



کانی‌سازی اکسید آهن-مس-طلا (IOCG) در کانسار جلال آباد، شمال غرب زرنند

بهرز کریمی شهرکی^{۱*}، بهزاد مهرابی^۱، فریبرز مسعودی^۲

۱- دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران

۲- مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران

۳- دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

(دریافت مقاله: ۹۴/۴/۴، نسخه نهایی: ۹۴/۶/۲۸)

چکیده: کانسار آهن جلال آباد در ۳۸ کیلومتری شمال غرب زرنند، در استان کرمان واقع شده است. ذخیره‌ی کانسار جلال آباد ۲۰۰ میلیون تن سنگ آهن با عیار $Fe = 45\%$ ، $S = 1.1\%$ و $P = 0.08\%$ است. کانه‌سازی اکسید آهن در سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی کامبرین زیرین (سری ریزو) رخ داده است. کانه‌سازی در سیلتستون، سیلتستون‌های ماسه‌ای، سنگ‌های ولکانو کلاستیک و دولومیت جای گرفته است. جلال آباد یک کانسار پنهان است و رخنمون کانسنگ آهن در منطقه بسیار ناچیز است. کانه‌ی اصلی مگنتیت بوده و مارتیتی شدن از اکسایش مگنتیت ایجاد شده است. پیریت و کالکوپیریت از مهمترین کانه‌های سولفیدی به همراه مقادیر کم آرسنوپیریت، بیسموتینیت و کوولیت هستند. کانه‌سازی مس در مرحله‌ی سولفیدی و اکسیدی تشکیل شده و به صورت افشان، رگه-رگچه‌ای و پرکننده‌ی حفره‌هاست. مالاکیت، آزوریت و آتاکامیت از مهمترین کانی‌های منطقه‌ی اکسیدی هوازده‌ی ذخیره هستند. طلای آزاد به صورت نفوذی‌های کوچکتر از ۵۰ میکرون در کالکوپیریت، پیریت و مگنتیت دیده شده است. دگرسانی در معدن جلال-آباد گسترده بوده و مهم‌ترین آن‌ها شامل دگرسانی سدی-کلسیک، کلریتی، سریسیتی و سیلیسی است. دگرسانی سدی-کلسیک (مجموعه فرواکتینولیت، ترمولیت، مگنزیم هورنبلند و مگنتیت) در بخش‌های زیرین کانسار واقع شده است. بیشترین کانی غیر فلزی، کوارتز است که همراه با تالک، کلریت، فرواکتینولیت، کلسیت، سریسیت و اپیدوت از کانی‌های باطله مشاهده شده است. بررسی‌های شاره‌های درگیر روی کوارتز همراه مگنتیت در کانسار جلال آباد نشان داد که شاره‌های درگیر از نوع سه فاز $(L+V+S)$ با کانی نوزاد هالیت هستند. دمای همگن شدن شاره‌های درگیر ۲۸۰ الی ۴۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و شوری آن‌ها ۳۷ الی ۵۱ درصد وزنی نمک طعام است. شاره‌های درگیر یاد شده‌ی شور با دمای همگن بالا در کانسار جلال آباد نشان می‌دهد که شاره‌های کانی‌سازی دارای خاستگاه ماگمایی-گرمایی هستند. بررسی‌های کانی‌شناسی، دگرسانی، ژئوشیمی و شاره‌های درگیر نشان داد که کانسار جلال آباد مشابه کانسارهای IOCG است.

واژه‌های کلیدی: دگرسانی گرمایی؛ شاره‌های درگیر؛ کانسار IOCG؛ جلال آباد.

مقدمه

بیسموت، کبالت، مس، طلا، نقره و نیوبیم را شامل می‌شود.

در کانسارهای IOCG عملکرد گرماب‌ها شدید بوده و بسته به جنس سنگ میزبان و عمق تشکیل، دگرسانی‌های متفاوتی رخ می‌دهند که دگرسانی سدی-کلسیک از شاخصه‌های مهم

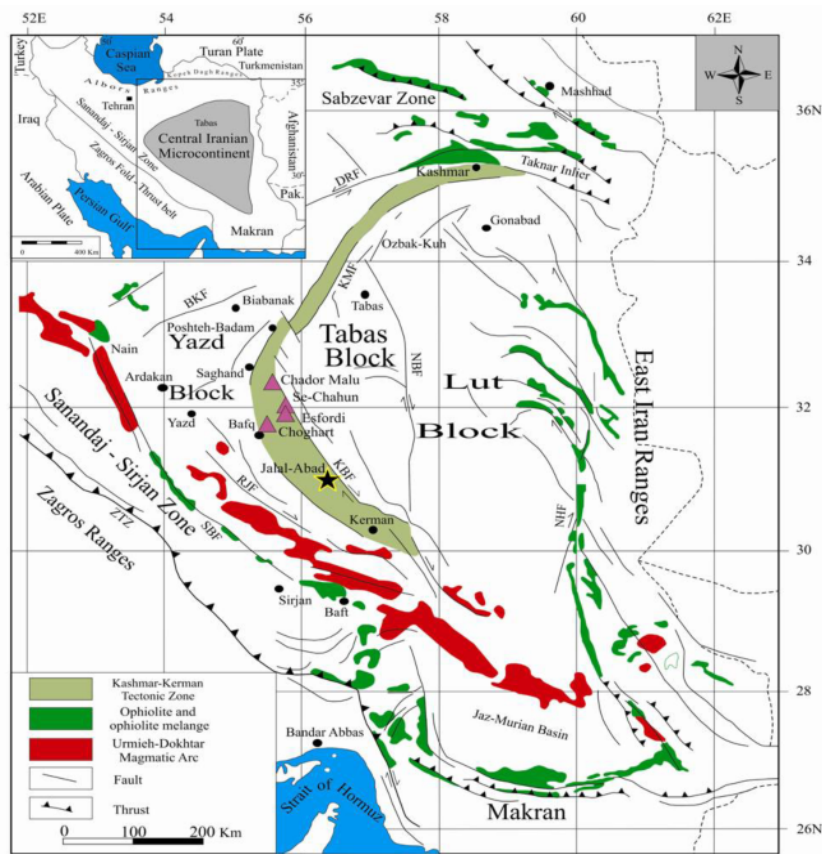
در سال‌های اخیر نوع جدیدی از کانسارهای آهن به نام کانسار اکسید آهن-مس-طلا (IOCG) توسط هیتزمن و همکاران [۱] معرفی شده است. این نوع کانسار طیف گسترده‌ای از کانسار آهن را با عناصر جانبی فسفر، عناصر نادر خاکی، اورانیوم،

نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، دگرسانی و شیمی کانی‌ها ارایه شده‌اند.

روش انجام پژوهش

پس از بررسی‌های صحرایی و کتابخانه‌ای، تعداد ۱۰۰ نمونه از رخنمون‌های مختلف سنگ میزبان از موقعیت‌های مختلف کانسار و از گمانه‌های حفاری شده برداشت شدند. کانی‌سازی بیشتر در عمق رخ داده و بیشترین نمونه‌ها از مغزه‌های حفاری شماره‌ی ۲۰، ۱۰، ۲۹، ۲۵، ۲۹، ۴۳، ۴۴، ۵۳ و تا عمق ۴۰۰ متر برداشت شده‌اند. تعداد ۳۰ مقطع صیقلی، ۴۵ مقطع نازک‌صیقلی برای بررسی‌های میکروسکوپی عبوری-بازتابی، میکروسکوپ الکترونی (SEM) و ریزپردازش الکترونی (EPMA) تهیه شدند. تعداد ۱۵ نمونه از بخش‌های دگرسان و کانسنگ با استفاده از XRD مدل Philips- Xpertpro، در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران مورد آزمایش قرار گرفتند. تجزیه به روش EPMA در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران با استفاده از دستگاه الکترون مایکروپروب مدل CAMECA-SX100 انجام گرفت.

این کانسارها است [۲]. منطقه‌ی زمین‌ساختی کاشمر-کرمان در ایران مرکزی حاوی بیش از ۳۴ بی‌هنجاری و کانسار مگنتیت و مگنتیت-آپاتیت است که در برخی از آن‌ها به‌طور محلی از عناصر نادر خاکی و اورانیوم نیز غنی شده‌اند (شکل ۱). وجود دو میلیارد تن کانسنگ آهن و تنوع مواد معدنی، این منطقه را به یک ایالت معدنی یگانه درآورده است [۳-۵]. کانسار آهن جلال‌آباد یکی از کانسارهای منطقه‌ی زمین‌ساختی کاشمر-کرمان است که در ۳۸ کیلومتری شمال غرب شهر زرنند در استان کرمان واقع شده است (شکل ۱). بررسی‌های قبلی در منطقه شامل بررسی‌های تکنواکسیپورت [۶] مهرابی و کریمی شهرکی [۷] و کریمی شهرکی [۸] بوده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده ذخیره‌ی کانسار جلال-آباد تقریباً ۲۰۰ میلیون تن سنگ آهن با عیار میانگین $P = 0.08\%$ و $S = 0.18\%$ ، $Fe = 45\%$ است. برخلاف کانسارهای دیگر منطقه‌ی بافق در کانسار جلال‌آباد علاوه بر کانی‌سازی آهن، کانی‌سازی مس نیز رخ داده و کانی‌سازی طلا برای اولین بار در این کانسار معرفی می‌شود. در این پژوهش



