است.

Fig. 17. Schematic model to show trends derived from a variety of processes that affects temperature and salinity of fluid with A composition (Wilkinson, 2001). In the Tappeh-Khargoosh area, dilution by the surface fluids has been the most important factor in the settling of quartz.

جدول ۳. جدول ماتریسی ضریب همبستگی عناصر در منطقه تپه‌خرگوش

Table 3. Matrix table of correlation coefficients of elements in the Tappeh-Kharghoosh area

	Ag	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Sr	V	Zn	Au
Ag	1									
Cr	-0.337	1								
Cu	0.342	0.524	1							
Fe	-0.141	0.922	0.41	1						
Mn	-0.089	0.901	0.444	0.873	1					
Pb	0.693	0.267	0.814	0.230	0.452	1				
Sr	0.148	0.189	-0.394	0.491	0.416	-0.117	1			
V	-0.567	0.830	0.074	0.868	0.647	-0.259	0.410	1		
Zn	0.865	0.061	0.763	0.153	0.173	0.884	-0.081	-0.309	1	
Au	0.034	0.501	0.879	0.224	0.417	0.689	-0.620	0	0.462	1

نیز ضریب همبستگی بالای آنها را توجه پذیر می‌کند. همراهی فلزات گران‌بها با فلزات پایه از نشانه‌های کانسارهای نوع اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین است (Yilmaz et al., 2007). نسبت بالای نقره به طلا (۴۸۵ تا ۱۱۷۵) از دیگر نشانه‌های کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین است (John, 2011).

بحث و نتیجه‌گیری

کانسار تپه‌خرگوش شامل مجموعه‌ای از رگه-رگه‌چه‌هاست که به صورت شکافه پرکن در مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیت و داسیت متناسب به ائوسن تشکیل شده است. توزیع مکانی رگه‌ها و انطباق آنها با گسل‌ها و شکستگی‌ها نشانگر کنترل ساختاری کانی‌سازی است. بسیاری از گسل‌ها و دایک‌ها و رگه‌های منطقه زاویه ۲۵ درجه با گسل پی‌سنگی قم-زفره می‌سازند و این می‌تواند از حرکت کششی ناشی از عملکرد راست‌گرد این گسل در زمان ائوسن و الیگوسن باشد (Nadimi, 2010) که مجرای مناسب برای

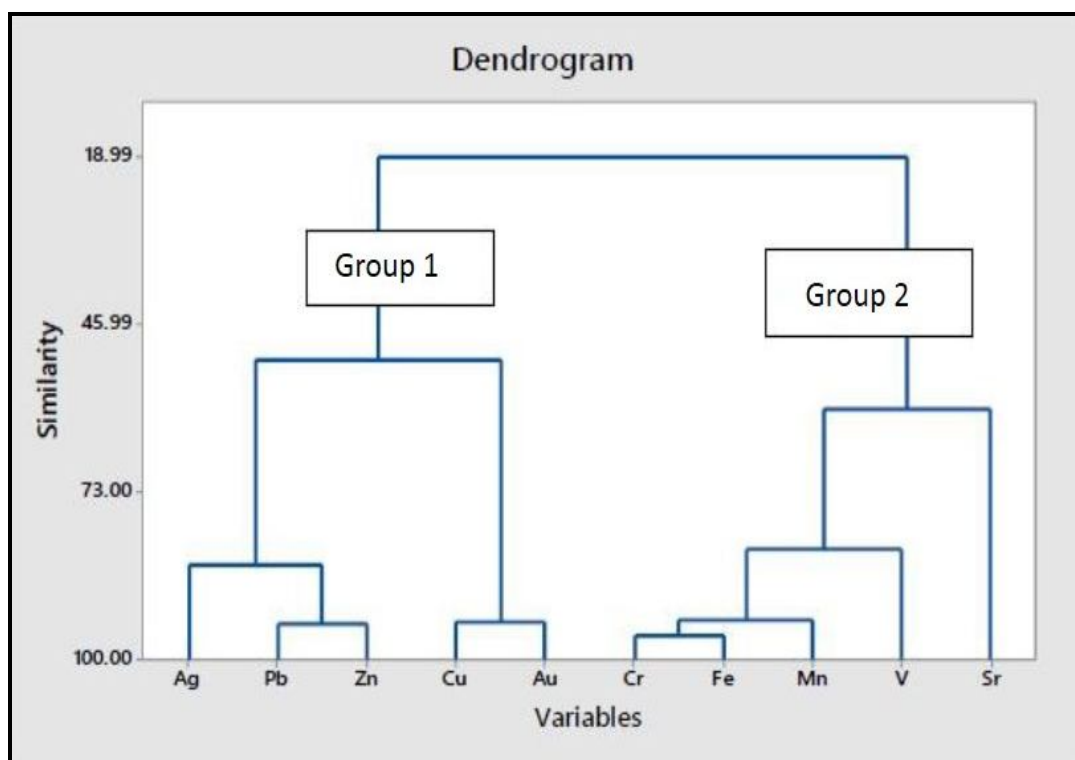
همبستگی این عناصر ناشی از فرایندهای سنگ‌ساز در سنگ‌های آتشفشانی میزبان در منطقه است. ضریب همبستگی منفی بین طلا و استرانسیم می‌تواند در ارتباط با عدم پذیرش استرانسیم در شبکه کوآرتزی باشد که در بردارنده طلاست (Monecke et al., 2002).

