



کانی‌سازی و توزیع عناصر کمیاب پیریت به کمک تجزیه ریزکاوشگر الکترونی در چاههای اکتشافی محدوده طلای چشمه‌زرد (استان خراسان رضوی، ایران)

زهرا اعلمی نیا^{۱*}، محمدحسن کریم‌پور^۲ و سید مسعود همام^۳

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

(۲) گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(۳) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

دریافت: ۱۳۹۳/۹/۲، پذیرش: ۱۳۹۴/۸/۱۶

چکیده

ناحیه مطالعاتی در شمال استان خراسان رضوی و ۴۵ کیلومتری جنوب نیشابور قرار دارد. رگه‌های طلادار درون سنگهای گرانیت، گرانودیوریت، گرانودیوریت‌پورفیری، آندزیت، برش و توف نفوذ کرده‌اند. رگه‌ها از جنس کوارتز و کلسیت هستند. مناطق اصلی دگرسانی شامل منطقه سرسیتیک، سیلیسی، پروپلیتیک و منطقه کربنات است. کانی‌زایی به‌طور نزدیکی با دگرسانی‌های سیلیسی و سرسیتیک به شکل رگه‌چه و با منطقه پروپلیتیک به شکل افشان همراه است. کانی‌شناسی کانیهای باطله کوارتز، کلسدونی، سرسیت، آدولاریا، کلسیت، دولومیت، ایلیت، دیکیت، آلبیت، کائولینیت و کلریت است. کانی‌زایی رگه‌ای عمدتاً با رگه‌چه‌ها، برش، افشان و استوکورک همراه هستند. رگه‌چه‌ها از پیریت، مارکازیت، آرسنوپیریت و کمتر کالکوپیریت، اسفالریت، گالن، مگنتیت و هماتیت تشکیل شده‌اند. بیشترین عیار طلا در رگه‌های سیلیسی دیده می‌شود. پیریت کانی سولفیدی اصلی در کانی‌سازی اولیه است. سه نوع پیریت بر اساس ترکیب شیمیایی شناسایی شده است: پیریت خالص، پیریت غنی از آرسنیک و پیریت تیتانیوم-وانادیوم‌دار. تجزیه‌های ریزکاوشگر الکترونی بیشترین غلظت آرسنیک، تیتانیوم و وانادیوم را به ترتیب ۳/۶۲، ۳/۹۱ و ۰/۵۳ درصد وزنی در پیریت‌های رگه‌های طلادار نشان می‌دهند. طلا معمولاً همراه با پیریت آرسنیک‌دار و پیریت تیتانیوم-وانادیوم‌دار است. براساس مطالعه بافت و ترکیب پیریت‌ها، رگه‌چه‌های پیریت آرسنیک‌دار همراه با کانیهای سولفیدی آرسنوپیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت در دمای بالا و با کاهش دما و فشار، پیریت‌های فرامبوئیدال با حاشیه حاوی آرسنیک و طلا شکل گرفته‌اند و در ادامه پیریت‌های درشت تیتان‌دار به‌وجود آمده‌اند. پیریت‌های خالص و تأخیری درشت بلور آخرین فاز کانی‌ساز در منطقه هستند.

واژه‌های کلیدی: عناصر کمیاب، پیریت، محدوده طلای چشمه‌زرد، شمال شرق ایران.

مقدمه

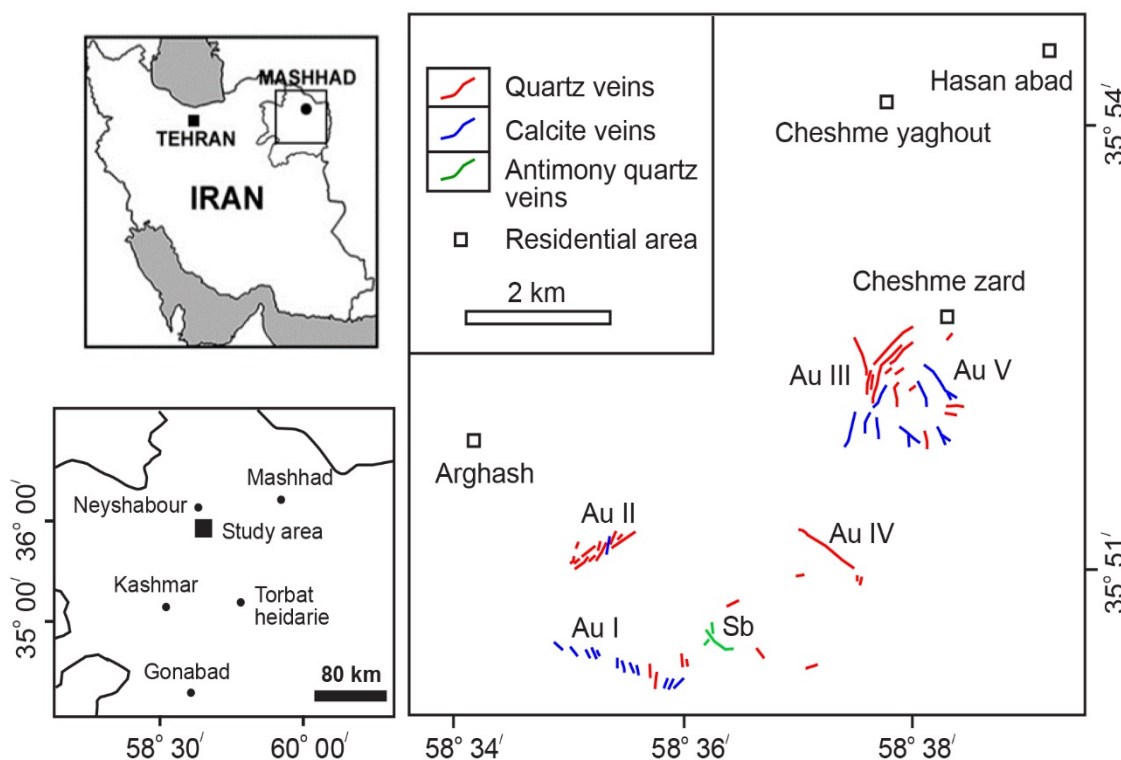
مطالعه بافت، پاراژنز و ترکیب عناصر فرعی پیریت می‌تواند چگونگی و نحوه تکامل سیستم‌های کانی‌سازی را فراهم کند. ترکیب پیریت و کانیهای موجود عمدتاً توسط شرایط فیزیکی و شیمیایی سیالات گرمایی کنترل می‌شود. بنابراین عناصر فرعی پیریت می‌توانند به ترکیب سیال و محیط‌های فلززایی اشاره داشته باشند (Agangi et al., 2013; Abraitis et al., 2004; Cook et al., 2009). پیریت‌های طلادار معمولاً آرسنیک‌دار هستند که به نظر می‌رسد عنصر آرسنیک جهت

پیریت فراوانترین کانی سولفیدی در ذخایر اپی‌ترمال کم‌سولفید است و معمولاً در طول مراحل مختلف کانی‌سازی توسعه می‌یابد. بررسی‌های تجربی نشان می‌دهد، پیریت‌های کم دما (کمتر از ۱۵۰ درجه) با سرعت شکل می‌گیرند که معمولاً دانه‌ریز و فرامبوئیدال هستند و در مقابل پیریت‌های بلوری (دمای بالاتر از ۲۰۰ درجه) آرام‌تر و از محلول‌های گرمایی و یا دگرگونی شکل می‌گیرند (Butler and Rickard, 2000).

(Richards et al., 2006)، بنابراین ذخایر یادشده موارد مطالعاتی با ارزشی برای بررسی عناصر فرعی در پیریت می‌باشند.

محدوده اکتشافی طلای چشمه‌زرد، در استان خراسان رضوی، در ۴۵ کیلومتری جنوب خاوری نیشابور، حد فاصل آبادیهای قاسم‌آباد، ارغش و حسن‌آباد قرار دارد (شکل ۱). در منطقه مطالعاتی پنج کانسار طلا و یک کانسار آنتیموان ($ESD Co^1$)، (ESD Co, 2002; 2001) وجود دارد (شکل ۱). پیریت کانی سولفیدی مهم در کانسنگ است که به‌صورت جزئی با کانیهای سولفیدی دیگر نظیر آرسنوپیریت، کالکوپیریت، مارکازیت، اسفالریت و گالن همراه است. در این پژوهش کانی‌سازی، مناطق دگرسانی و بافت و ترکیب شیمیایی پیریت‌های واقع در مناطق طلادار کانسار طلای شماره ۳ بررسی شده است.

به تله انداختن طلا در پیریت ضروری است (Barton, 1969). پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد ذخایر نوع اپی‌ترمال و کارلین بیشترین مقدار طلای غیر قابل رؤیت و ذخایر نوع طلای دگرگونی و کوه‌زایی (به خاطر تبلور مجدد و تحرک دوباره طلای کمی در پیریت حمل می‌کنند (Vaughan and Kyin, 2004; Larocque et al., 1995; Large et al., 2007) هر چند استثناهایی نیز وجود دارد (Oberthur et al., 1997). برخی از ذخایر طلای واقع در ناحیه تکتونیکي متالوژنیکي تربت‌حیدریه- سمنان که در طی اکتشافات زمین‌شیمیایی سیستماتیک توسط سازمان زمین‌شناسی کشور در سال ۱۳۷۳، شناسایی شده بود از نوع اپی‌ترمال کم‌سولفید هستند که از آن جمله می‌توان به طلای ارغش (جنوب نیشابور) (Alaminia et al., 2013a; Ashrafpour et al., 2013)، گندی و ابوالحسنی (کوه‌های ترود) اشاره داشت



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده اکتشافی چشمه‌زرد و پراکنندگی رگه‌های طلادار، با تغییراتی از (Alaminia et al., 2010).

Fig. 1. Geographic location of Cheshme Zard district and the distribution of gold-bearing veins (modified after Alaminia et al., 2010).

شد. کلیه تجزیه‌ها و مطالعات، در دانشگاه سالزبورگ اتریش انجام شده است. مقاطع پتروگرافی از رگه‌های کوارتز و کلسیت، برشها و مناطق دگرسانی بودند که از اعماق مختلف

روش مطالعه

برای رسیدن به اهداف این پژوهش، جمعاً ۱۹۳۷/۸ متر مغزه حفاری متعلق به ۲۰ گمانه از کانسار طلای شماره ۳، مطالعه

گمانه‌ها تعیین شده‌اند. جهت مطالعات زمین‌شیمیایی عناصر اصلی و فرعی رگه‌ها و دگرسانی اطراف، ۱۱ نمونه به کمک دستگاه XRF، اندازه‌گیری شده‌اند. همزمان، به منظور مطالعه کانیهای رسی و کربناته نمونه‌های انتخابی از رگه و دگرسانی اطراف، XRD روی کل نمونه سنگ با استفاده از پراش اشعه ایکس انجام شد. پراشهای اشعه ایکس با استفاده از نرم‌افزار Eva بررسی شده‌اند. شناسایی کانیها با مقایسه‌ای از زاویه پیک‌های موجود در گروه زمین‌شناسی و اطلاعات پایه (دیتا بیس) آنها مقایسه شده‌اند. پس از تلفیق با نتایج زمین‌شیمیایی، ۶ مقطع از گمانه‌های اکتشافی موجود در کانسار طلای شماره ۳ انتخاب و توسط ریز کاوشگر الکترونی^۱ خودکار مدل JEOL JXA-8600 با سیستم ولتاژ ۲۰ کیلوولت و جریان متغیر ۳۰ تا ۴۰ نانوآمپر بررسی شدند. مقدار DL این دستگاه برابر ۰/۱ درصد است. ناحیه‌های انتخاب شده برای عناصر طلا، نقره، مس، آهن، جیوه، تلور و ... بر روی پیریت تجزیه شدند. همزمان تصاویر بک اسکتر الکترون^۲ و نقشه‌های عنصری^۳ آماده‌سازی شد تا بتوان کانی‌شناسی و بافت کانیهای معدنی و باطله منطقه مطالعاتی را در این تصاویر بررسی نمود. نقشه‌های توزیع عناصر فرعی و اصلی به کمک X-ray نقطه‌ای با دقت ۰/۰۱ درصد بر روی یک مقطع نازک- صیقلی تهیه شد.

