



## میان‌بارهای سیال، کانی‌شناسی و شیمی کانی‌ها در کانسار پورفیری-آپی ترمال ساری گونی، استان کردستان

بهزاد مهربانی، مجید قاسمی سیانی\* و طیبه فاضلی

گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۱۳، پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۱

### چکیده

کانسار طلای آپی ترمال ساری گونی (داشکسن) در شمال‌خاور شهرستان قروه و میزبان سنگ‌های آتشفشانی میوسن میانی قرار دارد. این کانسار بین کمان ماگمایی ارومیه-دختر و پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان واقع شده است. کانی‌سازی به صورت رگه‌ای و برشی و به ترتیب شامل پنج مرحله: (۱) رگه-رگچه‌های کوارتز-سولفید-مگنتیت، (۲) رگه‌های برشی کوارتز-تورمالین، ۳ و ۴) رگه‌های آپی ترمال کوارتز-پیریت-استینیت-سولفید آرسنیک و (۵) رگه‌های کوارتز-کلسیت-پیریت-گالن-اسفالریت-تراهدریت است. شیمی تورمالین‌ها نشان می‌دهد که این کانی‌ها دارای منشأ گرمایی بوده و از نوع دراویت هستند. مرحله اول کانه‌زایی در بازه دمایی ۳۲۰ تا ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۳۵ تا ۴۵ درصد وزنی معادل نمک طعام تشکیل شده است. رگه‌های کوارتز-تورمالین برشی در یک بازه دمایی ۲۰۳ تا ۳۹۸ درجه سانتی‌گراد و شوری ۳۱/۴۳ تا ۴۵/۰۱ درصد وزنی معادل نمک طعام تشکیل شده‌اند. رگه‌های مرحله سوم و پنجم به ترتیب در یک بازه دمایی ۲۰۰ تا ۳۳۹ و ۱۶۵ تا ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۱/۷۰ تا ۱۱/۷۴ و ۱ تا ۷/۲۰ درصد وزنی معادل نمک طعام تشکیل شده‌اند. نتایج شیمی کانی‌های سولفیدی نشان می‌دهد که در اثر کاهش دما و فشار طی اختلاط با سیالات جوی و رقیق‌شدگی، تغییرات شیمی سیال به‌طور سریع رخ داده و هم‌زمان با جانشینی‌های آرسنیک-آنتیموان در کانی‌های سولفید آرسنیک (رالگار و اورپیمنت)-استینیت، جانشینی طلا با آهن در پیریت نیز رخ داده و طلا در این رگه‌ها به‌صورت محلول جامد و انکلوژیون‌های ریز در سوتی پیریت (پیریت دوده‌ای) تشکیل شده است.

**واژه‌های کلیدی:** کانی‌شناسی، شیمی کانی‌ها، میان‌بارهای سیال، آپی ترمال، سیستم کانه‌زایی رگه‌ای و برشی، ساری گونی

مقدمه  
کانه‌زایی‌های آپی ترمال و پورفیری در امتداد کمربند برخوردی کوه‌زایی آلپ-همالیای گسترش فراوان دارند (Jankovic, 1977; Jankovic and Petrascheck, 1987). کشور ایران به دلیل قرار گرفتن در بخش میانی کمربند عظیم آلپ-همالیای سرگذشت پیچیده تکتونو-ماگمایی طی باز و بسته شدن اقیانوس

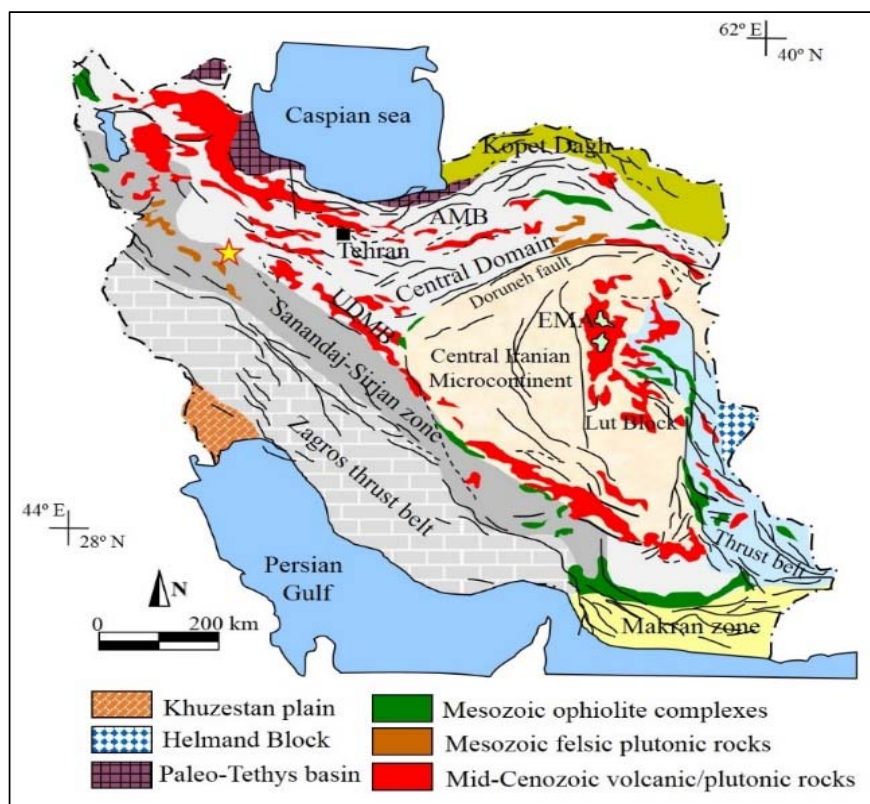
DOI: <https://dx.doi.org/10.22067/econg.v12i4.83516>

سیرجان و کمربند ماگمایی ارومیه-دختر در ارتباط با سنگ‌های آتشفشانی نیمه عمیق ائوسن میانی رخ داده است (Richards et al., 2006). در قدیم این محدوده به نام معدن آنتیموان داشکسن شناخته شده بود که در فاصله بین قله ساری گونی و یال شمالی کوه آق‌داغ تشکیل شده است (شکل ۲).

در سال‌های اخیر عمده کارهای اکتشافی معطوف به قله مخروطی آتشفشانی ساری گونی با ارتفاع ۲۲۱۷ متر بوده است که با اکتشاف کانی‌سازی طلا برای نخستین بار توسط شرکت اکتشافی ریوتینتو و زرکوه (Reynolds, 2001; Wilkinson, 2004)، نام کانسار به طلای ساری گونی تغییر یافت (شکل ۲) و بخش عمده استخراج در قله مخروطی ساری گونی در حال انجام است (شکل ۳-A).

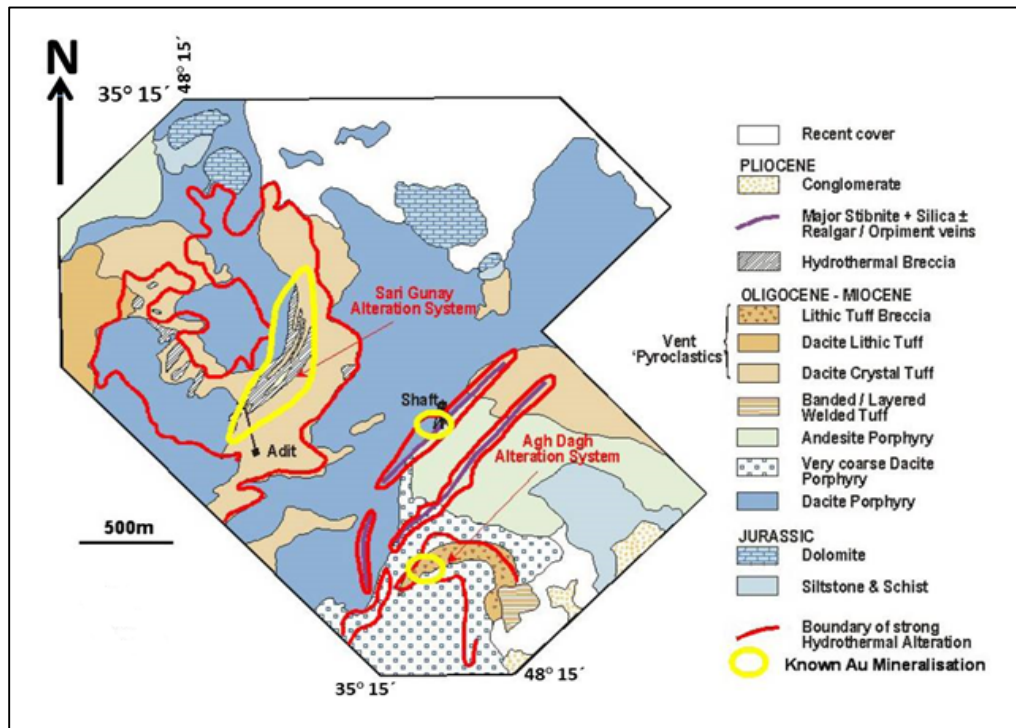
پالئوتتیس (پالئوزوئیک) و نئوتتیس (سنوزوئیک)، همواره بستر مناسبی برای تشکیل کانسارهای فلزات پایه و قیمتی ذخایر اپی‌ترمال و پورفیری است (Richards et al., 2006). پهنه‌های اصلی فلززایی ذخایر اپی‌ترمال و پورفیری در بخش‌هایی نظیر کمان ماگمایی البرز، باختر و شمال‌باختر ایران (کمربند ماگمایی ارومیه-دختر و زون البرز-آذربایجان)، زون خاور ایران و پهنه سنندج-سیرجان قرار دارند که کانسارهای متعددی در امتداد کمربند ماگمایی ارومیه-دختر و پهنه سنندج-سیرجان در ارتباط با سنگ‌های گرانیتی‌دی رخ داده است (Zarasvandi et al., 2019; Boomeri et al., 2019; Bagherpour et al., 2020).

محدوده اکتشافی کانی‌سازی اپی‌ترمال ساری گونی در دو تپه نسبتاً بزرگ به نام آق‌داغ و ساری گونی در مرز بین پهنه سنندج-



شکل ۱. موقعیت منطقه معدنی ساری گونی (ستاره زرد رنگ) در مرز بین پهنه سنندج-سیرجان و کمربند ماگمایی ارومیه-دختر (پهنه‌های ساختاری ایران با تغییرات بر اساس آق‌آباتی (Aghanabati, 2004))

Fig. 1. Location of the Sari Gunay mining district (yellow star) at the boundary of Sanandaj-Sirjan zone and Urumieh-Dokhtar magmatic belt (Structural zones of Iran modified based on Aghanabati, 2004)



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده‌های معدنی ساری‌گونی و آق‌داغ (با کمی تغییرات بر اساس ریچاردز و همکاران (Richards et al., 2006))

Fig. 2. Geological map of the Sari Gunay and Agh Dagh mining districts (modified after Richards et al., 2006)

است. از قدیمی‌ترین پژوهش‌ها، می‌توان به پژوهش ریچاردز و همکاران (Rastad et al., 2000) اشاره کرد که به کانی‌سازی آنتیموان در داشکسن پرداخته و نشان دادند که رابطه نزدیک بین کانی‌سازی آنتیموان-آرسنیک-طلا و محلول‌های سیلیسی مربوط به ماگماتیسیم آتشفشانی نیمه‌عمیق در ناحیه وجود دارد. ایشان کانی‌سازی را از نوع کانسارهای طلای اسید-سولفات معرفی کرده‌اند. بررسی‌های دورسنجی و کانی‌شناسی پهنه‌های دگرسانی (Feleghari, 2014; Maanijou et al., 2015)، مدل‌سازی کانسار (Geranian et al., 2015)، کانه‌زایی و زمین‌شناسی (Niroumand et al., 2013)، توزیع ژئوشیمیایی طلا (Moradi, 2018) و اکتشافات بیوژئوشیمیایی (Mehrabi et al., 2016) از دیگر کارهای انجام‌شده در محدوده مورد بررسی است. تاکنون بررسی‌هایی بر روی شیمی کانه‌ها و رگه‌های تورمالین صورت نگرفته و در این پژوهش شیمی کانه‌ها،

توزیع رخنمون‌ها در محدوده ساری‌گونی، ساختمانی بلوکی گسل‌خورده با روند شمال-شمال‌باختر، جنوب-جنوب‌خاور منسوب به کمر بند تکاب را نشان می‌دهند. این سیمای ساختمانی-ماگمایی، دربرگیرنده کمپلکس آتشفشانی ساری‌گونی و کنترل‌کننده موقعیت سایر مراکز آتشفشانی پلیوسن-کواترنری در شمال-شمال‌باختر ایران است (Richards et al., 2006). نزدیک‌ترین کانسارها به ساری‌گونی، کانی‌سازی طلا با میزبان رسوبی در منطقه زرشوران و کانی‌سازی طلای آق‌دره (Mehrabi et al., 1999; Asadi et al., 2000) است. با توجه به اهمیت کانی‌سازی طلا در منطقه ساری‌گونی، پژوهش‌های زیادی در منطقه انجام‌شده است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به پژوهش ریچاردز و همکاران (Richards et al., 2006) اشاره کرد که کانی‌سازی ساری‌گونی را در رده کانسارهای اپی‌ترمال آلکالن مرتبط با برخورد قاره‌ها قرار داده

میان‌بارهای سیال و شیمی تورمالین در رگه‌های برشی تورمالین و رگه‌های کوارتز-پیریت-استینیت-سولفید آرسنیک مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت با تلفیق نتایج حاصل با نتایج کارهای انجام‌شده قبلی در مورد شرایط سیال مسئول کانی‌سازی ساری‌گونی و نوع کانه‌زایی بحث‌شده است.