بر اساس نمودار خوشه‌ای، عناصر در دو گروه اصلی قرار می‌گیرند (شکل ۱۸). گروه اول شامل فلزات پایه و گران‌بها و گروه دوم شامل عناصر سنگ‌ساز V، Mn، Fe، Cr و Sr است. گروه اول بر اساس ضریب همبستگی به دو زیرگروه طلا-مس و سرب-روی-نقره تقسیم می‌شوند. همبستگی بالای طلا و مس هم از نظر ژنتیکی و هم از نظر اکتشافی و اقتصادی مهم است؛ به طوری که از مس می‌توان به‌عنوان عنصر ردیاب طلا استفاده کرد.

طلا و نقره همبستگی خوبی با مس، سرب و روی دارند که می‌تواند نشان‌دهنده شرایط مشابه تشکیل آنها باشد. تشخیص نقره در ساختار کانی‌های مس در بررسی‌های ریزکاو الکترونی

گرماپی در سنگ میزبان و تشکیل پهنه‌های دگرسانی شده است.

عبور محلول‌های گرماپی فراهم کرده است. عواملی چون نفوذپذیری بالای سنگ‌های آتشفشانی و گسلش و شکستگی‌های فراوان باعث گسترش و نفوذ زیاد محلول‌های

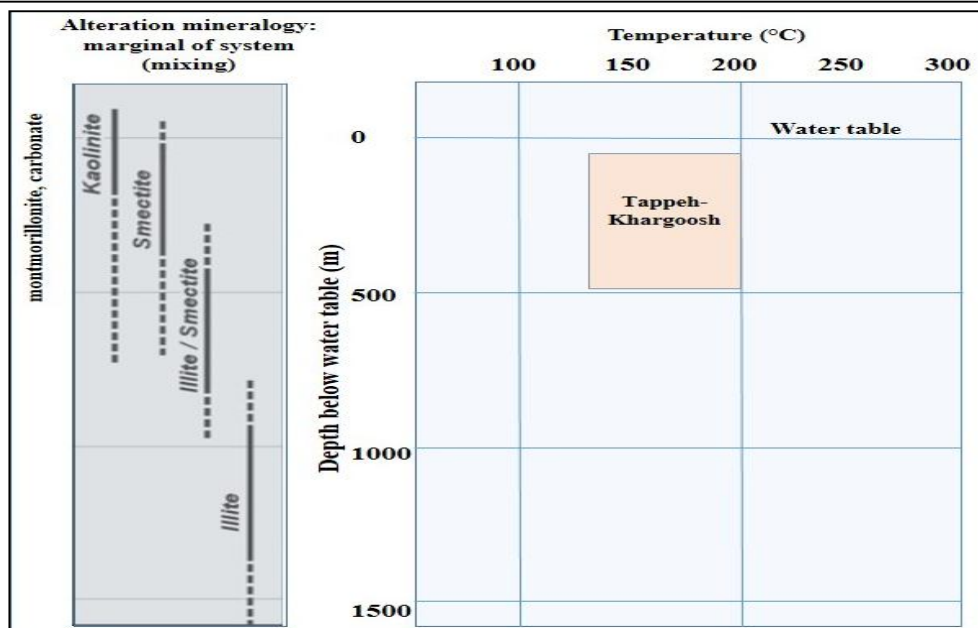


شکل ۱۸. نمودار خوشه‌ای عناصر در کانسار تپه‌خرگوش. عناصر به دو گروه اصلی کانسارساز (گروه ۱) و سنگ‌ساز (گروه ۲) تقسیم شده‌اند.

Fig. 18. Cluster diagram of elements in the Tappeh- Khargoosh deposit. Elements divided into two main ore- forming (group 1) and rock- forming (group 2) groups.

دمای پایین و خنثی‌بودن سیال گرماپی از نظر pH است (Simmons et al., 2005). در کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین این آب‌ها اغلب خنثی تا آلكالین ضعیف بوده است و منشأ جوی دارند (Simmons and Browne, 2000). گستردگی محدود یا نبود دگرسانی آرژلیک پیشرفته، کانسار تپه‌خرگوش را از کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون بالا متمایز می‌کند. مجموعه کانیایی همراه با دمای به‌دست آمده از میان‌بارهای سیال و ساخت و بافت‌های موجود در رگه‌های کوارتز، عمق کمتر از ۵۰۰ متر را برای تشکیل آنها پیشنهاد می‌کند (Hedenquist and Arribas, 2017) (شکل ۱۹).