زمین‌شناسی منطقه

محدوده در بخش شمالی استان خراسان رضوی، در ۴۵ کیلومتری جنوب شهرستان نیشابور، در گستره‌ای میان ۳۶' ۵۸" تا ۳۰' ۳۸" ۵۸° طول خاوری و ۳۰' ۵۱" ۳۵° تا ۰۰' ۵۳" ۳۵° عرض شمالی، حد فاصل مناطق حسن‌آباد، چشمه‌زرد و ارغش قرار دارد (شکل ۱). منطقه مطالعاتی، یکی از پیچیده‌ترین نواحی زمین‌شناسی در ناحیه سنگ‌توده ارغش (Alaminia et al., 2013a) است که مطالعات متعددی توسط سازمان زمین‌شناسی کشور بر روی رگه‌های کانی‌زایی طلا و زمین‌شناسی سنگ میزبان رگه‌های آن انجام گرفته است. بر اساس شواهد سطحی، قدیمی‌ترین سنگهای منطقه توده دیوریت ارغش با سن پرکامبرین واقع در شمال غرب محدوده است (شکل ۲). گدازه‌های بالشی با کشیدگی شرقی- غربی به شکل ناپیوسته دیده می‌شوند (شکل ۲). سنگهای آتشفشانی قدیمی شامل آندزیت خاکستری تیره، ریوداسیت،

کمتر داسیت و در بخشهای بالایی توف، رسوبات توفی و آگلومرا با میان‌لایه‌هایی از ماسه‌سنگ دانه‌ریز تا متوسط‌دانه قهوه‌ای، سبزه خاکستری می‌باشند. توده‌های هورنبلندگرانیئوتئیدی کرتاسه فوقانی (Alaminia et al., 2013b) با طیف ترکیبی لوکودیوریت، کوارتز دیوریت، کوارتز موزنودیوریت و گرانو دیوریت در بخشهای مختلف محدوده رخنمون وسیعی دارد (شکل ۲). لایه‌های متعدد کربناته خاکستری با روند شمال شرق- جنوب غرب با گسلهای تراست در منطقه ظاهر شده و ستیغهای مرتفعی را ساخته است. جنس آنها، آهک بایواسپارایت و میکرایتی همراه با فسلیلهای فراوان است. در نیمه جنوبی کنگلومرای ضخیم‌لایه با جورشدگی ضعیف و قطعات نیمه‌گرد تا گرد شده وجود دارد (شکل ۲). گرانیت‌های صورتی تا خاکستری با سن ائوسن زیرین (Alaminia et al., 2013c) به درون گرانودیوریتها نفوذ نموده‌اند. به دنبال فعالیت آتشفشانی ائوسن، سنگهای آتشفشانی از جنس آندزیت و داسیت در منطقه رخنمون دارد. در بخشهای مرکزی و شرقی محدوده دایکهای لامپروفیری درون واحد آتشفشانی و توده‌های گرانیتی تریق شده است. توده‌های نیمه‌نفوذی موزنودیوریت پورفیری رخنمون کمی دارند و به نظر می‌رسد که از سایر توده‌ها جوانتر باشند. کنگلومرای لیگوسن با جورشدگی ضعیف گسترش وسیعی در جنوب غرب روستای ارغش دارد (شکل ۲). رسوبات کواترنری شامل نهشته‌های سیلابی حاشیه کالها و آبرفتهای جوان می‌باشد.

کانی‌سازی (مشاهدات صحرایی، مطالعات چاه‌نگاری و میکروسکوپی)

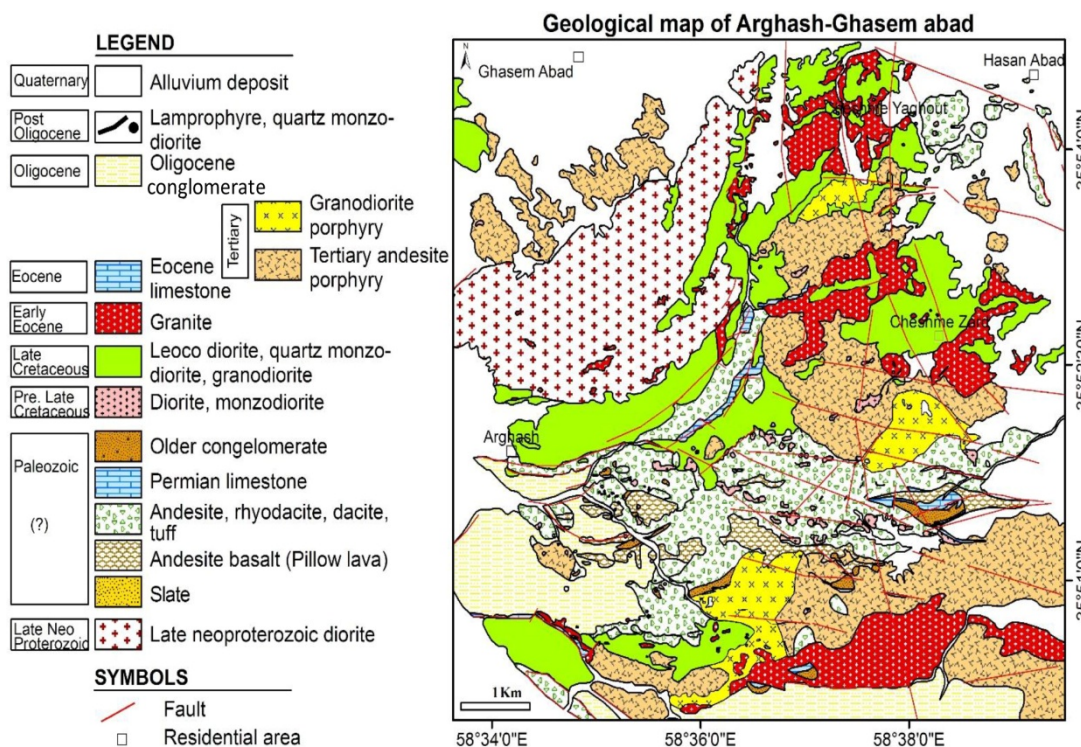
رگه‌های طلای ارغش توسط گسلهایی با دو روند اصلی شمال شرقی- جنوب غربی (NE-SW) و دیگری تقریباً شرقی- غربی (NWW-SEE) با شیبهای متفاوت ۴۹ تا ۸۶ درجه کنترل می‌شوند (ESD Co, 2002). معمولاً سنگهای میزبان طلا دار با مناطق دگرسانی که در اطراف گسلها دیده می‌شوند، قابل تشخیص هستند، البته گاهی برشهای گرمایی نیز از مناطق طلا دار به حساب می‌آیند. اندازه رگه‌های طلا دار متغیر بوده و طول آنها ۵۰ تا ۱۰۰۰ متر (شکل ۳) و ضخامت آنها ۰/۵ تا ۲ متر می‌باشد و به سوی عمق کشیده شده‌اند.

1. Electron micro probe analyzer
2. Back-scattered electron
3. X-ray element maps

دیوریت، آندزیت، برش و لاپیلی توف می‌باشد. رگه اصلی سیلیسی بوده و به وسیله گسل‌های بعد از کانه‌زایی جابه‌جا شده است. بالاترین عیار کانسنگ (ESD, 2001; Samadi, 2002) مربوط به بخش شمال شرقی است که در آنجا رگه شکل برشی دارد. در انتهای جنوب غربی رگه اصلی، رگه کوارتز دیگری با روند شمال غربی، طول ۷۰۰ متر و پهنا ۰/۵ تا ۲ متر به آن متصل می‌شود. در کانسار چشمه‌زرد علاوه بر رگه و توده‌های معدنی و مناطق کانی‌ساز، بیش از ۳۰ رگه کوارتزی، منطقه برشی و رگه‌های کلسیتی در طول‌های مختلف انتشار دارند.

مطالعات سطحی در کانسار طلای چشمه زرد، شماره ۳ (Au) (III-)

این کانسار مهمترین بخش کانی‌سازی در محدوده اکتشافی ارغش را در برمی‌گیرد که در ۷۰۰ متری روستای متروکه چشمه‌زرد قرار دارد. کانسار اصلی شامل رگه‌های متعدد است که به تدریج باریک شده و از بین رفته‌اند و مجدداً در فاصله دورتر و در امتداد روند عمومی NE, NNE و نیز به‌طور فرعی در امتداد NNW ظاهر می‌شوند (شکل ۳). رگه اصلی، ۱/۲ کیلومتر طول و کمتر از ۱ تا ۳ متر پهنا دارد؛ روند آن N45E (شکل ۳) و شیب آن حدود ۶۰ درجه به سمت شمال غرب است. سنگ‌های درون‌گیر رگه‌ها شامل گرانیت، گرانودیوریت،



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه چشمه‌زرد. راهنمای نقشه بر اساس شواهد سن نسبی در صحرا و سن‌سنجی انجام شده (Alaminia et al., 2013a) آمده است. آهک‌های منطقه از نوع فوزولین‌دار و نومولیت‌دار هستند که دو سن متفاوت دارند، اما به‌علت رخنمون کم، در نقشه تفکیک نشده‌اند.

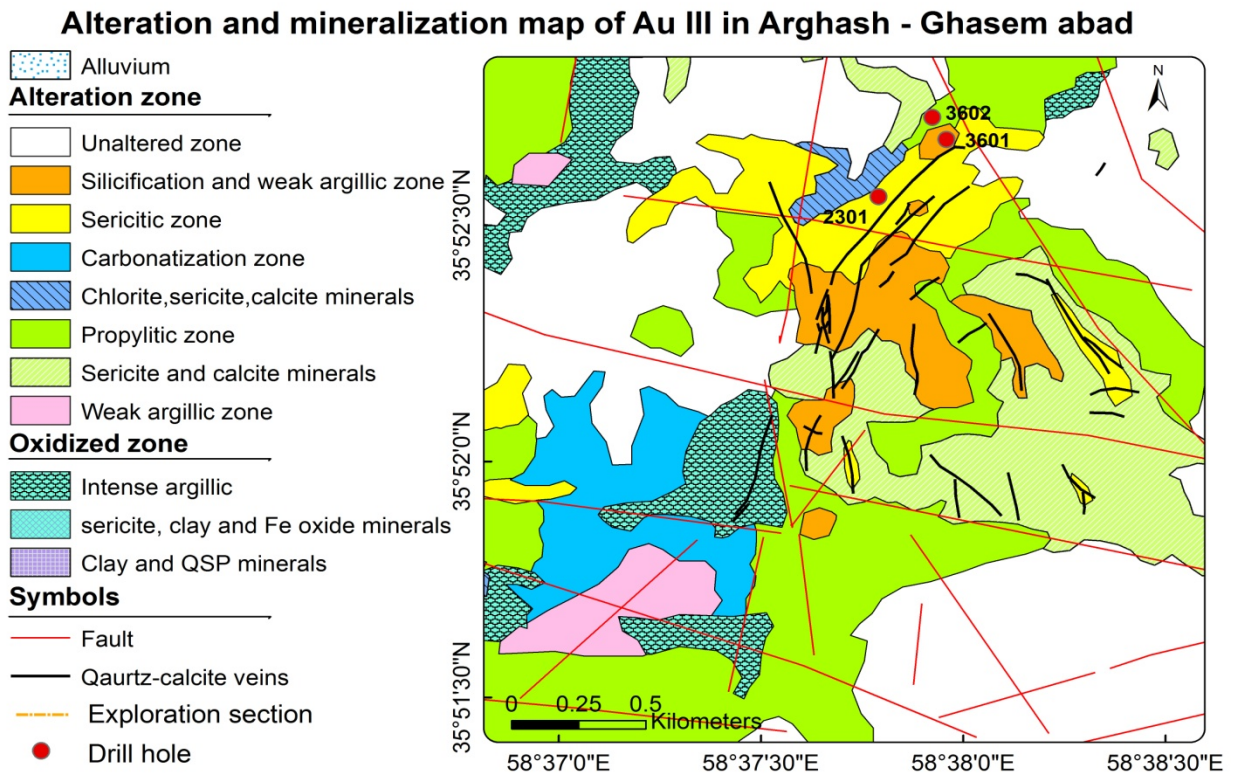
Fig. 2. Geologic map of the Cheshme Zard district. The legend of map is prepared based on relative age observations in the field and age dating (Alaminia et al., 2013a). Fossiliferous limestones in the above map include fosulina and nummulite, which have different age, but because of small outcrops are not divided.

کربنات+ سرسیت+ پیریت) و آرژیلیک می‌باشند. مناطق فرعی شامل کلریت + سرسیت - کلسیت و سرسیت - کلسیت هستند. فرآیندهای هوازدگی تأثیر زیادی در منطقه داشته‌اند و سبب تشکیل مناطق آرژیلیک شدید، سرسیت- رس و

شدت دگرسانی در منطقه بالاست. در مجموع مناطق دگرسانی شناسایی شده در منطقه بر مبنای گسترش، به دو دسته اصلی و فرعی تقسیم می‌شوند. مناطق اصلی شامل منطقه پروپلیتیک، سیلیسی، کربنات، سرسیتیک (کوارتز +

سیلیسی و پروپلیتیک بیشترین گسترش را در اطراف کانسار طلای شماره ۳ دارند (شکل ۳).

کانیهای اکسید آهن ثانویه، سرسیتیک آرژیلیکی شده و زئولیتی شده‌اند. در سطح به ترتیب دگرسانیهای سرسیتیک،



شکل ۳. موقعیت گمانه‌های ۳۶۰۱ و ۳۶۰۲ بر روی رگه کوارتز کلسیتی در نقشه دگرسانی تهیه شده از کانسار طلای شماره ۳ در محدوده چشمه زرد.

Fig. 3. Drill core (3601 and 3602) locations on the calcite-quartz vein in the alteration map from Au-III ore deposit in Cheshme Zard district.