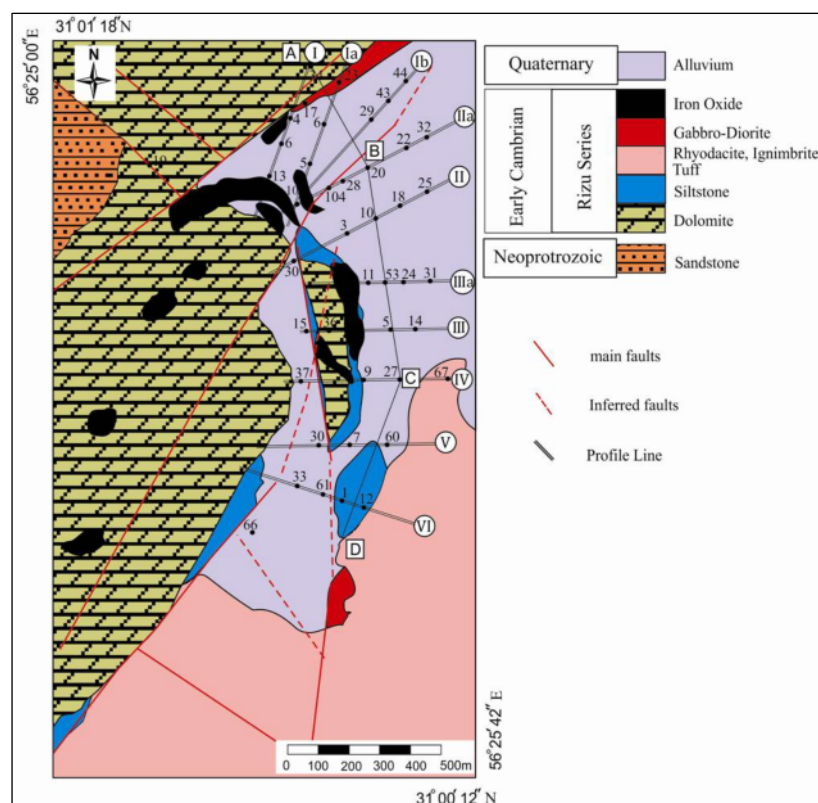
شکل ۱ منطقه‌ی زمین‌ساختی کاشمر-کرمان و موقعیت کانسارهای آهن منطقه‌ی بافق و جلال‌آباد زرنند با تغییرات [۹].

زمین‌شناسی

سنگ‌های رسوبی-تخریبی (سری مراد) و واحدهای آتشفشانی-رسوبی کامبرین زیرین (سری‌های ریزو-دزو) از مهم‌ترین واحدهای تشکیل دهنده کانسار جلال‌آبادند که از زمان نئوپروتروزوئیک پایانی تا کامبرین زیرین در ساختار زمین-شناسی منطقه مشارکت دارند (شکل ۲). سنگ میزبان کانسار جلال‌آباد از سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی سری ریزو است. ضخامت سری ریزو در منطقه‌ی تقریبی ۱۰۰۰ متر برآورد شده است و بخش ماسه‌سنگی زیرین ریزو در منطقه رخنمون ندارد و از طریق حفاری‌های پی‌جویی شناسایی شده است [۶]. تنوع سنگی سری ریزو در کانسار جلال‌آباد عبارتند از سیلتستون، ماسه‌سنگ، کانسنگ مگنتیتی، دولومیت، توف با ترکیب اسیدی و حدواسط، توفیت، ایگنمبریت، ریوداسیت و داسیت. از ویژگی‌های شاخص این سنگ‌ها تغییرات رخساره‌ای مشخص و قرارگیری ماسه سنگ و سیلتستون در افق‌های زیرین و در ادامه با رخساره‌ی دولومیتی است. رخساره‌های آتشفشانی به صورت عمودی و جانبی در منطقه گسترش دارند. در بخش غربی کانسار دنباله‌های دولومیتی به طول تقریبی ۴ کیلومتر و ضخامتی بین ۳۰۰ الی ۳۵۰ متر دیده می‌شوند. توده‌های

کوچک آذرین از نوع گابرو، میکرو گابرو و تعدادی دایک با ترکیب دیوریت و دیاباز در منطقه رخنمون دارند (شکل ۲). سال‌سنجی دقیقی روی این سنگ‌ها انجام نشده است و شواهد زمین‌شناسی بیانگر جوان‌تر بودن آن‌ها نسبت به سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی از سری ریزو هستند و احتمالاً قدیمی‌تر و یا هم‌زمان باکانی‌سازی آهن شکل گرفته‌اند. گسل‌های منطقه به صورت روندهای شمال‌غربی-جنوب‌شرقی و شمال‌شرقی-جنوب‌غربی دیده می‌شوند (شکل ۲).

بخش بیشتر منطقه از رسوب‌های آبرفتی و رسوب‌های بادی پوشیده شده است و رخنمون‌های واحدهای سنگی در منطقه کم هستند. در کانسار جلال‌آباد کانی‌سازی بیشتر در بخش‌های عمیق رخ داده و رخنمون‌های کمی از کانسنگ در بخش‌های شمال غربی و غربی کانسار دیده می‌شوند و اطلاعات به دست آمده از کانسار از طریق بررسی‌های گمانه‌های حفاری حاصل شده‌اند. شکل تقریبی کانسار جلال‌آباد به صورت یک عدسی کشیده با راستای شمال غربی-جنوب شرقی است و کانی‌سازی در کانسار بیشتر به صورت توده‌ای است و کانی‌سازی برشی، رگه-رگچه‌ای، افشان و آغشته نیز در مقادیر کمتر دیده می‌شوند.



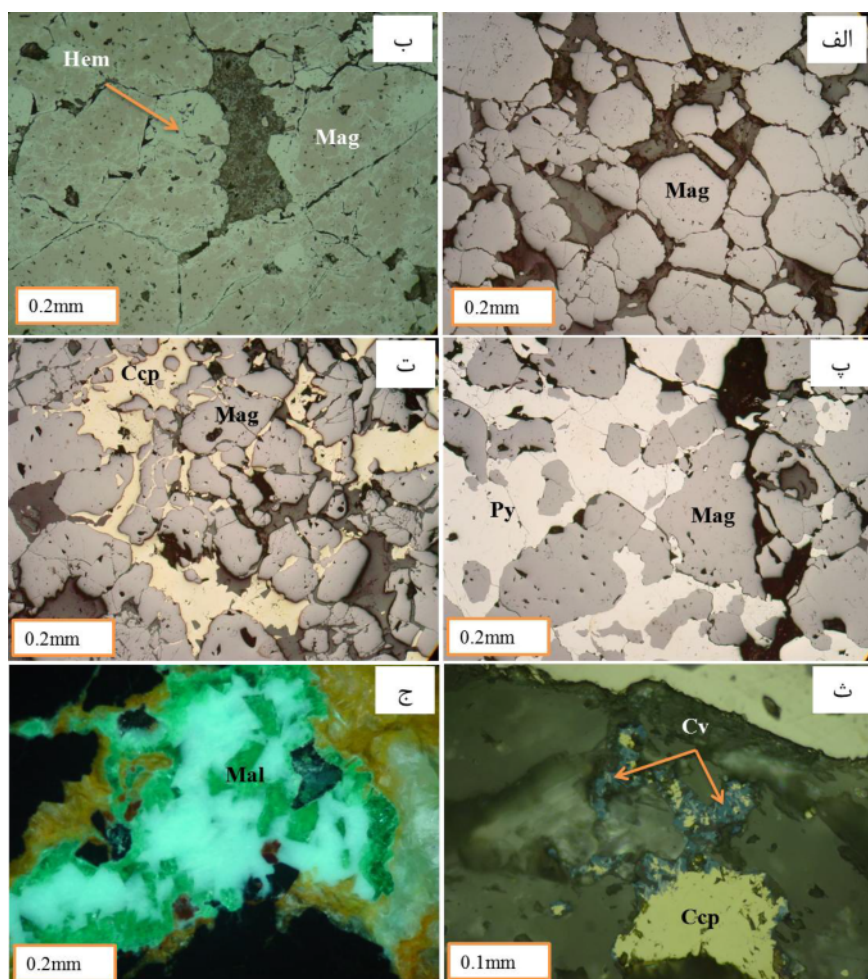
شکل ۲ نقشه‌ی زمین‌شناسی معدن جلال‌آباد زرنده با تغییرات [۶]

کانی‌شناسی

مگنتیت، مهم‌ترین کانی آهن‌دار در جلال‌آباد است، و بیشتر در بخش‌های عمیق کانسار دیده می‌شود و در بخش‌های کم‌عمق و سطحی مقدار آن کاهش می‌یابد. مگنتیت در نمونه‌ها به صورت خودشکل تا بی‌شکل‌اند و اندازه‌ی آن‌ها از ۰/۰۲ تا ۱ میلیمتر متغیر است. بافت کانی‌سازی در کانسار به صورت‌های توده‌ای، افشان، برشی و پرکننده‌ی حفره‌ها و رگه-رگچه‌ای است (شکل ۳ الف). برخی از مگنتیت‌ها تحت تأثیر حرکت‌های زمین ساختی دستخوش شکستگی شده و دارای بافت‌های کاتاکلاستیکی و خردشده هستند. فضای بین بلورهای مگنتیت بیشتر با کانی‌های اکتینولیت، کلریت، تالک، دولومیت و کوارتز پر شده است. هماتیت بیشتر در بخش‌های نزدیک به سطح، رخنمون‌های کانسنگ در سطح و در محل‌هایی که در اثر

حرکت‌های زمین ساختی دستخوش شکستگی شده‌اند به صورت گسترده دیده می‌شوند.

