

ترکیب شیمیایی سیالات درگیر در کانسار آهن جلال آباد، شمال غرب زرنند با استفاده از روش میکروآنالیز LA-ICP-MS

بهروز کریمی شهرکی* و بهزاد مهرابی

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

دریافت مقاله: 1394/06/16، پذیرش: 1394/09/17

چکیده

روش میکروآنالیز LA-ICP-MS برای آنالیز ترکیب سیال‌های درگیر واقع در کانسار آهن جلال آباد استفاده شد. نمونه‌های مورد بررسی از گمانه‌های حفاری شده و پیت معدن که با کانی‌سازی ارتباط داشتند، برداشت شده است. سیالات درگیر چند فاز (L+V+S) در کوارتز فراوان است و دمای همگن شدن آنها 260 تا 440 درجه سانتی‌گراد است. شوری سیالات بین 30 تا 52 درصد معادل وزنی نمک طعام است. نتایج LA-ICP-MS روی سیالات درگیر نشان داد که مقدار Fe و Cu به ترتیب تا 16076 و 3204 گرم بر تن و میانگین 6914 و 792 گرم بر تن هستند. مقدار Na در سیالات درگیر بین 26906 تا 140716 گرم بر تن و K در محدوده 2372 تا 70484 گرم بر تن اندازه‌گیری شد. نسبت Ca/K بین 0/53 تا 8/68 و با میانگین 1/75 است که نشان‌دهنده اختلاط سیالات ماگمایی و غیر ماگمایی است. نسبت Mn/Fe در سیالات درگیر در محدوده 0/21 تا 1/87 است که نشان‌دهنده حضور دو نوع سیال اکسیدی و احیایی است. نتایج به دست آمده از بررسی‌های کانی‌شناسی، میکروترموتری و شیمی سیالات درگیر نشان می‌دهد سیالات ماگمایی - گرمابی حاوی فلزات، سیالات گرمابی - غیر ماگمایی و اختلاط آنها با یکدیگر علت کانی‌سازی اکسید آهن - مس - طلا در کانسار جلال آباد بوده است.

واژه‌های کلیدی: مگنتیت، سیالات درگیر، کانسار LA-ICP-MS، JOCG، جلال آباد، زرنند

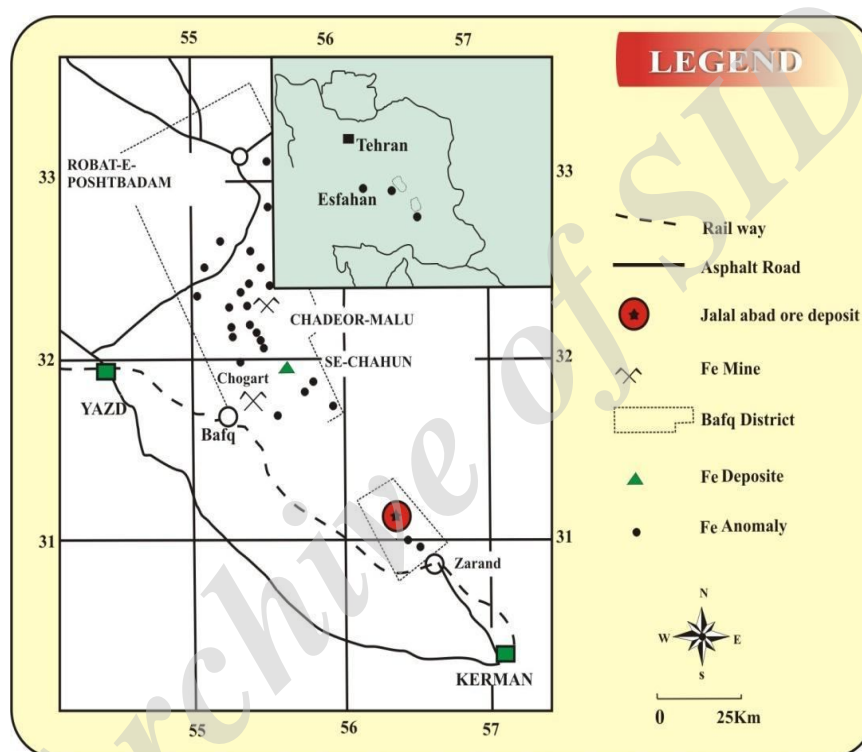
مقدمه

انجام شده ذخیره کانسار جلال آباد تقریباً 200 میلیون تن سنگ آهن با عیار متوسط 45% Fe، 1/18% S و 0/08% P است (Technoexport, 1976). سنگ میزبان کانسار جلال آباد، سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی گروه ریزو با سن کامبرین زیرین است و مهمترین سنگ‌های تشکیل‌دهنده شامل ماسه سنگ، شیل، سیلتستون، دولومیت، توف و ایگنمبریت است (Mehrabi and Karimi, 2003). کانی‌سازی در جلال آباد در سنگ‌های ولکانو کلاستیک، سیلتستون و دولومیت رخ داده است (Technoexport, 1976). سیالات درگیر شواهد باقی مانده از تاریخ گذشته کانسار است که در هنگام تشکیل در سنگ به تله افتاده‌اند و امکان بازسازی شرایط

منطقه رباط پشت بادام - بافق - زرنند حاوی بیش از 34 آنومالی و کانسار آهن است که میزبان تقریباً 2 میلیارد تن کانسنگ آهن بوده که در سنگ‌های ولکانیکی - رسوبی کامبرین زیرین واقع شده است (Stosch et al., 2011). سنگ‌های ولکانیکی دارای تنوع زیادی بوده و از ترکیبات اسیدی تا بازیگ متغیر هستند و شامل ریولیت، توف، گدازه‌های اسپیلیتی و دیابازی دگرسان شده هستند. سنگ‌های رسوبی شامل ماسه سنگ، سیلتستون، دولومیت و آهک هستند. کانسار سنگ آهن جلال آباد در 38 کیلومتری شمال غرب شهر زرنند استان کرمان واقع شده است (شکل‌های 1 و 2-A). بر اساس بررسی‌های

نقطه‌ای روی سیالات درگیر این اجازه را می‌دهد که تنها یک سیال درگیر به‌طور مستقل آنالیز و اطلاعات دقیقی از تکامل سیالات کانه‌ساز فراهم شود. میکروآنالیز LA-ICP-MS روشی برای اندازه‌گیری عناصر موجود در سیال درگیر است و بررسی‌های میکروترموتری برای تعیین شوری سیال و دمای همگن‌شدن استفاده می‌شود (Shepherd and Chenery, 1995; Stoffell et al., 2004; Graupner et al., 2005).