در نزدیکی رگه‌ها، دگرسانی‌های سیلیسی و سریسیتی و در فاصله دورتر، دگرسانی آرژلیک و پروپلیتیک غالب است که این نوع پهنه‌بندی دگرسانی که در بسیاری از کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین معمول است (Hayba et al., 1985; Cooke et al., 1996; Sparkes, 2012). کانسارهای نوع مانتو دیده نمی‌شود (Kojima et al., 2003). مجموعه کانی‌های دگرسانی کوارتز، سریسیت، آدولاریا، ایلیت، مونت‌موریلونیت، کلسیت و کلریت در تپه‌خرگوش که دگرسانی‌های سیلیسی، سریسیتی، آرژلیک و پروپلیتیک با گسترش اندک (به‌جز زون پروپلیتیک) را به‌وجود آورده، نشانه



شکل ۱۹. مدل فرضی برای کانسار اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین تپه‌خرگوش با تغییراتی از هدنکوئیست و آریباس (Hedenquist and Arribas, 2017)

Fig. 19. Conceptual model for low sulfidation epithermal mineralization of Tappeh-Khargoosh area (modified from: Hedenquist and Arribas, 2017)

کولیت، کالکوسیت، کوپریت، همتیت، گوتیت، مالاکیت، آزوریت، کریزوکولا و آتاکامیت وجود دارد و بخش اعظم مس به صورت کانی‌های ثانویه در سطح دیده می‌شود. از آنجایی که نسبت پیریت به کالکوپیریت چندان بالا نبوده، شست‌وشوی مس از بخش‌های سطحی ضعیف بوده و کالکوپیریت به مالاکیت و آزوریت تبدیل شده است و مقداری کریزوکولا نیز در بخش‌های سطحی پدید آمده است. کالکوسیت اغلب در مقادیر بالای Cu^{+2}/HS و کولیت در مقادیر پایین تر Cu^{+2}/HS در زون‌های سوپرژن تشکیل می‌شود (Guilbert and Park, 1986). بنابراین فراوانی بیشتر کالکوسیت نسبت به کولیت در منطقه تپه‌خرگوش یکی دیگر از نشانه‌های پایین‌بودن اسیدیته محلول‌های سطحی و یا پایین‌بودن مقدار پیریت در منطقه است. شست‌وشوی ناقص مس و گسترش‌نداشتن وسیع دگرسانی آرژلیک در برخی از کانسارهای مس به کمبود پیریت و تشکیل نشدن سیالات اسیدی برون‌زاد نسبت‌داده شده است (Chavez, 2000).

دگرسانی سیلیسی در محدوده گسترده‌ای از تغییرات دما و pH صورت می‌گیرد؛ در حالی که دگرسانی آرژلیکی در دماهای پایین و محدوده وسیعی از pH رخ می‌دهد. در نتیجه در قسمت‌هایی از منطقه که این دو نوع دگرسانی با هم در سنگ دیده می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که دمای محلول‌های دگرسان‌کننده سنگ‌ها باید پایین و در محدوده پایداری کانی‌های رسی باشد (Robb, 2005) که با دماهای به‌دست آمده از میان‌بارهای سیال (۱۳۷-۱۹۴ درجه سانتی‌گراد) مطابقت دارد. این دما یکی از ویژگی‌های کانه‌زایی‌های طلا-نقره اپی‌ترمال از نوع سولفیداسیون پایین تا حدواسط است که برای کانسارهای مشابه در دیگر نقاط دنیا نیز گزارش شده است (Sillitoe and Hedenquist, 2003; Yilmaz et al., 2007; Yilmaz et al., 2010).

در منطقه تپه‌خرگوش کانی‌های اولیه شامل پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت و طلا بوده و کانی شاخص کانسارهای با سولفیداسیون بالا مثل باریت، لوزونیت و انارژیت مشاهده نشده است. در منطقه سوپرژن نیز مجموعه کانی‌های

است. مقدار شوری کم تا متوسط میان‌بارهای سیال بیانگر این است که حجم اصلی سیال‌های کانه‌ساز متعلق به آب‌های جوی بوده؛ گرچه برای تعیین دقیق منشأ سیالات و فلزات نیاز به داده‌های ایزوتوپی است.

با توجه به ویژگی‌های شاخص از جمله میزان نسبتاً کم کانی‌های سولفیدی، همراهان عنصری (مس - طلا - نقره)، انواع دگرسانی و ویژگی‌های زمین‌شیمیایی، همراهی کانی‌های کربناتی با رگه-رگه‌چه‌های سیلیسی و بافت‌های معمول برشی و شانه‌ای، کانی‌سازی در منطقه تپه‌خرگوش بیشترین شباهت را به کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین نشان می‌دهد که به سمت ذخایر سولفیداسیون متوسط نیز گرایش دارد (White and Hedenquist, 1995; Shahabpour, 2007; Yilmaz et al., 2007) و شباهت‌هایی نیز با کانسارهای مس ماتو نشان می‌دهد (Sergio Espinoza et al., 1994; Maksaev and Zentilli, 2002; Kojima et al., 2003; Ramirez et al., 2006; Tristá-Aguilera et al., 2006; Cisternas and Hermosilla, 2006; Kojima et al., 2008; Oliveros et al., 2008) (جدول ۴).