### زمین‌شناسی

محدوده معدنی ساری‌گونی بر اساس تقسیم‌بندی آقانباتی (Aghanabati, 2004) در بین کمان ماگمایی ارومیه-دختر و پهنه سنندج-سیرجان قرار گرفته و زیر مجموعه‌ای از میدان معدنی تکاب است (شکل ۱). زون سنندج-سیرجان با درازای حدود ۱۵۰۰ کیلومتر و پهنای ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلومتر از باختر دریایچه ارومیه آغاز و در یک راستای شمال-باختری-جنوب‌خاوری تا گسل میناب در شمال بندرعباس ادامه دارد. کمان ماگمایی ارومیه-دختر با روند کلی شمال-باختر-جنوب‌خاور از ردیف‌های آتشفشانی-رسوبی تشکیل شده است. کمر بند تکاب با روند شمال-شمال‌باختر، جنوب-جنوب‌خاور به صورت ساختمانی بلوکی گسل‌خورده است که کانسار طلای ساری‌گونی و کمپلکس آتشفشانی میزبان آن و سایر مراکز آتشفشانی پلوسن-کواترنری در شمال-شمال‌باختر ایران را کنترل می‌کند و احتمالاً تا کانسار طلای زرشوران ادامه می‌یابد (Richards et al., 2006). کمر بند تکاب نسبت به کمر بند مس پورفیری میوسن میانی با میزبانی کمان آتشفشانی ارومیه-دختر، دارای فلزهایی متفاوت و تا حدودی جوان‌تر بوده و ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌های آذرین منطقه تکاب (پتاسیم بالا و تا حدودی آلکالن) و سنگ‌های ارومیه-دختر (ترکیب کالک آلکالن) است که ویژگی‌های این کمر بند نشان دهنده شرایط زمین‌ساخت برخوردی است (Richards et al., 2006).

قدیمی‌ترین رخنمون‌های زمین‌شناسی در منطقه مورد بررسی متشکل از شیل، سیلتستون و دولومیت‌های ژوراسیک است

(شکل ۲). واحدهای الیگوسن-میوسن مهم‌ترین واحدهای زمین‌شناسی بوده و شامل داسیت پورفیری، آندزیت پورفیری و توف‌های دیاترم برشی هستند. داسیت پورفیری متشکل از پلاژیوکلاز خودشکل تا بی‌شکل، کوارتزهای گردشده و مقدار کمتر بیوتیت است. بلورهای پلاژیوکلاز شدیداً دگرسان‌شده (رسی و سرسیستی‌شده) و در مواردی تنها قالب آن باقی‌مانده است. داسیت پورفیری در مناطق جنوب‌خاوری ساری‌گونی به‌عنوان کوارتز داسیت پورفیری و در جنوب آق داغ به‌عنوان داسیت پورفیری درشت‌بلور مطرح می‌شود. آندزیت پورفیری متشکل از پلاژیوکلاز ماکل‌دار خودشکل همراه با زونینگ، کوارتز و هورنبلند است. بخش عمده دیاترم برشی متشکل از توف سنگی داسیتی، توف بلورین داسیتی، توف لایه‌بندی‌شده و توف سنگی برشی است.

### روش مطالعه

تعداد ۳۰۰ نمونه سنگی از ۲۵ گمانه حفاری (از مجموع بیش از ۲۰۰ گمانه حفاری) و زون‌های سطحی برداشت شد و تعداد ۱۰۰ مقطع نازک-صیقلی و صیقلی تهیه‌شده از آن، توسط میکروسکوپ دومنظوره ZEISS Axioplan 2 در دانشگاه خوارزمی و مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی شیمی‌کانی‌های سولفیدی و تورمالین در رگه‌های کانی‌سازی شده، مقاطع نازک-صیقلی منتخب در بررسی‌های میکروسکوپی، به‌وسیله دستگاه میکروسکوپ الکترونی<sup>۱</sup> مدل Cameca SX100 ساخت کشور فرانسه با قطر پرتو ۵ میکرومتر، ولتاژ ۲۰ کیلو الکترون ولت (KeV)، جریان ۲۰ نانو آمپر و زمان تابش بین ۱۵ تا ۲۵ ثانیه مورد تجزیه نقطه‌ای قرار گرفت. تعداد ۱۰ مقطع دوبر صیقل از کانی کوارتز همراه با رگه‌های کوارتز-تورمالین برشی و کوارتز-سولفید مگنتیت (رگه مرحله اول و دوم)، رگه‌های کوارتز-پیریت-استینیت (مرحله سوم) و کوارتز و کلسیت همراه با رگه‌های کوارتز-کلسیت-پیریت-گالن-اسفالریت

سریستی شدید سنگ دیواره و سیلیسی شدن همراه هستند (شکل ۳-E). رگه‌های برشی کوارتز-تورمالین دارای ضخامت‌هایی در حد چند میلی‌متر تا ده‌ها سانتی‌متر بوده و به‌صورت سیمان غالب (سیمان تورمالینی) (شکل ۳-D) و یا قطعات غالب (اغلب سنگ میزبان داسیتی) (شکل ۳-F) مشاهده می‌شود. پهنه برشی و دگرسانی سریستی همراه با آن در نزدیک به تپه ساری‌گونی بیشترین گسترش را دارد و دارای وسعت تقریباً یک کیلومتر مربع است. بافت رسوبی در حاشیه این برش‌های کوارتز-تورمالینی قابل مشاهده است (شکل ۳-D). در سمت جنوب تپه ساری‌گونی، توده اصلی برش‌های کوارتز-تورمالینی با یک دگرسانی گسترده سریستی شدن رخنمون دارد. به سمت خارج سیستم، در سمت باختر ساری‌گونی، رگه‌های برش تورمالینی عقیم و بدون کانی‌سازی با ضخامت‌های کمتر از ده سانتی‌متر مشاهده می‌شود (شکل ۳-G). رگه‌های برشی کوارتز-تورمالین به سمت تپه آق‌داغ ادامه یافته و به تدریج مقدار تورمالین کاهش یافته، به طوری که در تپه آق‌داغ رگه‌ها بدون تورمالین هستند.

رگه-رگچه‌های کوارتز-پیریت-استینیت و رگه‌های کوارتز-پیریت-آنتیموان-رالگار-اورپینت در حاشیه سیستم برشی با روند غالب شمال‌شمال‌خاور-جنوب‌جنوب‌باختر از ساری‌گونی به سمت آق‌داغ تداوم دارند و دارای ضخامت‌های از سه سانتی‌متر تا بیست سانتی‌متر هستند. در سمت ساری‌گونی مقدار رالگار و اورپینت کمتر (شکل ۳-H) و به سمت آق‌داغ به بیشترین حد خود می‌رسند (شکل ۳-I و J). سیلیسی شدن همراه با این رگه‌ها رخ داده است. در خارجی‌ترین بخش سیستم کانی‌سازی، رگه‌های کوارتز-کلسیت-پیریت-گالن-اسفالریت با روند غالب شمال‌شمال‌خاور-جنوب‌جنوب‌باختر و ضخامتی در حد چند سانتی‌متر تشکیل شده است (شکل ۳-K و L) که دارای کانی‌سازی نقره به‌صورت ادخال‌های تتراهدريت در گالن است. دگرسانی غالب همراه با این رگه‌ها، دگرسانی پروپیلیتیک (کلریتی) است.

(مرحله پنجم) با جهت برش مناسب برای بررسی میان‌بارهای سیال تهیه و با دستگاه گرمایش و سرمایش Linkam مدل THMS600 و میکروسکوپ نوری مدل ZEISS در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران مورد بررسی قرار گرفت. کالیبراسیون دستگاه طی عمل گرمایش برابر  $\pm 0.6$  تا دمای ۴۱۴ درجه سانتی‌گراد با ماده استاندارد نیرات سزیم و طی عمل سرمایش برابر  $\pm 0.2$  تا دمای ۹۴/۳- درجه سانتی‌گراد با مایع استاندارد n-Hexane انجام شد.

### کانه‌زایی و دگرسانی

شواهد صحرایی نشان می‌دهد که کانه‌زایی، در فاصله بین دو تپه ساری‌گونی و آق‌داغ (شکل ۳-A) تشکیل شده و اغلب به‌صورت سیستم گرمابی رگه-رگچه‌ای و برشی است که متشکل از پنج سیستم رگه‌ای: (۱) رگه-رگچه‌های کوارتز-مگنتیت-سولفید در اعماق (۴۰۰ تا ۴۵۰ متر)، (۲) برش‌های گرمابی کوارتز-تورمالین، (۳) رگه‌های اپی‌ترمال کوارتز-پیریت-استینیت حاوی طلا، (۴) رگه‌های اپی‌ترمال استینیت-رالگار-اورپینت حاوی طلا و (۵) رگه‌های کوارتز-کلسیت-پیریت-گالن-اسفالریت حاوی تتراهدريت در حاشیه سیستم است. روند غالب رگه‌ها، شمال‌شمال‌خاور-جنوب‌جنوب‌باختر و شیب آنها از حالت عمودی تا ۷۰ درجه به سمت باختر-شمال‌باختر تا روند شمالی-جنوبی با شیب به سمت باختر متغیر است. رگه‌های کوارتز-سولفید-مگنتیت (شکل ۳-B) با ضخامت‌های چند میلی‌متر تا ۶ سانتی‌متر زیر زون اصلی کانی‌سازی اپی‌ترمال و برشی شده کوارتز-تورمالین مشاهده می‌شود (شکل ۳-C) که توسط رگه‌های بعدی کوارتز-تورمالین برشی (شکل ۳-D)، قطع شده است. دگرسانی پتاسیک (با ضخامت محدوده در حد چندین سانتی‌متر) به مقدار کمتر فلیک همراه با رگه‌های کوارتز-سولفید-مگنتیت تشکیل شده که از این نظر مشابه دگرسانی در سیستم‌های پورفیری است. رگه‌ها و سیمان‌های برشی کوارتز-تورمالین، بعد از رگه‌های کوارتز-سولفید-مگنتیت تشکیل شده است و با دگرسانی





**شکل ۳.** A: موقعیت مناطق معدنی ساری گونی و آق‌داغ (دید به سمت شمال)، B: رگه‌های کوارتز-سولفید-مگنتیت اولیه، C: برش‌های کوارتز-تورمالین رگه‌های کوارتز-سولفید-مگنتیت اولیه را قطع کرده است، D: رگه‌ها و برش‌های کوارتز-تورمالین با سیمان غالب دارای بافت رسوبی در حاشیه رگه، E: نمونه دستی دگرسانی سریستی همراه با برش‌های کوارتز-تورمالین، F: رگه‌ها و برش‌های کوارتز-تورمالین با قطعات غالب در سنگ میزبان داسیتی، G: رگه‌ها و برش‌های کوارتز-تورمالین عقیم، H: رگه‌های کوارتز-پیریت-استینیت، I و J: رگه‌های کوارتز-پیریت-استینیت-رالگار-اورپیمت، K: نمونه دستی گالن و L: رگه‌های کوارتز-کلسیت-پیریت-گالن-اسفالریت حاوی اذخال‌های تتراهدريت

**Fig. 3.** A: View of the Sari Gunay and Agh Dagh mining districts (view is to North), B: early quartz-sulfide-magnetite veins, C: breccias quartz-tourmaline cuts early quartz-sulfide-magnetite veins, D: matrix supported quartz-tourmaline veining and brecciation with sedimentary textures, E: hand specimen of sericitic alteration associated with breccia quartz-tourmaline vein, F: clast supported quartz-tourmaline veining and brecciation with dacite host rock, G: barren quartz-tourmaline veining and brecciation, H: quartz-pyrite-stibnite vein, I and J: quartz-pyrite-stibnite-realgar-orpiment vein, K: hand specimen of galena, and L: quartz-calcite-pyrite-galena-sphalerite veins with tetrahedrite inclusion

## کانی‌شناسی و شیمی کانه‌ها

**رگه‌های کوارتز-سولفید-مگنتیت:** این رگه‌ها حاوی کانی‌سازی سولفیدی مس با بافت انتشاری و شامل مگنتیت، کالکوپیریت، تتراهدريت (نسل اول) و پیریت (نسل اول) همراه با مقادیر کمی بورنیت و کانی‌های سوپرژن کالکوسیت و کولیت هستند (شکل ۴-A و B). بیوتیت ثانویه و کوارتز به‌عنوان کانی‌های مهم دگرسانی پتاسیک همراه با این مرحله از کانه‌زایی محسوب می‌شوند. بلورهای پیریت نسل اول به‌صورت خودشکل در حاشیه توسط پیریت با درصد آرسنیک بالاتر (نسل سوم) احاطه شده است (شکل ۵-A). تتراهدريت و تنانیت همراه با کانی‌های هیپوزن و سوپرژن مس در این رگه‌ها یافت می‌شوند (شکل ۵-B و C). ترکیب شیمیایی کالکوپیریت نزدیک به ترکیب استوکیومتری آن است و تنها دارای ۰/۱ تا ۰/۵۷ درصد وزنی آرسنیک است (جدول ۱). کالکوسیت سوپرژن دیگر کانی سولفیدی مهم در رگه‌های مرحله اول کانی‌سازی است و دارای مقادیر قابل توجهی از آرسنیک (۰/۵۰ تا ۰/۶۲ درصد وزنی)، سرب (۰/۵۲ تا ۳/۹۱ درصد وزنی) و آنتیموان (۰/۲۷ تا ۷/۶۱ درصد وزنی) است (جدول ۱). مقادیر بالای سرب در ترکیب کالکوسیت، احتمالاً به‌دلیل ادخال‌های گالن در ترکیب آن است که این فرضیه در تصاویر الکترون بازگشتی تأیید شده است (شکل ۵-C). مقادیر بالای آنتیموان نیز احتمالاً به‌دلیل وجود ادخال‌های استینیت و یا جانشینی آنتیموان و مس در ترکیب کالکوسیت است که با توجه به عدم شناسایی ادخال‌های استینیت، فرضیه دوم محتمل‌تر است.