فیزیکوشیمیایی کانسنگ را در زمان تشکیل فراهم می‌کنند (Wilkinson, 2001). بررسی‌های پتروگرافی و میکروترموتری سیالات درگیر می‌توانند ویژگی‌های سیال را مشخص و به تعیین تکامل فرآیند گرمایی در کانسارها کمک کنند (Roeder, 1984). کاتیون‌ها و آنیون‌های موجود در سیال، ردپایی از سیال اولیه هستند که با اندازه‌گیری مقادیر آن در سیال‌ها امکان تعیین منشأ اولیه سیال فراهم خواهد شد. آنالیزهای



شکل 1. موقعیت منطقه آهن‌دار رباط پشت بادام- بافق- زرند و کانسار جلال‌آباد (Technoexport, 1976)

Fig. 1. Location map of Robate Poshtebadam-Bafq-Zarand iron ore district and Jalal-Abad deposit (Technoexport, 1976)

روش مطالعه

روی کوارتز متمرکز شد. برای شناسایی دقیق کانی‌ها آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) روی نمونه‌های دگرسانی در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شد. بررسی سیالات درگیر با استفاده از میکروسکپ نوری عبوری دارای استیج گرم‌کننده و سردکننده با مدل لینکهام THMS-G-600 با محدوده حرارتی (180- تا 600 درجه سانتی‌گراد) در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شد. سیال‌های درگیر

برای بررسی کانی‌شناسی و سیالات درگیر تعداد 100 نمونه از پیت معدن و گمانه‌های حفاری شده انتخاب شد و مقاطع نازک، نازک صیقلی، صیقلی و نازک دوبر صیقل تهیه و با میکروسکپ پلاریزان در نور عبوری و انعکاسی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های پتروگرافی نشان داد که کوارتز حاوی سیالات درگیر است و بررسی‌های سیالات درگیر در کانسار جلال‌آباد

سیلیتی، بخش‌های متاسوماتیتی شده کلریتی - تالکی و دولومیتی، کانسنگ‌های مگنتیتی با میان‌لایه‌های دولومیتی، ماسه سنگ‌های آهکی، سنگهای کربناتی سیلیسی شده، توف و توفیت تشکیل شده است. عمده سنگ‌های ولکانیکی در منطقه ریوداسیت تا آندزیت و سنگ‌های ولکانو کلاستیک شامل توف و ایگنمبریت است. سنگ‌های آذرین مافیک موجود در منطقه جلال آباد با سنگهای موجود در منطقه آهن دار بافق شباهت زیادی دارند و از نظر سنی به کامبرین زیرین نسبت داده می‌شود که همراه سنگ‌های ولکانیکی و رسوبی کامبرین زیرین (گروه ریزو و دزو) دیده می‌شوند (Ramezani and Tucker, 2003).

کانی شناسی

مگنتیت کانه اصلی کانسار جلال آباد است و تقریباً بیشتر حجم کانسار را تشکیل داده است. کانه‌های مگنتیتی دارای بافت‌های کاتا کلاستیکی، متراکم و انتشاری هستند. هماتیت اغلب در بخش‌های نزدیک سطح زمین و همچنین در محل‌هایی که در اثر حرکات زمین ساختی دچار شکستگی شده‌اند، به‌طور گسترده حضور دارد. بلورهای مگنتیت دارای ابعاد مختلف از 0/5 میلی‌متر تا ابعاد کمتر از 0/1 میلی‌متر است. مگنتیت‌ها از نظر بلوری دارای شکل‌های بی‌شکل تا شکل‌های خودشکل مکعبی هستند (شکل A-4 و B). هماتیت معمولاً در کانسار از نوع ثانویه است که در اثر مارتیتی شدن ایجاد شده است و اغلب در قسمت‌های کم عمق و سطحی کانسار دیده می‌شود و در بخش‌های عمیق ناچیز است (شکل C-4). کانه پیریت به‌صورت گسترده در کانسار جلال آباد حضور دارد و درصد بالایی از گوگرد موجود در ذخیره را به خود اختصاص داده است. پیریت در کانسار به‌صورت بلورهای درشت و ریز خودشکل که ابعاد آنها معمولاً کمتر از 1 سانتی‌متر است (شکل A-4 و B) و نیز به‌صورت رگه - رگه‌چه‌ای دیده می‌شوند. پیریت فضای بین مگنتیت‌ها را پر کرده است و در مواردی با مگنتیت هم‌رشدی دارد. کالکوپیریت مهمترین کانی مس‌دار کانسار جلال آباد و بعد از پیریت فراوان‌ترین کانی سولفیدی است. کالکوپیریت اغلب به شکل‌های نامنظم، رگه‌ای، پرکننده فضای خالی وجود

در این استیج توسط یک المنت مقاوم گرم و توسط نیتروژن مایع سرد شده است. اندازه‌گیری کاتیون‌های سیالات درگیر واقع در کوارتز به روش LA-ICP-MS در دانشگاه لیدز انگلستان انجام شد. قطر پرتو لیزر تابیده شده به نمونه بسته به اندازه سیال 20 تا 30 میکرومتر بوده و باعث تبخیر سیال درگیر و اندازه‌گیری کاتیون‌ها در آن شده است. آنالیز شیمیایی سیال‌های درگیر در کوارتز بر روی 57 سیال درگیر سه فاز (L+V+H) انجام شد و عناصر Li, Na, Mg, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Sr, Ba, Pb, Cs در آنها اندازه‌گیری شد.