مارتیتی‌شدن در اعماق زیاد بسیار ناچیز است و از اکسایش مگنتیت به وجود آمده است (شکل ۳ ب). مارتیتی‌شدن در بخش‌هایی تشکیل می‌شود که گریزندگی اکسیژن بالا و یا ممکن است در اثر اکسایش دوباره‌ی مگنتیت اولیه (مارتیت با دمای بالا) تشکیل شود [۱۰]. مارتیتی‌شدن از حاشیه بلورهای مگنتیت و در راستای شکستگی‌ها و سطوح رخ‌ها شروع شده و در مراحل پیشرفته‌تر به داخل بخش‌های داخلی کانه گسترش یافته است. در کانسار جلال‌آباد کانی‌سازی آپاتیت بسیار ناچیز است و تنها در بررسی‌های با میکروسکوپ الکترونی شناسایی شده است.



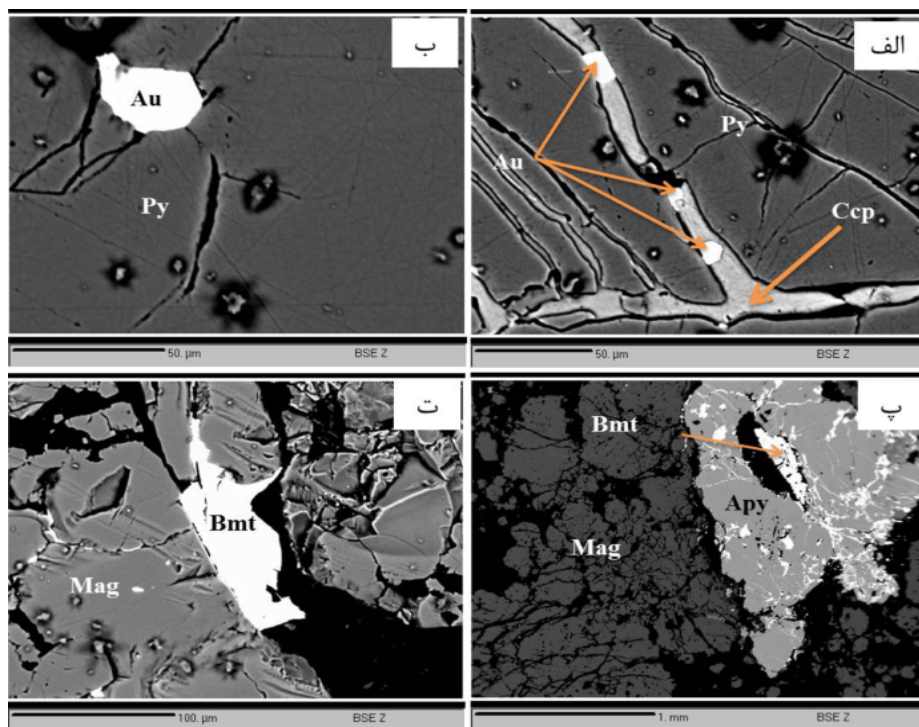
شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی کانه‌ها در نور بازتابی، الف) بلورهای بی‌شکل تا خودشکل مگنتیت (Mag) در بخش کانسنگ مگنتیتی، ب) اکسایش مگنتیت به هماتیت (Hem) طی فرآیند مارتیتی‌شدن، پ) فضای بین بلورهای مگنتیت که به وسیله‌ی پیریت (Py) پر شده است، ت) و ث) کالکوپیریت (Ccp) فضای بین بلورهای مگنتیت را پر کرده است، ث) کالکوپیریت در اثر دگرسانی به کوولیت (Cv) تبدیل شده است، ج) حفره-های موجود در کانی‌های باطله به وسیله‌ی مالاکیت (Mal) پر شده‌اند.

شامل مالاکیت $[Cu_2(CO_3)(OH)_2]$ ، آزوریت $[Cu_3(CO_3)_2(OH)_2]$ و آتاکامیت $[Cu_2Cl(OH)_3]$ می‌شوند. مالاکیت و آزوریت فراوان‌ترین کانی ثانویه مس و در واقع فراوان‌ترین کانی مس‌دار در نمونه‌های سطحی و کم عمق منطقه جلال‌آباد است که در اثر اکسایش کالکوپیریت حاصل شده است. مالاکیت در بخش‌های اکسیدی و به همراه سنگ‌های بخش فوقانی کانسار اغلب به صورت پرکننده‌ی فضاهای خالی و آغشتگی‌های سطحی حضور دارد که به صورت ریزبلور دیده می‌شود (شکل ۳ ج).

کانی‌سازی طلا نیز در جلال‌آباد رخ داده و بررسی‌های ریز پردازشی الکترونی نشان داد که کانی‌سازی طلا بیشتر همراه کالکوپیریت است. طلا به صورت نفوذی‌های ریز در ابعاد کوچکتر از ۲۵ میکرون در رگچه‌های کالکوپیریت دیده می‌شود (شکل ۴ الف). همراهی مس-طلا با یکدیگر معرف اهمیت نقش سیستم کانی‌ساز مس در نهشت طلاست. پیریت‌هایی که همزمان با کالکوپیریت‌های فاز کانی‌سازی سولفیدی مس تشکیل شده‌اند حاوی نفوذی‌هایی از طلا هستند (شکل ۴ ب). ابعاد ذرات طلا در پیریت کمتر از ۵۰ میکرون است.

پیریت به صورت گسترده در کانسار جلال‌آباد حضور دارد و درصد بالایی از گوگرد موجود در آن را به خود اختصاص داده است. پیریت‌ها بین کانه‌های مگنتیت تشکیل شده‌اند و میزان آن‌ها در بخش‌های مختلف متفاوتند (شکل ۳ پ). پیریت‌ها به صورت بلوری، نیمه‌بلوری با دانه‌بندی نامنظم با اندازه‌های ۰/۲ تا ۰/۳ میلیمتر و رگه-رگچه‌ای هستند. مقدار پیریت در نمونه‌ها متغیر است و مقدار آن در نمونه‌ها، کمتر از ۱٪ تا ۲۰٪ تغییر می‌کند. کالکوپیریت مهم‌ترین کانی مس‌دار کانسار جلال‌آباد است و اغلب به شکل‌های نامنظم، رگه‌ای، پرکننده فضای خالی وجود دارد و ابعاد کانه‌ها بین ۰/۱ تا ۱/۵ میلیمتر است (شکل ۳ ت) و در اثر عوامل دگرسانی از حاشیه به کولیت تبدیل شده است (شکل ۳ ث). مقدار تقریبی کالکوپیریت در نمونه‌ها کمتر از ۱ درصد تا ۶ درصد تغییر می‌کند. کانی‌سازی مس سولفیدی بیشتر در بخش کانسنگ توده-ای مگنتیت و در بخش‌های عمیق کانسار دیده می‌شود و فراوانی آن به سمت بخش‌های سطحی کانسار کمتر است.

به منظور شناسایی دقیق نوع کانی‌های مس اکسیدی، نمونه‌هایی که حاوی مقادیر قابل توجهی مس اکسیدی بودند مورد بررسی XRD قرار گرفتند و نتایج نشان داد که کانی‌ها



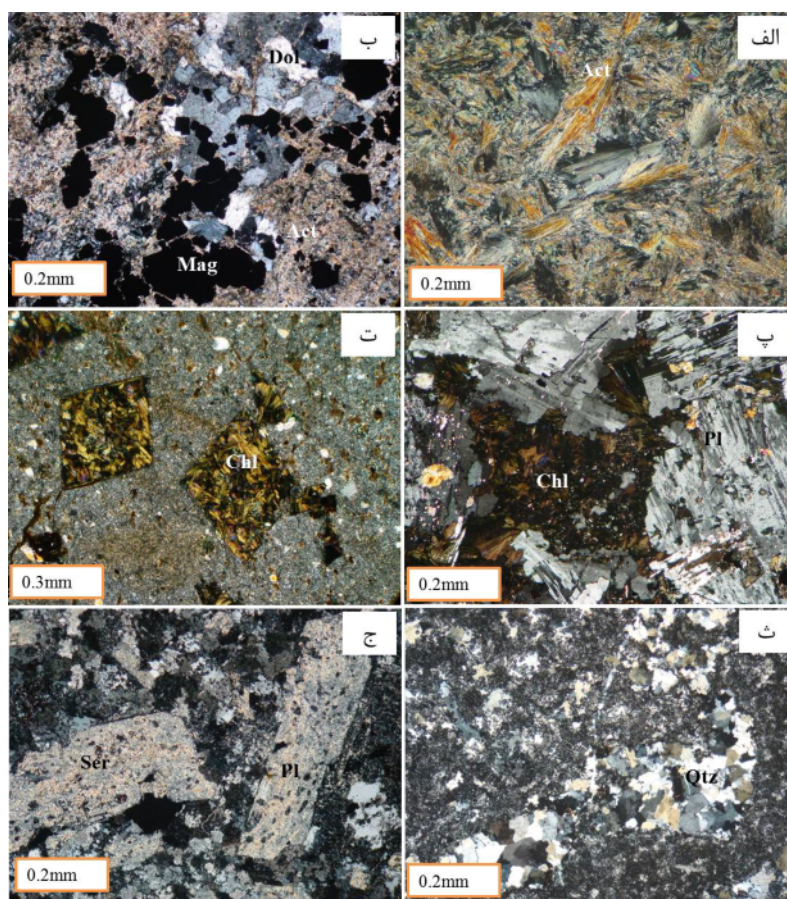
شکل ۴ تصاویر الکترون برگشتی تهیه شده به وسیله‌ی ریزپردازنده‌ی الکترونی از بخش‌های کانی‌سازی شده، الف) رگچه‌های کالکوپیریت حاوی طلا (Au) در زمینه پیریت، ب) نفوذ طلا در داخل پیریت، پ) پرشدگی حفره‌ها موجود در مگنتیت به وسیله بیسموتینیت (Bmt) و آرسنوپیریت (Apy)، ت) پرشدگی حفره‌ها و شکستگی‌های مگنتیت به وسیله بیسموتینیت.