با توجه به مطالب بالا، نحوه تشکیل کانسار تپه‌خرگوش را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

سیالات گرمایی نسبتاً شور و گرم ضمن حرکت به سمت بالا با سیالات جوی با شوری پایین و سرد مخلوط شده و کمپلکس‌های حمل‌کننده فلزاتی که از نوع سولفیدی بوده‌اند، در اثر سرد شدن و اختلاط با آب‌های جوی، ناپایدار شده و بار خود را طبق واکنش زیر ته‌نشین کرده‌اند.

$$\text{Au}(\text{HS})_2^- + \text{H}^+ + 0.5\text{H}_2\text{O} = \text{Au} + 0.25\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{S}$$

$$\text{H}_2\text{S}$$
 آزادشده از این واکنش سبب اسیدی شدن سیال و دگرسان شدن سنگ دیواره و تشکیل سولفیدها از جمله پیریت و کالکوپیریت شده است. با تبدلات بیشتر سیال - سنگ، pH سیال کاهش یافته و به تشکیل پهنه پروپلیتیک منجر شده است. پهنه‌های دگرسانی از رگه به سمت بیرون، شامل سیلیسی، سرپیتی، آرژلیک و پروپلیتیک است که نشان‌دهنده کاهش دما و pH سیال با دور شدن از رگه است.

بر اساس مطالعه ضریب همبستگی و نمودار خوشه‌ای، طلا، مس و نقره همبستگی بالایی نشان می‌دهند. همبستگی بالای طلا و مس هم از نظر ژنتیکی و هم از نظر اکتشافی و اقتصادی مهم است؛ به طوری که از مس می‌توان به عنوان عنصر ردیاب فلزات گران‌بها استفاده کرد. تشخیص نقره در ساختار کانی‌های مس در بررسی‌های ریزکاوا الکترونی نیز ضریب همبستگی بالای آنها را توجیه‌پذیر می‌کند. طلا به صورت آزاد در داخل هماتیت‌هایی با بافت کلوفرمی دیده می‌شود و این احتمال وجود دارد که طلا در ساختار سولفیدها بوده که در اثر هوازدگی و اکسیداسیون آنها آزاد شده است. همراهی فلزات گران‌بها با فلزات پایه از نشانه‌های کانسارهای نوع اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین است (Yilmaz et al., 2007). نسبت بالای نقره به طلا (۴۸۵ تا ۱۱۷۵) نیز از دیگر نشانه‌های کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین است (John, 2011).

شواهد بافتی از قبیل نبود کوارتز کلوفرم، کوارتز شعله‌ای یا پرماند، کلسیت تیغه‌ای و فراوانی بافت‌های شانه‌ای و رومیکی در کوارتز و کلسیت، مشاهده نشدن هم‌زمان میان‌بارهای دو فاز غنی از بخار و غنی از مایع و نیز همگن نشدن به فاز بخار از نشانه‌های نبود رخداد جوشش در نمونه‌های بررسی شده است (Moncada et al., 2012). مهمترین لیگاندهای حمل‌کننده عناصر در دمای کمتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، لیگاندهای سولفیدی است (Barnes, 1979). بر اساس بررسی‌های میان‌بارهای سیال در منطقه تپه‌خرگوش، کمپلکس اصلی برای حمل فلزات از نوع سولفیدی بوده است. نبود بلورهای دختر مثل هالیت و سیلویت در میان‌بارهای سیال منطقه تپه‌خرگوش از دیگر نشانه‌های شوری پایین سیالات و نقش‌نداشتن کمپلکس‌های کلریدی در حمل فلزات است. دمای پایین و شوری کم تا متوسط سیالات و غالبیت کمپلکس‌های سولفیدی (HS^- یا H_2S) از مشخصات کانسارهای اپی‌ترمال است. در منطقه مورد بررسی، برخلاف کانسارهای سولفیداسیون بالا که بیشتر سیالات ماگمایی نقش اصلی را دارند (Moghadam, Foster, 1991; Vahabi 1993)، سیالات جوی عامل اصلی

جدول ۴. مقایسه کانسار تپه خرگوش با انواع کانسارهای اپی‌ترمال و مانتو

Table 4. Comparison of the Tappeh-Khargoosh deposit with epithermal and manto type deposits