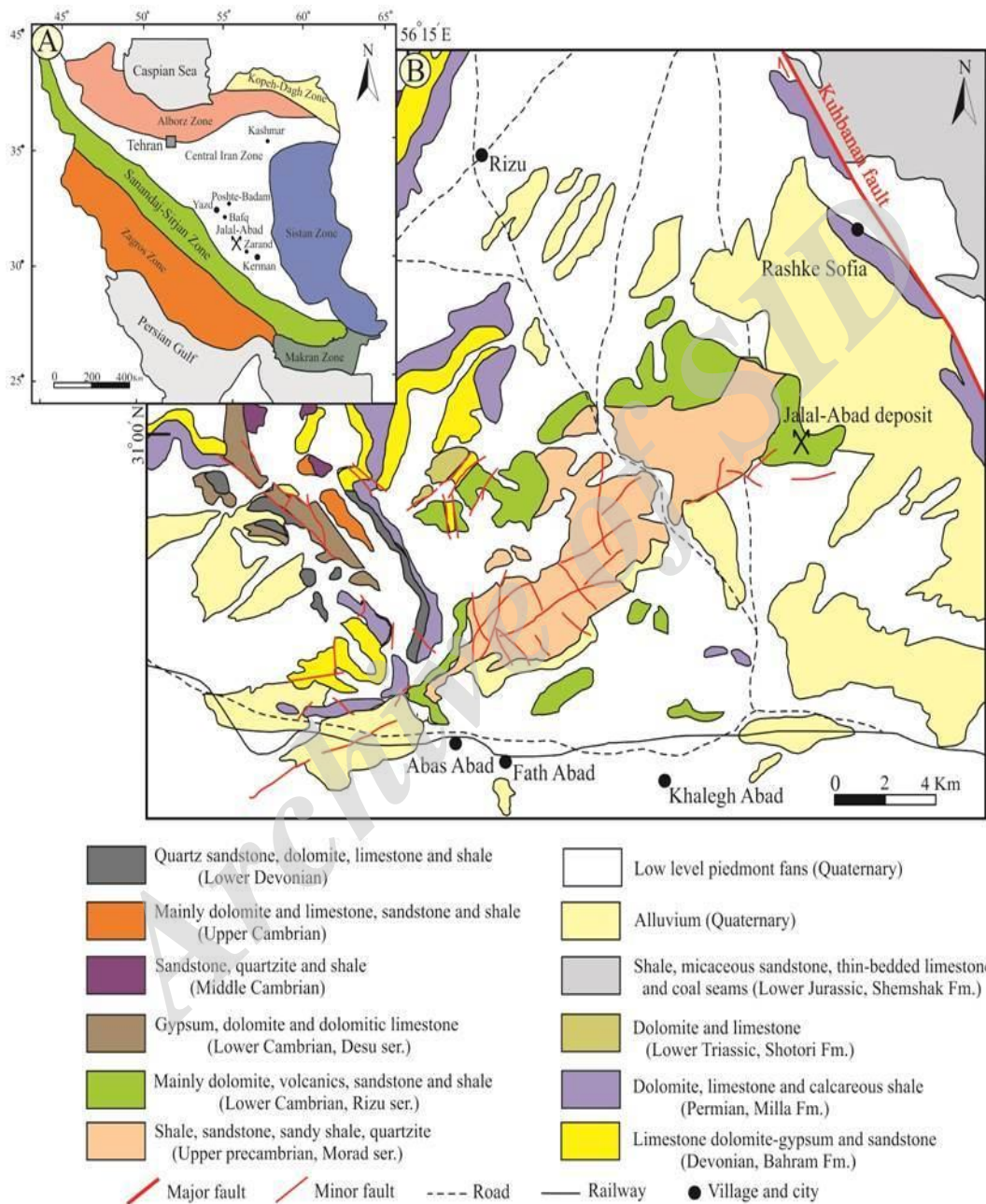
زمین‌شناسی محدوده معدنی

منطقه بین کرمان و ساغند حاوی ضخیمترین و کاملترین توالی سنگ‌های پالئوزوئیک زیرین (کامبرین تا سیلورین) در ایران و خاور میانه است و از لحاظ چینه‌شناسی پیچیده است. این منطقه از لحاظ زمین‌ساختی در زمان کامبرین فعال و دارای رخساره‌های کم عمق دریایی بوده است. سنگ‌های رسوبی - تخریبی (دسته مراد) و واحدهای آتشفشانی - رسوبی کامبرین زیرین (گروه‌های ریزو - دزو) مهمترین واحدهای تشکیل دهنده کانسار جلال آباد است که از زمان نئوپروتروزوئیک پایانی تا کامبرین زیرین در ساختار زمین‌شناسی منطقه مشارکت دارند. مجموعه گروه‌های ریزو و دزو زیر عنوان سنگهای آتشفشانی - رسوبی کامبرین (CVSU) نام‌گذاری شده است (2003 Ramezani and Tucker). رسوبات آبرفتی و ماسه‌های بادی منطقه را پوشش داده است (شکل B-2).

سنگ میزبان کانسار جلال آباد T سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی گروه ریزو است. کانی‌سازی در سیلتستون‌ها، سیلتستون‌های ماسه‌ای، سنگ‌های آتشفشانی اسیدی و دولومیت صورت گرفته است. در کانسار جلال آباد، کانی‌سازی اغلب در بخش‌های عمیق واقع شده است و رخنمون‌های کمی از کانسنگ در بخش‌های شمال غربی و غربی کانسار دیده می‌شود و اطلاعات به‌دست آمده از کانسار از طریق بررسی گمانه‌های حفاری شده به‌دست آمده است (شکل 3). ضخامت افق کانه‌دار تقریباً بین 180 تا 250 متر است و از سیلتستون‌های کلریتی شده، ماسه‌سنگ

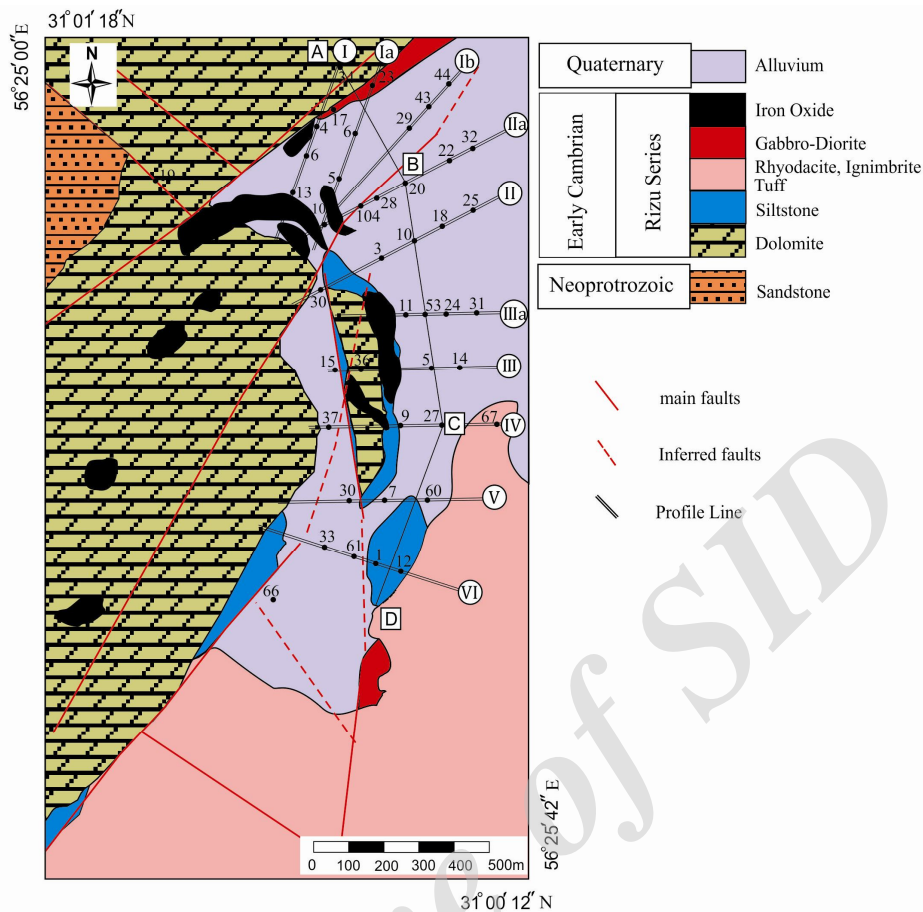
اثرهوازدگی و آب‌گیری اکسیدها و سولفیدهای آهن تشکیل شده است.