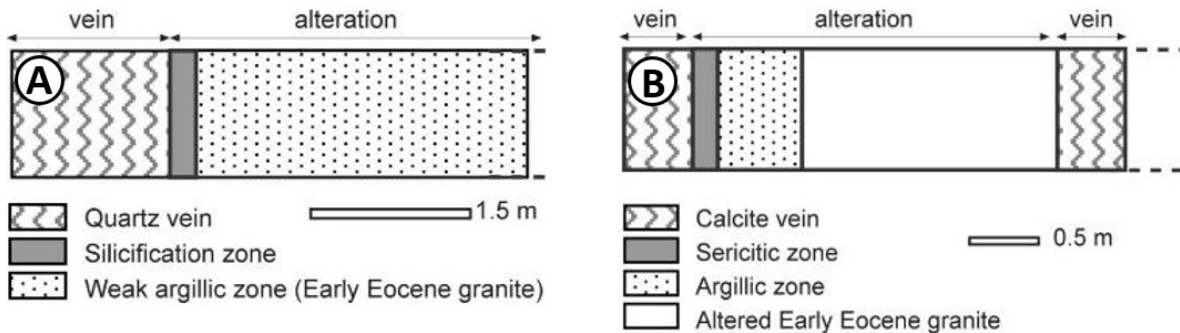
نظر پتروگرافی جنس رگه از کوارتز با بافت شانه‌ای و به مقدار جزئی آدولاریا و کلسیت تشکیل شده است. کانی آدولاریا در حاشیه رگه دیده می‌شود (تغییرات زمین‌شیمی K/Al (شکل ۵) نیز با آن تطبیق دارد). پیریت و پیریت‌آرسنیک‌دار همراه با شکل‌گیری رگه‌های کوارتز و در مرکز آنها تشکیل شده‌اند، گاهی همراه با کوارتز، کلسیت، آلبیت و دیکیکیت (ناکریت) نیز دیده می‌شوند (به تغییرات SO₃ در مرکز و حاشیه رگه در شکل ۵ توجه شود). آلکالی فلدسپارها به دیکیکیت دگرسان شده‌اند و در آخر آلبیت و دیکیکیت با کلسیت تأخیری دوباره نهشته شده‌اند. هوازدگی سبب تشکیل هیدروکسیدهای آهن و کائولینیت، در سطوح کم عمق شده است. سنگ دیواره گرانیات دگرسان شده، بیشتر تحت تأثیر فرآیندهای تأخیری،

به‌منظور بررسی نوع کانی رسی و کربناته به کمک پراش اشعه ایکس و بررسی همزمان تغییرات زمین‌شیمی، دو رگه سیلیسی و کربناته طلا دار (شکل‌های A-۴ و B-۴) انتخاب و نمونه‌برداری منظم به‌صورت عمود بر رگه بر روی آنها انجام شده است. بررسی تغییرات زمین‌شیمی، به‌منظور تعیین تجزیه‌شیمیایی عناصر اصلی، فرعی و اندازه‌گیری عنصر طلا انجام شده است.

بر روی رگه سیلیسی طلا دار با ضخامت ۱/۵ متر، هفت نمونه عمود بر رگه با هدف بررسی تغییرات کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی از خود رگه و دگرسانی اطراف برداشت شده است (شکل A-۴). رگه سیلیسی تا فاصله بیش از ۱۰ متر سنگ میزبان گرانیات ائوسن زیرین را دگرسان نموده است. از

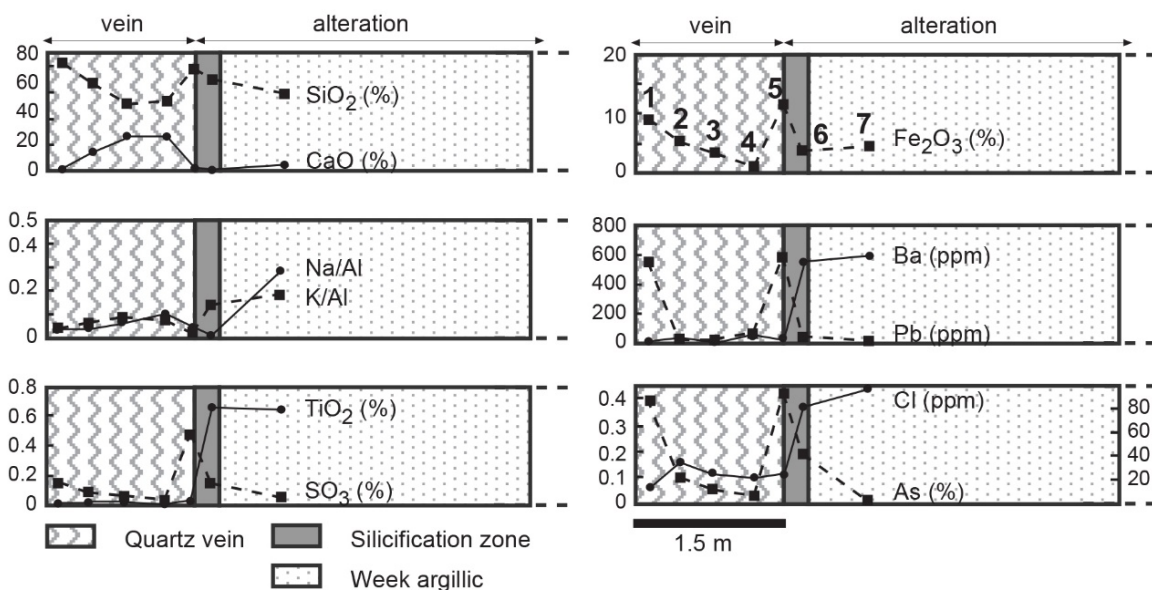
و Pb ، As ، CaO با SiO_2 نسبت عکس نشان می‌دهد. مقادیر As ، Pb و SO_3 به سمت مناطق دگرسان (از نمونه ۵ تا ۷) کاهش و مقادیر Ba و TiO_2 و Cl افزایش می‌یابند (شکل ۵).

کربناته و رسی شده است. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود مقادیر As ، Pb ، Fe_2O_3 و SO_3 از مرکز (نمونه ۱) به سمت حاشیه رگه (نمونه ۴) روند کاهشی نشان می‌دهند (تمرکز سولفیدها در مرکز رگه‌ها به چشم می‌خورد). تغییرات



شکل ۴. دو مقطع عرضی انتخابی از رگه‌های طلا دار منطقه چشمه‌زرد، A: رگه کوارتز و سنگ دیواره دگرسان شده؛ B: رگه کربناته و سنگ دیواره گرانیت دگرسان شده.

Fig. 4. Selected two cross sections of gold bearing veins of Cheshme Zard. A: Quartz vein and altered wall rocks, B: Carbonate vein and altered granite wall rock.



شکل ۵. چهار نمونه از رگه (شماره‌های ۱، ۲، ۳ و ۴) و سه نمونه (شماره‌های ۵، ۶ و ۷) از سنگ دیواره در محدوده چشمه‌زرد انتخاب شده است؛ وسعت دگرسانی بیش از ۱۰ متر است.

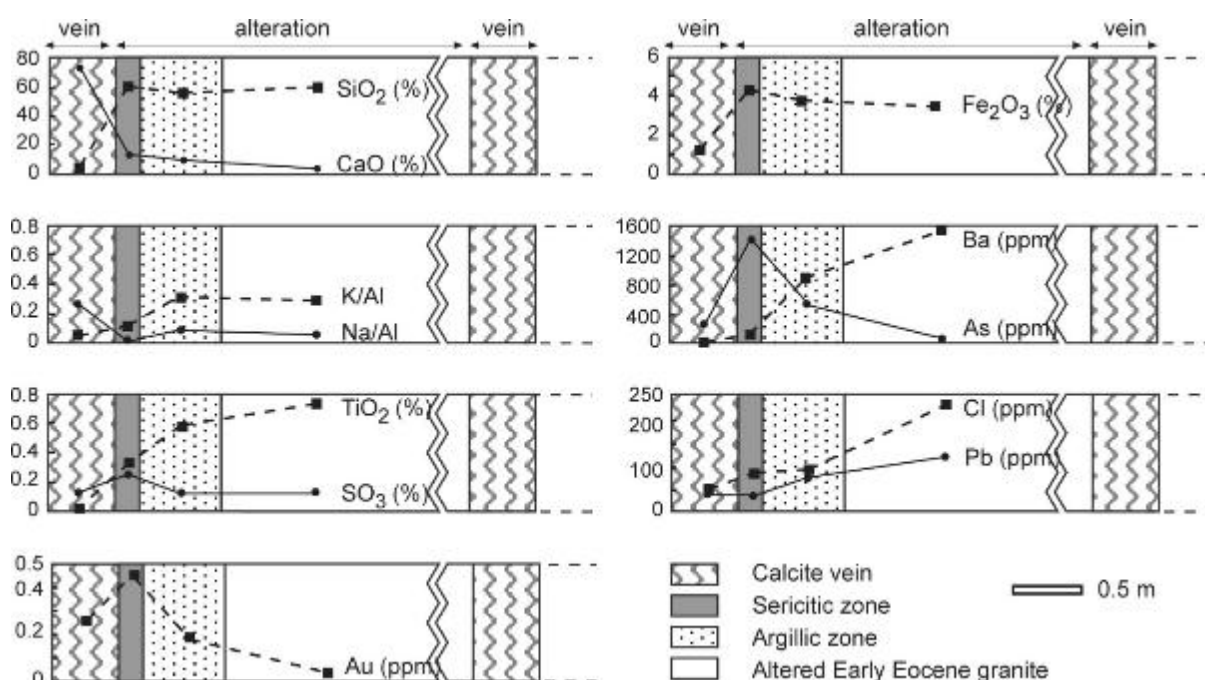
Fig. 5. Four samples from the vein (1, 2, 3 and 4) and three samples from the wall rock (5, 6 and 7) have been selected in Cheshme Zard district. The alteration extend over ten meters.

می‌باشد. از نظر پتروگرافی در کنار درشت بلورهای صفحه‌ای از جنس کلسیت و کمتر دولومیت، بلورهای کوارتز نیز دیده می‌شود.

از میان دو رگه کربناته و دگرسانی مرتبط با آنها، چهار نمونه به ترتیب از رگه کربناته و سنگ دیواره انتخاب شده است (شکل ۴-B). سنگ میزبان این رگه‌ها گرانیت آئوسن

رگه‌چه‌هایی نازک از کوارتز-آلبیت، کربنات و کانیه سولفیدی در متن سنگ دیده می‌شوند. در شکستگیها و فضاها در اثر فرآیندهای هوازدگی کانیه‌های ژپس، رس و کانیه‌های اکسید آهن آبدار دیده می‌شوند. میزان فراوانی عناصر به صورت شماتیک در شکل ۶ نشان داده شده است. مقدار طلا از سمت رگه به سمت سنگ دیواره به ترتیب ۰/۲۵، ۰/۴۵، ۰/۱۸ و ۰/۰۷۹ گرم در تن اندازه‌گیری شده است. بیشترین مقادیر Fe_2O_3 و SO_3 ، As ، Au ، سرسیتیک مشاهده می‌شود. با دور شدن از رگه اصلی کلسیت، مقادیر Pb ، Ba ، Cl و TiO_2 افزایش می‌یابد و بیشترین مقادیر آنها در مناطق دگرسانی دیده می‌شود.

کانیه‌های سولفیدی در مرکز رگه کلسیتی دیده می‌شوند. حاشیه رگه دارای رگه‌چه‌هایی از کوارتز، سرسیت و کلسیت می‌باشد. آلبیت و بلورهای ریز آدولاریا به صورت رومبوند و پراکنده در رگه کوارتز دیده می‌شوند (تغییرات زمین‌شیمی Na/Al و K/Al (شکل ۶) نیز تأیید می‌کند). کانیه‌های سولفیدی به دو صورت بی‌شکل در رگه‌چه و شکل‌دار در متن سنگ دیده می‌شوند. فلدسپارها به سرسیت و کانیه رسی تجزیه شده‌اند. در سطح بر اثر فرآیند هوازدگی، رس (مونتموریونیت) و اکسیدهای آهن آبدار (هماتیت) تشکیل شده است. بقایایی از بافت سنگ میزبان گرانیت در حاشیه دیده می‌شود. بیشتر آلکالی فلدسپارها به رس تجزیه شده‌اند.



شکل ۶. سنگ دیواره گرانیت دگرسان شده در میان دو رگه کلسیتی در محدوده چشمه‌زرد قرار دارد. مقادیر اکسیدهای اصلی به درصد و مقادیر عناصر فرعی و طلا بر حسب گرم بر تن گزارش شده‌اند.

Fig. 6. The altered granitic wall rock is situated between two calcite veins in Cheshme Zard district. Results of major oxides and trace elements are reported as percent and ppm, respectively.

حفاری شده است. دو گمانه اول از یک نیم‌رخ اکتشافی انتخاب شده‌اند تا بتوان موقعیت زیر سطحی رگه را در اعماق تقریبی ۵۰ و ۱۰۰ متر کنترل نمود.

مطالعات زیرسطحی

از میان ۱۹۳۷/۸ متر گمانه مطالعه شده از کانیه‌سازی طلای شماره ۳، سه گمانه ۳۶۰۲، ۳۶۰۱ و ۲۳۰۱ به‌طور خلاصه شرح داده می‌شوند. گمانه‌های نام‌برده در فرادیواره رگه‌ها

تبدیل می‌شود و رگه به همراه دگرسانی سیلیسی و سرسیتیک به سمت عمق شیب پیدا می‌کند (شکل ۸). برخلاف گمانه ۳۶۰۱، دگرسانی پروپلیتیک بیشتر طول گمانه را فرا گرفته است. در عمق رگه‌چه‌های کوارتز خاکستری شده و پهن‌تر می‌شوند و سنگ بوی گوگرد می‌دهد. علاوه بر رگه اصلی کوارتز، رگه‌چه‌های سولفیدی، هماتیت، کلسیت و کمی کلریت نیز دیده می‌شوند. عیار طلا به بیشترین حد خود یعنی ۷/۲۹ گرم در تن (ESD Co, 2001) می‌رسد. در نیم‌رخ زیر سطحی، در سرتاسر رگه دگرسانی‌های کوارتز-سرسیت-پیریت و سیلیسی در ارتباط و همراه با رگه دیده می‌شوند و دگرسانی پروپلیتیک دورتر از رگه شکل گرفته است (شکل ۹). سولفیدها در نزدیکی رگه‌های اصلی کوارتز و کلسیت به صورت رگه‌چه بوده و با دور شدن از رگه اصلی، به شکل افشان دیده می‌شوند (شکل ۱۰).