	epithermal			Manto	Tappe-khargoosh
	H.S	I.S	L.S		
Structure and texture	Fine-grained, massive, mainly replacement origin; residual/vuggy quartz commonly hosts ore	Shear veins, vuggy and banded	Chalcedony/ quartz displaying crustiform, bladed, cockade and carbonate-replacement textures; open space filling	Mainly open space filling, rarely veinlets, dissemination	Quartz/ Chalcedony/ carbonate displaying crustiform, cockade textures; open space filling
Carbonate	Absent	rarely	Common	rarely	Common
Paragenesis	Copper sulfosate, chalcopyrite, bornite, enargite, luzonite, chalcocite	Sphalerite, galena and Low amounts of chalcopyrite and tennantite	Sphalerite, galena and tetrahedrite are common. Copper is mainly in the form of chalcopyrite	Chalcocite, bornite, digenite, chalcopyrite and covellite, native Cu	Chalcopyrite, bornite, chalcocite, gold
Alteration minerals	dominated by advance argillic (alunite, pyrophyllite, kaolinite)	Epidote, quartz-sericite, illite/muscovite	Sericite, adularia, illite/muscovite, chloritic, cabonate	Carbonate, chlorite, quartz, hematite and alkali feldspar	quartz, sericite, adularia, montmorillonite, illite, calcite, chlorite
Alteration intensity	Widespread and extensive advance argillic, visually prominent	Low extensive (siliceous, sericitic, intermediate argillic)	Commonly restricted and visually subtle (intermediate argillic, rarely sericitic, chlorite)	Without zoning, very restricted (propylitic-siliceous -calcite and albite)	restricted and less extensive (siliceous, sericitic, argillic and propylitic)
Source fluids	Mainly acidic water with high salinity	Near-neutral meteoric waters with low to moderate salinity	Mainly meteoric waters with low salinity	meteoric waters with variable salinity (1.5-62)	meteoric water with low to medium salinity
Host rock	Mainly andesite-rhyodacite	Volcanic rocks by combining basic to intermediate	Andesite-rhyodacite-rhyolite	Andesitic lavas and calc-alkaline basalts to high potassium volatiles	Andesite, dacite
Ag/Au ratio	Low	Low	High	-	high (485-1175)
Temperatures	200-300	100-300	100-300	150-360	137-194
References	White and Hedenquist, 1995; Hedenquist et al., 2000	White and Hedenquist, 1995; Hedenquist et al., 2000	White and Hedenquist, 1995; Hedenquist et al., 2000	Cisternas and Hermosilla, 2006; Tristán-Aguilera et al., 2006	this research

قدردانی

حمایت‌های مالی و همکاری‌های صحرایی شرکت مس-طلای اردستان به‌ویژه آقایان مهندس شریفی و مهندس معینی قدردانی می‌نمایند.

نویسندگان از همکاری‌های مسئولان محترم دانشگاه‌های اصفهان و پیام‌نور اصفهان، از مدیران و کارشناسان آزمایشگاه کیمیاپژوه البرز و مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران، همچنین از

References

- Aghanabati, A., 2004. Geology of Iran. Geological Survey of Iran Publications, Tehran, 709 pp. (in Persian)
- Alikhani, M., Shamanian, Gh.H. and Jafary Zanglanelo, M., 2014. Mineralization and hydrothermal alteration of the vein system of Tajrud, south of Neyshabur. *Journal of Economic Geology*, 5(2): 325–339. (in Persian)
- Barnes, H.L., 1997. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. John Wiley and Sons, New York, 992 pp.
- Bodnar, R.J., 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683–684.
- Chavez, W.X., 2000. Supergene oxidation of copper deposits: Zoning and distribution of copper oxide minerals. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 41(1): 10–21.
- Cisternas, M.E. and Hermosilla, J., 2006. The role of bitumen in strata-bound copper deposit formation in the Copiapo area, Northern Chile. *Mineralium Deposita*, 41(4): 339–355.
- Cooke, D.R., Mcpall, D.C. and Blom, M.S., 1996. Epithermal gold mineralization, Acupan, Baguio District, Philipines, geology, mineralization, alteration and the thermochemical environment of ore deposition. *Economic Geology*, 91(2): 243–272.
- Craig, J.R. and Vaughan, D.J., 1981. Ore microscopy and ore petrography. Wiley Interscience, New York, 417 pp.
- Dong, G., Morrison, G. and Jaireth, H., 1995. Quartz texture in epithermal veins, Queensland- classification, Origin, and implication. *Economic geology*, 90(6): 1841–1856.
- Feyzi, M., Ebrahimi, M., Hossein Kouhestani, H. and Mokhtari, M.A.A., 2017. Geology, mineralization and geochemistry of the Aqkand Cu occurrence (north of Zanjan, Tarom-Hashtjin zone). *Journal of Economic Geology*, 8(2): 507–524. (in Persian with English abstract)
- Foster, R.P., 1991. Gold metallogeny and exploration. Springer, London, 431 pp.
- Guilbert, J.M. and Park, Ch.F., 1986. The geology of ore deposits. Freeman and company, New York, 985 pp.
- Hashemian, E., 2016. The study of alteration, geochemistry, fluid inclusion and genesis of the Tappeh-Khargoosh Cu-Au deposit, southwest Ardestan. M.Sc. thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran, 115 pp.
- Hayba, D.O., Bethke, P.M., Heald, P. and Foley, N.K., 1985. Geologic, mineralogic, and geochemical characteristics of volcanic-hosted epithermal precious-metal deposits. In: B.R. Berger and P.M. Bethke (Editors), *Geology and Geochemistry of Epithermal Systems*. Society of Economic Geologists, Chelsea, pp. 129–166.
- Hedenquist, J.W., 1987. Mineralization associated with volcanic-related hydrothermal systems in the circum-Pacific basin. In: M.K., Horn (Editor), *Transaction of the Fourth Circum-Pacific Energy and Mineral Resources Conference*. American Association of Petroleum Geologists, Singapore, pp. 513–524.
- Hedenquist, J.W. and Arribas, A., 2017. Epithermal ore deposits: First-order features relevant to exploration and assessment. 14th Conference: Mineral Resources to Discovery. The Society for Geology Applied to Mineral Deposits Biennial Meeting, Quebec, Canada.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. and Gonzalez-Urien, E., 2000. Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13(7): 221–244.
- Huston, D.L. and Large, R.R., 1989. A chemical model for the concentration of gold in volcanogenic massive sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 4(3): 171–200.