دارد. کالکوپیریت‌ها بیشتر شکستگی‌ها، حفره‌های ریز پیریت و مگنتیت را پر کرده است (شکل D-4). کانی‌گوتیت بیشتر در نواحی اکسید کانسار (زون هماتیت‌دار) دیده می‌شود و در



شکل 2. A: نقشه زون‌های زمین‌ساختی ساده از ایران (Nabavi, 1976) منطقه مورد بررسی در ایران مرکزی واقع شده است و B: نقشه زمین‌شناسی محدوده کانسار جلال‌آباد با تغییرات از هوکریده و همکاران (Huckriede et al., 1962) و وحدتی دانشمند (Vahdati Daneshmand, 1990)

Fig. 2. A: Simplified tectonic map of Iran (Geological Survey of Iran, Nabavi 1979), study area is located in the Central Iran Zone and B: Simplified geological map of Jalal-Abad deposit area modified after Huckriede et al., (1962) and Vahdati Daneshmand (1990)



شکل 3. نقشه زمین‌شناسی معدن جلال آباد زرنند با تغییرات از تکنواسپرت (Technoexport, 1976)

Fig. 3. Geological map of Jalal-Abad iron deposit (modified after Technoexport, 1976)

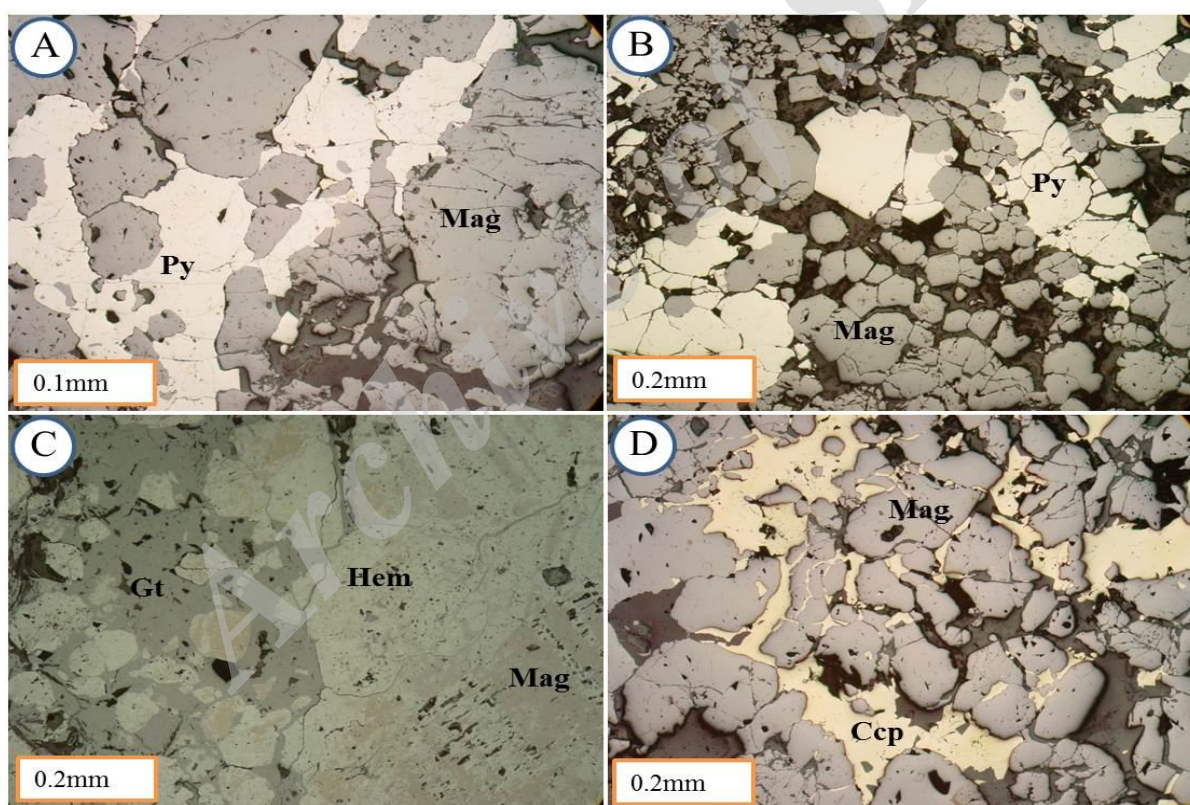
به صورت ادخال‌های ریز در ابعاد کوچکتر از 25 میکرون داخل کالکوپیریت دیده می‌شود (شکل B-5). بررسی‌های SEM روی نمونه‌ها نشان داد که کانی‌سازی بیسموتینیت، کباتیت، آرسنوپیریت و کاسیت در مقادیر کم در کانسار تشکیل شده است. این کانی‌ها به صورت پرکننده حفرات و شکستگی‌ها در کانسار دیده می‌شوند. بیسموتینیت، کباتیت و آرسنوپیریت با یکدیگر هم‌رشدی دارند (شکل C-5 و D). کوارتز به صورت آزاد، پراکنده و رگه‌های تزریقی درون سیلتستون‌های ماسه‌ای، کانسارهای آهن و دولومیت دیده می‌شود. کانی‌های کوارتز به همراه مگنتیت، هماتیت، پیریت، کالکوپیریت و کلسیت دیده می‌شود. در ناحیه کم‌عیار و همچنین اکسید کانسار، درصد کوارتز آزاد بیشتر است. کانی‌های کربناته به خصوص کلسیت و دولومیت در محدوده کانسار گسترش زیادی دارد. کلسیت و

مالاکیت و آزوریت فراوانترین کانی ثانویه مس در واقع فراوانترین کانی مس‌دار در نمونه‌های سطحی و کم عمق منطقه جلال آباد است که در اثر اکسید شدن کالکوپیریت به دست آمده است. مالاکیت در بخش‌های اکسیدی و به همراه سنگ‌های بخش بالایی کانسار اغلب به صورت پرکننده فضاهای خالی حضور دارد و به صورت ریزبلورین است. در نمونه‌های دستی هیچ‌گونه اثری از کانی آپاتیت دیده نشده است و بررسی‌های میکروسکپ الکترونی (SEM) نشان داد که آپاتیت به صورت کانی فرعی همراه مگنتیت و اکتینولیت در کانسار جلال آباد وجود دارد (شکل A-5). کانی‌سازی طلا در منطقه جلال آباد رخ داده است و بررسی‌های کانی‌شناسی این موضوع را تأیید کرد. بررسی‌های میکروسکپی نوری انعکاسی و SEM نشان داد که کانی‌سازی طلا اغلب همراه کالکوپیریت است. طلا

دگرسانی در منطقه مورد بررسی هستند.