برای شناسایی کانی‌های گروه فلهور از نمودارهای ارائه‌شده توسط سک و همکاران (Sack et al., 2002) استفاده شد و مشخص شد که تتراهدريت و تنانیت سولفوسالت‌های همراه با کانی‌های سولفیدی کالکوپیریت و کالکوسیت هستند (شکل ۶-A و B). در ترکیب تتراهدريت و تنانیت، مقادیر بالای سرب (به ترتیب ۰/۶۷ تا ۸/۶۹ و ۰/۷۰ تا ۰/۷۶ درصد وزنی) شناسایی شده که ممکن است به‌دلیل وجود ادخال‌های گالن همراه با این مرحله از کانی‌سازی باشد. مقادیر بالای آرسنیک

در تتراهدريت (۰/۷۶ تا ۱/۶۹ درصد وزنی) به‌دلیل جانشینی عنصری بین آرسنیک و آنتیموان است.

**رگه‌های کوارتز-تورمالین برشی:** این رگه‌ها متشکل از پیریت‌های درشت‌بلور نسل دوم همراه با باطله اصلی کوارتز و تورمالین است. تورمالین به‌صورت تیغه‌ای (تورمالین نسل اول) و شعاعی (تورمالین نسل دوم) مشاهده می‌شود (شکل ۴-C). تورمالین اغلب به‌صورت تیغه‌ای بوده و همراه با کوارتز و سرسیت تشکیل شده است (شکل ۵-D و E). پیریت نسل دوم همراه با این رگه‌ها دارای ادخال‌هایی از روتیل است که در بررسی‌های الکترون مایکروپروب تشخیص داده شده است. ترکیب شیمیایی تورمالین‌های نسل اول و دوم شبیه به هم است و تفاوت چشم‌گیری از نظر ترکیب شیمیایی بین آنها مشاهده نشد (جدول ۲). بر اساس مقادیر (Ca, Na, K) در تورمالین و بود یا نبود فضای خالی در موقعیت x، تورمالین‌ها به سه گروه تورمالین‌های کلسیک، قلیایی، و انواعی که موقعیت x آنها خالی است، تقسیم می‌شوند (Hawthorne and Henry, 1999) که تورمالین‌های رگه‌های برشی کوارتز-تورمالین وابسته به نوع قلیایی و اشباع از Al هستند (شکل ۶-C). برای شناسایی تورمالین از نمودار  $X_{vacan}/X_{vacan}+Na$  در برابر  $Fe/Fe+Mg$  (Slack et al., 1993)، استفاده شد که تورمالین‌های مورد بررسی در گستره در اویت قرار گرفته‌اند (شکل ۶-D). نمونه‌های تورمالین گرمایی نسبت به نوع ماگمایی از منیزیم غنی‌تر و از آهن و تیتانیوم فقیرتر هستند (Tindle et al., 2002). در نمودار  $Ca/(Ca+Na)$  vs.  $Mg/(Mg+Fe)$  (Tindle et al., 2002)، تورمالین‌های رگه‌های برشی، دارای مقادیر کم آهن و مقدار بالای منیزیم بوده و از نوع گرمایی هستند (شکل ۶-E). برای بررسی جانشینی عنصری در تورمالین‌های مورد بررسی از نمودار  $R1+R2$  در مقابل  $R3$  نیز استفاده شد (Trumbull and Chaussidon, 1999) که خود بر اساس نمودار پایه ارائه‌شده توسط منینگ (Manning, 1982) است (  $x=R1=Ca+Na$ ,  $y=R2=Fe+Mg+Mn$ ,  $z=R3=Al+1.33Ti$  ) در این نمودار، ترکیب

شورلیت-دراویت نزدیک به مرکز نمودار قرار می‌گیرد ( $R1+R2=4, R3=6$ ). تورمالین‌های گرمایی نسبت به شورلیت-دراویت از آلومینیم فقیرتر و تورمالین‌های گرانی و پگماتی از آلومینیم غنی‌تر هستند. تورمالین‌های منطقه معدنی ساری گونی، بیشتر فقیر از آلومینیم و غنی از منیزیم هستند که احتمالاً نشان‌دهنده دو رخداد جانشینی است (Trumbull and Chaussidon, 1999):  $\{Al\} \{Mg, Fe, Na\}$  (۱)؛ که نشان‌دهنده تورمالین‌های خالی از لحاظ قلبایی است و ۲) جانشینی  $Al-O$  ( $(Mg, Fe)OH$ )، که نشان‌دهنده تورمالین‌های خالی از لحاظ پروتون است. نمونه‌های مورد بررسی بیشتر تمایل به خارج از قلمرو بین دو نمودار یعنی روند تورمالین‌های خالی از لحاظ قلبایی قرار می‌گیرند. نمونه‌هایی که در خارج از محدوده بین این دو بردار قرار می‌گیرند، گرمایی هستند (Trumbull and Chaussidon, 1999).

**رگه‌های کوارتز-پیریت-استیبینیت-رالگار-اورپیمنت:** این کانی‌سازی اپی‌ترمال متشکل از رگه‌های نوع سوم (کوارتز-پیریت غنی از استیبینیت) و رگه‌های نوع چهارم (کوارتز-پیریت-استیبینیت غنی از رالگار و اورپیمنت) است. در این کانه‌زایی رورشدی پیریت با آرسنیت پیریت نسل سوم مشاهده می‌شود که به آن پیریت دوده‌ای یا سوتی پیریت گفته می‌شود (شکل ۴-۴). طلا همراه با پیریت‌های دوده‌ای (آرسنیت پیریت) است. طلا به‌صورت نامرئی است و شناسایی طلا در این پیریت‌ها سخت بوده و تنها سه نقطه در تجزیه الکترون مایکروپروب از این پیریت‌ها دارای مقادیر بالای طلا بود که در این پژوهش ثبت شده است (شکل ۴-۵). تجزیه الکترون مایکروپروب طلا نشان داد که مقدار طلا بین ۶۱/۳۴ تا ۸۴/۱۰ درصد وزنی بوده و مقادیر گوگرد و آهن در آن به ترتیب برابر ۲/۷۵ تا ۹/۰۱ و ۱ تا ۷/۱۲ درصد وزنی است. مقدار نقره در ترکیب طلا بین ۰/۵۷ تا ۰/۶۲ درصد وزنی است. ترکیب شیمیایی طلا نشان داد که مجموع عناصر تجزیه‌شده به صد درصد نرسیده و باید بررسی‌های بیشتری برای شناسایی ترکیب طلا در کانسار ساری گونی انجام شود. شیمی پیریت نیز نشان داد که برخی از بلورهای پیریت دارای

منطقه‌بندی بوده و در حاشیه دارای مقدار آرسنیک بالاتری هستند (شکل ۵-۵). مقدار آرسنیک در آرسنیت پیریت برابر ۱/۸۰ تا ۹/۶۵ درصد وزنی است. مقدار طلا در نمونه‌های تجزیه‌شده برخلاف انتظار کم بوده و تنها در نمونه دارای آرسنیک بالاتر، مقدار طلا نیز تا ۰/۴۰ درصد وزنی می‌رسد، هرچند که در یک نمونه طلا تا یک درصد نیز مشاهده شده است (جدول ۱). مقدار بیسموت در پیریت حداکثر تا ۰/۳۰ درصد وزنی و مقدار نیکل آن نیز حداکثر تا ۰/۶۶ درصد وزنی است. در رگه-رگه‌های کوارتز-پیریت-استیبینیت-رالگار-اورپیمنت، بیشترین کانی‌سازی طلا رخ داده و هم‌زمان با تشکیل آرسنیت پیریت، طلا ناپایدار و تشکیل شده است. رالگار و اورپیمنت اغلب به‌صورت هم‌رشد و با یکدیگر مشاهده شده است (شکل ۴-۴) و در مناطق اکسید شده، به اسکورودیت ( $FeAsO_4 \cdot 2H_2O$ ) تبدیل شده‌اند (شکل ۵-۵). استیبینیت به‌صورت رگه و پرکننده‌ی فضای خالی و شکل بلوری ستونی تشکیل شده و در مناطق سطحی به استیبیکونیت ( $Sb_3O_6(OH)$ ) تبدیل شده است (شکل ۴-۴ و H). استیبینیت با رالگار و اورپیمنت در اغلب نمونه‌ها (به‌خصوص در منطقه آق‌داغ) همراه است (شکل ۵-۴ و H). مقدار طلا در نمونه‌های غنی از استیبینیت متغیر است؛ اما برخلاف رگه‌های اورپیمنت-رالگار، رگه‌های استیبینیت همیشه دارای مقداری طلا هستند. مقدار آرسنیک در استیبینیت بین ۴/۰۷ تا ۶/۶۹ درصد وزنی متغیر بوده و نشان می‌دهد جانشینی بین آرسنیک و آنتیموان در استیبینیت شدید است (جدول ۱). مقدار جیوه در استیبینیت تا ۰/۱۵ درصد وزنی نیز رسیده و ادخال‌هایی از کانی‌های جیوه‌دار از قبیل سینابر در استیبینیت و کانی‌های آرسنیک‌دار در بررسی‌های الکترون مایکروپروب مشاهده شده است (شکل ۵-۵). مقدار سرب و بیسموت (۰/۰۲ تا ۰/۲۲ درصد وزنی) نیز در استیبینیت قابل توجه بوده که احتمالاً به دلیل ادخال‌های ریز گالن در آن است.

مقدار سلنیم در استیبینیت بین ۰/۰۳ تا ۰/۰۷ درصد وزنی بوده که مقادیر ناچیزی به‌شمار می‌روند. مقادیر سلنیم (۰/۱۴ تا ۰/۲۶ درصد وزنی)، آهن (۰/۱۰ تا ۰/۱۶ درصد وزنی) و جیوه (زیر حد