گمانه ۲۳۰۱: از نظر زمین‌شناسی شامل واحدهای گرانیت ائوسن زیرین، گرانودیوریت پورفیری ترشیاری، استوک دیوریتی و دایک می‌باشند (شکل ۱۱). در این گمانه گسترش دگرسانی‌های سیلیسی، سرسیتیک و نیز حضور برش گرمایی اهمیت دارد. دگرسانی سیلیسی در نزدیک رگه با شدت بیشتری دیده می‌شود. رگه اصلی کانی‌سازی از عمق ۱۰۸ متر و نزدیک به عمود دیده می‌شود. شدت رگه‌چه‌های سولفید اکسید شده و کوارتز در برش گرمایی افزایش می‌یابد و در طول برش، عیارهای ناچیزی از طلا دیده می‌شود.

توالی پاراژنز کلی

بر اساس مطالعات انجام گرفته در این تحقیق، کانیهای دگرسانی سنگ دیواره در کانسار طلا عمدتاً شامل کوارتز، سرسیت، کلسیت و کلریت همراه با مقدار کمی پیریت، آدولاریا، آلبیت و میکروکلین است. دگرسانی‌های کوارتز، سرسیت، کلسیت و پیریت از نظر فضایی و مکانی به کانی‌زایی طلا نزدیکند. این دگرسانی گرمایی به‌طور عمده در طول گسلها و در برشها به‌صورت یک الگوی نسبتاً منظم تکرار می‌شود. بر اساس مطالعات دگرسانی و ارتباطات تقاطعی میان رگه‌چه‌ها توالی پاراژنز کلی را می‌توان به دو گروه کانیهای اولیه و اکسیدی تقسیم نمود. کوارتز به سه شکل مشخص شیری، خاکستری و برشی دیده می‌شود (شکل ۱۲). کوارتزهای خاکستری و برشی همراه کانی‌سازی طلا دیده

گمانه ۳۶۰۱: این گمانه نسبت به گمانه ۳۶۰۲، در فاصله نزدیکتری به رگه اصلی قرار دارد (شکل ۳). در گمانه ۳۶۰۱ واحد زمین‌شناسی گرانودیوریت کرتاسه بالایی در ابتدای گمانه، سنگ گرانیت ائوسن زیرین در فاصله ۱۵ تا ۶۵ متر و در مرز بالایی گرانیت، واحد دایک دیوریتی (بعد از الیگوسن) دیده می‌شود. دگرسانی سیلیسی بیشترین طول گمانه را با شدتهای مختلف دربرگرفته است. دگرسانی در نزدیک رگه‌های کانی‌سازی به‌صورت سیلیسی-آرژیلیکی دیده می‌شود و عمیق‌تر از رگه به پروپلیتیک تبدیل می‌شود (شکل ۷).

کانی‌سازی در گمانه ۳۶۰۱ بیشتر به‌صورت رگه‌چه، رگه‌ای، برشی و کمتر به شکل افشان دیده می‌شود. در گمانه‌ها رگه‌چه‌ها به سمت عمق عریض‌تر و تعداد آنها کمتر می‌شوند و به‌صورت نسبتاً عمودی و با طول بیشتری دیده می‌شوند. گاه طول رگه‌چه‌ها در گمانه‌ها به ۶۵ سانتی‌متر می‌رسد. کانی‌سازی سولفیدی شامل پیریت، پیریت‌آرسنیک‌دار، کالکوپیریت، کمتر اسفالریت و گالن می‌باشد. پیریت و کمتر پیریت آرسنیک‌دار فراوانترین کانیهای سولفیدی در این منطقه‌اند که به‌صورت خودشکل، نواری و قشرگون دیده می‌شوند. گاه فراوانی پیریت در زمینه به ۷ درصد حجمی می‌رسد. گاهی در عمق پیریت‌های نسبتاً دانه‌درشت با متوسط اندازه ۰/۹ میلی‌متر در رگه دیده می‌شوند. در دگرسانی سیلیسی با شدت ۷ تا ۲۰ درصد، رگه‌چه‌های سولفیدی با عرض ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر با طول ۴۰ میلی‌متر و تراکم ۳۰ عدد در متر در عمق پهن‌تر شده و عرض آنها به ۱۰ میلی‌متر و طول کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر تبدیل و تعداد آنها به ۱۲ عدد کاهش می‌یابد. این رگه‌چه‌ها در سطح به‌صورت استوک‌ورک و متقاطع هستند و در عمق به موازات محور گمانه دیده می‌شوند (شکل ۷). این رگه‌چه‌ها برشهای سیلیسی گرمایی را قطع می‌کنند. در گرانیت سیلیسی شده در نزدیکی برش گرمایی ۲۵ رگه‌چه کوارتز در طول یک متر مشاهده می‌شود. گاهی عیارهای بالای طلا (ESD Co, 2001) در این منطقه دیده می‌شود.

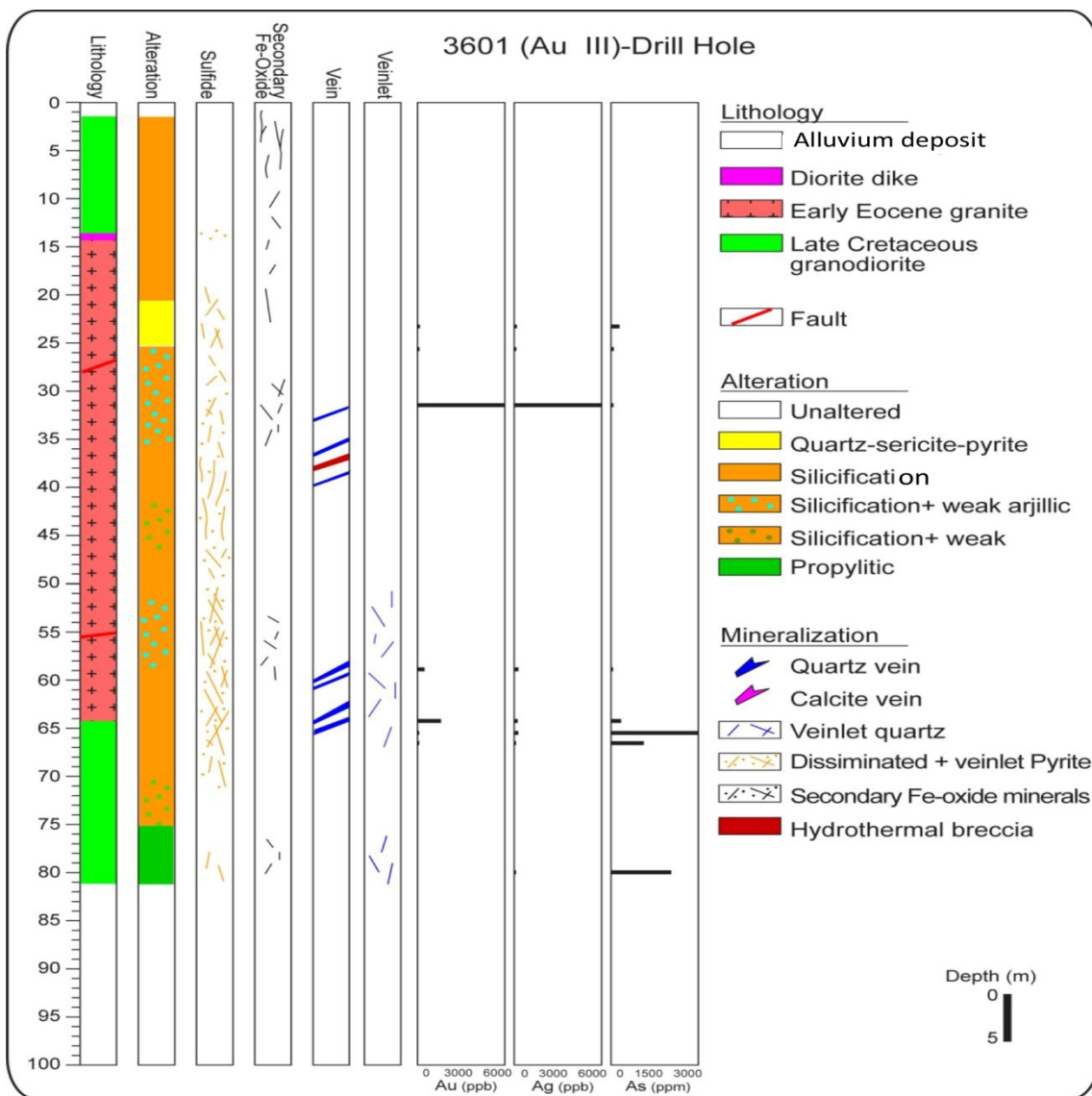
گمانه ۳۶۰۲: در این گمانه، عمدتاً سنگهای گرانودیوریتی کرتاسه بالایی رخنمون دارند که گرانیت ائوسن زیرین و دایکهای بعد از الیگوسن (Alaminia et al., 2013a) به درون آنها نفوذ کرده است (شکل ۸). با دور شدن از رگه اصلی در سطح، در گمانه ۳۶۰۲ دگرسانی سیلیسی به پروپلیتیک

تغییرات ژئوشیمی عناصر مختلف بر روی آنها توسط ریزکاوشر الکترونی تجزیه و بررسی گردد. در این روش عناصر مورد تجزیه برای پیریت با توجه به تجزیه شیمیایی کلی کانسنگ انتخاب شده که عبارتند از S، Fe، As، Hg، Sb، Cu، Co، Ti، V، Te. تعداد نقاطی که در آنها پیریت مورد تجزیه نقطه‌ای زمین‌شیمی قرار گرفته‌اند ۳۰ نقطه است که نتایج آن در جدول ۱ آمده است. نقاط انتخابی سعی شده است که از حاشیه‌ها، مرکز رگه طلای شماره ۳ و دگرسانی اطراف آن انتخاب شود.

می‌شوند. پیریت بیشترین گسترش را در مرحله اولیه کانی‌سازی دارد.

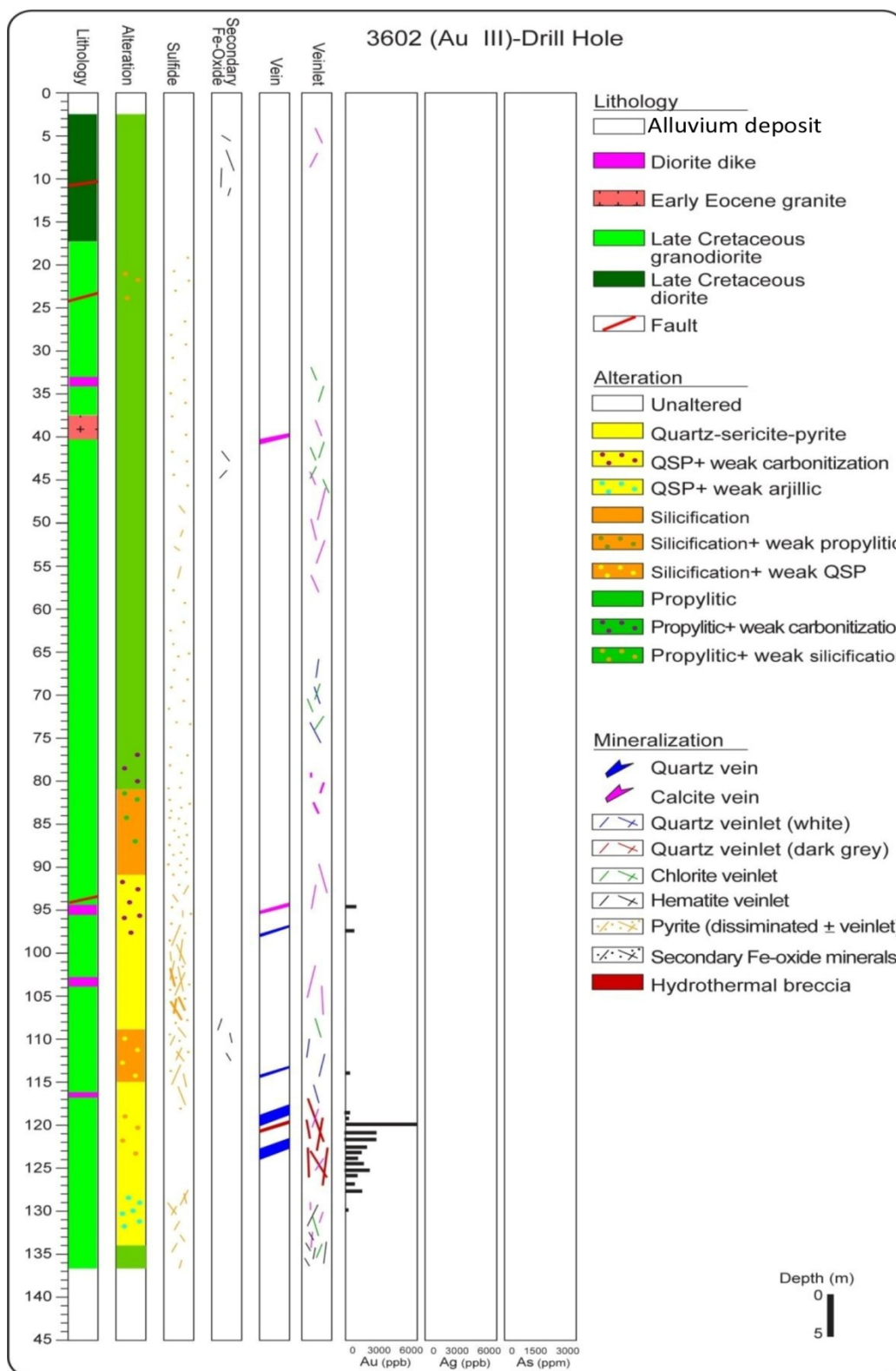
مطالعات ریز کاوشر الکترونی بر روی نسل‌های پیریت در کانی‌سازی طلا