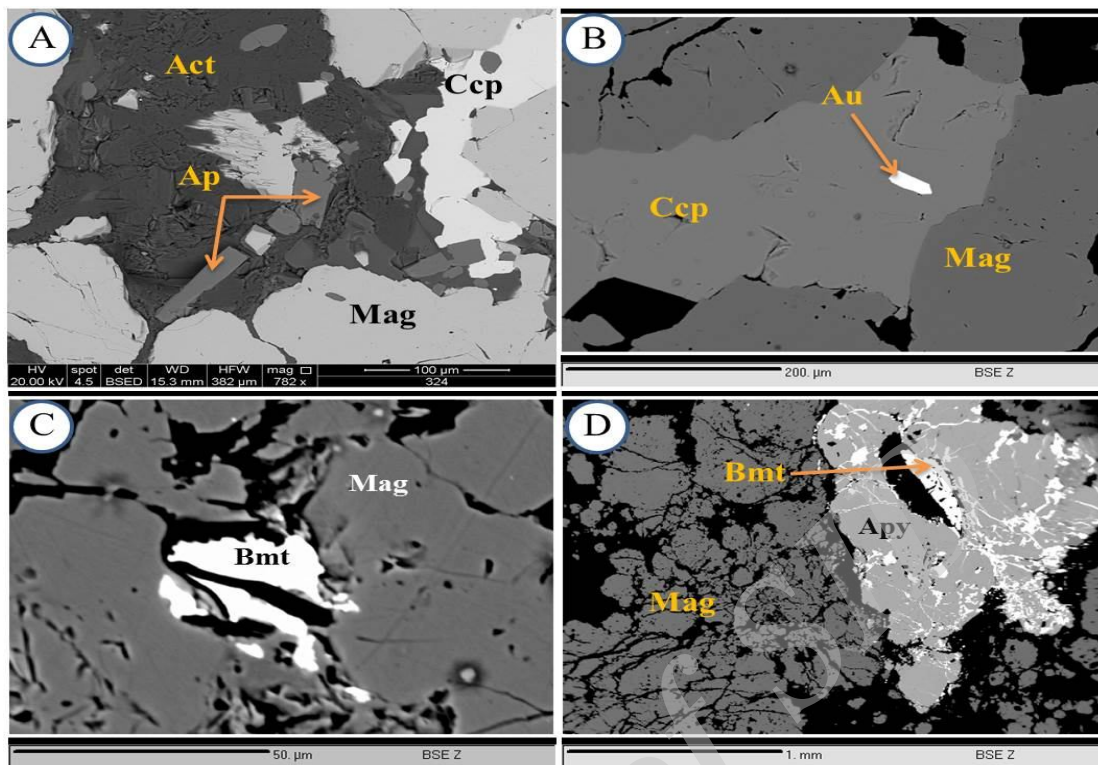
اکتینولیت فراوانترین کانی آب‌دار است که در بخش‌های عمیق کانی‌سازی با مگنتیت هم‌رشدی نشان می‌دهد (شکل A-6 و B). در بررسی‌های پراش پرتو ایکس (XRD) به روش کمی بر روی یکی از نمونه‌ها حضور 51 درصد حجمی فرواکتینولیت تأیید شده است. در شکل 7 توالی هم‌یافتی کانی‌ها در کانسار جلال‌آباد نشان داده شده است. مگنتیت، اکتینولیت، آپاتیت و پیریت کانی‌هایی هستند که در مراحل اولیه تشکیل کانسار ایجاد شده‌اند. پیریت در مراحل اولیه و تأخیری تشکیل شده است و کانی‌سازی طلا همراه کانی‌سازی مس سولفیدی رخ داده است.

دولومیت در زوشکاف‌ها را در قسمت اکسیدان کانسار پر کرده است و به همراه تالک، کلریت و پیریت به صورت رگه‌ای و برشی در ماده معدنی وجود دارند. کلسیت و دولومیت کانی‌های شاخص دگرسانی کربناتی در کانسار هستند. این دو کانی زمینه سنگ آهن را در بخش‌های کانی‌سازی شده در آهک‌های دولومیتی تشکیل داده‌اند. بررسی‌های میکروسکوپی و XRD نشان داد که کانی دولومیت اغلب به کانی‌های تالک و ترمولیت تبدیل شده است. ترمولیت در بخش‌های کانی‌سازی در کربنات‌ها در اثر اضافه شدن محلول گرمایی حاوی سیلیس به دولومیت تشکیل شده است. فرواکتینولیت، تالک، کلریت، کوارتز، کلسیت، سریسیت و اپیدوت از محصولات اصلی



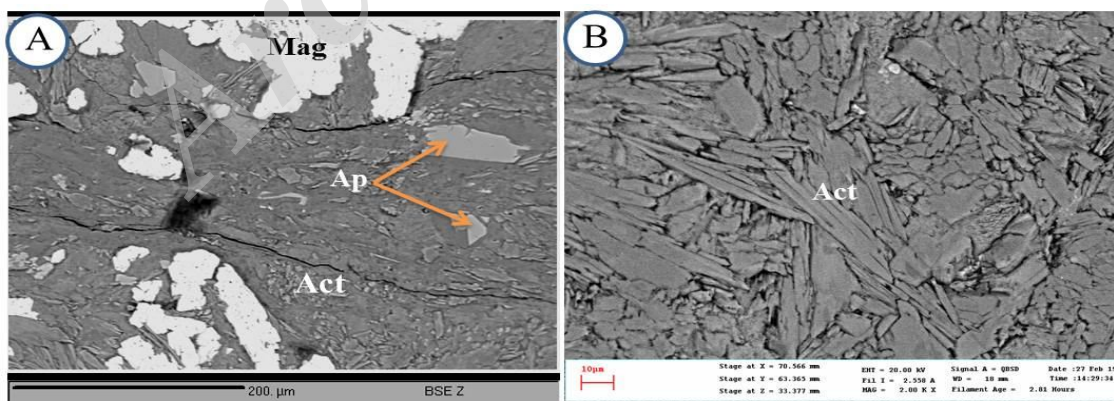
شکل 4. تصاویر میکروسکوپی از کانسنگ در کانسار جلال‌آباد (نور انعکاسی - PPL). A و B: هم‌رشدی مگنتیت (Mag) با پیریت‌های (Py) نیمه‌شکل و بی‌شکل: C: اکسیداسیون مگنتیت به هماتیت (Hem) و اکسیداسیون هماتیت به گوتیت (Gt) و فضای بین بلورهای مگنتیت و شکستگی‌های موجود در مگنتیت‌ها توسط کالکوپیریت (Ccp) پر شده است. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 4. Ore minerals photomicrographs from Jalal Abad deposit (PPL in reflected light). A and B: Subhedral and anhedral pyrite (Py) associated with coarse grain magnetite (Mag), C: Replacement of magnetite by hematite (Hem) in ore zone sample along the fractures (martitization process) and also hematite replaced by goethite (Gt), and D: Chalcopyrite (Ccp) filled the space between magnetite in ore zone sample. Abbreviations after Whitney and Evans (2010)



شکل 5. تصاویر الکترون برگشتی تهیه شده توسط دستگاه میکروسکپ الکترونی از کانسار جلال آباد. A: اکتینولیت (Act) مهمترین کانی غیر فلزی است که فضای بین بلورهای مگنتیت را پر کرده است، B: ادخال طلا (Au) در داخل کالکوپریت، C: پرشدگی بیسموتینیت (Bmt) در فضاهای خالی مگنتیت و D: پرشدگی حفرات و شکستگی‌های مگنتیت توسط مجموعه آرسنوپریت (Apy) - بیسموتینیت علایم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 5. Back-scattered electron (BSE) images of Jalal Abad deposit by SEM. A: Actinolite (Act) is a major gangue mineral filled the spaces between magnetite crystals, B: Gold inclusion of up to 20 μm (Au) within chalcopyrite, C: Bismuthinite (Bmt) filled open spaces in magnetite, and D: Open space filling of bismuthinite and arsenopyrite (Apy) in magnetite.