- John, D.A., 2011. Epithermal gold-silver deposits of the Hauraki Goldfield, New Zealand: An Introduction. *Economic Geology*, 106(6): 915–919.
- Kojima, S., Astudillo, J., Trista, D. and Hayashi, K., 2003. Ore mineralogy, fluid inclusion, and stable isotopic characteristics of stratiform copper deposits in the coastal Cordillera of Northern Chile. *Mineralium Deposita*, 38(1): 208–216.
- Kojima, S., Trista-Aguilera, D. and Hayashi, K., 2008. Genetic aspects of the manto-type copper deposits. *Resource Geology*, 59(1): 87–98.
- Lowell, J.D. and Guilbert, J.M., 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65(4): 373–408.
- Maksaev, V. and Zentilli, M., 2002. Chilean Strata-bound Cu-(Ag) Deposits. An Overview: T.M. Porter (Editor), *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective*. Porter GeoConsultancy Publishing, Adelaide, pp. 185–205.
- Mauk, J.L. and Simpson, M., 2007. Geochemistry and stable isotope composition of altered rocks at the Golden Cross epithermal Au-Ag deposit, New Zealand. *Economic Geology*, 102(5): 841–871.
- Mehvari, R., Shamsipour, R., Bagheri, H., Noghreyan, M. and Mackizadeh M.A., 2010. Mineralogical and fluid inclusion studies in the Kalchueh copper- gold deposit, East of Isfahan. *Journal of Economic Geology*, 1(1): 47–55. (in Persian with English abstract)
- Moncada, D., Mutchler, S., Niebto, A., Reynolds, T.J., Rimstidt, J.D. and Bodnar, R.J. 2012. Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag-Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 114(12): 20–35.
- Monecke, T., Kempe, U. and Gotze, J., 2002. Genetic significance of the trace element content in metamorphic and hydrothermal quartz: a reconnaissance study. *Earth and Planetary Science Letters*, 202(3–4): 709–724.
- Nadimi, A., 2010. Active Strike-slip faults in the central part of the Sanandaj-Sirjan Zone of Zagros Orogen (Iran). Ph.D. Thesis, University of Warsaw, Warsaw, Poland, 121 pp.
- Oliveros, V., Féraud, G., Aguirre, L., Ramírez, L., Fornari, M., Palacios, C. and Parada, M., 2008. Detailed $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of geologic events associated with the Mantos Blancos copper deposit, northern Chile. *Mineralium Deposita*, 43(3): 281–293.
- Omrani, J., Agard, P., Whitechurch, H., Benoit, M., Prouteau, G. and Jolivet, L., 2008. Arc-magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: A new report of adakites and geodynamic consequences. *Lithos*, 106(3): 380–398.
- Pirajno, F., 2009. *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer, New York, 1273 pp.
- Pourkaseb, H., Zarasvandi1, A., Saed, M. and Ali Reza Davoudian Dehkordy, A.R., 2017. Magmatic-hydrothermal fluid evolution of the Dalli porphyry Cu-Au deposit; using Amphibole and Plagioclas mineral chemistry. *Journal of Economic Geology*, 9(1): 73–92. (in Persian with English abstract)
- Radfar, J., 1992. Geological map quadrangle Ardestan, scale 1:100000. Geological Survey of Iran. (in Persian)
- Ramdohr, P., 1980. *The Ore mineral and their intergrowths*. Pergamon, New York, 1205 pp.
- Ramirez, L.E., Palacios, C., Townley, B., Parada, M.A., Sial, A.N., Fernandez-Turiel, J.L., Gimeno, D., GarciaValles, M. and Lehmann, B., 2006. The mantos blancos copper deposit: An upper Jurassic breccia-style hydrothermal system in the coastal range of northern Chile. *Mineralium Deposita*, 41(3): 246–258.
- Robb, L., 2005. *Introduction to ore-forming processes*. Blackwell Publication, Australia. 373 pp.
- Rowland, J.V. and Simmons, S.F., 2012. Hydrologic, magmatic, and tectonic controls on hydrothermal flow, Taupo Volcanic Zone, New Zealand: Implications for the formation of epithermal vein deposits. *Economic Geology*, 107(3): 427–457.
- Salehi, M., 2015. Petrology and geochemistry of volcanic rocks, southwest of Ardestan. M.Sc. Thesis, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran, 100 pp.
- Sergio Espinoza, R., Hector Veliz, G., Justo Esquivel, L., Jaime Arias, F. and Aldo Mroago, B., 1994. *The Cupriferous Province of the*