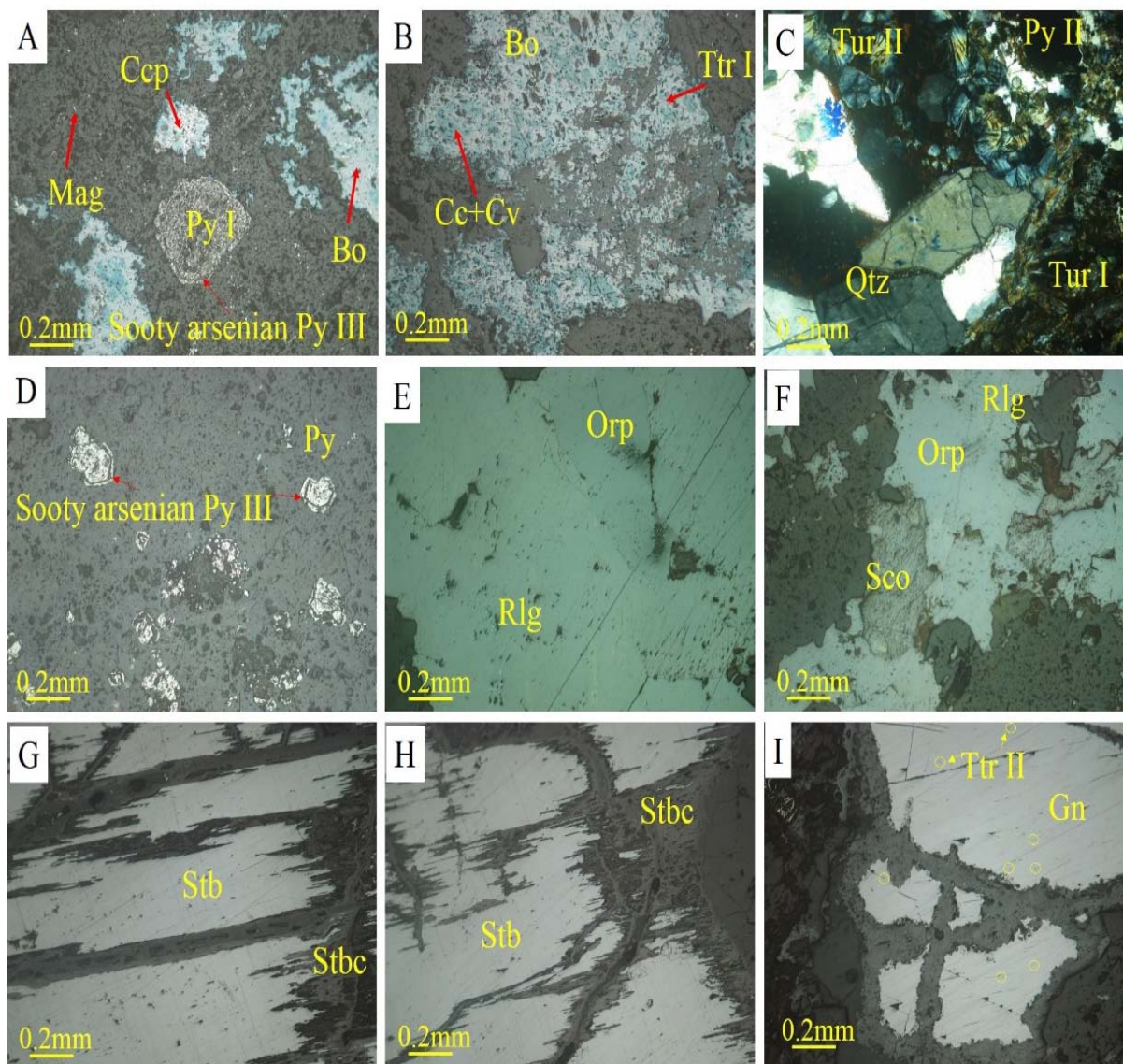
و گاز (V) در رگه‌های مرحله سوم و پنجم (شکل A-8 و B) و سه‌فازی مایع+گاز+جامد هالیت (L+V+S) و تک فاز گاز (V) در رگه‌های مرحله اول و دوم هستند (شکل C-8 و D). میان‌بارهای سیال دارای فاز جامد هالیت کوارتز مرحله اول (رگه‌های کوارتز-سولفید-مگنتیت)، دمای همگن شدن به فاز مایع (Thv-I) در بازه دمایی ۳۲۰ تا ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد (شکل A-9) با شوری ۳۵ تا ۴۵ درصد معادل وزنی نمک طعام است (شکل B-9). در میان‌بارهای سیال دارای فاز جامد هالیت کوارتز مرحله دوم (رگه‌های برشی کوارتز-تورمالین)، دمای همگن شدن هالیت هم قبل و هم بعد از همگن شدن نهایی به فاز مایع رخ داده است. در سیالاتی که دمای همگن شدن هالیت (۱۹۱ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) قبل از همگن شدن نهایی (۲۰۳ تا ۳۹۸ درجه سانتی‌گراد) رخ داده، شوری میان‌بار برابر ۳۱/۴۳ تا ۴۲ درصد معادل وزنی نمک طعام است؛ درحالی‌که میان‌بارهای سیالی که دمای همگن شدن هالیت (۲۸۰ تا ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد) بعد از همگن شدن نهایی (۲۶۰ تا ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد) رخ داده، شوری میان‌بار برابر ۴۰ تا ۴۵/۰۱ درصد معادل وزنی نمک طعام است (Sterner et al., 1988) (شکل A-9 و B). دمای ذوب آخرین بلور یخ یا  $T_{mice}$  در میان‌بارهای سیال دوفازی مرحله سوم کانه‌زایی برابر ۸- تا ۱- درجه سانتی‌گراد معادل با شوری ۱/۷۰ تا ۱۱/۷۴ درصد معادل وزنی نمک طعام است (Bodnar, 1993). دمای همگن شدن میان‌بارهای سیال دو فازی غنی از مایع در مرحله سوم کانه‌زایی برابر ۲۰۰ تا ۳۳۹ درجه سانتی‌گراد است. میان‌بارهای سیال دو فازی غنی از مایع در کوارتز و کلسیت مرحله پنجم کانی‌سازی به ترتیب دمای ۱۶۵ تا ۲۳۰ و ۱۷۰ تا ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد و شوری ۱ تا ۷/۲۰ و ۳ تا ۴ درصد معادل وزنی نمک طعام را نشان می‌دهند (Bodnar, 1993). چگالی میان‌بارهای سیال سه فازی بین ۰/۶۸۲ و ۱/۰۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب و برای سیالات دوفازی ۰/۶۸۲ و ۰/۹۶۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب است (Wilkinson, 2001).

سنجش تا ۰/۱۹ درصد وزنی) در رالگار بیشتر از اورپیمنت (به ترتیب برابر ۰/۰۵ تا ۰/۱۳، ۰/۰۲ تا ۰/۰۷ و ۰/۰۱ تا ۰/۰۳ درصد وزنی) است (جدول ۱)؛ درحالی‌که مقدار آنتیموان در اورپیمنت (۰/۲۲ تا ۰/۴۶ درصد وزنی) بیشتر از آنتیموان در رالگار (۰/۰۷ تا ۰/۳۵ درصد وزنی) است که نشان از محلول جامد بین اورپیمنت و استینیت و جانشینیه‌های آرسنیک و آنتیموان است. این جانشینیه در استینیت بیشتر نمایان شده است.

**رگه‌های کوارتز-کلسیت-پیریت-گالن-اسفالریت-تتراهدریت:** فاز پایانی کانی‌سازی متشکل از رگه‌هایی از کوارتز-کلسیت-پیریت نسل چهارم همراه با گالن و اسفالریت و تراهدریت نوع سوم ادخال در گالن با بافت حفره‌دار است که معمولاً در اطراف کانی‌سازی ساری‌گونی و دورتر از رگه‌های کانی‌سازی مرکزی Au-Sb-Hg-As یافت می‌شوند و کانی‌سازی گالن بیشتر از اسفالریت بوده و در حاشیه نیز به سروریت تبدیل شده است. ادخال‌هایی از تراهدریت در گالن مشاهده شده است (شکل I-4 و I-5). شیمی گالن شبیه به ترکیب استوکویومتری آن است و تنها مقادیری نقره (۰/۰۱ تا ۰/۰۸ درصد وزنی) و جیوه (۰/۰۱ تا ۰/۰۵ درصد وزنی) در آن ثبت شده است. سولفوسالت‌های نقره‌دار (تتراهدریت) به صورت ادخال‌های ریز در گالن مشاهده شد که دارای مقادیر نقره تا ۶/۱۰ درصد وزنی و آرسنیک تا ۰/۴۰ درصد وزنی است. شکل ۷، توالی پاراژنتیکی مراحل تشکیل رگه‌های کانه‌دار را در منطقه ساری‌گونی نشان داده است.

### میان‌بارهای سیال

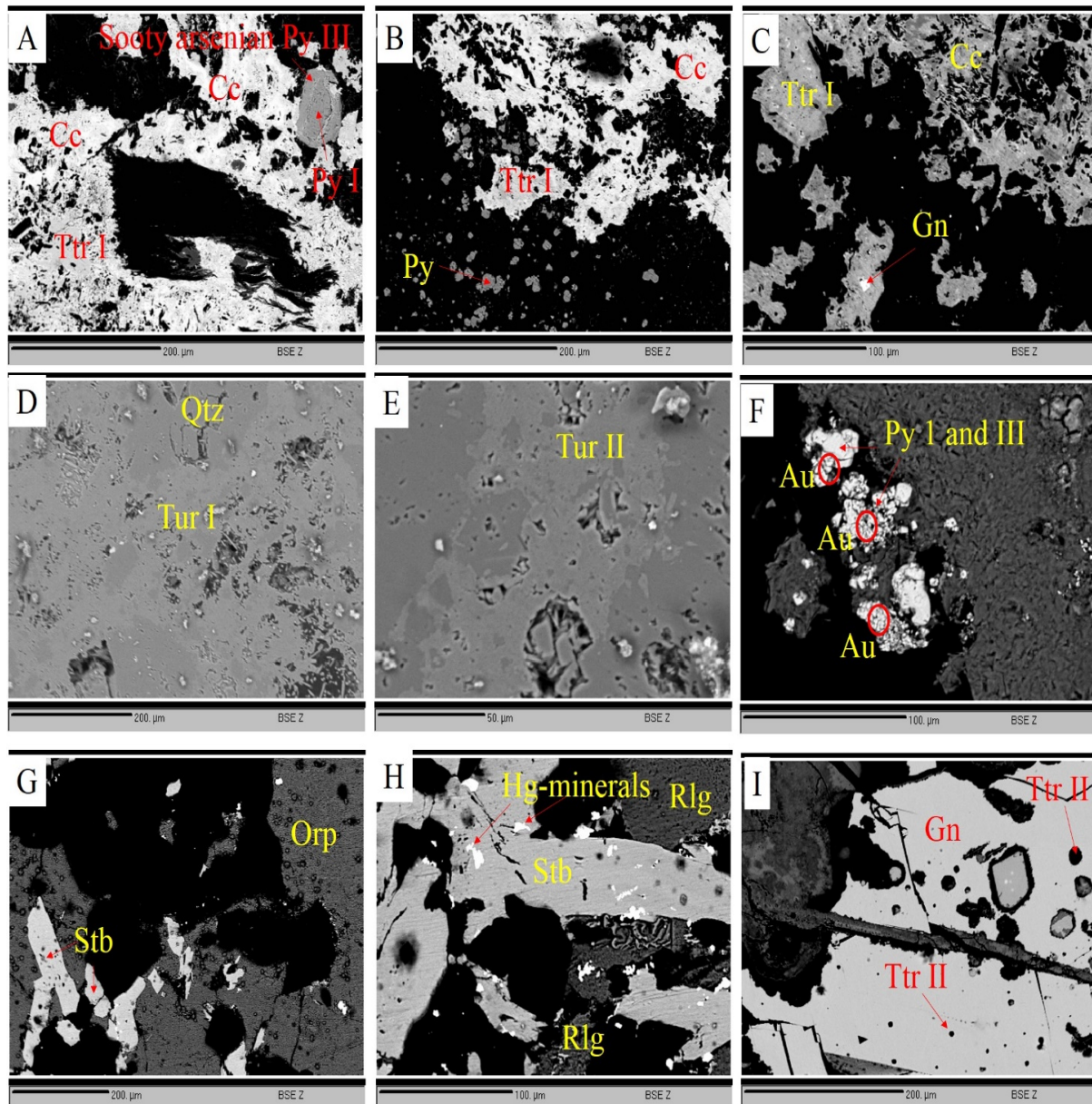
بررسی میان‌بارهای سیال بر روی کوارتز و کلسیت همراه با کانه‌زایی مرحله اول، دوم، سوم و پنجم در کانسار ساری‌گونی انجام شد. در مرحله چهارم سیال مناسب برای بررسی میان‌بارهای مناسب پیدا نشد. بررسی‌های سنگ‌نگاری نشان داد که میان‌بارهای سیال به شکل‌های کروی، میله‌ای، بیضوی و بی‌شکل با ابعاد ۴ تا ۳۰ میکرون (میانگین ۱۵ میکرون) و بر اساس تقسیم‌بندی شفرد و همکاران (Shepherd et al., 1986) از انواع دوفازی مایع+گاز غنی از مایع (L+V) و تک فاز مایع (L)



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی از کانی‌سازی در کانسار ساری‌گونی، A و B: کانی‌سازی سولفیدی مس در رگه‌های مرحله اول، C: تورمالین نسل اول و دوم در رگه‌های مرحله دوم همراه با پیریت نسل دوم، D: پیریت ریزبلور دوده‌ای آرسنیک‌دار نسل سوم در اطراف بلورهای خودشکل پیریت نسل اول، E و F: همراهی رالگار و اورپیمنت که در حاشیه به اسکورودیت تبدیل شده است، G و H: بلورهای تیغه‌ای استیبینیت که در حاشیه به استیبیکونیت تبدیل شده است و I: ادخال‌های تتراهدریت در گالن در رگه‌های مرحله پنجم. علائم اختصاری بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ccp: کالکوپیریت، Cc: کالکوسیت، Cv: کولیت، Bo: بورتیت، Ttr: تتراهدریت، Tur: تورمالین، Stb: استیبینیت، Stbc: استیبیکونیت، Qtz: کوارتز، Rlg: رالگار، Orp: اورپیمنت، Sco: اسکورودیت، Gn: گالن، Py: پیریت، Mag: مگنتیت).

**Fig. 4.** Photomicrograph of ore mineralization in the Sari Gunay deposit, A and B: Cu sulfide mineralization in the stage I veins, C: tourmaline type I and II in the stage II veins associated with type II pyrite, D: euhedral type I pyrite overgrown by fine-grain sooty arsenian type III pyrite, E and F: association of realgar and orpiment that altered to scorodite in rims, G and H: tabular stibnite crystals that altered to stibconite in rims, and I: tetrahedrite inclusions in galena in the stage V veins. Mineral abbreviation from Whitney and Evans (2010) (Ccp: chalcopyrite, Cc: chalcocite, Cv: covellite, Bo: bornite, Ttr: tetrahedrite, Tur: tourmaline, Stb: stibnite, Stbc: stibconite, Qtz: quartz, Rlg: realgar, Orp: orpiment, Sco: scorodite, Gn: galena, Py: pyrite, Mag: magnetite).





شکل ۵. تصاویر الکترون برگشتی از کانی‌سازی در کانسار ساری‌گونی، A، B و C: کانی‌سازی سولفیدی مس همراه با تتراهدریت نسل اول در رگه‌های مرحله اول، D و E: تورمالین‌های نسل اول و دوم در رگه‌های کوارتز-تورمالین برشی مرحله دوم، F: پیریت دوده‌ای حاوی ادخال‌های بسیار ریز طلا، G و H: کانی‌سازی استیبنیت همراه با رالگار و اورپیمنت که دارای ادخال‌هایی از کانی‌های جیوه‌دار هستند و I: ادخال‌های تتراهدریت نسل دوم در گالن، رگه‌های مرحله پنجم. علائم اختصاری بر اساس ویتنی و اوایز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cc: کالکوسیت، Ttr: تتراهدریت، Tur: تورمالین، Stb: استیبنیت، Qtz: کوارتز، Rlg: رالگار، Orp: اورپیمنت، Au: طلا، Gn: گالن، Py: پیریت، Hg: جیوه).