منطقه‌های دگرسان در کانسار شامل اکتینولیت، ترمولیت، کلریت، دولومیت، گوتیت، پیریت، تالک، کوارتز، کلسیت، بیوتیت، آلبیت و سرپسیت است. دگرسانی‌های گرمایی اولیه شامل دگرسانی‌های سدی-کلسیک است که با کانی‌های اکتینولیت، مگنتیت، پیریت و کلریت همراه است. بررسی‌های سنگ‌نگاری و پراش پرتو ایکس (XRD) که به‌صورت کمی روی نمونه‌ها انجام شد، و در مجموع نشان داده که نمونه‌ها از مگنتیت (۴۱٪)، فرواکتینولیت (۲۵٪)، تالک (۲۰٪)، کلریت (۱۰٪) و کلسیت (۴٪) تشکیل شده‌اند که معرف فرایند متاسوماتیسم سدیم است. دگرسانی سدیک-کلسیک در بخش‌های زیرین کانسار (عمق ۳۰۰-۴۰۰ متر) با کانی‌های شاخص اکتینولیت و ترمولیت مشاهده شده، در حالی که در نمونه‌های سطحی مشاهده نشده است (شکل ۵ الف و ب).

حضور نفوذی‌های طلا در مگنتیت، دولومیت و آنکریت از طریق بررسی‌های ریزپردازنده‌ی الکترونی شناسایی شد. بررسی‌های کانی‌شناسی به وسیله‌ی ریزپردازنده‌ی الکترونی نشان داد که کانه‌های بیسموتینیت و آرسنوپیریت همراه یکدیگر در کانسنگ تشکیل شده‌اند (شکل ۴ پ). بیسموتینیت بی‌شکل است و شکاف‌های موجود در مگنتیت را پر کرده است (شکل ۴ ت). ابعاد بیسموتینیت در نمونه‌ها معمولاً کمتر از ۰/۰۴ میلیمتر و ابعاد آرسنوپیریت غالباً کمتر از ۰/۰۷ میلیمتر است.

دگرسانی

دگرسانی گرمایی به‌طور گسترده‌ای در کانسار جلال‌آباد صورت گرفته و مجموعه‌ی کانی‌های دگرسان در منطقه تاریخچه‌ی فعالیت‌های گرمایی را در منطقه نشان می‌دهد. بررسی‌های XRD و میکروسکوپی نشان دادند کانی‌های معمول در

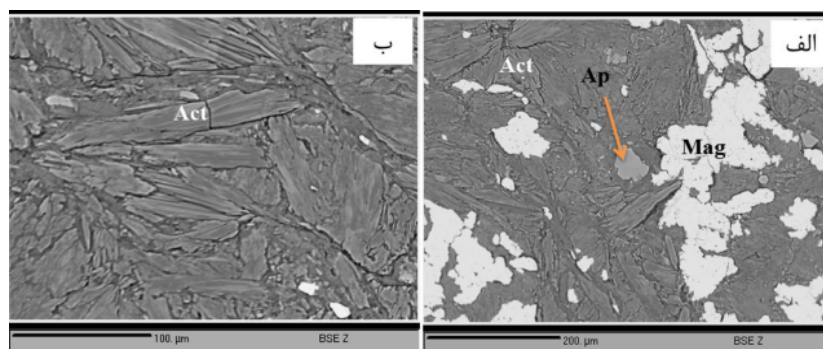


شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی از دگرسانی‌های موجود در کانسار جلال‌آباد، الف) دگرسانی سدی در کانسنگ آهن با رخداد کانی‌های کشیده و سوزنی اکتینولیت (Act)، ب) تشکیل بلورهای مگنتیت بین دولومیت (Dol) و اکتینولیت، پ) دگرسانی پلاژیوکلازها (Pl) در سنگ‌های آتشفشانی به کلریت (Chl)، ت) دگرسانی بلورهای خودشکل هورنبلند در سنگ‌های آتشفشانی به کلریت، ث) سیلیسی شدن سنگ‌های توفی در اثر پر شدن حفره‌ها و شکستگی‌ها به وسیله کوارتز (Qtz) و تشکیل کوارتز، ج) دگرسانی بلورهای پلاژیوکلاز در دایک دیابازی به‌طور کامل به سرپسیت (Ser).

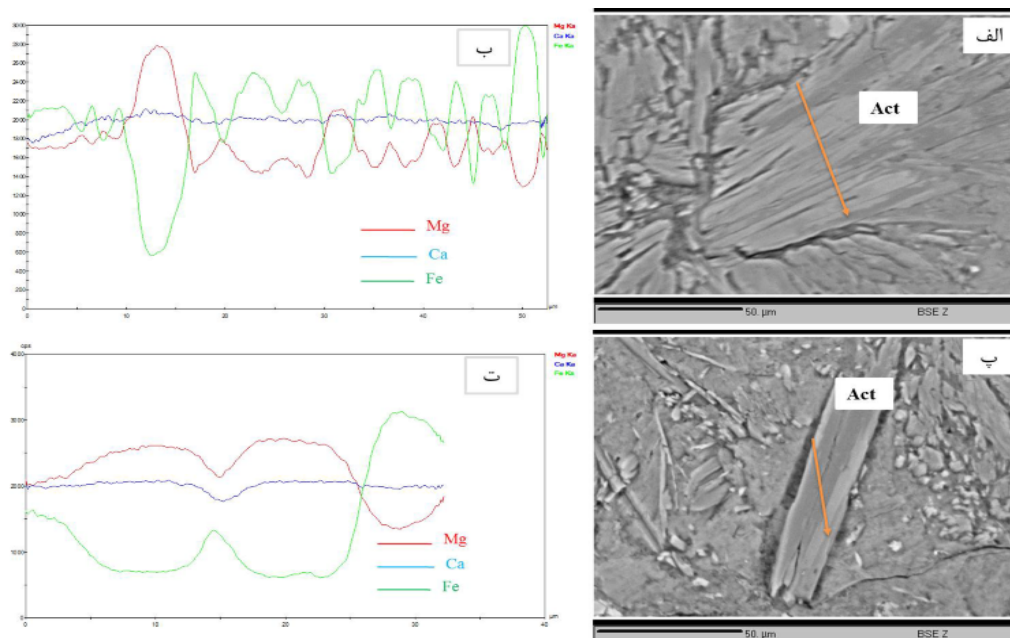
قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهند (شکل ۶ ب). نیمرخ‌های تهیه شده از آمفیبول‌ها، غنی‌شدگی و تهی‌شدگی از عناصر Fe و Mg را نشان می‌دهند در صورتی که مقدار Ca تقریباً ثابت بوده و تغییراتی نشان نمی‌دهد (شکل ۷). کلریت از دیگر کانی‌های مهم دگرسان است که به‌طور گسترده در بخش‌های مختلف کانسار تشکیل شده و در ماسه سنگ، سیلتستون، گابرو، دیوریت، سنگ‌های آتشفشانی و همراه کانسنگ دیده می‌شود. کلریتی شدن در اثر دگرسانی کانی‌های مافیک پیروکسن، هورنبلند و عملکرد شاره‌های غنی از Mg ایجاد می‌شود [۱۱].

در بخش‌های غنی از اکتینولیت کانی‌های آپاتیت، زیرکن، پیریت و کوارتز نیز در مقادیر کم دیده شدند (شکل ۶ الف). کانی‌سازی مگنتیت بیشتر با کانی‌های دگرسان اکتینولیت، کلریت و تالک همراه است. تالک در اثر دگرسانی اکتینولیت‌ها و در مواردی نیز در اثر عملکرد گرماب‌های حاوی سیلیس روی بخش‌های دولومیتی ایجاد شده است.

آمفیبول‌های بخش دگرسان همراه کانسنگ ریزپدازش الکترونی شدند. تصاویر الکترون برگشتی نشان می‌دهند که در بخش‌های کانسنگ غنی از مگنتیت، آمفیبول‌ها تغییرات رنگ



شکل ۶ تصاویر الکترون برگشتی به وسیله ریزپدازنده‌ی الکترونی از دگرسانی‌های سدی در کانسار جلال‌آباد. الف) هم‌رشدی مگنتیت با اکتینولیت و حضور بلورهای آپاتیت (Ap) بین بلورهای اکتینولیت، ب) منطقه‌بندی بلورهای اکتینولیت به‌دلیل تغییرات منیزیم و آهن.



شکل ۷ نیمرخ تغییرات غلظت عناصر در اکتینولیت‌ها، نیمرخ در جهت پیکان با استفاده از یک ریزپدازنده‌ی الکترونی تهیه شده است. تصاویر الکترون برگشتی اکتینولیت‌ها نشان می‌دهند که دوفاز در کنار یکدیگر وجود دارند (قسمت تیره و قسمت روشن). براساس نیمرخ‌های رسم شده مقدار عنصر آهن در بخش‌های روشن بیشتر از منیزیم است و مقدار منیزیم در بخش‌های تیره بیشتر از آهن است و مقدار کلسیم تقریباً در هردو ثابت است.

اولیه کانی سازی تشکیل شده است.