- costal Range, Northern Chile. Society of Economic Geologists, London, 16 pp.
- Shahabpour, J., 2007. Economic Geology. Shahid Bahonar University, Kerman, 536 pp. (in Persian)
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. A practical guide to fluid inclusion studies. Glasgow: Blackie, Chapman and Hall, New York, 239 pp.
- Sikka, D.B., Petruk, W., Nehru, C.E. and Zhang, Z., 1991. Geochemistry of secondary copper minerals from Proterozoic porphyry copper deposit, Malanjhand, India. *Ore Geology Reviews*, 6(2–3): 257–290.
- Sillitoe, R.H. and Hedenquist, J.W., 2003. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. *Society of Economic Geologists, Special Publication*, 10(1): 315–343.
- Simmons, S.F. and Browne, P.R.L., 2000. Hydrothermal minerals and precious metals in the Broadlands-Ohaaki Geothermal System: Implications for understanding low-sulfidation epithermal environments. *Economic Geology*, 95(5): 971–999.
- Simmons, S.F., White, N.C. and John, D.A., 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. In: J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Richard (Editors), *Economic Geology, 100th Anniversary Volume: 1905-2005*. Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, pp. 485–522.
- Simpson, M., Mauk, J.L. and Simmons, S.F., 2001. Hydrothermal alteration and hydrologic evolution of the Golden Cross epithermal Au-Ag deposit, New-Zealand. *Economic Geology*, 96(4): 773–796.
- Sparkes, G.W., 2012. A prospector's guide to alteration and epithermal gold mineralization – Examples from Eastern Avalon. Technical Report, Geological Survey Newfoundland and Labrador, Canada, 27 pp.
- Tajmir Riahi, Z., Beigi, S., Safaei, H. and Nadimi, A., 2012. Identification active faults and seismic tectonic Shahreza area. 31th Geosciences Conference, Geological survey and mineral explorations, Tehran, Iran. (in Persian)
- Tristá-Aguilera, D., Barra, F., Ruiz, J., Morata, D., Talavera-Mendoza, O., Kojima, S. and Ferraris, F., 2006. Re-Os isotope systematics for the Lince–Estefanía deposit: constraints on the timing and source of copper mineralization in a stratabound copper deposit, Coastal Cordillera of Northern Chile. *Mineralium Deposita*, 41(1): 99–105.
- Vahabi Moghadam, B., 1993. Petrographic and petrology metamorphic- magmatic rocks south of Nain. M.Sc. Thesis, University of Tarbiat Moalem, Tehran, Iran, 250 pp.
- White, N.C. and Hedenquist, J.W., 1995. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics, and exploration. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 23(1): 9–13.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1–4): 229–272.
- Yeganefar, H., 2007. Petrology and Geochemistry of volcanic rocks south Ardestan. M.Sc. Thesis, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran, 118 pp. (in Persian with English abstract)
- Yeganefar, H., Ghorbani, M.R., Shinjo, R. and Ghaderi, M., 2013. Magmatic and geodynamic evolution of Urumieh–Dokhtar basic volcanism, Central Iran: major, trace element, isotopic, and geochronologic implications. *International Geology Review*, 55(6): 767–786.
- Yılmaz, H., Oyman, T., Arelhart, G.B., Çolakoğlu, A.R. and Billor, Z., 2007. Low-sulfidation type Au-Ag mineralization at Bergama, Izmir, Turkey. *Ore Geology Reviews*, 32(1–2): 81–124.
- Yılmaz, H., Oyman, T., Sönmez, F.N., Arelhart, G.B. and Billor, Z., 2010. Intermediate sulfidation epithermal gold-base metal deposits in tertiary subaerial volcanic rocks, Şahinli/Tespîh Dere (Lapseki/Western Turkey). *Ore Geology Reviews*, 37(3–4): 236–258.



Mineralogy, alteration, fluid inclusion and geochemical constraints of the Tappeh-Khargoosh Cu-Au deposit (SW Ardestan)

Elham Hashemian¹, Hemayat Jamali^{1*} and Jamshid Ahmadian²

1) Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

2) Department of Geology, Payame Noor University, Iran

Submitted: Feb. 7, 2017

Accepted: Dec. 20, 2017

Keywords: Mineralography, Alteration, Fluid Inclusion, Geochemistry, low Sulfidation Epithermal, Tappeh-Khargoosh, Ardestan

Introduction

The Tappeh-Khargoosh area is located at the 15 km SW of Ardestan, in the middle section of the Urumieh-Dokhtar magmatic arc (Aghanabati, 2004). Exploration in the study area began in 2006 by Kani Pajohan-e- Spadana Company and continued in detail by the Ardestan Copper-Gold Company. Their exploration activities consist of preparing the geological map (1:5000 in scale), drilling trenches and boreholes. Also minor extraction has been done. In this paper, our focus is on mineralogy, alteration, geochemistry and fluid inclusion of the Tappeh-Khargoosh deposit for determining the genesis of mineralization. The results of this study can be used for more exploration in the study and adjacent areas.