**Fig. 5.** BSE images of ore mineralization in the Sari Gunay deposit, A, B and C: Cu sulfide mineralization associated with type I tetrahedrite in the stage I veins, D and E: tourmaline type I and II in the breccia quartz-tourmaline stage II veins, F: very fine-grain Au-bearing sooty arsenian pyrite, G and H: stibnite mineralization associated with realgar and orpiment, showing inclusions of Hg-bearing minerals, I: type II tetrahedrite inclusions in galena at the stage V veins. Mineral abbreviation from Whitney and Evans (2010) (Cc: chalcocite, Ttr: tetrahedrite, Tur: tourmaline, Stb: stibnite, Qtz: quartz, Rlg: realgar, Orp: orpiment, Au: gold, Gn: galena, Py: pyrite, Hg: mercury).

جدول ۱. نتایج الکترون مایکروپروب کانه‌های فلزی در کانسار ساری گونی (n.d: مقادیر کمتر از حد تشخیص و n.a: مقادیر تجزیه نشده)

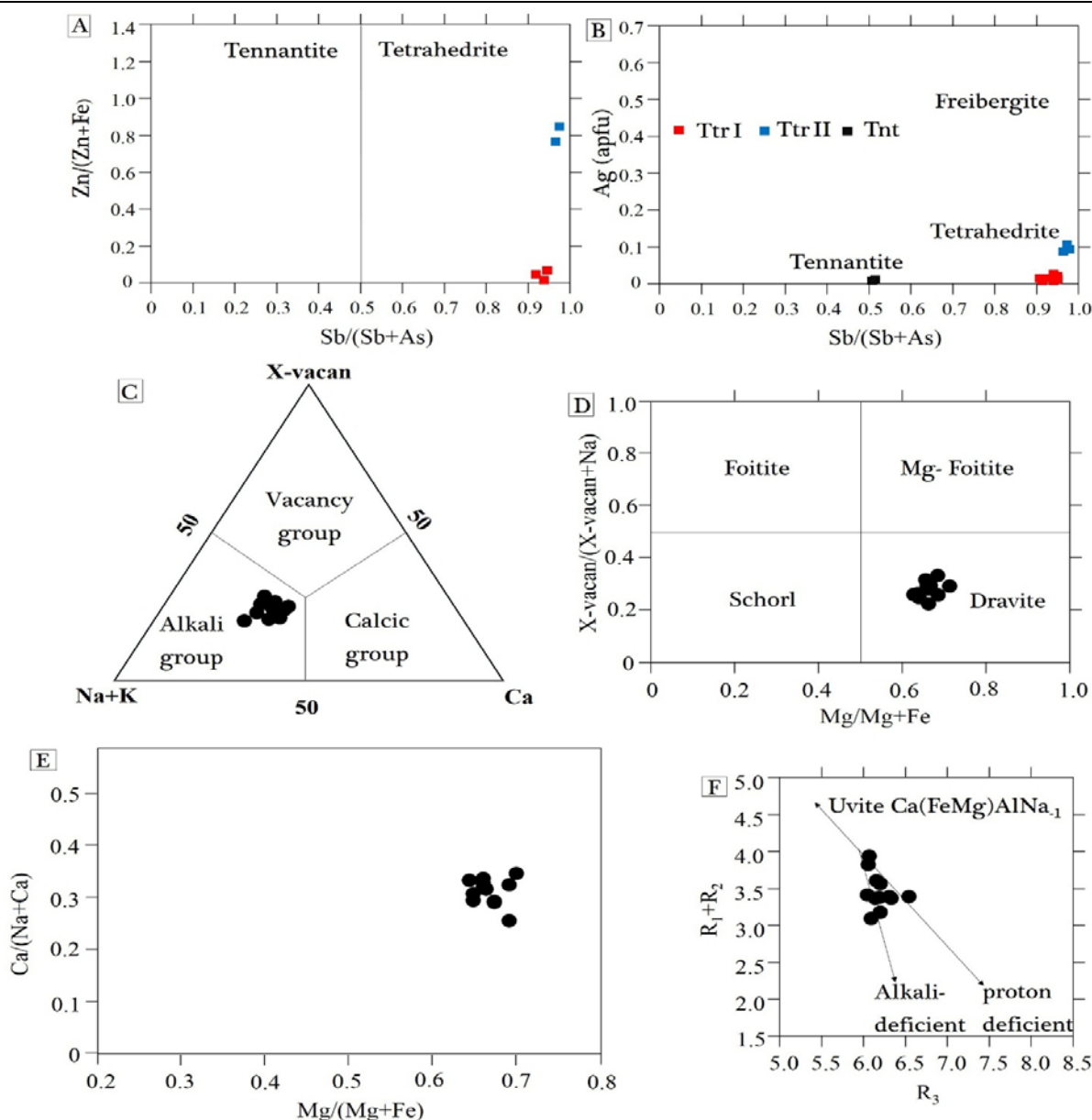
**Table 1.** Electron microprobe data of main mineral phases in the Sari Gunay. (n.d: below detection limit and n.a: not analyzed)

	Realgar (stage IV)				Orpiment (stage IV)				Stibnite (stage III)			
S	30.32	29.81	28.97	29.59	37.93	36.11	37.68	38.13	28.16	27.93	28.49	27.83
Fe	0.16	0.10	0.12	0.15	0.07	0.06	0.02	0.04	0.07	0.01	0.10	0.04
Cu	n.d	0.01	n.d	n.d	0.02	n.d	n.d	0.04	0.07	n.d	0.16	0.02
Zn	0.02	0.06	0.03	0.03	n.d	0.01	0.02	n.d	n.d	n.d	n.d	0.03
As	67.86	68.70	69.57	68.89	60.78	62.82	61.39	60.46	5.03	4.07	5.09	5.34
Se	0.20	0.26	0.14	0.19	0.12	0.13	0.05	0.11	0.06	0.07	0.05	0.06
Ag	0.01	0.01	n.d	0.02	n.d	n.d	0.01	n.d	n.d	n.d	0.08	0.03
Au	n.d	n.d	n.d	n.d	0.12	0.02	0.11	n.d	n.d	0.06	0.06	n.d
Pb	0.33	0.06	0.07	0.11	0.21	0.08	0.03	0.12	0.22	0.23	0.11	0.15
Sb	0.35	0.07	0.16	0.17	0.28	0.46	0.22	0.22	66.43	67.09	66.31	65.92
Te	n.d	0.03	0.04	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Bi	0.06	n.d	0.09	0.18	0.17	0.15	0.11	0.13	0.17	0.16	0.10	0.27
Hg	n.d	0.10	0.19	n.d	0.03	0.01	0.02	0.01	n.d	n.d	n.d	n.d
Total	99.31	99.21	99.38	99.33	99.73	99.82	99.66	99.26	100.21	99.62	100.55	99.69
	Stibnite (stage III)				Tetrahedrite (stage I)							
S	27.87	28.06	27.94	27.84	28.80	18.31	26.53	27.69	27.39	26.69	27.36	22.96
Fe	0.07	0.04	0.09	0.10	0.11	0.55	0.26	0.23	0.25	0.13	0.11	0.58
Cu	n.d	0.05	0.03	0.09	n.d	54.79	46.97	46.67	46.65	46.62	45.29	46.78
Zn	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0.01	n.d	n.d	0.04	n.d	n.d	n.d
As	4.77	5.79	6.68	5.24	5.41	0.76	1.04	1.31	1.29	1.27	1.23	1.69
Se	0.06	n.d	0.03	0.03	0.06	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Ag	0.05	0.10	n.d	0.05	n.d	n.d	0.05	n.d	n.d	n.d	0.05	n.d
Au	n.d	n.d	n.d	n.d	0.07	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Pb	0.02	0.13	0.22	0.13	0.20	8.69	3.01	0.67	0.91	1.41	1.85	4.02
Sb	66.06	65.71	64.18	65.43	64.35	17.65	21.75	23.27	23.25	23.65	23.91	23.69
Te	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Bi	0.12	0.02	0.05	0.20	0.22	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a
Hg	n.d	n.d	n.d	0.10	0.15	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a
Total	99.02	99.90	99.22	99.21	99.37	100.76	99.61	99.84	99.78	99.77	99.80	99.72
	Gold (stage III)				Tennantite (stage I)		Chalcocite (stage I)			Chalcopyrite (stage I)		
S	24.84	9.01	6.78	2.75	26.71	26.15	24.21	25.12	23.36	24.22	33.55	33.62
Fe	0.13	7.12	4.18	1.00	3.54	2.84	0.19	0.10	0.18	0.43	32.61	32.65
Cu	50.55	n.d	n.d	n.d	42.82	42.15	62.91	70.59	66.37	73.71	32.75	32.72
Zn	0.01	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0.05	n.d	n.d	0.01
As	1.30	0.06	0.04	0.04	12.50	13.84	0.62	0.13	0.89	0.05	0.57	0.10
Se	n.d	0.01	0.01	0.01	0.01	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0.01
Ag	n.d	0.62	0.57	0.60	0.01	0.10	0.08	0.09	n.d	n.d	0.04	0.08
Au	n.d	61.34	62.30	84.10	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0.03	0.00
Pb	1.92	n.d	n.d	n.d	0.70	0.76	3.91	0.65	4.59	0.52	n.d	n.d
Sb	21.45	0.03	0.01	0.02	13.41	14.10	7.61	2.35	4.06	0.27	0.01	0.01
Te	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Bi	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Hg	n.d	0.60	0.35	0.51	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Total	100.20	78.79	74.24	89.03	99.81	99.94	99.53	99.03	99.50	99.20	99.56	99.20

ادامه جدول ۱. نتایج الکترون مایکروپروب کانه‌های فلزی در کانسار ساری گونئی (n.d: مقادیر کمتر از حد تشخیص و n.a: مقادیر تجزیه‌نشده)

**Table 1 (Continued).** Electron microprobe data of main mineral phases in the Sari Gunay. (n.d: below detection limit and n.a: not analyzed)

	Tetrahedrite (stage V)			Galena (stage V)			Pyrite and arsenian pyrite (stage III and IV)				
<b>S</b>	27.50	27.25	27.35	10.55	10.85	11.10	52.63	53.08	47.54	55.28	56.15
<b>Fe</b>	n.d	0.02	0.04	0.01	n.d	n.d	46.77	46.52	42.15	43.24	43.70
<b>Cu</b>	39.62	39.24	38.41	0.01	n.d	0.04	n.d	n.d	n.d	0.23	0.28
<b>Zn</b>	0.10	0.10	0.15	0.05	0.04	0.06	n.d	n.d	n.d	0.18	0.07
<b>As</b>	0.40	0.10	0.21	0.05	0.10	0.08	0.13	0.14	9.65	0.08	0.14
<b>Se</b>	0.01	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
<b>Ag</b>	5.30	6.10	5.74	0.01	0.05	0.08	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
<b>Au</b>	n.d	0.01	0.01	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0.60	n.d	n.d
<b>Pb</b>	n.d	0.01	0.02	88.40	88.54	88.26	0.31	0.26	0.32	0.17	0.17
<b>Sb</b>	26.60	26.21	27.10	0.03	0.02	0.01	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
<b>Ni</b>	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0.17	n.d	0.36	0.13
<b>Te</b>	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0.05	n.d	n.d	n.d
<b>Bi</b>	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0.16	0.25	0.29	0.11	0.10
<b>Hg</b>	n.d	0.01	0.02	0.05	0.01	0.04	0.05	n.d	n.d	n.d	n.d
<b>Total</b>	99.05	99.05	99.53	99.16	99.61	99.67	100.05	100.47	100.55	99.65	100.74
<b>Pyrite and arsenian pyrite (stage III and IV)</b>											
<b>S</b>	52.40	52.67	53.16	52.14	51.90	52.06	52.73	52.18	52.81	52.32	52.91
<b>Fe</b>	44.16	42.53	42.79	42.84	42.64	43.70	45.44	44.55	44.78	45.13	44.60
<b>Cu</b>	0.32	0.24	1.07	0.26	0.78	0.20	n.d	0.27	n.d	n.d	1.97
<b>Zn</b>	0.14	0.13	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0.07	n.d	0.21
<b>As</b>	2.10	3.05	2.21	4.04	2.89	3.12	2.07	3.22	0.23	2.00	n.d
<b>Se</b>	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0.11	0.01	0.05	n.d	0.01	n.d
<b>Ag</b>	n.d	0.06	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
<b>Au</b>	n.d	n.d	n.d	n.d	0.40	n.d	n.d	n.d	0.40	n.d	n.d
<b>Pb</b>	0.13	0.27	0.41	0.43	0.02	0.26	0.24	0.16	0.16	0.24	0.21
<b>Sb</b>	n.d	n.d	0.14	n.d	0.01	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
<b>Ni</b>	0.66	0.59	0.42	0.27	0.90	n.d	n.d	n.d	0.62	0.62	0.11
<b>Te</b>	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0.01	0.01	n.d	n.d
<b>Bi</b>	0.08	n.d	0.12	0.10	0.09	0.20	0.14	0.19	0.30	0.17	0.17
<b>Hg</b>	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0.01	n.d	n.d
<b>Total</b>	99.99	99.54	100.32	100.08	99.63	99.65	100.63	100.63	99.39	100.49	100.18
<b>Pyrite and arsenian pyrite (stage III and IV)</b>											
<b>S</b>	52.50	52.78	52.21	51.64	51.11	51.37	51.22	51.72	51.00	47.14	51.97
<b>Fe</b>	45.58	44.81	45.38	44.56	45.97	44.18	45.77	45.24	45.62	45.65	45.75
<b>Cu</b>	n.d	0.07	0.23	0.18	0.10	0.06	0.03	0.12	0.09	0.08	0.11
<b>Zn</b>	n.d	n.d	0.07	0.02	0.09	0.15	n.d	n.d	n.d	0.03	n.d
<b>As</b>	0.05	3.09	0.03	2.27	0.98	2.83	1.80	1.86	1.85	5.24	2.02
<b>Se</b>	n.d	n.d	n.d	0.02	n.d	0.03	0.02	n.d	0.01	n.d	n.d
<b>Ag</b>	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
<b>Au</b>	n.d	n.d	0.30	0.42	0.34	0.48	n.d	n.d	n.d	1.00	n.d
<b>Pb</b>	0.18	0.04	0.34	0.18	0.20	0.20	0.24	0.11	0.27	0.10	0.14
<b>Sb</b>	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
<b>Ni</b>	n.d	n.d	0.30	n.d	0.42	n.d	0.29	0.06	0.58	0.25	n.d
<b>Te</b>	0.01	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0.03	n.d	n.d
<b>Bi</b>	0.34	0.18	0.16	0.15	0.21	0.24	0.28	0.24	0.20	0.24	0.01
<b>Hg</b>	n.d	n.d	0.05	0.08	0.01	0.01	n.d	n.d	0.02	n.d	n.d
<b>Total</b>	98.66	100.97	99.07	99.52	99.43	99.55	99.65	99.35	99.67	99.73	100.00