ژئوشیمی

براساس ترکیب شیمیایی و عیار سنگ آهن، کانسار جلال آباد به چهار گروه کانسنگ اکسیدی، کانسنگ مگنتیتی پرعیار، کانسنگ مگنتیتی کم عیار و سیلتستون های کانی سازی شده تقسیم می شود (جدول ۲).

دگرسانی های مراحل پایانی شامل تشکیل بیوتیت ثانویه، سریسیت، کائولینیت، موسکویت، هماتیت و گوتیت است. پلاژیوکلازها در سنگ های آتشفشانی در اثر دگرسانی به سریسیت و کائولینیت تبدیل شده اند (شکل ۵ ج). کانی سازی مس- طلا بیشتر با کانی های دگرسان کلریت، سریسیت و کوارتز همراهند. در جدول ۱ دنباله ی تشکیل دوگانه کانی ها نشان داده شده است. کانی های مگنتیت و اکتینولیت در مراحل

جدول ۱ دنباله ی کانی های دوگانه در کانسار جلال آباد.

Minerals	Hypogen		Supergen
	Early stage	Late stage	
Magnetite	—————		
Pyrite	—————		
Hematite	- - - - -	—————	
Chalcopyrite		—————	
Arsenopyrite		- - - - -	
Bismutinite		- - - - -	
Gold		———	
Actinolite	—————		
Apatite	- - - - -		
Quartz		—————	
Chlorite		—————	
Dolomite		—————	
Talc		—————	
Sericite		—————	
Goethite			—————
Malachite			—————

جدول ۲ میانگین ترکیب شیمیایی انواع مختلف کانسنگ در کانسار جلال آباد بر اساس درصد [۸].

Com.	Oxide ore	Magnetite rich ore	Magnetite poor ore	Mineralized siltstone
Fe	۵۴٫۲۱	۵۳٫۳۱	۳۳٫۱۰	۱۶٫۵۵
P	۰٫۰۶	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۱۰
FeO	۰٫۴۲	۱٫۵۰	۱٫۵۳	۱٫۳۵
SiO _۲	۱۱٫۳۶	۱۲٫۲۹	۲۴٫۰۴	۴۳٫۶۰
Al _۲ O _۳	۱٫۱۰	۰٫۷۸	۲٫۱۰	۳٫۳۲
MgO	۲٫۶۳	۴٫۶۳	۶٫۰۱	۸٫۲۰
CaO	۳٫۳۹	۲٫۳۰	۴٫۲۵	۵٫۲۰
MnO	۰٫۱۸	۰٫۰۷	۰٫۲۶	۰٫۰۸
Cu	۰٫۱۵	۰٫۱۷	۰٫۱۶	۰٫۹۰
Fe/FeO	۱۳٫۴۱	۲٫۳۵	۰٫۰۶	۱٫۵۴
TiO _۲	۰٫۱۲	۰٫۱۱	۰٫۲۲	۰٫۲۰

تغییرات آن در گستره‌ی ۱/۴ تا ۴/۸ درصد است. در کانسار جلال‌آباد کانی‌سازی آپاتیت به‌میزان کم صورت گرفته و مقدار فسفر در این کانسار ناچیز است. میانگین Cu در کانسنگ منییتی پرعیار ۰/۱۷ درصد است. بیشترین مقدار کانی‌سازی مس در سیلتستون‌هاست و میانگین آن ۰/۹ درصد است. کانی‌سازی مس بیشتر در بخش‌های کم عمق و در شکستگی‌ها و به همراه کانی‌های سولفیدی رخ داده است. به منظور بررسی شیمی مگنتیت، نمونه‌های کانسنگ مگنتیتی با استفاده از ریزپردازنده‌ی الکترونی در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران تجزیه نقطه‌ای شده‌اند (جدول ۳).

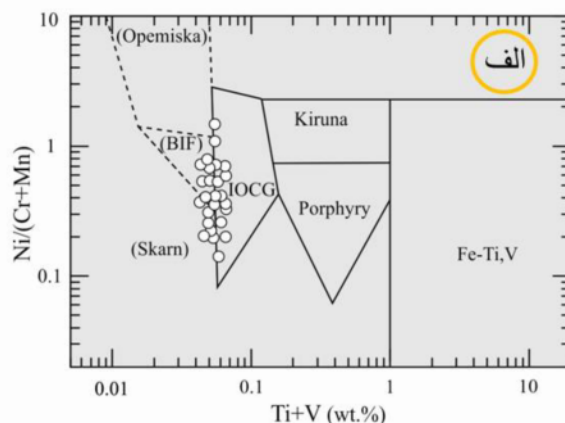
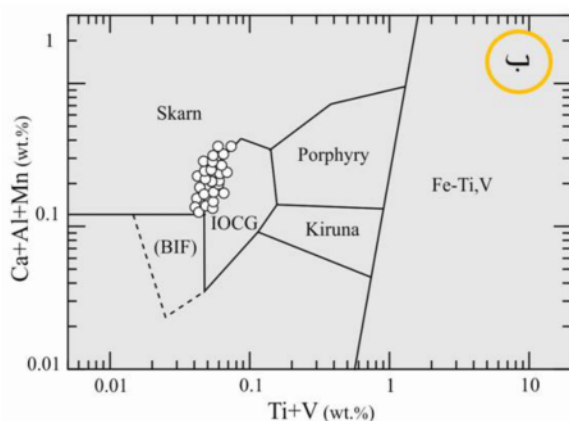
مقدار میانگین Fe در سنگ‌آهن پرعیار اکسید شد ۵۴ درصد است که با مقادیر زیادی هماتیت همراه است. درجه‌ی اکسایش کانسنگ یعنی نسبت آهن کل به اکسید آهن (II) (Fe/FeO) از ۰/۰۶ تا ۱۳/۴۱ درصد تغییر می‌کند که این تغییرات با وجود هر دوی ماهیت هماتیتی و مگنتیتی در بخش‌های مختلف کانسار همخوان است. درجه اکسایش در کانسنگ مگنتیتی پرعیار، کانسنگ مگنتیتی کم‌عیار و سیلتستون‌های کانی‌سازی شده با کاهش عیار آهن کم شده است. کمترین مقدار نسبت Fe/FeO در بخش کانی‌سازی در سیلتستون‌ها ۱/۵۴ است. گوگرد یکی از عناصر مضر همراه کانسارهای آهن است و کیفیت سنگ‌آهن را کاهش می‌دهد که

جدول ۳ نتایج تجزیه نقطه‌ای مگنتیت‌های کانسار جلال‌آباد به روش ریزپردازنده‌ی الکترونی.