پس از مطالعه مقاطع نازک صیقلی و بلوکهای صیقلی، ۶ نمونه از گمانه‌ها جهت بررسی بیشتر بافت و پتروگرافی کانسنگ انتخاب شد. با توجه به وجود پیریت‌های متفاوت (شکل‌دار، بی‌شکل در رگه‌چه‌ها و یا به صورت پراکنده) تصمیم گرفته شد



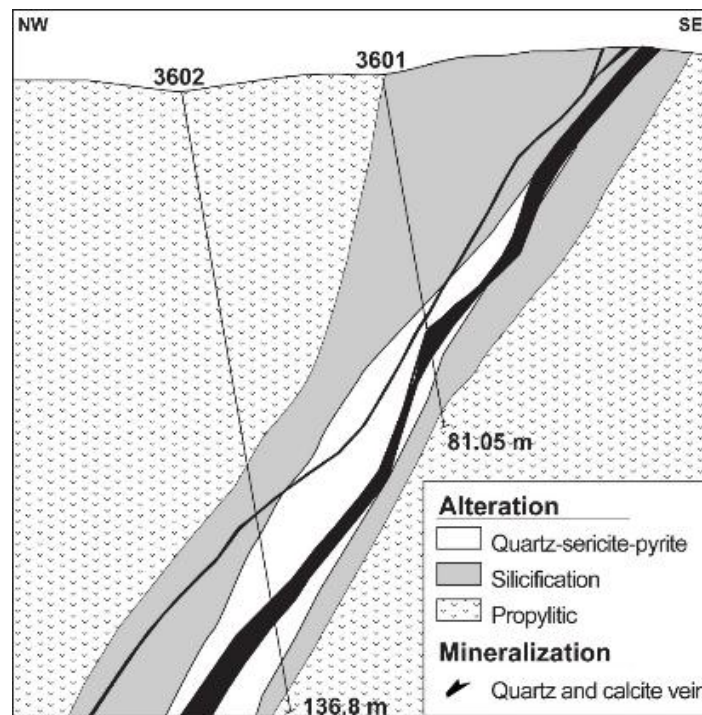
شکل ۷. نمودار چاه‌نگاری چاه شماره ۳۶۰۱ از کانسار طلای شماره ۳ در محدوده چشمه‌زرد.

Fig. 7. Logging of drill hole 3601 from Au-III ore deposit in Cheshme Zard district.



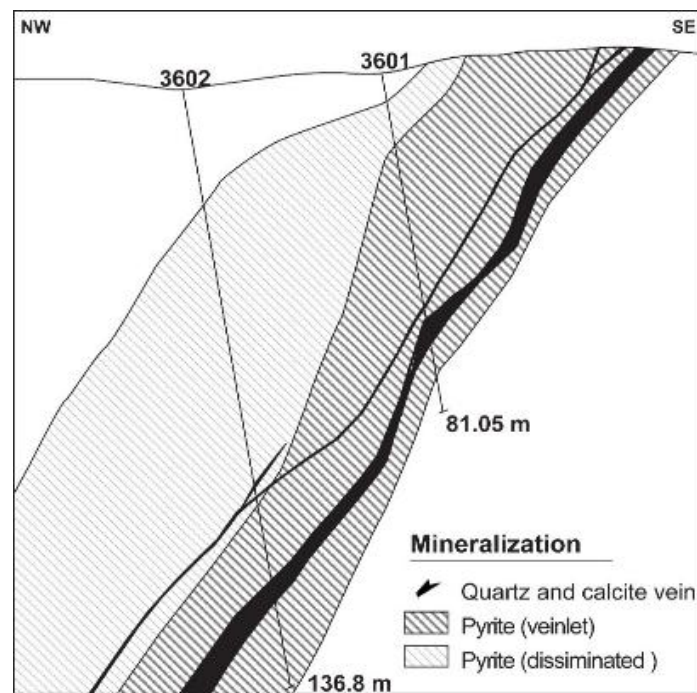
شکل ۸. نمودار چاه‌نگاری چاه شماره ۳۶۰۲ از کانسار طلای شماره ۳ در محدوده چشمه‌زرد.

Fig. 8. Logging of drill hole 3602 from Au-III ore deposit in Cheshme Zard district.



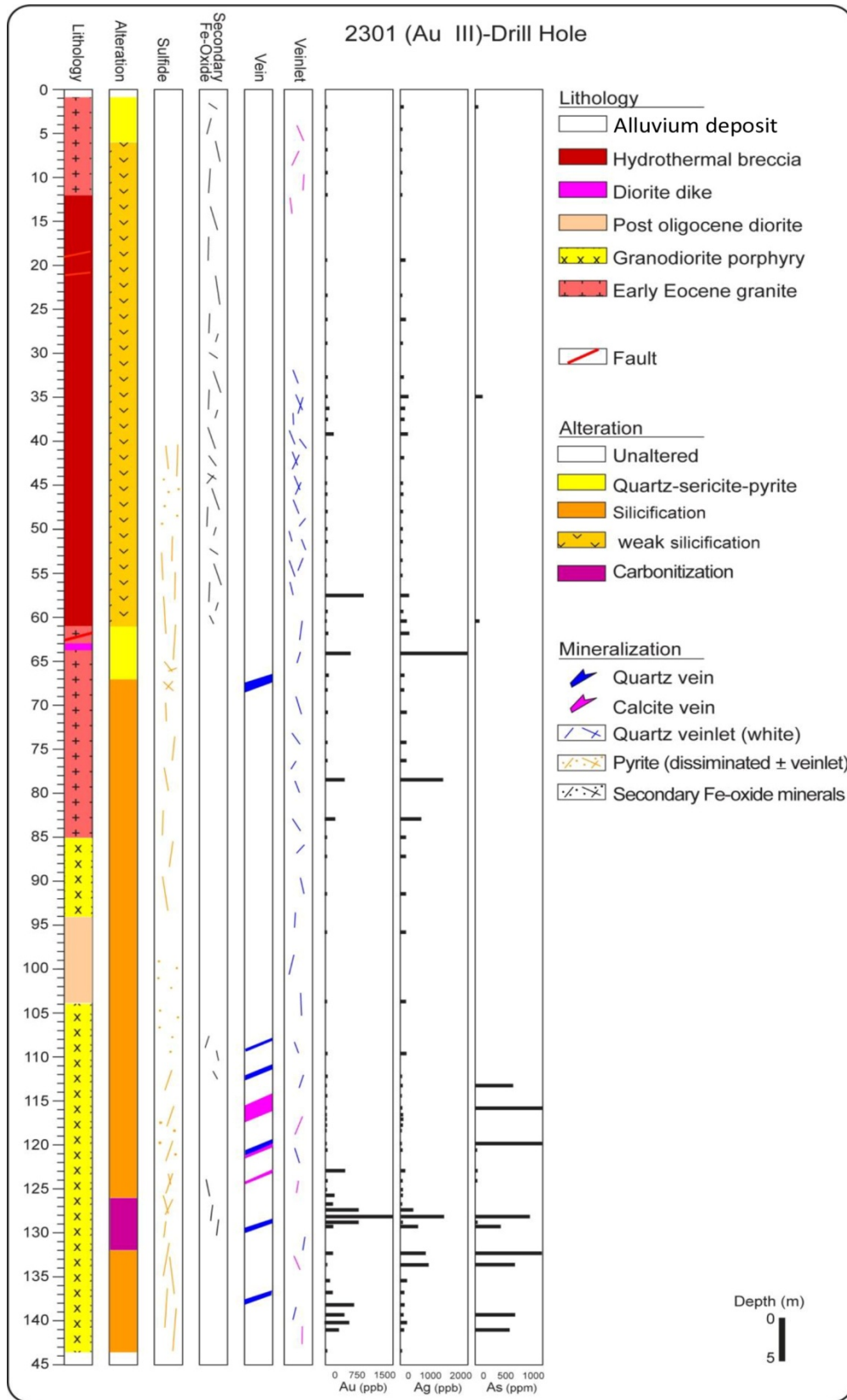
شکل ۹. نیم‌رخ زیر سطحی دگرسانی از دو گمانه ۳۶۰۱ و ۳۶۰۲ چشمه‌زرد، هر دو گمانه رگه را در عمق قطع می‌کنند. جهت مقطع شمال غرب-جنوب شرق و شیب رگه به سمت شمال غرب است.

Fig. 9. Alteration underground cross section from two drill holes 3601 and 3602 of Cheshme Zard, both crosscut the vein at depth. The section has NW-SE direction and the vein has NW dipping.



شکل ۱۰. شکل کانی‌سازی سولفیدی (رگه‌چه یا افشان) در مقطع زیرسطحی چشمه‌زرد. کانیهای سولفیدی با دور شدن از رگه اصلی، از شکل رگه‌چه به افشان تغییر می‌کند.

Fig. 10. Sulfide mineralization shape (veinlet or disseminated) in underground section of Cheshme Zard. Sulfide minerals were changed from veinlet to disseminate with distance of main vein.



شکل ۱۱. نمودار چاه‌نگاری چاه شماره ۲۳۰۱ از کانسار طلای شماره ۳ در محدوده چشمه‌زرد.

Fig. 11. Logging of drill hole 2301 from Au-III ore deposit in Cheshme Zard district.

Mineral	Stage	
	Early	Late
	Hypogene	
	Supergene	
Pyrite	-----	-----
Arsenopyrite	-----	
Chalcopyrite	-----	
Sphalerite	-----	
Galena	-----	
Hematite		-----
Chlorite	-----	-----
Epidote	-----	
Zoisite	-----	
Quartz	-----	-----
Chalcedony	-----	-----
Opal		-----
Adularia	-----	
Microcline	-----	
Albite	-----	
Sericite	-----	-----
Dickite	-----	-----
Kaolinite	-----	-----
Illite		-----
Calcite	-----	-----
Dolomite		-----
Iron oxyhydroxides		-----
Jarosite		-----
Epidote		-----
Gypsum		-----
Clay		-----

شکل ۱۲. ترتیب پاراژنز کلی در محدوده اکتشافی چشمه‌زرد، براساس مطالعات چاه‌نگاری و پتروگرافی مقاطع نازک.

Fig. 12. Generalized paragenetic sequence in the Cheshme Zard district, based on graphic logging and thin section petrography.

چشم می‌خورد. تصاویر BSE جنبه‌هایی از پتروگرافی ماده معدنی را در کانسار طلای چشمه‌زرد نشان می‌دهند. براساس این پژوهش، پیریت‌های منطقه مطالعاتی در ارتباط با چندین نسل کانی‌سازی در منطقه تشکیل شده‌اند که شکل و ترکیب‌های متفاوتی دارند.

کانی‌سازی سولفیدی شامل پیریت، مارکازیت، آرسنوپیریت، کمتر کالکوپیریت، اسفالریت و گالن می‌باشند که به صورت رگه‌چه و افشان دیده می‌شوند که کانیهای همراه آن شامل آلبیت، آلکالی‌فلدسپار، کمتر سرسیت و آپاتیت می‌باشند. در مکانهای مشخص شده جهت تجزیه نقطه‌ای، نکات جالب توجهی در بافت و ترکیب شیمیایی پیریت و سایر کانیها به

جدول ۱. مشخصات و ترکیب شیمیایی انواع پیریت‌های موجود در محدوده طلای چشمه‌زرد (مقادیر بر حسب درصد آمده است).