شکل ۶. A و B: تتراهدریت و تانتیت کانی‌های گروه فهلور در کانسار ساری گونی هستند، C: نمودار طبقه‌بندی بر اساس محتوی X-vacancy، Ca و Na+K تورمالین که نشان می‌دهد نمونه‌ها در گروه قلیایی واقع می‌شوند، D: ترکیب تورمالین در نمودار  $X\text{-vacancy}/(X\text{-vacancy}+Na)$  در برابر  $Mg/(Mg+Fe)$  که نشان می‌دهد نمونه‌های تورمالین از نوع دراویت هستند، E: ترکیب تورمالین در نمودار  $Ca/(Ca+Na)$  در برابر  $Mg/(Mg+Fe)$  و F: نمودار تغییرات ترکیب تورمالین در ارتباط با سازوکارهای جانشینی معمول در تورمالین را نشان می‌دهد. علائم اختصاری بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ttr: تتراهدریت، Tnt: تانتیت)

**Fig. 6.** A and B: Tetrahedrite and tenantite are fahllore group minerals in the Sari Gunay ore deposit, C: tourmaline classification diagram based on X-site vacancy, Ca and Na+K contents, showing that samples are plot in the alkali group tourmalines field, D: compositions of tourmalines plotted on X-vacancy / X-vacancy+Na vs. Mg/(Mg+Fe), showing that tourmaline samples are dravite type, E: compositions of tourmaline on the Ca/(Na+Ca) vs. Mg/(Mg+Fe), and F: compositional variations in tourmalines are shown in relation to common substitution mechanisms in tourmalines. Mineral abbreviation from Whitney and Evans (2010) (Ttr: tetrahedrite, Tnt: Tennantite).





۱۵۱ جدول ۲. نتایج تجزیه الکترون مایکروپروب تورمالین نوع اول در رگه‌های برشی کوارتز-تورمالین

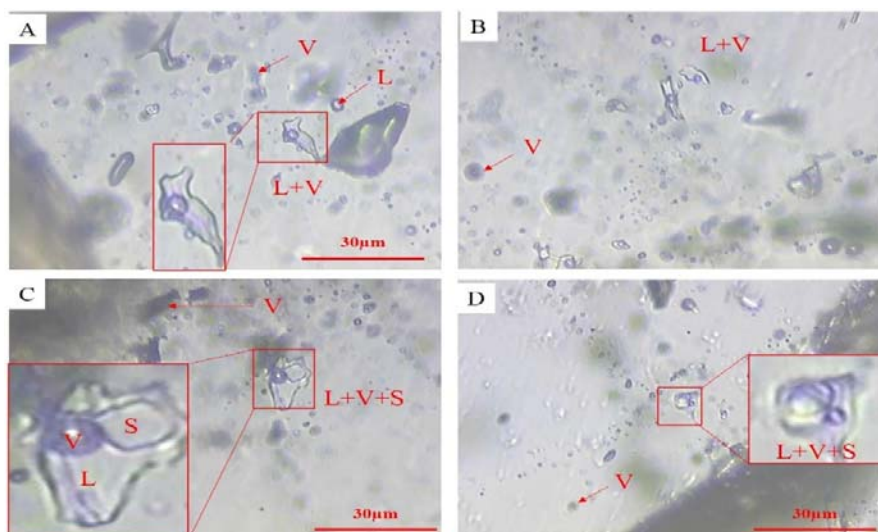
**Table 2 (Continued).** Electron microprobe data of type I tourmaline in the breccia quartz-tourmaline vein

<b>Tourmaline Type II</b>					
<b>SiO<sub>2</sub></b>	37.22	36.95	38.56	36.81	37.98
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.49	0.40	0.59	0.32	0.61
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	33.48	33.74	31.62	31.52	33.95
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.02	0.12	0.02	0.02	0.12
<b>FeO</b>	6.44	6.35	6.25	6.78	6.59
<b>MnO</b>	0.12	0.11	0.06	0.11	0.08
<b>MgO</b>	7.13	7.03	7.03	8.86	7.22
<b>CaO</b>	1.56	1.78	1.68	1.81	1.63
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1.69	1.63	1.81	1.51	1.50
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.04	0.02	0.02	0.01	0.02
<b>F</b>	0.61	0.52	0.34	0.37	0.40
<b>H<sub>2</sub>O</b>	2.45	1.65	1.45	1.35	1.42
<b>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	10.15	10.00	10.70	10.60	9.46
<b>Li<sub>2</sub>O</b>	0.56	0.40	0.35	0.38	0.41
<b>O=F</b>	0.26	0.22	0.14	0.16	0.17
<b>Total</b>	101.70	100.48	100.34	100.29	101.22
<b>Structural formula based on 31 anions (O, OH, F)</b>					
<b>Si<sup>4+</sup></b>	6.061	6.135	6.391	6.151	6.287
<b>Al<sup>3+</sup></b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
<b>T-site sum</b>	6.061	6.135	6.391	6.151	6.287
<b>B<sup>3+</sup></b>	2.853	2.866	3.061	3.057	2.703
<b>Al<sup>3+</sup></b>	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
<b>Z-site sum</b>	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
<b>Al<sup>3+</sup></b>	0.425	0.603	0.177	0.207	0.623
<b>Ti<sup>4+</sup></b>	0.060	0.050	0.074	0.040	0.076
<b>Cr<sup>3+</sup></b>	0.003	0.016	0.003	0.003	0.016
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	1.731	1.740	1.737	2.207	1.782
<b>Mn<sup>2+</sup></b>	0.017	0.015	0.008	0.016	0.011
<b>Fe<sup>2+</sup></b>	0.877	0.882	0.866	0.947	0.912
<b>Li<sup>+</sup></b>	0.367	0.267	0.233	0.255	0.273
<b>Y-site sum</b>	3.479	3.573	3.098	3.675	3.693
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	0.272	0.317	0.298	0.324	0.289
<b>Na<sup>+</sup></b>	0.534	0.525	0.582	0.489	0.481
<b>K<sup>+</sup></b>	0.008	0.004	0.004	0.002	0.004
<b>X-site sum</b>	0.814	0.846	0.884	0.815	0.774
<b>OH<sup>-</sup></b>	2.661	1.828	1.603	1.505	1.568
<b>F<sup>-</sup></b>	0.314	0.273	0.178	0.196	0.209
<b>Mineral Name</b>	Dravite	Dravite	Dravite	Dravite	Dravite

Mineral	Stage I	Stage II	Stage III	Stage IV	Stage V	Supergene Alteration
Arsenian pyrite						
And pyrite	Py I	Py II	Py III		Py IV	
Chalcopyrite						
Tetrahedrite						
Tenantite	Ttr I				Ttr II	
Bornite						
Magnetite						
Tourmaline		Tur I and II				
Stibnite						
Realgar						
Orpiment						
Galena						
Sphalerite						
Hg-Te minerals						
Gold						
Quartz						
Calcite						
Covellite						
Calcocite						
Cerussite						
Scorodite						
Stibconite						
Alteration:						
Potassic						
Silicification						
Sericitization						
Tourmalinization						
Propylitization						

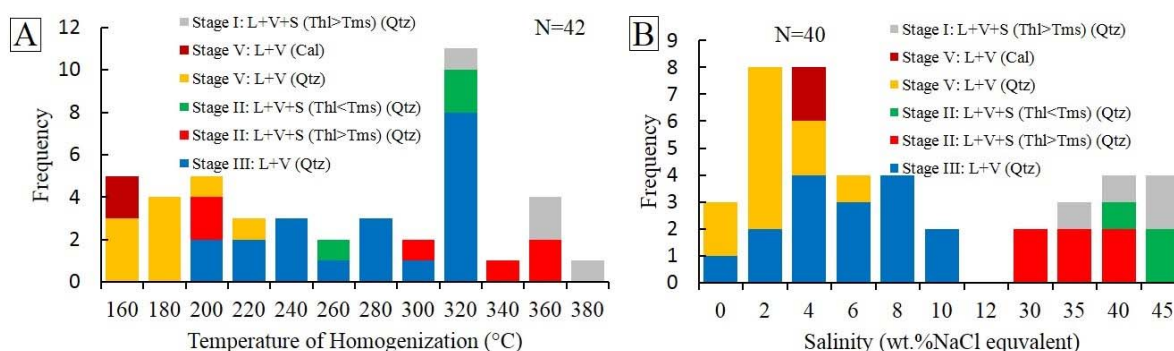
شکل ۷. توالی پاراژنتیکی در کانسار ساری گونی

Fig. 7. Paragenetic sequence in the Sari Gunay ore deposit



شکل ۸. A: تصاویر میکروسکوپی از میان‌بارهای سیال کانسار ساری گونی، میان‌بارهای دوفازی و تک‌فازی مایع و گاز در رگه‌های کوارتز-پیریت-استیبینیت مرحله سوم، B: میان‌بارهای دوفازی غنی از مایع در کوارتز همراه با رگه‌های مرحله پنجم، C: تصویر میان‌بار سیال سه‌فازی دارای فاز جامد هالیت و میان‌بارهای تک‌فازی گاز در رگه‌های کوارتز-تورمالین برشی مرحله دوم و D: سیالات سه‌فازی دارای فاز جامد هالیت و میان‌بارهای تک‌فازی گاز در رگه‌های کوارتز-سولفید-مگنتیت مرحله اول

Fig. 8. Photomicrograph of fluid inclusion in the Sari Gunay deposit, A: fluid inclusion image showing monophasic V and L and two phase L+V inclusions in the Qtz-Py-Stb vein in the stage II, B: liquid rich two phase fluid inclusion in the quartz associated with stage V veins, C: fluid inclusion image including three phase L+V+S and monophasic V inclusions in the brecciated stage II Qtz-Tur veins, and D: three phase L+V+S and monophasic V inclusions in the stage I Qtz-sulfide-magnetite veins



شکل ۹. A: هیستوگرام دمای تغییرات همگن شدن میان‌بار و B: هیستوگرام تغییرات شوری بر حسب درصد وزنی معادل نمک در کانسار ساری گونی  
**Fig. 9.** A: homogenization temperatures (Th) histogram, and B: salinity histogram (wt.% NaCl equivalent) in the Sari Gunay deposit

پتاسیک و شوری و دمای بالای سیال کانی‌سازی شده، به‌نظر می‌رسد که محیط تشکیل مرحله اول در عمق در ارتباط با کانسارهای پورفیری در نظر گرفته شود. در مرکز دیاترم‌های برشی، برش‌های کوارتز-تورمالین با یک دگرسانی گسترده سریستی تشکیل شده که رگه‌های برشی، رگه‌های مرحله اول را قطع کرده و بر روی آن تشکیل شده است. دیاترم برشی در عمق کم تشکیل شده است؛ زیرا توف سنگی داسیتی با داسیت همراه هستند. بررسی‌های میان‌بارهای سیال در رگه‌های برشی کوارتز-تورمالین دمای ۲۰۳ تا ۳۹۸ درجه سانتی‌گراد با شوری ۳۱/۴۳ تا ۴۵/۰۱ درصد وزنی معادل نمک طعام را نشان می‌دهد که تقریباً منطبق با نتایج ارائه شده توسط ریچاردز و همکاران (Richards et al., 2006) تا ۲۴۶ تا ۳۶۰ درجه سانتی‌گراد با شوری ۳۴/۴ تا ۴۶/۱ درصد وزنی معادل نمک طعام) است. تورمالین‌های موجود در برش‌های کوارتز-تورمالینی از نوع دراویت هستند که نشان‌دهنده بالا بودن مقدار منیزیم در مقایسه با آهن و منشأ گرمابی آن است (Burt, 1989)؛ زیرا دراویت کانی معمول تورمالین در کانسارهای رگه‌ای گرمابی است. مقادیر  $FeO^*$  (FeO/FeO+MgO) برای تورمالین‌های مورد بررسی، کمتر از ۰/۶ بوده که خاستگاه گرمابی آن را نشان می‌دهد. با توجه به وجود قطعات سنگ میزبان داسیتی و توف سنگی داسیتی، می‌توان گفت که این برش‌ها انتقال عمودی کم داشته‌اند و در

### نتیجه‌گیری

کانی‌سازی در کانسار ساری گونی در ارتباط با فعالیت‌های آتشفشانی با سن ۱۱ میلیون منطبق بر دگرسانی سریستی مرتبط با کانی‌زایی (۱۰/۳ تا ۱۰/۸ میلیون سال) رخ داده است (Richards et al., 2006). کانی‌سازی در دو محدوده ساری گونی و آق‌داغ مشاهده شده که در هر دو محدوده دیاترم‌های برشی وجود دارد که اغلب از واحدهای داسیت و توف داسیتی تشکیل شده است. کانی‌سازی مرحله اول به‌صورت رگه-رگچه‌های کوارتز-سولفید-مگنتیت در ۴۰۰ تا ۴۵۰ متر زیر سطح توپوگرافیکی فعلی تشکیل شده و عیار مس در آنها بین ۰/۲ تا ۰/۳ درصد و عیار طلا برابر ۰/۳ تا ۰/۵ گرم در تن گزارش شده است (Richards et al., 2006). دمای تشکیل این رگچه‌ها بین ۳۲۰ تا ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد و شوری بین ۳۵ تا ۴۵ درصد وزنی معادل نمک طعام است.