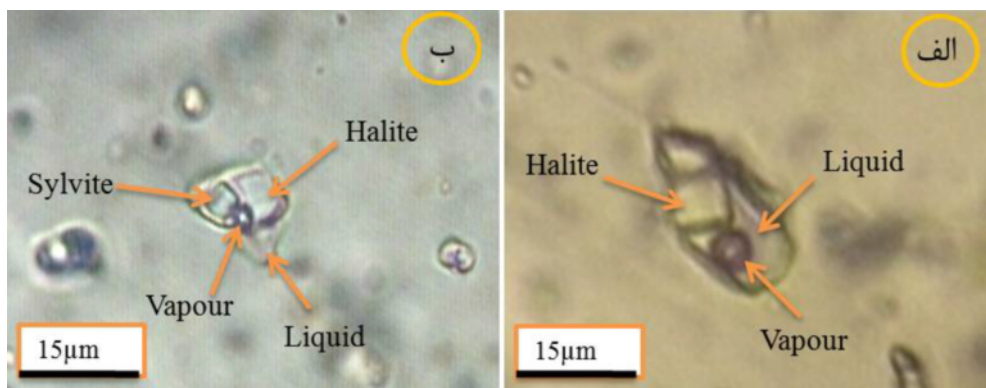
Point	MgO	MnO	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	CoO	NiO	ZnO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	V ₂ O ₅	Total
۱	۰/۰۲	۰/۱۰	۳۰/۱۲	۶۹/۱۰	۰/۲۸	۰/۴۹	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۲۴	۰/۰۶	۰/۰۳	۱۰۰/۴۶
۲	۰/۰۴	۰/۰۳	۳۰/۶۵	۶۸/۹۹	۰/۱۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۰۴	۰/۰۵	۱۰۰/۱۹
۳	۰/۰۶	۰/۰۲	۳۱/۲۲	۶۸/۵۵	۰/۳۵	nd	۰/۰۲	nd	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۰۶	۰/۰۳	۱۰۰/۴۶
۴	۰/۰۴	۰/۰۱	۳۹/۹۰	۶۹/۰۴	۰/۱۱	nd	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۴	۱۰۰/۳۸
۵	۰/۰۵	۰/۰۱	۳۰/۲۷	۶۹/۰۴	۰/۱۷	۰/۴۷	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۱۸	۰/۰۶	۰/۰۲	۱۰۰/۳۶
۶	۰/۰۱	۰/۰۲	۳۹/۷۷	۶۹/۰۰	۰/۱۳	nd	۰/۰۱	nd	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۰۳	۱۰۰/۱۵
۷	۰/۰۰	۰/۰۱	۳۱/۲۲	۶۸/۱۲	۰/۲۰	nd	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۱۴	۰/۰۴	۰/۰۵	۹۹/۸۴
۸	۰/۰۲	۰/۰۲	۳۹/۷۸	۶۹/۰۳	۰/۱۲	nd	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۳	۱۰۰/۲۷
۹	۰/۰۳	۰/۰۱	۳۲/۰۳	۶۷/۷۸	۰/۲۹	nd	۰/۰۲	nd	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۵	۱۰۰/۳۱
۱۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۲۹/۶۰	۶۹/۱۷	۰/۱۸	۱/۳۶	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۴	۱۰۰/۱۴
۱۱	۰/۰۲	۰/۰۴	۳۰/۵۵	۶۸/۵۲	۰/۲۱	۰/۲۸	۰/۰۲	nd	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۲۳	۰/۰۴	۰/۰۴	۹۹/۹۶
۱۲	۰/۰۵	۰/۰۲	۳۰/۳	۶۸/۲۷	۰/۰۶	۰/۳۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۳۹	۰/۰۴	۰/۰۳	۹۹/۹۲
۱۳	۰/۰۶	۰/۰۲	۳۰/۸۹	۶۸/۴۹	۰/۲۰	nd	۰/۰۳	nd	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۶۵	۰/۰۶	۰/۰۲	۱۰۰/۴۵
۱۴	۰/۰۱	۰/۰۲	۳۰/۴۳	۶۸/۴۳	۰/۱۷	۰/۳۹	۰/۰۱	nd	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۱۸	۰/۰۳	۰/۰۴	۹۹/۷۸
۱۵	nd	۰/۰۳	۳۰/۵۶	۶۷/۸۶	۰/۲۱	nd	۰/۰۱	nd	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۶۲	۰/۰۴	۰/۰۳	۹۹/۴۰
۱۶	۰/۰۷	۰/۰۱	۳۰/۵۷	۶۸/۱۱	۰/۱۱	nd	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۸۷	۰/۰۳	۰/۰۴	۹۹/۸۷
۱۷	۰/۰۳	۰/۰۴	۲۹/۵۷	۶۸/۸۴	۰/۰۸	۰/۴۲	۰/۰۱	nd	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۵۱	۰/۰۷	۰/۰۴	۹۹/۶۸
۱۸	۰/۰۱	۰/۰۱	۳۱/۰۱	۶۹/۰۲	۰/۱۳	nd	۰/۰۲	nd	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۰۴	۱۰۰/۴۳
۱۹	۰/۰۶	۰/۰۲	۳۰/۷۵	۶۸/۴۷	۰/۳۱	nd	۰/۰۱	nd	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۵۰	۰/۰۶	۰/۰۴	۱۰۰/۲۴
۲۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۳۰/۴۸	۶۸/۵۷	۰/۱۰	۰/۲۷	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۶۶	۰/۰۴	۰/۰۳	۱۰۰/۳۴
۲۱	۰/۰۷	۰/۰۴	۳۰/۶۰	۶۸/۳۳	۰/۲۲	nd	۰/۰۱	nd	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۶۸	۰/۰۶	۰/۰۳	۱۰۰/۰۷
۲۲	۰/۰۸	۰/۰۲	۳۰/۶۳	۶۸/۴۵	۰/۱۵	nd	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۰۵	۹۹/۶۳
۲۳	۰/۰۴	۰/۰۶	۳۰/۶۱	۶۸/۲۳	۰/۱۱	nd	۰/۰۱	nd	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۷۹	۰/۰۶	۰/۰۴	۹۹/۹۷
۲۴	۰/۰۱	۰/۰۳	۳۰/۴۳	۶۸/۳۷	۰/۲۱	۰/۳۶	۰/۰۲	nd	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۶۴	۰/۰۶	۰/۰۲	۱۰۰/۲۱
۲۵	nd	۰/۰۲	۳۰/۴۶	۶۸/۴۵	۰/۲۴	۰/۳۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۳	۹۹/۶۹
۲۶	۰/۰۴	۰/۰۱	۳۱/۰۱	۶۸/۰۹	۰/۲۲	nd	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۶۰	۰/۰۳	۰/۰۶	۱۰۰/۱۵
۲۷	nd	۰/۰۲	۳۰/۹۲	۶۸/۲۹	۰/۱۸	۰/۲۳	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۴۴	۰/۰۷	۰/۰۴	۱۰۰/۲۸
۲۸	۰/۰۲	۰/۰۲	۳۰/۶۵	۶۸/۲۸	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۴۷	۰/۰۶	۰/۰۳	۹۹/۷۸

کانسارهای آهن-تیتانیوم، کانسارهای حاوی وانادیوم و کانسارهای کرومیت، مقدار عناصر Ti, Cr, V در مگنتیت نسبتاً زیادتر است (شکل ۸) [۱۲، ۱۳]. در نمودار $Ni/(Cr+Mn)$ نسبت به $Ti+V$ گستره‌های ذخایر IOCG، BIF، اسکارن، کایرونا، پورفیری مس و نیز ذخایر آهن-تیتان و وانادیم به خوبی مشخص شده‌اند. داده‌های مگنتیت کانسار جلال‌آباد در گستره‌ی کانسارهای IOCG و گستره مرزی کانسارهای BIF و اسکارن واقع شده‌اند (شکل ۸ الف). نمودار $Ti+V$ در مقابل $Ca+Al+Mn$ کانسارهای اسکارن، BIF، IOCG، کانسارهای اسکارن، کایرونا، پورفیری مس و ذخایر آهن-تیتان-وانادیم را از هم تفکیک می‌کند. بر اساس این نمودار داده‌های کانسار جلال‌آباد در گستره کانسارهای IOCG و اسکارن واقع شده است و بیشتر داده‌ها در گستره‌ی IOCG قرار گرفته‌اند (شکل ۹ ب).

مقدار TiO_2 اندازه‌گیری شده در مگنتیت از ۰/۳ درصد تا ۰/۷ درصد متغیر است. در تصاویر الکترون برگشتی از مگنتیت‌ها، تیغه‌های ایلمنیت نفوذی دیده نشد. مقدار V_2O_5 در مگنتیت‌ها از ۰/۲ تا ۰/۶ درصد متغیر است. در برخی از نقاط اندازه‌گیری شده مقادیری کبالت جانشین مگنتیت شده و نتایج نشان می‌دهد که مقدار CoO در مگنتیت ۰/۱ تا ۱/۳۶ درصد است. احتمالاً نفوذ شاره‌های کبالت‌دار در کانسنگ باعث جانشینی کبالت در مگنتیت شده است. مگنتیت با مقادیر پائین Ti (کمتر از ۰/۵ درصد) از شاخص‌های کانسارهای IOCG است و با کانسارهای اسکارن، ماسیو سولفید و BIF مشترک است. مگنتیت کانسارهای نوع کایرونا (مگنتیت-آپاتیت) و مس پورفیری در مقایسه با کانسارهای IOCG مقادیر بیشتری Ti دارند. تمرکز عناصر Al و Mn در کانسارهای نوع کایرونا نسبتاً پائین‌تر است (شکل ۸).



شکل ۸ الف- نمودار تغییرات $Ti+V$ در مقابل $Ca+Al+Mn$ که نشان دهنده‌ی ارتباط نمونه‌های کانسار آهن جلال‌آباد با کانسارهای IOCG و اسکارن است. ب) نمودار تغییرات $Ti+V$ در مقابل $Ni/(Cr+Mn)$ که نشان دهنده‌ی ارتباط نمونه‌های کانسار آهن جلال‌آباد با کانسارهای IOCG، BIF و اسکارن است [۱۲].



شکل ۹ تنوع شاره‌های درگیر در کوارتزهای نسل اول، الف) شاره‌های درگیر سه فاز (L+V+S)، د) شاره درگیر سه فاز با کانی‌های نوزاد هالیت و سیلویت.

شاره‌های درگیر

مناسب‌ترین کانی شفاف برای بررسی‌های شاره‌های درگیر در کانسار آهن جلال‌آباد کوارتز است. شاره‌های درگیر مورد بررسی در گروه شاره‌های سه‌فازی غنی از مایع (L+V+S) با کانی‌های نوزاد ($\sim \leq 50 \text{ vol.}\%$) قرار می‌گیرند (شکل ۹ الف). هالیت معمولی‌ترین کانی نوزاد در شاره‌های درگیر منطقه‌ی مورد بررسی است. وجود کانی‌های نوزاد هالیت در دمای اتاق نشان‌دهنده‌ی این است که نفوذی‌ها حاوی بیش از ۲۶ درصد وزنی معادل NaCl هستند [۱۴]. در نمونه‌های کوارتز کانسار جلال‌آباد برخی از شاره‌های درگیر حاوی چند فاز جامد هستند و علاوه بر هالیت، سیلویت نیز دارند (شکل ۹ ب). شاره‌های درگیر سه‌فازی معمولاً بی‌شکل‌اند و اندازه‌ی آن‌ها از ۵ تا ۴۰ میکرون تغییر می‌کند در حالی که میانگین ابعادی آن‌ها بین ۱۰ تا ۲۰ میکرون است. حباب گاز، ۱۰ تا ۱۵ درصد حجم شاره را تشکیل داده است. کانی‌های نوزاد هالیت درشت‌اند و در مواردی تا ۵۰ درصد حجم شاره‌ی درگیر را تشکیل می‌دهند. طی گرم‌کردن شاره‌ی درگیر، معلوم شد که دامنه‌ی تغییرات دمای همگن‌شدن (Th) ۲۶۰ تا ۴۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده و بیشترین فراوانی بین دماهای ۲۸۰ تا ۳۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است (شکل ۱۰ الف). همه‌ی شاره‌ی درگیر به فاز مایع همگن تبدیل می‌شوند و در دماهای به‌دست آمده حداقل دمای شاره‌ی کانساز را نشان می‌دهد.