Methodology

Samples collected along a traverses perpendicular to the mineralized veins and their alteration haloes. The geometry, morphology, mineralogy and texture of mineralization were examined. After careful microscopic studies, 7 samples were analyzed by the XRF method in the laboratory of the Tarbiat Modarres University and Iranian Mineral Processing Research Center (IMPRC) in Karaj. Six thin-polished sections and 8 polished sections were examined. Also, 32 samples of mineralized and altered zones were analyzed by Inductively Coupled Plasma with optical emission spectrometer (ICP-OES) in IMPRC. Six samples

were analyzed for gold by Atomic Absorption Spectroscopy (A.A.S) method in the Kimia Pajoh Alborz laboratory. Three double polished sections prepared from mineralized quartz vein and micro thermometric studies had been analyzed by a model HF-S90 microscope in the University of Isfahan. For detail understanding of mineral composition and determination of some fine and rare minerals, the electron microprobe analyzing (EMPA) technique (model SX100) is used in IMPRC.

Discussion and results

The Tappeh-Khargoosh deposit consist of quartz vein and veinlets which occur as open space filling in Eocene andesite and dacite. The mineralized veins mainly occur in the fault zones. The subparallel fault systems of dextral strike sleep Qom-Zefreh crustal scale fault (Tajmir Riahi et al., 2012) has had the main role in localization of mineralizing fluids.

The alteration mainly consist of silicification, propylitization with minor sericitization and argillization represented as vein-veinlets, dissemination and pervasively in host volcanics. These alteration assemblages are indicative of near neutral to little alkaline hydrothermal fluids (Simmons et al., 2005). The silicic alteration has occurred in a wide range of pH and temperature, while the argillic alteration has occurred in low temperature and a wide range of pH. So where the

*Corresponding authors Email: h.jamali@sci.ui.ac.ir

silicic and argillic alterations have occurred together, the temperature of the causing fluid must be lower in the range of clay mineral stability field (Robb, 2005). The fluid inclusion in the quartz shows the low temperature (137-194°C) and low to medium salinity (4-12.5 %) which coincide with low to medium sulfidation epithermal deposit conditions. According to fluid inclusion data, bisulfides were the main ligand for metals transportation. The absence of halite/sylvite daughter minerals in fluid inclusions and low salinity of fluid inclusions show that the chloride complexes not act as effective ligands. Opposed to high sulfidation epithermal deposits in which the magmatic waters are common, in the low sulfidation type, the meteoric waters are dominant (Foster, 1991; Vahabi Moghadam, 1993). Dilution by cold and low salinity meteoric water has the main role in mineral deposition. Pyrite, chalcopyrite, bornite, chalcocite and native gold are the primary minerals and hematite, goethite, covellite, chalcocite, cuprite, malachite, chrysocolla, azurite and atacamite are the secondary minerals, which have occurred as veinlets, open space filling, colloform, amygdal filling and dissemination in quartz vein and host rocks. Fine grain gold had be seen in the colloidal secondary Fe-oxides, which indicate that the gold probably occurred primarily in sulfide minerals and was released in the supergene process. According to microprobe analysis, Ag was measured as impurity in chalcocite. These features coincide with high correlation coefficient between precious metals and copper. So, the Cu can be used as a pathfinder element for gold exploration in this and adjacent areas. The abundance of Cu-bearing secondary minerals in the surface, indicate that the Cu has not leached effectively as a result of the little amount of pyrite and aridity of the area. In this condition, Cu which was created

by oxidation of primary Cu minerals was fixed in the surface as silicate, carbonate and oxide minerals (Chavez, 2000). Geology, geometry, texture and structure, geochemistry, alteration schema, fluid inclusion and mineralogical data of the Tappeh-Khargoosh make it similar to low sulfidation (L.S) epithermal deposits.

References

- Aghanabati, A., 2004. Geology of Iran. Geological Survey of Iran Publications, Tehran, 709 pp. (in Persian)
- Chavez, W.X., 2000. Supergene oxidation of copper deposits: Zoning and distribution of copper oxide minerals. Society of Economic Geologists Newsletter, 41(1): 10–21.
- Foster, R.P., 1991. Gold metallogeny and exploration. Springer, London, 431 pp.
- Robb, L., 2005. Introduction to ore-forming processes. Blackwell Publication, Australia. 373 pp.
- Simmons, S.F., White, N.C. and John, D.A., 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. In: J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Richard (Editors), Economic Geology, 100th Anniversary Volume: 1905-2005. Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, pp. 485–522.
- Tajmir Riahi, Z., Beigi, S., Safaei, H. and Nadimi, A., 2012. Identification active faults and seismic tectonic Shahreza area. 31th Geosciences Conference, Geological survey and mineral explorations, Tehran, Iran. (in Persian)
- Vahabi Moghadam, B., 1993. Petrographic and petrology metamorphic- magmatic rocks south of Nain. M.Sc. Thesis, University of Tarbiat Moalem, Tehran, Iran, 250 pp.