با توجه به وجود سیالات تک‌فاز گازی و سیالات سه‌فازی با شوری بالا، فشار پایین را برای تشکیل این رگه‌ها در نظر گرفته است (Richards et al., 2006). بررسی‌های الکترون میکروپروب در این رگه‌ها، کانی‌سازی تتراهدريت و به مقدار کمتر تنانیت را همراه با کانی‌های سولفیدی کالکوپریت و بورنیت نشان داده است. با توجه بافت انتشاری و کانی‌سازی تتراهدريت و مگنتیت همراه با سولفیدهای مس، دگرسانی

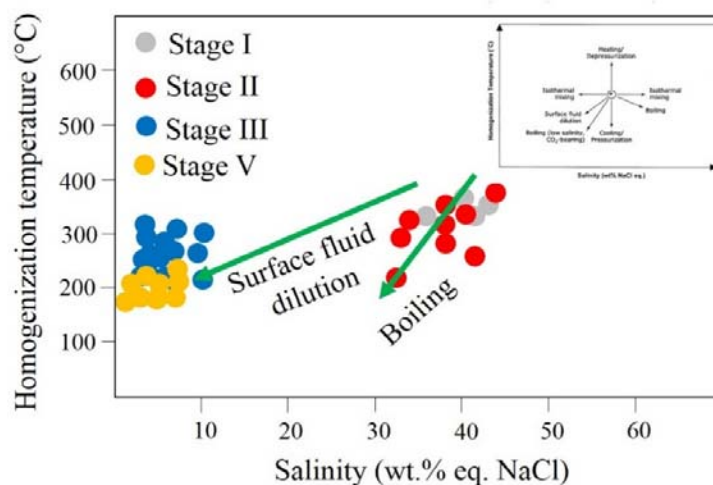
در این رگه‌ها شده است. این جانیشینی و تغییرات سریع در شیمی سیال در دماهای کمتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد (Dickson et al., 1975; Nakai et al., 1986). جانیشینی‌های آرسنیک و آنتیموان در گروه محلول جامد استینیت-اورپیمنت رایج بوده و با تغییرات شیمی سیال می‌تواند کانی‌های حدواسط این گروه جامد تشکیل شود (Bonazzi et al., 2005). میان‌بارهای سیال دوفازی در رگه‌های کوارتز-پیریت-استینیت-رالگار-اورپیمنت، دمای ۲۰۰ تا ۳۳۹ درجه سانتی‌گراد با شوری ۱/۷۰ تا ۱۱/۷۴ درصد وزنی معادل نمک طعام را نشان می‌دهند. وجود سیالات دوفازی همراه با فراوانی بالای سیالات تک‌فازی گازی نشان‌دهنده شرایط فشار پایین و جوشش در سیالات این مرحله بوده و کاهش دما هم‌زمان با تغییرات شیمی سیال باعث شده که طلا ناپایدار و ته‌نشین شود. در اثر کاهش سریع دما و فشار پیریت‌های غیر استوکیومتری غنی از آرسنیک با سرعت ته‌نشین شده‌اند و جانیشینی آرسنیک با شعاع یونی بزرگ‌تر از آهن، فضای مناسب برای قرارگیری طلا در ساختمان پیریت آرسنیک را امکان‌پذیر ساخته است (Garnier et al., 2007). گرچه اورپیمنت/رالگار در مناطق طلادار دیده می‌شود؛ اما بود یا نبود آن الزاماً شاخصی از بود یا نبود طلا نیست. در سیستم آق‌داغ، مقدار زیادی رالگار و اورپیمنت دیده می‌شود؛ اما کانی‌سازی طلا دیده نمی‌شود. در ساری‌گونی، مقدار استینیت بالاتر بوده و با ناپایداری آنتیموان، طلا نیز ناپایدار شده و در ادامه با افزایش مقدار آرسنیک در سیال کانه‌زا، رالگار و اورپیمنت در مراحل پایانی این رگه‌ها تشکیل شده است. در مناطقی که مقدار آنتیموان بیشتر است، کانی‌سازی طلا بالاتر بوده و همچنین در پیریت‌های طلادار نیز مقدار آنتیموان بالا گزارش شده که نشان از همبستگی معنادار طلا و آنتیموان است که در کانسارهای مشابه نیز گزارش شده است (Maddox et al., 1998). این سیستم رگه‌ای در سرتاسر منطقه متغیر بوده است؛ به طوری که در رگه‌هایی تنها پیریت و کوارتز وجود دارد و در برخی دیگر استینیت و رالگار و اورپیمنت نیز آنها را همراهی می‌کند. فاز پایانی کانی‌سازی، رگه‌های گالن-

اثر کاهش ناگهانی فشار در عمق کم انفجار درجا رخ داده و باعث خردشدن سنگ میزبان و ایجاد قطعات برشی زاویه‌دار سنگ میزبان در یک سیمان تورمالینی همراه با پیریت و کوارتز شده است. عیار طلا و مس در این رگه‌ها کم بوده و تنها در مناطقی که با رگه‌های بعدی هم‌پوشانی دارند، افزایش عیار نشان می‌دهند.

مرحله اصلی کانی‌سازی طلا هم‌زمان با تشکیل رگه‌های کوارتز-پیریت همراه با استینیت-رالگار و اورپیمنت همراه با دگرسانی سیلیسی شدن است. وجود این کانی‌ها نشان داد که در این مرحله، مقدار آرسنیک و آنتیموان افزایش داشته که شرایط فیزیکوشیمیایی انحلال و ناپایداری آنها شبیه به طلاست. هم‌زمان با تشکیل آرسنیت پیریت، طلا نیز به صورت محلول جامد و ادخال‌های بسیار ریز در ساختار آرسنیت پیریت (پیریت دوده‌ای) تشکیل شده است. در کانسارهای زیادی، طلا در فازهایی از پیریت مشاهده شده که مقدار آرسنیک در آن بالاتر بوده و یا آرسنوپیریت تشکیل شده است (Cabri et al., 1989; Cathelineau et al., 1989; Wu et al., 1990; Fleet and Mumin, 1997; Garnier et al., 2007; Cepedal et al., 2008). نتایج سه نقطه تجزیه شیمیایی با الکترون میکروپروب نشان‌دهنده مقدار بالای طلا در ساختمان پیریت‌هایی است که بیشترین مقدار As/S را در ترکیب خود داشته‌اند. هرچه مقدار As/S در پیریت و آرسنیت پیریت بیشتر باشد، احتمال ناپایداری طلا در ساختمان آن بیشتر است (Fleet et al., 1993). طلای ریز نامرئی به صورت محلول جامد در ساختمان پیریت تشکیل شده و به سختی قابل شناسایی است و تنها سه ادخال بسیار ریز طلا در پیریت شناسایی شد (برای مثال به ویکنتیف (Vikentyev, 2015) مراجعه شود). ترکیب شیمیایی کانی‌ها در این رگه‌ها نشان داد که مقدار آنتیموان در کانی‌های رالگار و اورپیمنت و مقدار آرسنیک در استینیت بیشتر از ترکیب معمول این کانی‌هاست که بیانگر رخداد انحلال جامد ناپیوسته در سیستم است. تغییرات شیمی سیال، در دسترس بودن آرسنیک و آنتیموان در محلول و تغییرات P-T سیال باعث جانیشینی آرسنیک و آنتیموان در کانی‌های رالگار-اورپیمنت-استینیت

۱۰) که سیال مسئول کانی‌سازی در کانسار ساری گونی طی توالی پاراژنتیکی دچار کاهش دما و شوری شده است. میان‌بارهای سه فازی با شوری و دمای بالاتر مرحله اول در ارتباط با کانی‌سازی پورفیری است.

اسفالریت حاوی نقره بوده که در حاشیه سیستم همراه با دگرسانی سیلیسی شدن تشکیل شده است. دمای تشکیل این رگه‌ها بین ۱۶۵ تا ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد با شوری ۱ تا ۷/۲۰ درصد وزنی معادل نمک طعام است. نمودار شوری در برابر دمای همگن‌شدن (Wilkinson, 2001) نشان می‌دهد (شکل



شکل ۱۰. نمودار دمای همگن‌شدن در برابر شوری در میان‌بارهای سیال کانسار ساری گونی

Fig. 10. Plot of fluid inclusion homogenization temperature vs. salinity from the Sari Gunay ore deposit

سیال جوی، جانشینی‌های عنصری و ته‌نشینی طلا داده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سیستم کانی‌سازی در ناحیه ساری گونی و آق‌داغ (داشکسن سابق) متشکل از رگه‌ها و برش‌های مختلف با ترکیب کانی‌شناسی متفاوت بوده که احتمالاً بیانگر رخداد کانی‌سازی چند مرحله‌ای پورفیری-اپی‌ترمال است.

میان‌بارهای سیال رگه‌های برشی کوارتز-تورمالین که دارای شوری بالا بوده و همراه با دگرسانی سریسیتی شدن شدیدی است، بیانگر شرایط جوشش در این مرحله از کانی‌سازی است که نمودار شوری در برابر دمای همگن‌شدن نیز آن را تأیید می‌کند (شکل ۱۰). کاهش دما و شوری در مرحله سوم و پنجم چشم‌گیرتر شده و با کاهش دما به دلیل رقیق‌شدگی و اختلاط با

## References

Aghanabati, A., 2004. Geology of Iran. Geological Survey of Iran. Tehran, 586 pp. (in Persian)  
Asadi, H.H., Voncken, J.H.L., Kühnel, R.A. and Hale M., 2000. Petrography, mineralogy and geochemistry of the Zarshuran Carlin-like gold

deposit, northwest Iran. Mineralium Deposita, 35(7): 656–671.  
Bagherpour, H., Mokhtari, M.A.A., Kouhestani, H., Nabatian, G. and Mehdikhani, B., 2020. Intermediate-sulfidation Style of Epithermal Base Metal (Ag) Mineralization at the Qoyjeh



- Yeylaq Deposit, SW Zanjan – IRAN. *Journal of Economic Geology*, 11(4): 545–564. (in Persian with English abstract)
- Bodnar, R.J., 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683–684.
- Bonazzi, P., Lampronti, G.I., Bindi, L. and Zanardi, S., 2005. Wakabayashilite, [(As, Sb)6S9] [(As4S5): Crystal structure, pseudosymmetry, twinning and revised chemical formula. *American Mineralogist*, 90(7): 1108–1114.
- Boomeri, M., Biabangard, H. and Zeinadini, Z., 2019. Investigation of petrography, mineralogy and alteration of northern part of the Chahfiruzeh porphyry copper deposit, northwest of Shar-e-Babak, Kerman. *Journal of Economic Geology*, 11(1): 57–80. (in Persian with English abstract)
- Burt, D.M., 1989. Vector representation of tourmaline compositions. *American mineralogist*, 74(7–8): 826–839.
- Cabri, L.J., Chryssoulis, S.L., De Villiers, J.P.R., Gilles La-amme, J.H. and Buseck, P.R., 1989. The nature of invisible gold in arsenopyrite. *The Canadian Mineralogist*, 27(3): 353–362.
- Cathelineau, M., Boiron, M.C., Holliger, P., Marion, P. and Denis, M., 1989. Gold in arsenopyrites: crystal chemistry, location and state, physical and chemical conditions of deposition. In: R.R. Keays, W.R.H. Ramsay and D.I. Groves (Editors), *The Geology of Gold Deposits*. Economic geology monograph series, Economic Geology Publishing Co., USA, pp. 328–341.
- Cepedal, A., Fuente, M.F. and Martin-Izard, A., 2008. Gold-bearing As-rich pyrite and arsenopyrite from the El Valle gold deposit, Asturias, Northwestern Spain. *The Canadian Mineralogist*, 46(1): 233–247.
- Dickson, F.W., Radtke, A.S., Wiessberg, B.G. and Heropoulos, C., 1957. Solid solution of antimony, arsenic, and gold in stibnite (Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), orpiment (As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>) and realgar (As<sub>2</sub>S<sub>2</sub>). *Economic Geology*, 70(3): 591–594.
- Feleghari, H., 2014. Studies of alteration related to gold epithermal Sari Gunay ore deposit in the Kurdistan province using by Aster satellite, mineralogy and geochemistry evidences. M.Sc. thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, 123 pp.
- Fleet, M.E., Chryssoulis, S.L., MacLean, P.J., Davidson, R. and Weisener, C.G., 1993. Arsenian pyrite from gold deposits; Au and As distribution investigated by SIMS and EMP and color staining and surface oxidation by XPS and LIMS. *The Canadian Mineralogist*, 31(1): 1–17.
- Fleet, M.E. and Mumin, A.H., 1997. Gold-bearing arsenian pyrite andmarcasite and arsenopyrite from Carlin Trend gold deposits and laboratory synthesis. *American Mineralogist*, 82(1–2): 182–193.
- Garnier, V., Malo, M., Dubé, B., Chagnon, A. and Beaudoin, G., 2007. Carlin-type gold mineralization at Saint-Andréde-Restigouche, Gaspé Peninsula (Québec). *Canadian Appalachians. Mineralium Deposita*, 42(6): 639–662.
- Geranian, H., Tabatabaei, S.H., Asadi Harooni, H. and Mohamadi, A., 2015. Application of discrimination analysis and support vector machine methods for modelling in the epithermal gold deposits in Dashkasan area. *Iranian Journal of Mining Engineering*, 10(28): 53–65. (in Persian with English abstract)
- Hawthorne, F.C. and Henry, D.J., 1999. Classification of the minerals of the tourmaline group. *European Journal of Mineralogy*, 11(2): 201–215.
- Jankovic, S., 1997. The Carpatho–Balkanides and adjacent area: a sector of the Tethyan Eurasian metallogenic belt. *Mineralium Deposita*, 32(5): 426–433.
- Jankovic, S. and Petrascheck, W.E., 1987. Tectonics and metallogeny of the Alpine-Himalayan belt in the Mediterranean area and western Asia. *Episodes*, 10(3): 169–175.
- Maanijou, M., Puyandeh, N., Sepahi, A.A. and Dadfar, S., 2015. Mapping of hydrothermal alteration of Dashkasan (Sari Gunay) epithermal gold mine using Aster sensor images and XRD analysis. *Geosciences*, 24 (95): 95–104. (in Persian with English abstract)
- Maddox, L.M., Bancroft, G.M., Scaini, M.J. and Lorimer, J.W., 1998. Invisible gold: comparison of Au deposition on pyrite and arsenopyrite. *American Mineralogist*, 83(11–12): 1240–1245.
- Manning, D.A.C., 1982. Chemical and morphological variation in tourmalines from the