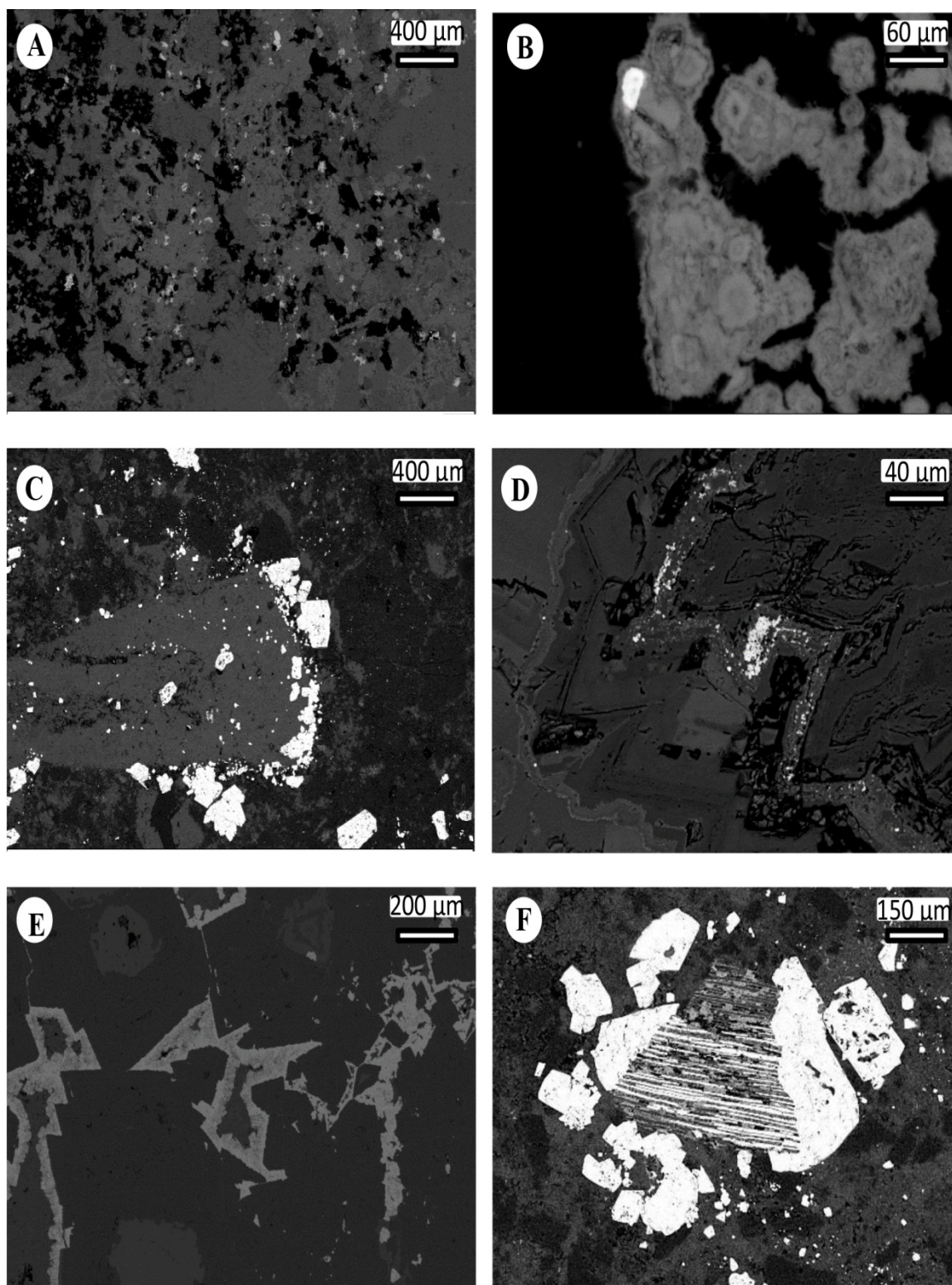
Table 1. Characteristics and chemical composition of pyrite types in the Cheshme Zard gold district (Values in at %).

Location and type of pyrite	Fe	S	As	Ti	V	Total
Anhedral, veinlet	43.94	56.05				99.99
Anhedral, veinlet	41.88	57.59				99.47
Anhedral, veinlet	42.19	57.8				99.99
Anhedral, veinlet	41.89	58.10				99.99
Anhedral, veinlet	42.8	57.04				99.84
Anhedral, veinlet	41.25	56.73				97.98
Anhedral fine-grained, Disseminated	40.97	56.86	1.54			99.37
Anhedral fine-grained, Disseminated	45.53	52.47	2.02			101.02
Anhedral fine-grained, Disseminated	41.38	56.86	2.1			100.34
Anhedral fine-grained, Disseminated	41.42	55.68	2.9			100
Anhedral fine-grained, Disseminated	40.81	58.28	0.6			99.69
Core of framboidal pyrite	42.09	57.9				99.99
Framboidal pyrite	42.31	57.68				99.99
Rim of framboidal pyrite	41.29	57.09	1.62			101
Radiating aggregate, open space	40.83	56.16	3			99.99
Radiating aggregate, open space	45.96	49.9	3.62			99.48
Radiating aggregate, open space	41.59	55.60	2.81			100
Radiating aggregate, open space	42.52	54.41	2.81			99.74
Euhedral coarse-grained, Disseminated	42.6	55.01		2.36	0.02	99.99
Euhedral coarse-grained, Disseminated	41.4	54.8		2.34	0.53	99.07
Euhedral coarse-grained, Disseminated	42.4	53.2		3.91	0.53	100.04
Euhedral coarse-grained, Disseminated	42.12	57.60				99.72
Euhedral coarse-grained, Disseminated	42.03	57.28				99.31
Euhedral coarse-grained, Disseminated	42.65	56.81				99.46
Euhedral coarse-grained, Disseminated	42.7	56.8				99.5
Euhedral coarse-grained, Disseminated	42.01	57.9				99.91
Euhedral coarse-grained, Disseminated	42.06	57.94				100
Euhedral coarse-grained, Disseminated	41.97	58.02				99.99
Euhedral coarse-grained, Disseminated	42.16	57.82				99.98
Fine-grained, Disseminated	42.57	57.98				100.55

در ادامه از پیریت خاصی (شکل F-۱۳) که در مطالعات ریزکاوشگر الکترونی مورد توجه قرار گرفت، توسط تابش لیزر^۱ بر روی پیریت مورد نظر نقشه‌های ریزکاوشگر الکترونی تهیه شده است تا توزیع برخی عناصر اصلی و فرعی مانند Au, Fe, S, As, Te, Cu, Pb را با دقت بیشتری و به صورت نقشه گرافیکی مستندسازی نماید. مقطع نازک صیقلی از عمق ۱۱۵/۲ متری گمانه ۳۲۰۱ انتخاب شد. علاوه بر بافت و ترکیب متفاوت (شکل F-۱۳)، وجود ناهنجاری عناصر تیتان و وانادیوم در پیریت مورد توجه قرار گرفت. هر روبش عنصری مدت زمان زیادی را صرف نمود. این نقشه‌ها در ارتباط با شکل F-۱۳، می‌باشند و نتایج آنها در راهنمای رنگی پایین هر نقشه آمده است. نقشه‌های سیلیسیوم، آلومینیوم، کلسیم، پتاسیم، سدیم و تلور، فراوانی گسترده این عناصر را در زمینه و حاشیه رگه‌چه نشان می‌دهد. از طرفی نقشه‌های آهن، گوگرد، تیتان، باریوم و سرب حضور آنها را در محدوده داخل دانه پیریت نشان می‌دهد (شکل ۱۵). آرسنیک و جیوه به مقدار کمی در پایین پیریت در داخل رگه‌چه دیده می‌شوند. طلا و جیوه در داخل و خارج پیریت به مقدار کم دیده می‌شوند. مقدار مس در این نوع پیریتها بسیار ناچیز است. بر اساس این نقشه‌ها (شکل ۱۵)، تصاویر BSE و تجزیه نقطه‌ای به نظر می‌رسد یک دانه مرکزی که احتمالاً یک مگنتیت غنی از تیتانیوم بوده، شکسته شده و سپس به ترکیبی از پیریت و روتیل دگرسان شده است؛ این واکنش به کمک محلولهای گرمابی غنی از گوگرد صورت گرفته است، البته پیریت به شکل دانه‌های خودشکل نیز در اطراف ته‌نشست کرده است. واکنش سولفیدی شدن (Shahabpour, 2005) در ذخایر طلا زمانی دیده می‌شود که محلولهای احیایی طلا و گوگرد با FeO در سنگ دیواره واکنش می‌دهند (در این جا سنگ دیواره یک دایک دیوریتی بوده است که به درون گرانودیوریت نفوذ نموده است و در آن مگنتیت آذرین غنی از تیتانیوم وجود داشته است) و پیریت (و روتیل با در نظر گرفتن تیتانیوم اضافی) شکل می‌گیرد که با نهشته شدن طلا همزمان است. در حقیقت این بافت پیشنهاد می‌کند که دانه اصلی یک ترکیب اکسلوشن از مگنتیت با تیغه‌های ایلمنیت بوده که با جانمایی پیریت به جای مگنتیت و روتیل به جای ایلمنیت صورت گرفته است.

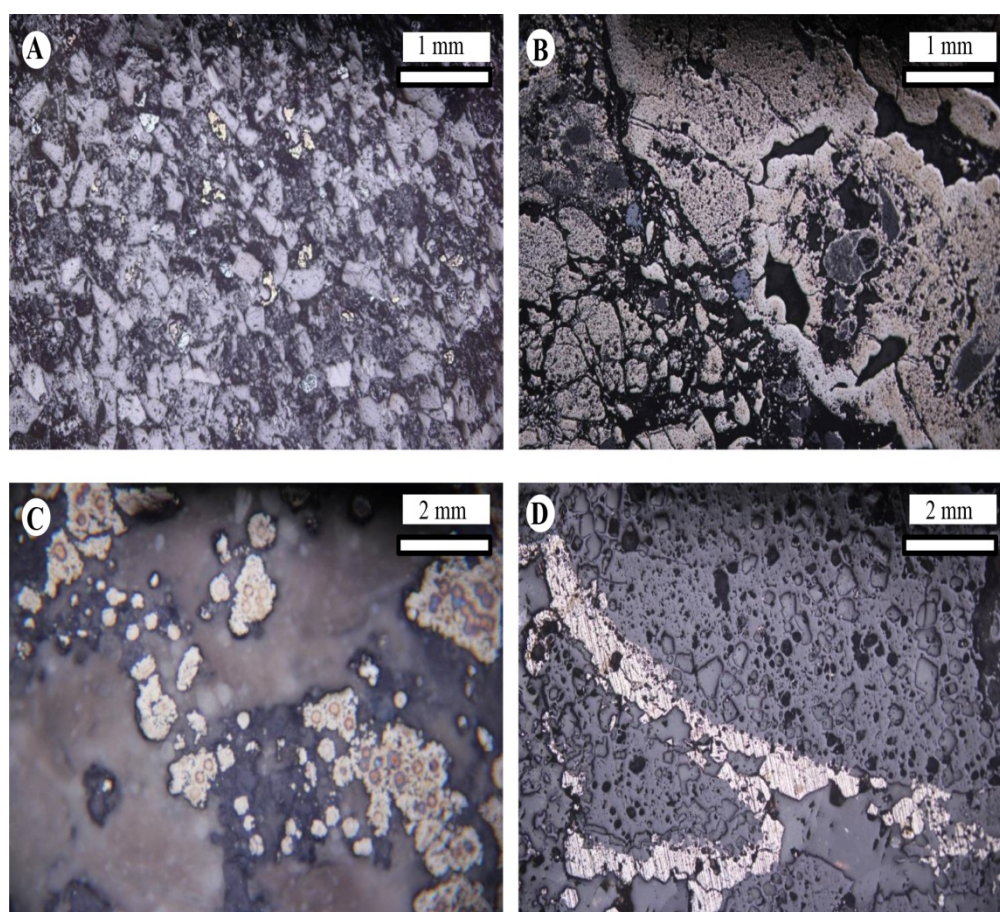
برخی پیریتها از نظر ترکیبی به طور نسبی یکنواخت (شکل‌های A-۱۳ و A-۱۴) هستند اما برخی از آنها دارای ناهنجاری از عناصر دیگر هستند. پیریت آرسنیک‌دار به همراه کالکوپیریت به صورت بی‌شکل و افشان همراه با انکلوزیونهای گالن و سیلیس دیده می‌شوند. برخی آگرگات شعاعی (شکل B-۱۴) یا اسفنجی که خوب پالیش نمی‌خورند، نشان می‌دهند و برخی به صورت فرامبوئیدال (شکل B-۱۳ و C-۱۴) ظاهر شده‌اند. گاهی کاملاً شکل‌دارند (شکل C-۱۳) و گاهی شکل خاصی نداشته و به کانیه‌های دیگری از قبیل مارکازیت، پیریت‌های دانه‌ریز یا آرسنیک‌دار (شکل D-۱۳) دگرسان شده‌اند. تغییرات در رنگ پیریت گاهی می‌تواند مربوط به فراوانی انکلوزیونهای سیلیسی دانه‌ریز باشد.