شکل 6. تصاویر الکترون برگشتی توسط دستگاه الکترون میکروپروپ از دگرسانی‌های متاسوماتیسم سدیم در کانسار جلال آباد. A: هم‌رشدی مگنتیت با اکتینولیت و بلورهای آپاتیت و B: اکتینولیت مهمترین کانی در زون دگرسانی متاسوماتیسم سدیک - کلسیک در کانسنگ مگنتیتی علایم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 6. Back-scattered electron (BSE) images of sodic hydrothermal alteration in Jalal Abad deposit t by EPMA. A: Association of magnetite, actinolite and apatite, and B: Actinolite is major mineral in Na-Ca metasomatism alteration zone in magnetite ore body. Abbreviations after Whitney and Evans (2010)

میکروترموتری سیالات درگیر

عمده سیال‌های درگیر مشاهده شده در نمونه‌ها از نوع سه فاز (L+V+S) است که اغلب دارای بلورهای هالیت هستند (شکل A-8 و B) و سیال‌های درگیر حاوی فاز اوپیک در نمونه کم است. سیال‌های درگیر سه فاز معمولاً بی‌شکل هستند و اندازه آنها از 5 تا 40 میکرون متغیر است؛ در حالی که میانگین ابعادی آنها بین 10 تا 20 میکرون است. حباب‌گاز 10 تا 15 درصد حجم سیال را تشکیل داده است. بلورهای دختر هالیت درشت هستند و در مواردی تا 50 درصد حجم سیال را تشکیل داده است. سیالات درگیر حاوی هالیت در بسیاری از ذخایر معدنی مثل کانسارهای اکسید آهن - مس - طلا (IOCG)، نوع دره

می‌سی‌سی‌پی، طلای کوه‌زایی، ماسیو سولفیدها و مس پورفیری و غیره دیده می‌شوند (Baker et al., 2008; Wilkinson et al., 2009). دامنه تغییرات دمای همگن شدن (Th) 260 تا 440 درجه سانتی‌گراد بوده و بیشترین فراوانی بین دماهای 280 تا 380 درجه سانتی‌گراد است (شکل A-9). تمامی سیالات درگیر به فاز مایع همگن می‌شوند و در دماهای به‌دست آمده حداقل دمای سیال کانه‌ساز را نشان می‌دهد. تغییرات شوری سیالات درگیر 30 تا 52 درصد وزنی معادل نمک طعام با بیشترین فراوانی در محدوده 34 تا 38 درصد وزنی معادل نمک طعام است (شکل B-9).

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

شکل 7. توالی هم‌یافتی کانی‌ها در کانسار جلال آباد

Fig. 7. Paragenetic sequence of mineral in the Jalal Abad deposit

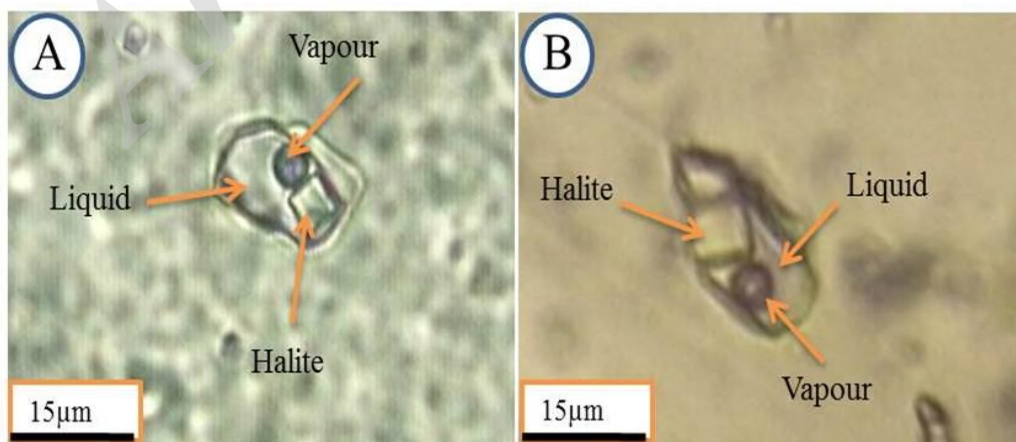
شیمی سیالات درگیر

یکی از روش‌های شناسایی منابع احتمالی سیالات گرمایی اندازه‌گیری کاتیون‌های سیالات درگیر است (Shepherd and Chenery, 1995; Stoffell et al., 2004; Graupner et

al., 2005) که از طریق آنالیز LA-ICP-MS روی سیالات درگیر کانی کوارتز در کانسار جلال‌آباد انجام شد (جدول 1). نسبت Na/Ca برای اغلب سیال‌های درگیر بزرگتر از 1 بوده و مقدار Na > Ca است؛ در حالی که در برخی از سیال‌های درگیر