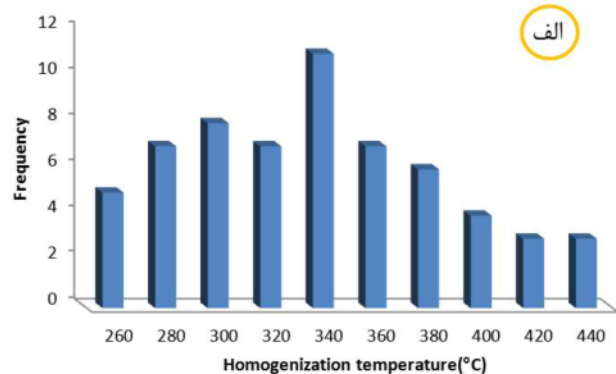
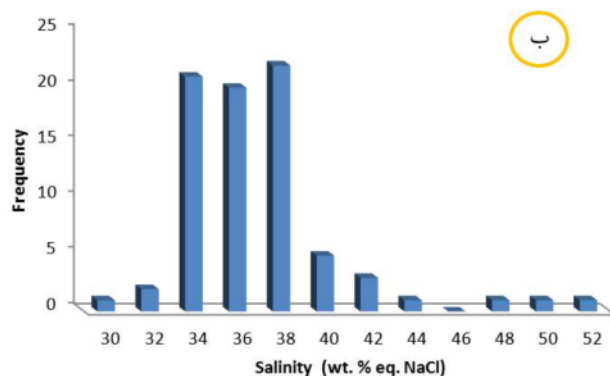
تعبیر و تفسیر داده‌های ریزدماسنجی با استفاده از نرم افزار FLUIDS نسخه‌ی بیکر، ۲۰۰۳ [۱۵] انجام شد و شوری شاره‌های درگیر سه‌فازی از روش استرنز و همکاران، ۱۹۸۸ [۱۶] بدست آمد. دمای انحلال هالیت در این نمونه‌ها ۲۰۰ الی ۴۴۶ درجه‌ی سانتی‌گراد است. تغییرات شوری شاره‌های درگیر ۳۰ تا

۵۲ درصد وزنی معادل نمک‌طعام با بیشترین فراوانی در گستره ۳۴ تا ۳۸ درصد وزنی معادل نمک‌طعام است (شکل ۱۰ ب). دامنه‌ی تغییرات میزان شوری و دمای همگن‌شدن در شاره‌های درگیر مورد بررسی زیاد بوده و به نظر می‌رسد که پدیده‌ی اختلاط گرماب‌ها با شاره‌ی جوی صورت گرفته است.

بحث

طیف گسترده‌ای از کانه‌های اکسیدی، سولفیدی و کربناتی در کانسار جلال‌آباد تشکیل شده است. دگرسانی به‌طور گسترده‌ای در کانسار جلال‌آباد رخ داده و نشان‌دهنده‌ی عملکرد گسترده‌ای از واکنش سنگ-شاری در منطقه است. دگرسانی‌های مهم شناسایی شده در کانسار شامل دگرسانی سدی-کلسیک، کلریتی، سریسیتی، پتاسی، سیلیسی شدن و کربناتی است که با کانسنگ همراهند. در کانسار جلال‌آباد دگرسانی سدی-کلسیک در بخش‌های زیرین کانسار رخ داده و حاوی مجموعه‌ای از کانی‌های فرو اکتینولیت، ترمولیت، مگنزیو هورنبلند و مگنتیت است.

یکی از ویژگی‌های شاخص کانسارهای IOCG، دگرسانی سدی-کلسیک در مقیاس وسیع است. حجم بزرگی از دگرسانی نشان‌دهنده‌ی کانی‌سازی و تشکیل سیستم گرمابی خیلی بزرگ است [۱۷]. دگرسانی گرمابی معمولاً شدید بوده و نشان‌دهنده‌ی نسبت بالای شاره به سنگ و حضور شاره‌های ابرشور است [۱۸]. روند دگرسانی‌ها در کانسارهای IOCG شامل دگرسانی سدی-کلسیک همراه مگنتیت در بخش عمیق (آلیت، اکتینولیت و اسکاپولیت)، دگرسانی پتاسی (بیشتر پتاسیم فلدسپار و بیوتیت) در بخش کم‌عمق‌تر و دگرسانی سیلیسی و سریسیتی در بخش خیلی کم‌عمق است [۱].



شکل ۱۰ الف) نمودار ستونی دمای همگن‌شدن شاره‌های درگیر اولیه در کوارتز در مرحله‌ی اول کانی‌سازی، ب) نمودار ستونی شوری شاره‌های درگیر در کوارتز مرحله اول کانی‌سازی.

جلال آباد نشان داد که بیشتر توده‌های آذرین منطقه از نوع گابرو-دیوریت‌اند که به داخل سنگ‌های سری ریزو تزریق شده‌اند بررسی‌های انجام شده نشان داده که در اواخر پراکامبرین تا پالئوزوئیک زیرین، منطقه بافق-زرنند تحت تأثیر فرایندهای کششی قرار گرفته است و گسل درون قاره‌ای شکل گرفته است [۲۵-۲۷]. در کانسارهای IOCG سرتاسر دنیا، همبافت‌های کلریدی لیگاند‌های غالب هستند. شوری مهمترین تأثیر را در تمرکز فلزات در سیالات دارد و Cl مهم‌ترین همبافت انتقال دهنده فلزات در گرماب‌ها رخ می‌دهد به طوری که با افزایش آن تمرکز فلزات افزایش می‌یابد [۲]. رخداد طلای آزاد همراه کالکوپریت و حضور شاره‌های درگیر با شوری بالا نشان دهنده انتقال مس و طلا از طریق همبافت کلریدی است. عملکرد شاره‌های نسبتاً شور (۱۵ تا ۳۵ درصد معادل نمک‌طعام) و نسبتاً دمای بالا (۳۰۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد) حاوی مس و طلا در تشکیل کانسارهای IOCG نقش دارند [۲۸، ۲۹].

برداشت

کانی‌سازی در جلال‌آباد به‌صورت توده‌ای، برشی، پرکننده فضای خالی، افشان و رگه-رگچه‌ای در سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی سری ریزو تشکیل شده است. مگنتیت مهم‌ترین کانه‌ی تشکیل دهنده کانسار است که حاوی مقادیر پائینی از V، Ti و Cr است. مس به‌صورت کانی‌سازی سولفیدی و کانی‌سازی اکسیدی در کانسار مشاهده می‌شود و کانی‌سازی طلا به‌صورت نفوذی‌هایی در کالکوپریت، پیریت، مگنتیت و دولومیت رخ داده است. کانی‌سازی مس و طلا با هم همراه بوده و کانی‌سازی مس در کانسار می‌تواند معرف پی‌جویی خوبی برای طلا باشد. آرسنوپریت و بیسموتینیت در زمان پرکننده‌ی حفره‌ها و شکستگی‌ها در مرحله‌ی سولفیدی تشکیل شده است. بخش‌های عمیق کانسار بیشتر از مگنتیت تشکیل، و در بخش‌های سطحی بخاطر شرایط اکسایش هماتیت تشکیل شده است. حجم بزرگی از دگرسانی‌های گرمابی کانسار را دربرگرفته و نشان‌دهنده‌ی عملکرد گسترده‌ی گرماب‌ها در منطقه است. دگرسانی‌های شاخص در کانسار دگرسانی سدیک-کلسیک، پتاسیک، سیرسیت، کلریت، کوارتز و کانی‌های کربناتی (کلسیت، دولومیت) است. کانی‌های شاخص در دگرسانی

بیشتر کانسارهای IOCG مثل المپیک‌دم، پی ریج و الویز منطقه‌بندی دگرسانی دیده می‌شود [۱۹، ۲۰]. مجموعه‌ی دگرنهاده‌ی Ca-Na معمولاً از شاره‌های با شوری ۳۰ الی ۴۰ درصد وزنی معادل NaCl و دمای ۵۰۰-۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شوند [۲۱]. این دگرسانی‌ها در اثر شاره‌های بسیار شور مشتق شده از ماگمای فلسیکی تا حد واسط است [۲۰]. دگرسانی سدی-کلسیک در کانسارهای IOCG در اثر چرخش شاره‌های داغ با نسبت بالای Na/K در سنگ‌های دیواره ایجاد شده است [۲۲]. بیشتر کانسارهای IOCG به سنگ‌های شبه آتشفشانی و سنگ‌های رسوبی توده‌های آذرین وابسته‌اند [۱۸]. ماگماتیسیم نقش مهمی در تولید گرمای، چرخش شاره‌ها و گسترش سیستم گرمابی دارد و همراهی توده‌های نفوذی با کانسارهای IOCG شناخته شده است [۲۳]. بیشتر شاره‌های درگیر اولیه‌ی مشاهده شده در کوارتزهای همراه مگنتیت در کانسار جلال‌آباد از نوع سه فاز (L+V+S) و دارای کانی‌های نوزاد هالیت هستند. شاره‌های درگیر حاوی هالیت در بسیاری از ذخایر معدنی مثل کانسارهای اکسید آهن-مس-طلا (IOCG)، از نوع دره‌ی می‌سی‌سی‌پی، طلای کوه‌زایی، ماسیو سولفیدها و مس پورفیری دیده می‌شوند [۲۴]. دمای همگن‌شدن شاره‌های درگیر اولیه‌ی کوارتزهای همراه مگنتیت ۲۶۰ الی ۴۴۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۳۰ الی ۵۲ درصد وزنی معادل نمک طعام است که نشان‌دهنده‌ی نقش شاره‌های ماگمایی و اختلاط آن با شاره‌های جوی در تشکیل کانسار است. گستره‌ی دمای همگن‌شدن و شوری شاره‌های درگیر گسترده است که نشان‌دهنده‌ی اختلاط شاره‌های ماگمایی با شاره‌های جوی سرد است. نتایج تجزیه نقطه‌ای مگنتیت‌ها در نمودارهای تغییرات Ti+V نسبت به Ca+Al+Mn و Ti+V نسبت به Ni/(Cr+Mn) بیشتر در موقعیت کانسارهای IOCG قرار دارند [۱۲]. کانسارهای IOCG اغلب حاوی Fe بیش از ۱۰ درصد با مقادیر پائین Ti و معمولاً حاوی مقادیری U، REE، Au، Cu و Co هستند [۱۸]. در جلال‌آباد عیار آهن ۱۶/۵۵ تا ۵۴/۲۱ درصد متغیر است و مقدار TiO_2 کمتر از ۰/۲۲ درصد است. مقدار میانگین Cu در انواع مختلف کانسنگ‌ها متفاوت بوده و از ۰/۱۵ تا ۰/۹۰ درصد تغییر می‌کند و کانی‌سازی طلا بیشتر در بخش‌های کانی‌سازی شده مس دیده شد. بررسی‌های سنگ شناسی انجام شده در کانسار

central Iran: new isotopic and geochemical evidence", Jour Scien IRI 14 (3) (2003) 259-269.