در برخی رگه‌چه‌ها، کلوامورفهای از پیریت با کربنات لوزی شکل همراه است (شکل E-۱۳). گاهی کانی پیریت با بافت اسفنجی همراه با کانیه‌های گرمابی آلکالی‌فلدسپار، آلبیت و آپاتیت در زمینه سیلیسی دیده می‌شود. برخی پیریتها انکلوزیونهایی از سیلیکات و تیتانیوم (شکل F-۱۳) نشان می‌دهند. در مطالعات تجزیه نقطه‌ای، دو نوع پیریت شکل‌دار دیده می‌شود: پیریت‌های دانه‌ریز که همراه کانیه‌های آلکالی-فلدسپار و آلبیت دیده می‌شوند و پیریت‌های درشت تیتان‌دار که همراه با آپاتیت دیده می‌شوند (شکل‌های A-۱۳ و C). پیریت‌های دانه‌ریز ترکیب شیمیایی ساده و یکنواخت دارند. گاهی آگرگات گروهی پیریتها با ابعاد ۵ میکرون همراه با آلبیت، سرسیت، کلسیت، کلسیت دولومیتی آهن‌دار و کلریت دیده می‌شود. در نزدیک حاشیه رگه‌چه، پیریت‌های ساده همراه دولومیت و آلکالی‌فلدسپار به صورت افشان دیده می‌شوند. گاهی پیریت‌های دانه‌درشت با خوردگی در مرکز، در حاشیه رگه دیده می‌شوند و همه بافت مشترکی در مرکزشان نشان می‌دهند (شکل F-۱۳). پیریت‌های درشت‌تر در مرکزشان روتیل یا آثاری از ایلمنیت نشان می‌دهند. این پیریتها با اندازه متوسط ۰/۲ میلی‌متر الگوی خطی به موازات حاشیه رگه را دنبال می‌کنند. گاه در خارج از رگه‌چه، مگنتیت تیتان‌دار و پیریت آرسنیک‌دار وجود دارد که به صورت پراکنده دیده می‌شوند. در حاشیه رگه‌چه، پیریت ترکیب ساده (شکل ۱۴-D) داشته و سیلیکات آلومینیوم تیتان‌دار به صورت انکلوزیون در آن دیده می‌شود.



شکل ۱۳. تصاویر BSE از پیریت در محدوده اکتشافی چشمه‌زرد؛ A: پیریت‌های دانه‌ریز افشان؛ B: پیریت‌های فرامبوئیدال؛ C: پیریت‌های خودشکل درشت دانه؛ D: پیریت بی‌شکل در رگه‌چه؛ E: پیریت آرسنیک‌دار با آگرگات شعاعی در فضای خالی؛ F: پیریت خود شکل با خوردگی در مرکز.

Fig. 13. Back-scattered electron images of pyrite in the Cheshme Zard district. A: Disseminated fine-grained pyrites, B: framboidal pyrites, C: Euhedral coarse-grained pyrites. D: Anhedral pyrite in veinlet. E: Arsenian bearing pyrite with radiating aggregate in open spacing. F: Euhedral pyrite with a corrosion in center.



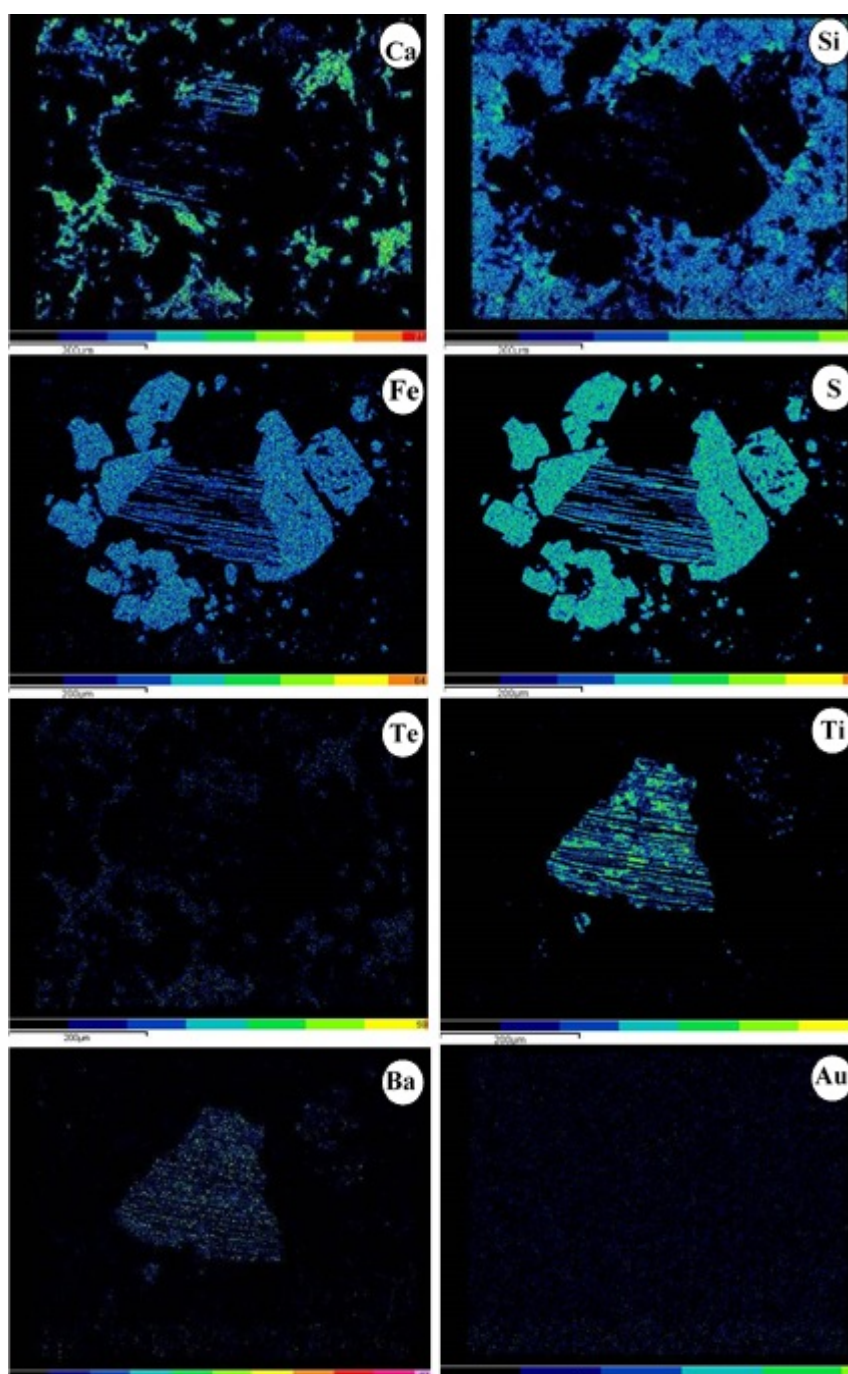
شکل ۱۴. تصاویر نور انعکاسی از پیریت؛ A: پیریت‌های دانه‌ریز افشان؛ B: پیریت آرسنیک‌دار با آگرگات شعاعی در فضای خالی؛ C: پیریت‌های فرامبوئیدال؛ D: پیریت‌های خودشکل دانه‌درشت در رگه‌چه.

Fig. 14. Reflected light microphotographs of pyrite. A: Disseminated fine-grained pyrites, B: Arsenian bearing pyrite with radiating aggregate in open spacing, C: Framboidal pyrites, D: Euhedral coarse-grained pyrites in veinlet.

نتیجه‌گیری

الگوی دگرسانی نشان می‌دهد مناطق سرسیت-کوارتز-پیریت و سیلیسی در نزدیک رگه‌های کانی‌سازی طلا، منطقه پروپلیتیک و کربناتی در بخش خارجی و منطقه آرژیلیک به صورت محدود در نزدیکی منطقه سیلیسی دیده می‌شود. کانی‌سازی در منطقه غالباً به صورت رگه‌ای و رگه‌ها از جنس کوارتز و کربنات می‌باشد و به مقدار کم در حاشیه رگه‌ها، رگه‌هایی از سولفیدها و دورتر به صورت افشانه‌هایی دیده می‌شود. این افشانه‌ها در فاصله کمتر از ۱۰ متر نسبت به حاشیه رگه‌های اصلی کوارتز-کلسیت دیده می‌شوند. تلفیق داده‌های زمین‌شیمیایی و دگرسانی دلالت بر افزایش طلا در بخش‌های سرسیتیک و سیلیسی است که با حضور رگه‌های کوارتز و کلسیت و رگه‌های پیریت و پیریت‌آرسنیک‌دار (شکل ۱۴-C و ۱۴-D) مشخص می‌شوند. مطالعات دگرسانی،

کانی‌سازی و زمین‌شیمیایی گمانه‌ها نشان می‌دهد ذخایر رگه‌ای طلا همراه با کانی‌های کوارتز، کلسدون، سرسیت، آدولاریا، کلسیت، دولومیت، ایلیت، دیکیت، آلپیت، کائولینیت و کلریت شکل گرفته است. پیریت کانی سولفیدی مهم در کانسنگ است. حضور کانی‌های آدولاریا، ایلیت و دیکیت کانی‌سازی کم‌سولفید را تأیید می‌کند. بر اساس مجموعه کانی‌های باطله کربنات، کلریت، کوارتز و کمتر سرسیت و مقدار بسیار کم پتاسیم فلدسپار در منطقه مطالعاتی پیشنهاد می‌شود مقدار pH سیال گرمابی نزدیک طبیعی تا کمی اسیدی (تقریباً ۴/۵ تا ۵/۳ تحت دمای ۲۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و شرایط ۱ کیلو بار فشار محاسبه شده است (Johnson et al., 1991) و طلا می‌تواند به‌طور عمده به شکل بی‌سولفید طلا حمل شود (Stefansson and Seward, 2004).



شکل ۱۵. برخی از نقشه‌های میکروشیمیایی عناصر اصلی و فرعی EMPA از دانه‌های پیریت در نمونه 3201-115.2 در محدوده چشمه‌زرد (ارجاع به شکل F.۱۳). تغییرات در مقدار آهن و گوگرد از مورفولوژی پیریت تبعیت می‌کند مرکز پیریت از عناصر تیتان و باریم غنی شده و اطراف آن از عناصر تلور، سرب، جیوه و پتاسیم تشکیل شده است. این نوع پیریت شامل انکلوزیونهای غنی شده از عناصر تیتانیوم و وانادیوم است. توجه کنید که مقدار تیتان و وانادیوم در بخش غنی‌شده حضور دارد و حواشی پیریت در ارتباط با دگرسانی سولفیداسیون است.

Fig. 15. Some microchemical maps of EMPA of distributions of major and trace elements for pyrite crystals in Cheshme Zard district, in sample 3201-115.2 (please see Fig. 13. F). Variation in Fe and S values follow the morphology of pyrite. The core is enriched with Ti and Ba and the rim is composed of Te, Pb, Hg and K. This type of pyrite contain Ti- and V-rich inclusions. Note, there is Ti and V in the enriched part and around of pyrite is related to sulfidation alteration feature.

رگه‌های طلا دار شناسایی شده است (جدول ۲) که شامل پیریت‌های آرسنیک‌دار، پیریت‌های فرامبوئیدال، پیریت‌های تیتان‌دار و پیریت‌های تأخیری می‌باشند. پیریت‌های آرسنیک‌دار به صورت بی‌شکل، دانه‌ریز و یا افشان در رگه‌های کوارتز و در سنگ دیواره دگرسان شده دیده می‌شوند که به صورت محلی با کالکوپیریت، مارکازیت، اسفالریت و گالن پاراژنز هستند. پیریت‌های درشت تیتان‌دار همراه با آپاتیت و روتیل دیده می‌شوند. پیریت‌های جوان تأخیری با ترکیب شیمیایی ثابت و یکنواخت به صورت دانه‌درشت و بی‌شکل هستند که در داخل رگه‌چه دیده می‌شوند، عناصر فرعی در این پیریت زیر حد تشخیص دستگاه است.

اشرف‌پور و همکاران (Ashrafpour et al., 2012) بر اساس نوارهای نازک کلسدونی، رشد بلورهای دروغین کوارتز بر روی کلسیت صفحه‌ای، هم‌رشدی کوارتز-کلسیت، مطالعه سیالات درگیر، وجود رگه‌های فراوان کلسیت و بافت برشی در رگه‌ها، کانی‌سازی طلا را در ارتباط مستقیم با جوشش می‌دانند (Ashrafpour et al., 2012). فرآیند جوشش، سبب کاهش H_2S و CO_2 و افزایش pH و ناپایداری کمپلکس‌های بی‌سولفید طلا در فاز بخار شده که نهشته شدن طلا را در بردارد (Simmons et al., 2000). یافته‌های این پژوهش، به حضور پیریت‌های درشت تیتان‌دار نیز اشاره دارد. براساس مطالعات کانی‌شناسی رگه‌های کانسار طلای شماره ۳ که توسط ریزکاوشگر الکترونی انجام شد، چهار نسل پیریت در

جدول ۲. دسته‌بندی انواع پیریت‌های موجود در محدوده اکتشافی طلای چشمه‌زرد.

Table 2. Classification of pyrite types in Cheshme Zard gold district.

Location and type of pyrite	As	Ti	V
Anhedral, veinlet	--	--	--
Anhedral fine-grained, Disseminated	0.6 - 2.9	--	--
Framboidal pyrite	--	--	--
Rim of framboidal pyrite	1.62	--	--
Radiating aggregate, open space	2.81 - 3.62	--	--
Euhedral coarse-grained, Disseminated	--	2.34 - 3.91	0.02 - 0.53
Fine to coarse-grained, Disseminated	--	--	--

با حاشیه حاوی آرسنیک و طلا شکل گرفته‌اند و در ادامه محلول‌های احیایی گوگرد و طلا دار، پیریت‌های درشت تیتان‌دار نسل سوم را به وجود آورده‌اند که مقدار طلای پایین‌تری دارند. پیریت‌های تأخیری درشت بلور نسل چهارم، نشانه ظهور آخرین فاز کانی‌سازی به منطقه است که احتمالاً فاقد کانسارسازی طلا هستند.