- Hub Kapong batholith of Peninsular Thailand. *Mineralogical Magazine*, 45(337): 139–147.
- Mehrabi, B., Alimohammadi, H., Farhadian Babadi, M. and Ghahramaninejad, F., 2016. Biogeochemical exploration in Sari Gunay gold deposit, Northwestern Iran. *Geopersia*, 6(2): 223–232.
- Mehrabi, B., Yardley, B.W.D. and Cann, J.R., 1999. Sediment-hosted disseminated gold mineralization at Zarshuran, NW Iran. *Mineralium Deposita*, 34(7): 673–696.
- Moradi, M., 2018. Mineralogy and gold geochemical distribution in the sulfide and oxide ores of the Dashkasan ore deposit (E Qorveh). M.Sc. thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran, 148 pp.
- Nakai, I., Yokoi H. and Nagashima K., 1986. Crystal chemistry of the system As-Sb-S (I): Synthesis of wakabayashilite and synthetic study on the solid solution in the As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> system. *Mineralogical Journal*, 13(4): 212–222.
- Niroumand, SH., Rastad, E., Rashidnezhad Omran N. and Ghaderi, M., 2013. Geology and mineralization of the Dashkasan (Sari Gunay) epithermal gold deposit, Sanandaj-Sirjan zone, east of Qorveh, Kordestan province. *Geosciences*. 3(88): 30–41. (in Persian with English abstract)
- Rastad, E., Niroumand SH. and Rashidnezhad Omran N., 2000. Genesis of SB-AS-AU deposit in volcano-plautonic complex of Dash-Kasan (east Qorveh, Kordestan province). *Geosciences*, 9(37–38): 2–23. (in Persian with English abstract)
- Reynolds, M., 2001. Mineralogical characterization of arsenical gold ores from the Dashkasan deposit. Iran, RioTinto Technical Services, United Kingdom, Report BR3029, 43 pp.
- Richards, J.P., Wilkinson, D. and Ullrich, T., 2006. Geology of the Sari Gunay epithermal deposit. *Economic Geology*, 101(8): 1455–1496.
- Sack, R.O., Kuehner S.M. and Hardy, L.S., 2002. Retrograde Ag-enrichment in fahlores from the Coeur d'Alene mining district, Idaho, USA. *Mineralogical Magazine*, 66(1): 215–229.
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H., 1985. A Practical guide to fluid inclusion studies. Blackie and Sons, Glasgow, 239 pp.
- Slack, J.F., Palmer, M.R., Stevens, B.P.J. and Barnes, R.G., 1993. Origin significance of tourmaline-rich rocks in the Broken Hill district, Australia. *Economic Geology*, 88(3): 505–541.
- Sterner, S.M., Hall, D.L. and Bodnar, R.J., 1988. Synthetic fluid inclusions. V. Solubility relations in the system NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O under vapor-saturated conditions: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(5): 989–1005.
- Tindle, A.G., Breaks, F.W. and Selway, J.B., 2002. Tourmaline in petalite-subtype granitic pegmatites: evidence of fractionation and contamination from the Pakeagama Lake and Separation Lake areas of northwestern Ontario, Canada. *The Canadian Mineralogist*, 40(3): 753–788.
- Trumbull, R.B. and Chaussidon, M., 1999. Chemical and boron isotopic composition of magmatic and hydrothermal tourmalines from the Sinceni granite-pegmatite system in Swaziland. *Chemical Geology*, 153(1–4): 125–137.
- Vikentyev, I.V., 2015. Invisible and microscopic gold in pyrite: Methods and new data for massive sulfide ores of the Urals. *Geology of Ore Deposits*, 57(4): 237–265.
- Wilkinson, D.L., 2004. Sari Gunay (Formerly Dashkasan) gold project Kordestan Province, Iran. Zar Kuh Mining Company, Tehran, Annual Report 1, 52 pp.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusion in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1): 229–272.
- Wu, X., Delbove, F. and Touray, J.C., 1990. Conditions of formation of gold-bearing arsenopyrite: a comparison of synthetic crystals with samples from Le ChaÅtelet gold deposit Creuse, France. *Mineralium Deposita*, 25(4): S8–S12.
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Tashi, M., Fereydouni, Z. and Saed, M., 2019. Comparison of geochemistry and porphyry copper mineralization efficiency in granitoids of the Sanandaj-Sirjan and Urumieh-Dokhtar zones; using rare earth elements geochemistry. *Journal of Economic Geology*, 11(1): 1–23. (in Persian with English abstract)



## Fluid inclusions, mineralogy and mineral chemistry of the porphyry-epithermal Sari Gunay epithermal ore deposit - the Kurdistan province

Behzad Mehrabi, Majid Ghasemi Siani\* and Tayebbeh Fazeli

*Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran*

Submitted: Oct. 05, 2019

Accepted: Mar. 01, 2020

**Keywords:** *Mineralogy, Mineral chemistry, Fluid inclusions, Epithermal, Veining and breccia mineralization system, Sari Gunay*

### Introduction

The Sari Gunay veining and breccia epithermal gold mineralization is situated between the Urumieh-Dokhtar magmatic belts and the Sanandaj-Sirjan metamorphic zone in central-NW Iran. The Sari Gunay gold deposit is hosted by a middle Miocene volcanic complex that has been formed in the two Sari Gunay and Agh Dagh hills with ~2 km distance. The Sari Gunay volcanic complex consists of dacite to rhyolite volcanics and its coeval volcanoclastic rocks. There are some published data on the Sari Gunay ore deposit (e.g. Richards et al., 2006), while mineral chemistry of silicate and sulfide minerals have not been studied previously. The main goal of the present investigation is to determine type of mineralization based on detailed mineralogy, mineral chemistry, and fluid inclusion evidence and previously published data by Richards et al. (2006).

### Materials and methods

A total of 300 samples were collected systematically from 25 drill cores and outcrops.

A total of 100 samples from different mineralization veins were selected for optical microscopy and after comprehensive study by stereomicroscope that was carried out at the Kharazmi University and Iranian Mineral Processing Research Center (IMPRC). The selected mineral phases were analyzed by an Electron Microprobe Analysis (EPMA) Cameca X-100 with 20 kV and 20 nA, with a beam diameter of 5  $\mu\text{m}$  at the IMPRC. Micro thermometric

analyses were carried out on 10 doubly polished thin sections from breccia quartz-tourmaline and quartz-pyrite-arsenic sulfides-stibnite and quartz-tourmaline veins using a Linkam THMS 600 freezing-heating stage, mounted on a ZEISS Axioplan2 research microscope at the IMPRC.

### Results

Field geology and petrographic observations indicate that veining and breccia ore mineralization in the Sari Gunay ore deposit have occurred in different levels including quartz-magnetite-sulfide veinlet in the deeper levels and brecciated quartz-tourmaline-sulfide veins in the shallow levels. Several high-grade gold-bearing veins and veinlets of quartz-pyrite-stibnite-realgar-orpiment with diverse abundance ratio have formed within, and finally silver-bearing quartz-base metals veins have been formed outward of the hydrothermal system. EPMA data indicate that gold has occurred in arsenian pyrite as solid solution and very fine inclusions. Stibnite, realgar and orpiment exhibits extensive range in As/Sb substitution. Hg-bearing minerals have been detected in stibnite and arsenian sulfide minerals and also rutile has been detected in pyrite by EPMA. According to EPMA evidence, all tourmalines are alkaline belonging to dravite-type which show hydrothermal origin of quartz-tourmaline breccia veins. Fluid inclusions in the first stage have homogenization to a liquid in the range of 320° to 380°C, corresponding to salinities of 35 to 45 wt. % NaCl equivalent. Moreover, fluid inclusions in quartz-tourmaline

\*Corresponding author Email: majid4225@yahoo.com

veins show homogenization to a liquid in the range of 203° to 398°C, corresponding to salinities of 31.43 to 45.01 wt. % NaCl equivalent based on Sterner et al. (1988). Fluid inclusions in quartz-pyrite-stibnite veins homogenized to a liquid between 200° and 339°C, with salinities of 1.70 and 11.74 wt. % NaCl equivalent, and finally base metal veins were formed by fluid with 165° and 230°C, with salinities of 1 and 7.20 wt. % NaCl equivalent based on Bodnar (1993).

### Discussion

Textural relationships and microscopic features allowed us to recognize five stages of veining; (1) quartz-magnetite-sulfide, followed by (2) quartz-tourmaline breccia, (3) quartz-pyrite-gold-stibnite, (4) quartz-pyrite-stibnite-realgar-orpiment-gold and (5) late Ag-bearing quartz-calcite-pyrite-galena-sphalerite. There is evidence of As/Sb substitution in stibnite-realgar-orpiment minerals. Moderate temperature and salinity features, presence of V and L rich in association with L+V fluid inclusion types, variation in fluid composition, and pressure fluctuation of the mineralizing fluid during the main stage of gold mineralization are the main highlights of the Sari Gunay epithermal deposit, whereas high salinity and temperatures with first quartz-sulfide-magnetite veins are consistent with porphyry ore mineralization in depth. Possibly rapid variations in the fluid chemistry and availability of enough As and Sb in the solution are responsible for As/Sb substitution, indicating that gold mineralization has occurred approximately at 250°C, which is supported by fluid inclusion data. A large As/Sb substitution range has also been reported by Mehrabi et al. (1999) in the Zarshuran ore deposit. In this condition, gold has occurred in mineral structure defected in arsenian pyrite due to substitution of Fe with large As ion. There are differences in core and rims of pyrite crystals on BSE images, reflecting lower As and higher S contents in the core of pyrite grains. Compositional zoning that has been found in pyrite represents rapid evolving conditions during ore mineral

precipitation, probably due to episodic hydrothermal fluid degassing. The correlation between gold content and degree of As-enrichment in arsenian pyrite could indicate that gold has precipitated from hydrothermal fluids on to the As-rich growth surfaces of pyrite (e.g. Cepedal et al., 2008). Decrease of temperature and salinity during paragenetic sequences are consistent with fluid mixing with meteoric water and following fluid dilution. We can then conclude that the occurrence of porphyry-epithermal veins in the Sari Gunay deposit is due to the presence of a fault system under the aquifer causing sudden depressurization and gradual mixing with shallow water. During temperature and pressure decrease gold was precipitated in the main stage of epithermal gold mineralization evidenced by extensive Au-As-Sb-Fe substitution in stibnite-realgar-orpiment-pyrite minerals.

### References

- Bodnar, R.J., 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683–684.
- Cepedal, A., Fuente, M.F. and Martin-Izard, A., 2008. Gold-bearing As-rich pyrite and arsenopyrite from the El Valle gold deposit, Asturias, Northwestern Spain. *The Canadian Mineralogist*, 46(1): 233–247.
- Mehrabi, B., Yardley, B.W.D. and Cann, J.R., 1999. Sediment-hosted disseminated gold mineralization at Zarshuran, NW Iran. *Mineralium Deposita*, 34(7): 673–696.
- Richards, J.P., Wilkinson, D. and Ullrich, T., 2006. Geology of the Sari Gunay epithermal deposit. *Economic Geology*, 101(8): 1455–1496.
- Sterner, S.M., Hall, D.L. and Bodnar, R.J., 1988. Synthetic fluid inclusions. V. Solubility relations in the system NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O under vapor-saturated conditions: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(5): 989–1005.