[5] Daliran F., "Kiruna-type iron oxide-apatite ores and apatites of the Bafq district, Iran, with an emphasis on the REE geochemistry of their apatites: in Porter, T. M. (ed.) Hydrothermal iron oxide copper-gold & related deposits", A global perspective. 2 (2002) 303-320.

[6] Technoexport., "Results of the survey of Zarand ore deposit", (1976) 104 p.

[۷] مهرابی ب.، کریمی شهرکی ب.، "کانسار جلال آباد نمونه ای از کانسارهای اکسید آهن گرمابی"، بیست و دومین همایش علوم زمین، سازمان زمین شناسی کشور (۱۳۸۲).

[۸] کریمی شهرکی ب.، "بررسی ژئوشیمیایی و زمین شناسی اقتصادی کانسار آهن جلال آباد زرنند"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم (۱۳۸۲)، ص ۱۸۰.

[9] Ramezani J. and Tucker. R.D., "The Saghand region, central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics", American Journal of Science 303 (2003) 622-665.

[10] Forster. H., and Jafarzadeh, A., "The Bafq mining district in central Iran a highly mineralized Infracambrian Volcanic Field", Economic Geology 89 (1994) 1697-1721.

[11] Monteiro. L.V.S., Xavier. R.P., Hitzman. M.W., Caetano Juliani. C., Filho. C.R.S., Carvalho. E.R., "Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil", Ore Geology Reviews 34 (2008) 317-336.

[12] Dupuis. C., Beaudoin. G., "Discriminant diagrams for iron oxide trace element finger printing of mineral deposit types", Miner Deposita 46 (2011) 319-335.

[13] Leake. B.E., Woolley. A.R., Arps. C.E.S., Birch. W.D., Gilbert. M.C., Grice. G.D., Hawthorne. F.C., Kato. A., Kisch. H.J., Krivovichev. V.G., Linthout. K., Laird. J., Mandarino. J., Maresch. W.V., Nickel. E.H., Rock. N.M.S., Shumacher. J.C., Smith. D.C., Stephenson. N.C.N., Ungaretti. L., Wittaker. E.J.W., Youzhi. G., "Nomenclature of amphiboles. Report of Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names", European Journal of Mineralogy 9 (1997) 623-651.

سدی-کلسیک در جلال آباد عبارتند از کانی‌های فرو اکتینولیت، ترمولیت، مگنزیو هورنبلند و مگنتیت. دگرسانی سدی-کلسیک در جلال آباد در سطوح عمیق کانسار رخ داده است که از نشانه‌های کانسارهای IOCG است. شاره‌های درگیر دارای دمای همگن‌شدن و شوری بالایی هستند که نشان-دهنده‌ی خاستگاه ماگمایی شاره‌ها هستند. دامنه‌ی تغییرات دمای همگن‌شدن و شوری شاره‌های درگیر زیاد است و اختلاط گرماب‌های اولیه با شاره‌های جوی محتمل است.

در اواخر پرکامبرین تا پالئوزوئیک زیرین منطقه بافق-زرنند تحت تأثیر فرآیندهای کشتی قرار گرفته است و توده‌های نفوذی با ترکیب گابرو و دایک‌های متعددی با ترکیب دیوریت و دیاباز در کانسار تزریق شدند که ریشه آن‌ها در بخش‌های زیرین کانسار به توده‌ی آذرین مافیک ختم می‌شود. توده‌های آذرین نقش ماشین گرمایی منطقه را داشته و باعث گرم‌شدن شاره‌ها و چرخش آن‌ها در منطقه شده است. در کانسار جلال-آباد شاره‌های ماگمایی و غیر ماگمایی در کانی‌سازی نقش داشته‌اند. شاره‌های ماگمایی در کانی‌سازی مراحل اولیه و تشکیل مگنتیت و مراحل سولفیدی مس نیز اهمیت زیادی داشته‌اند. بررسی‌های کانی‌شناسی، دگرسانی، ژئوشیمی و شاره-های درگیر در کانسار جلال آباد نشان داد که این کانسار دارای ویژگی‌های کانسارهای IOCG است.

مراجع

- [1] Hitzman M. W., Oreskes N., Einaudi M.T., "Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits ", Precambrian Research 58 (1992) 241-287.
- [2] Groves D.I., Bierlein F.P., Meinert. L.D., Hitzman. M.W., "Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits". Economic Geology 105 (2010) 641-654.
- [3] Bonyadi Z., Davidson. G., Mehrabi. B., Meffre. S., Ghazban. F., "Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Se-Chahun iron oxide-apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights from Paragenesis and geochemistry", Chemical Geology 281 (2011) 253-269.
- [4] Moore. F. and Modabberi. S., "Origin of Choghart iron oxide deposit, Bafq mining district,

- [22] Zhang H.F., Zhu R.X., Santosh M., Ying J.F., Su B.X., Hu Y., "Episodic widespread magma underplating beneath the North China Craton in the Phanerozoic: implications for craton destruction", *Gondwana Research* 23 (2013) 95–107.
- [23] Pollard P.J., "An intrusion-related origin for Cu–Au mineralization in iron oxide–copper–gold (IOCG) provinces", *Mineralium Deposita* 41 (2006) 179–187.
- [24] Baker T., Mustard R., Fu B., Williams, P.J., Dong G., Fisher L., Mark G., and Ryan, C.G., "Mixed messages in iron-oxide-copper-gold systems of the Cloncurry district, Australia: insights from PIXE analysis of halogens and copper in fluid inclusions", *Mineralium Deposita* 43 (2008) 599–608.
- [۲۵] آل طه کوهبنانی، ب.، "مطالعه پترولوژی و ژئوشیمی سنگهای آذرین شرق زرنند کرمان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده علوم (۱۳۷۳)، ص ۱۹۰.
- [۲۶] درویش زاده، علی، "زمین شناس ایران"، انتشارات نشر دانش امروز، تهران، (۱۳۷۰) ص ۹۰۱.
- [27] Berberian. M. and king. G.C. P., "Towards a Paleogeography and tectonic evolution of Iran", *Canadian Journal of Earth Sciences* 18 (1981) 210–265.
- [28] Yardley B.W.D., "100th Anniversary Special Paper: metal concentrations in crustal fluids and their relationship to ore formation", *Economic Geology* 100 (4) (2005) 613–632.
- [29] Rieger A.A., Marschik R., Diaz M., "The hypogene iron oxide copper–gold mineralization in the Mantoverde District", Northern Chile, *Economic Geology* 105 (2010) 1271–1299.
- [14] Shepherd T.J., Chenery S.R., "Laser ablation ICP-MS elemental analysis of individual fluid inclusions: An evaluation study", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59 (1995) 3997–4007.
- [15] Bakker R.J., Package FLUIDS 1. "Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modeling bulk fluid properties. *Chem Geol* 194 (2003) 3–23
- [16] Sterner S.M., Hall D.L., Bodnar R.J., *Synthetic fluid inclusions V: solubility relations in the system NaCl–KCl–H₂O under vaporsaturated conditions*. *Geochim Cosmochim Acta* 52 (1988) 989–1005
- [17] Barton M.D., Johnson D.A., "Footprints of Fe-oxide (Cu–Au) systems: University of Western Australia", Centre for Global Metallogeny Special Publication 33 (2004) 112–116.
- [18] Williams P., "Classifying IOCG deposits. In: *Exploring for iron oxide copper–gold deposits: Canada and global analogues*", Geological Association of Canada 20 (2010a) 11–19.
- [19] Mark G., Oliver N.H.S, and Carew M.J., "Insights into the genesis and diversity of epigenetic Cu–Au mineralisation in the Cloncurry district, Mt. Isa Inlier, Northwest Queensland", *Australian Journal of Earth Sciences* 53 (2006a) 109–124.
- [20] Hunt, J.A., Baker, T., Cleverly, J., Davidson, G.J., Fallick, A.E., and Thorkelson, D.J., "Fluid inclusion and stable isotope constraints on the origin of Wernecke Breccia and associated iron oxide–copper–gold mineralization, Yukon", *Canadian Journal of Earth Sciences*. 48 (2011) 1425–1445.
- [21] Barton M.D., Kreiner D.C., Jensen E.P., and Girardi J.D., "Superimposed hydrothermal systems and related IOCG and porphyry mineralization near Copiapo, Chile. In: *Proceedings of the 11th Biennial SGA Meeting, Society for Geology Applied to Ore Deposits*", Antofagasta, Chile (2011b) 521–523.