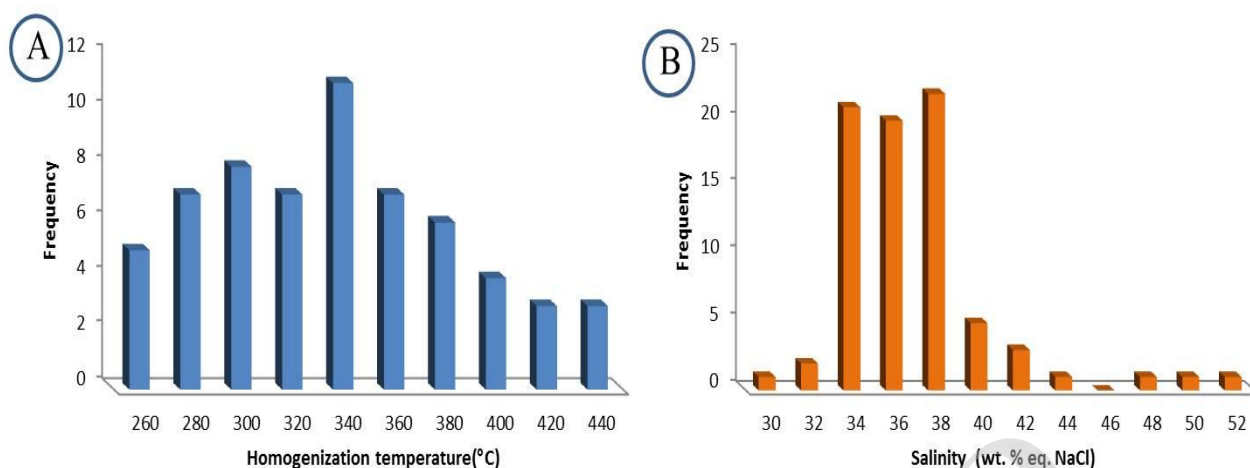
نسبت Mn/Fe در سیال شرایط اکسیداسیون و احیای سیال را نشان می‌دهد. سیال‌های با شرایط اکسیدان مقادیر بالاتری Mn/Fe نسبت به سیال‌های با شرایط احیایی دارند (Yardley, 2005) تغییرات در شرایط اکسیداسیون و احیا نسبت Mn/Fe را در سیال تحت تأثیر قرار می‌دهد. کمترین و بیشترین مقدار نسبت Mn/Fe برابر 0/21 و 1/87 و میانگین Mn/Fe در نمونه‌ها 0/6 است. در اغلب نمونه‌ها Fe>Mn است (شکل C-10). مقدار میانگین Sr/Na در نمونه‌های اندازه‌گیری شده 0/034 است که نشان‌دهنده دولومیتی شدن و سیلیسی شدن سنگ‌های میزبان کربناتی است. Sr و Ba از کربنات‌ها در حین فرآیند دگرسانی به داخل سیال آزاد می‌شوند (Appold et al., 2004; Appold and Wenz, 2011). نسبت Ba/Ca در سیال‌های درگیر 0/03 تا 1/99 بوده و میانگین آن 0/28 است. مقدار Ba در سیال‌های درگیر 826 تا 27664 گرم بر تن است. نسبت Sr/Ca در سیال‌های درگیر 0/01 تا 0/09 است و میانگین آن 0/06 است (جدول 1). مقدار متوسط Ca/Mg در سیال‌های درگیر 31/96 است که این نسبت نشان‌دهنده جانشینی کلسیت توسط دولومیت و جانشینی آنکریست در دولومیت است (Appold and Wenz, 2011). سیال‌های گرمابی در جلال‌آباد مسؤول دولومیتی شدن بوده‌اند؛ به طوری که توالی‌های دولومیت‌های درشت بلور در محدوده کانسار دیده می‌شود.

Ca>Na است (شکل A-10). نسبت Ca/K در سیال‌های درگیر اندازه‌گیری شده از 0/53 تا 8/67 متغیر بوده و میانگین Ca/K برابر 1/75 است. در برخی از نمونه‌ها K>Ca بوده و در اغلب نمونه‌های اندازه‌گیری شده Ca>K است. مقدار متوسط Na در سیال‌ها 61511 گرم بر تن است که با شوری اندازه‌گیری شده در روش میکروترموتری سیال‌های درگیر هم‌خوانی دارد. بیشترین مقدار نسبت Na/K برابر 37/51، کمترین مقدار 0/38 و مقدار متوسط Na/K در سیال‌های درگیر اندازه‌گیری شده 3/79 است (شکل B-10). مقدار Fe در نمونه‌ها از 576 تا 16076 گرم بر تن متغیر است و میانگین آن در سیال‌های درگیر 6914 گرم بر تن است. مقدار Mn در نمونه‌ها از 424 گرم بر تن تا 7581 گرم بر تن متغیر است (شکل C-10). نتایج آنالیز سیال‌های درگیر نشان می‌دهد که Mn با Ca تقریباً یک همبستگی مثبت نشان می‌دهد (شکل D-10). مقدار Cu در سیال‌های درگیر اندازه‌گیری شده متنوع و از 51 تا 3204 گرم بر تن متغیر بوده و مقدار متوسط آن 792 گرم بر تن است. مقدار Zn از 152 تا 3458 گرم بر تن متغیر بوده و مقدار متوسط آن 1157 گرم بر تن است. مقدار Pb بین 39 تا 1313 گرم بر تن متغیر بود و مقدار متوسط آن 384 گرم بر تن است. نسبت Zn/Pb بین 0/69 تا 16/99 و با مقدار متوسط 3/83 است.



شکل 8. A و B: تصاویر میکروسکوپی سیالات درگیر اولیه سه فازی (L+V+S) در کوارتز در کانسار جلال‌آباد.

Fig. 8. A and B: Photomicrographs of primary three phases fluid inclusion (L+V+S) in quartz from Jalal -Abad deposit, solid phase is halite daughter mineral.



شکل 9. A: هیستوگرام دمای همگن‌شدن سیال‌های درگیر اولیه در کانسار جلال‌آباد و B: هیستوگرام شوری سیالات درگیر در کوارتز مرحله اول کانی‌سازی

Fig. 9. A: Histogram of homogenization temperatures of primary fluid inclusions in the Jalal Abad deposit., and B: Histogram of Salinity of fluid inclusions in first stage quartz of mineralization

جدول 1. خلاصه نتایج آنالیز LA-ICP-MS سیالات درگیر (بر اساس گرم بر تن) و نسبت عناصر اصلی

Table 1. Summary of LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions (ppm) and major elemental ratios

Con.									
	Na	Mg	K	Ca	Li	Mn	Fe	Cu	Zn
Min.	26906	135	2372	3751	19	424	576	51	152
Max.	140716	32508	70484	87486	2196	7581	16076	3204	3458
Ave.	61511	7974	28848	38851	475	3645	6914	792	1157
Ratio									
	Na/K	Na/Ca	Na/Mg	Ca/K	Ca/Mg	Fe/Ca	Mn/Fe	K/Fe	Zn/Pb
Min.	0.58	0.96	0.96	0.53	0.43	0.03	0.21	0.84	0.69
Max.	59.32	37.51	398.77	8.68	555.47	0.44	1.87	18.12	16.99
Ave.	5.67	3.79	54.64	1.75	31.96	0.19	0.60	4.72	3.83
	Cu/Zn	Sr/Ba	Ba/Ca	Sr/Ca					
Min.	0.10	0.03	0.03	0.01					
Max.	8.38	0.95	1.99	0.09					
Ave.	0.98	0.27	0.28	0.06					