قدردانی

از پروفیسور فینگر و دکتر کرن به‌خاطر انجام تجزیه‌ها در دانشگاه سالزبورگ اتریش تشکر می‌شود. همچنین از سردبیر و داوران محترم مجله زمین‌شناسی اقتصادی ایران به پاس زحماتشان قدردانی می‌شود.

پیریت فرامبوئیدال عمدتاً در محیط‌های رسوبی رخ می‌دهد در حالی که ممکن است در طی دگرگونی و دگرسانی گرمایی هم شکل گیرد (Scott et al., 2009). پیریت‌های فرامبوئیدال نسل دوم، منطقه چشمه‌زرد، با توجه به ترکیب شیمیایی مشابه پیریت نسل اول به نظر می‌آید در طی دگرسانی گرمایی شکل گرفته باشند. بنابراین، براساس مطالعه بافت و ترکیب پیریت‌ها، پیشنهاد می‌گردد سیال کانی‌ساز، ابتدا دمای بالاتری داشته و تحت تأثیر کنترل‌کننده‌های ساختاری رگه‌چه‌های پیریت آرسنیک‌دار را شکل داده و به صورت جزئی با کانیه‌های سولفیدی آرسنوپیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت و طلا همراه است. سپس با کاهش دما و فشار، پیریت‌های فرامبوئیدال

References

- Abratis, P.K., Patrick, R.A.D. and Vaughan, D.J., 2004. Variations in the compositional, textural and electrical properties of natural pyrite: a review. *International Journal Mineral Process*, 74(1): 41–59.
- Agangi, A., Hofmann, A. and Wohlgemuth-Ueberwasser, C.C., 2013. Pyrite zoning as a record of mineralization in the Ventersdorp Contact Reef, Witwatersrand Basin, South Africa. *Economic Geology*, 108(6): 1243–1272.
- Alaminia, Z., Karimpour, M.H., Haidarian Shahri, M.R. and Homam, S.M., 2010. Mineralization and Interpretation of geophysical survey, IP/RS, in Hassan Abad Gold-Antimony, Northeast of Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 18(4):723–734.
- Alaminia, Z., Karimpour, M.H., Homam, S.M. and Finger, F., 2013a. The magmatic record in the Arghash region, NE Iran, and tectonic implications. *International Journal of Earth Sciences*, 102(6):1603-1625.
- Alaminia, Z., Karimpour, M.H., Homam, S.M. and Finger, F., 2013b. Geochemistry and geochronology of the magnetite series granitoids in Upper Cretaceous, Arghash-GhasemAbad, NE Iran. *Iranian Journal of Petrology*, 3(12):103–118.
- Alaminia, Z., Karimpour, M.H., Homam, S.M. and Finger, F., 2013c. Petrology, Geochemistry and Mineralization of Tertiary volcanic rocks associated with sub-volcanic intrusive bodies, with special reference to age dating and origin of granites from Arghash-GhasemAbad area, NE Iran. *Iranian Journal of Economic Geology*, 5(1):1–22.
- Ashrafpour, E., Ansdell, K.M. and Alirezaei, S., 2012. Hydrothermal fluid evolution and ore genesis in the Arghash epithermal gold prospect, northeastern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 51(1):30–44.
- Barton Jr, P.B., 1969. Thermochemical study of the system Fe-As-S. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 33(7):841–857.
- Butler, I.B. and Rickard, D., 2000. Framboidal pyrite formation via the oxidation of iron (II) monosulfide by hydrogen sulphide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(15): 2665–2672.
- Cook, N.J., Ciobanu, C.L. and Mao, J., 2009. Textural control on gold distribution in As-free pyrite from the Dongping, Huangtuliang and Hougou gold deposits. North China Craton (Hebei Province, China). *Chemical Geology*, 264(1):101–121.
- Earth Science Development Company (ESD Co.), 2001. Overview exploration in Arghash gold ore deposit, Southeast Neyshabour, unpublished report, Tehran, 51 pp. (in Persian)
- Earth Science Development Company (ESD Co.), 2002. Report of geological map and ore explorations of Arghash-Cheshme Zard gold ore deposit, Southeast Neyshabour, unpublished report, Tehran, 79 pp. (in Persian)
- Johnson, J.W., Oelkers, E.H. and Helgeso, H.C., 1991. SUPCRT92, a software package for calculating the standard molal thermodynamic properties of minerals, gases, aqueous species, and reaction from 1 to 5000 bars and 0 to 1000 °C. *Computers and Geosciences*, 18(4):899–947.
- Large, R.R., Maslennikov, V.V., Robert, F., Danyushevsky, L.V. and Chang, Z., 2007. Multistage Sedimentary and Metamorphic Origin of Pyrite and Gold in the Giant Sukhoi Log Deposit, Lena Gold Province, Russia. *Economic Geology*, 102(7):1233–1267.
- Larocque, A.C.L., Hodgson, C.J., Cabri, L.J. and Jackman, J.A., 1995. Ion-microprobe analysis of pyrite, chalcopyrite and pyrrotite from the Moberly VMS deposit in northwestern Quebec: evidence for metamorphic remobilization of gold. *Canadian Mineralogist*, 33(2):373–388.
- Oberthur, T., Weiser, T., Amanor, J.A. and Chryssoulis, S.L., 1997. Mineralogical siting and distribution of gold in quartz veins and sulfide ores of the Ashanti mine and other deposits in the Ashanti belt of Ghana: genetic implications. *Mineralium Deposita*, 32(3):107–118.
- Richards, J.P., Wilkinson, D. and Ullrich, T., 2006. Geology of the Sari Gunay epithermal gold deposit, Northwest Iran. *Economic Geology*, 101(S2):1455–1496.
- Samadi, M., 2001. Exploration in Arghash Gold Prospect. Geological Survey of Iran, unpublished report, Tehran, 73 pp. (in Persian)
- Scott, R.J., Meffre, S., Woodhead, J., Gilbert, S.E., Berry, R.F. and Emsbo, P., 2009. Development of framboidal pyrite during diagenesis, low-grade regional metamorphism, and hydrothermal alteration. *Economic Geology*, 104(8):1143–1168.

- Shahabpour, J., 2005. Economic geology. Shahid bahonar university of Kerman university publishing, Kerman, 543 pp.
- Simmons, S.F., Arehart, G., Simpson, M.P. and Mauk, J.L., 2000. Origin of massive calcite veins in the golden cross low-sulfidation epithermal Au–Ag deposit. New Zealand. *Economic Geology*, 95(1):99–112.
- Stefansson, A. and Seward, T.M., 2004. Gold (I) complexing in aqueous sulphide solutions to 500 °C at 500 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(20):4121–4143.
- Vaughan, J.P. and Kyin, A., 2004. Refractory gold ores in Archaean greenstones, Western Australia, mineralogy, gold paragenesis, metallurgical characterization and classification. *Mineralogical Magazine*, 68(2):255–277.



Mineralization and trace element distribution in pyrite using EMPA in exploration drill holes from Cheshmeh Zard gold district, Khorasan Razavi Province, Iran

Zahra Alaminia^{1*}, Mohammad Hassan Karimpour² and Seyed Massoud Homani³

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

2) Research Center for Ore Deposit of Eastern Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3) Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Submitted: Nov. 23, 2014

Accepted: Nov. 7, 2015

Keywords: Trace element, pyrite, CheshmehZard, gold district, NE Iran.

Introduction

Pyrite is the most abundant sulfide mineral in low sulfidation ore deposits. Experimental studies have shown that low-temperature (<150°C) pyrite that formed rapidly is more likely to be fine-grained and framboidal in shape compared to pyrite crystals that formed more slowly and at a higher temperature (> 200°C) from hydrothermal or metamorphic fluids (Butler and Rickard, 2000). Framboidal pyrite mostly occurs in sedimentary environments, though it could also form during metamorphism and hydrothermal alteration (Scott et al., 2009). The pyrite formed tends to be enriched in various trace elements such as Au and As. For this study we have combined the geology, alteration, mineralization with recent studies of the description of the deposit from core logging and underground mapping and geochemistry in the CheshmehZard gold district and also investigated the compositional variation and textural differences between pyrite types. This study is based on the results of our alteration and mineralization mapping and detailed logging of 1937.8 m of drill core.

Materials and Methods

Geology, hydrothermal alteration and mineralization were examined in drill holes along several cross sections. Host-rock alteration minerals and veins were determined for 11 samples using standard X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence spectrometry (XRF) techniques. Polished sections were studied by reflected light microscopy and backscattered electron images (BSE). In this study, the trace-

element composition of pyrite samples from the Au-III vein system was obtained using electron microprobe analyzer (EMPA) data. All analyses were carried out at the department of Materials Engineering and Physics of the University of Salzburg in Austria. The EMPA measurements and BSE imaging were made using a JXA-8600 electron microprobe. Spot analyses of 30 pyrite grains from CheshmehZard are given in Table 1.

Results

The study area is located in the north of Khorasan Razavi Province 45 km to the south of Neyshabour. The area near CheshmehZard could become important as a site of economically significant gold mineralization. Six gold-bearing vein systems were recognized east of Arghash. The estimated resources are about 2 million metric tons of potential ore with an average of 1.9 g/t Au (Samadi, 2001; Ashrafpour et al., 2012). Multiple intrusive events are recognized in the region including Precambrian to post-Oligocene-Miocene igneous rocks (Alaminia et al., 2013a). This includes the Arghash diorite pluton, upper Cretaceous granitoids (minor diorite, mainly quartz monzodiorite and granodiorite), early Eocene granite and several lamprophyre and small intrusions of quartz monzodiorite porphyries. Volcanics include andesite, dacite, pillow basalt and tuffs. Sedimentary rocks are conglomerate and minor limestone. Gold veins are hosted by intermediate to silicic volcanic rocks, tuffs, granite, granodiorite, and conglomerate. Veins consist of calcite and quartz. The main alteration zones mapped at the surface and underground are

*Corresponding authors Email: z.alaminia@sci.ui.ac.ir

sericite-quartz-pyrite-calcite, with silicified, propylitic, argillic, and carbonate zones. The mineralization associated with sericitic alteration and silicification occurs as veinlets and disseminated in the propylitic zone. Gangue minerals are quartz, chalcedony, calcite, adularia, illite, and kaolinite. Mineralization occurs as veinlets, breccia filling and disseminated. The veinlets are comprised of pyrite, arsenopyrite, minor chalcopryrite, sphalerite, galena, magnetite and hematite. Pyrite is the main sulfide mineral in the hypogene ore. Samples were collected with the objective of studying the pyrite in the Au (III) vein systems. All samples were therefore pyrite rich. The paragenesis was determined to show four stages of mineralization based on the following microscopic observations: 1. an initial pyrite veinlet stage with associated quartz, chlorite, epidote. Pyrite is fine to medium grained, anhedral and gold-poor. 2. a second pyritic stage (polymetallic sulfide stage) contains pyrite, chalcopryrite, galena, sphalerite, quartz and chalcedony, minor adularia and arsenopyrite. 3. An As-bearing pyrite stage with sericite, chalcedony and quartz. The pyrite is framboidal. 4. Finally, a carbonate-dominated stage. The pyrite is euhedral to anhedral and coarse grained. The Au concentration in Stages 2 and 3 pyrite is higher than that in Stage 4 pyrite.

Conclusions

The gangue mineral assemblages of carbonate, chlorite, quartz, and minor sericite and potassium feldspar in the ore-forming process of the Cheshmeh Zard gold district suggest that the pH value of the hydrothermal fluids was near neutral to slightly acid (approximately 4.5 to 5.3 under 250 to 300 °C and 1 kbar conditions) and that gold would be transported mainly as $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ (Stefansson and Seward, 2004). Three types of pyrite based on the chemical composition have

been investigated: As-bearing pyrite, Ti-V - bearing pyrite and pure or barren pyrite. EMPA analyses of the pyrite in gold veins show maximum concentrations of As (3.62 wt.%), Ti (3.91 wt.%) and V (0.53 wt.%) respectively. The occurrence of the gold is usually associated with arsenian pyrite and Ti-V - bearing pyrite. Veinlets of the Py1 coexisting with arsenopyrite and gold Py2 implies the substitution of sulfur by arsenic. Gold precipitated under relatively reducing conditions in framboidal pyrite. Py3 formed prior to barren pyrite (IV).

References

- Alaminia, Z., Karimpour, M.H., Homam, S.M. and Finger, F., 2013a. The magmatic record in the Arghash region, NE Iran, and tectonic implications. *International Journal of Earth Sciences*, 102(6):1603-1625.
- Ashrafpour, E., Ansdell, K.M. and Alirezaei, S., 2012. Hydrothermal fluid evolution and ore genesis in the Arghash epithermal gold prospect, northeastern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 51(1):30-44.
- Butler, I.B. and Rickard, D., 2000. Framboidal pyrite formation via the oxidation of iron (II) monosulfide by hydrogen sulphide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(15): 2665-2672.
- Samadi, M., 2001. Exploration in Arghash Gold Prospect. Geological Survey of Iran, unpublished report, Tehran, 73 pp. (in Persian)
- Scott, R.J., Meffre, S., Woodhead, J., Gilbert, S.E., Berry, R.F. and Emsbo, P., 2009. Development of framboidal pyrite during diagenesis, low-grade regional metamorphism, and hydrothermal alteration. *Economic Geology*, 104(8):1143-1168.
- Stefansson, A. and Seward, T.M., 2004. Gold (I) complexing in aqueous sulphide solutions to 500 °C at 500 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(20):4121-4143.