بحث

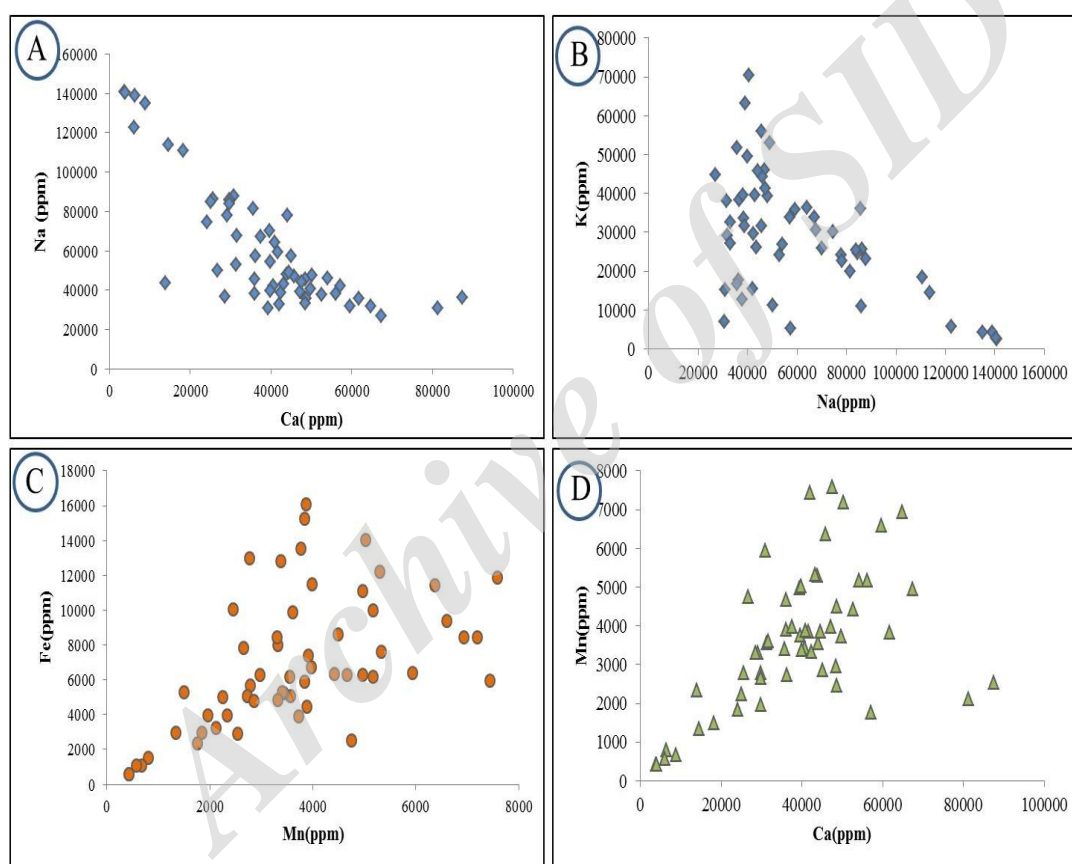
کانسار جلال آباد از نظر کانی شناسی دارای ویژگی‌های کانسارهای IOCG است. در اغلب کانسارهای IOCG، ابتدا کانی سازی آهن رخ داده و در مراحل بعدی کانی سازی مس - طلا اتفاق افتاده است (Hitzman et al., 1992; Groves et al., 2010; Rieger et al., 2010; Williams et al., 2005).

یکی از ویژگی‌های شاخص کانسارهای IOCG حضور متاسوماتیسم در مقیاس وسیع و دگرسانی سدیک در مقیاس منطقه‌ای است. حجم بزرگی از دگرسانی نشان‌دهنده کانی سازی و تشکیل سیستم گرمابی خیلی بزرگ است (Barton and Johnson, 2004; Barton et al., 2011). دگرسانی گرمابی معمولاً شدید بوده و نشان‌دهنده نسبت بالای سیال به سنگ و حضور سیال‌های فوق شور است (Williams et al., 2005). از ویژگی‌های کانی شناسی کانسارهای IOCG، حضور فلزات مس - طلا، اکسیدهای آهن (هماتیت - مگنتیت) با مقادیر پایین Ti، حضور کانی‌های سولفیدی کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت، پیروتیت، حضور کانی‌های حاوی Bi, Co, U، Cu, Au و عناصر نادر خاکی است (Hitzman et al., 1992; Groves et al., 2010; Williams et al., 2005; Zhang et al., 2013). متوسط تا بالاست و محدوده آن تقریباً 30 تا 52 درصد وزنی معادل نمک طعام است. شوری سیالات درگیر از شوری آب دریا (~3/5wt%) و سیال‌های جوی (~0/2wt%) به میزان قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. محدوده وسیع شوری سیال‌های درگیر نشان‌دهنده نقش سیال‌های ماگمایی و حوضه‌ای است. نقش سیالات فوق شور در کانی سازی مس - طلا در بسیاری از کانسارهای IOCG به اثبات رسیده است (Pollard, 2006). دمای به تله افتادن سیالات درگیر در کانسارهای IOCG 170 تا 550 درجه سانتی گراد است و این محدوده وسیع دما نیز نقش حرارتی سیال‌های ماگمایی و اختلاط آن با سیال‌های حوضه‌ای را تأیید می‌کند. سیال‌های ماگمایی و غیر ماگمایی در تشکیل بیشتر کانسارهای IOCG نقش دارند و علاوه بر منشأ ماگمایی و غیر ماگمایی منشأ دو رگه نیز مطرح شده است (Hunt et al.,

2011). سیالات ماگمایی حاوی مقادیر فراوانی Fe، K>Ca و حاوی مقادیر حائز اهمیتی Cu هستند. مقدار Cu در سیال‌های درگیر اندازه‌گیری شده کانسار جلال آباد متنوع بوده و از 51 گرم بر تن تا 3204 گرم بر تن و مقدار Fe اندازه‌گیری شده در سیالات درگیر از 576 تا 16076 گرم بر تن متغیر است. مقادیر Fe و Cu در سیال‌های ماگمایی به ترتیب بیش از 10000 گرم بر تن و 1000 گرم بر تن است؛ در صورتی که مقادیر آن‌ها در سیال‌های غیر ماگمایی بسیار کمتر است (Fisher and Kendrick, 2008; Gillen, 2010). درگیر نشان‌دهنده نقش سیالات ماگمایی و غیر ماگمایی در کانی سازی است. سیال‌های ماگمایی علاوه بر Fe و Cu نسبت به سیال‌های غیر ماگمایی از عناصر Mn, Zn, Pb غنی شده‌اند. در سیال‌های ماگمایی معمولاً K>Ca است و نسبت Ca/K در آنها بین 0/01 تا 1 است؛ در حالی که در سیال‌های غیر ماگمایی مقدار Ca بیشتر است و نسبت Ca/K بین 1 تا 100 است (Yardley, 2005; Fisher and Kendrick, 2008; Gillen, 2010). مقدار K و Ca در سیال‌های ماگمایی و غیر ماگمایی دارای محدوده وسیعی است و از طریق نسبت Ca/K امکان جداسازی این دو نوع سیال وجود دارد. سیال‌های غنی از Ca نشان‌دهنده نقش سیال‌های غیر ماگمایی (سیال‌های حوضه‌ای) است که احتمالاً در اثر واکنش سیال‌های جوی با سنگ‌های دیواره در حین عبور از بخش‌های نفوذپذیر از این عنصر غنی شده‌اند. در سیال‌های درگیر آنالیز شده در کوارتز کانسار جلال آباد مقدار Ca<K و در برخی دیگر K>Ca است و نشان‌دهنده حضور سیال‌های ماگمایی و غیر ماگمایی (سیال‌های حوضه‌ای) است (شکل A-11). مقدار متوسط Ca/K در سیال‌های درگیر برابر 1/75 است و نشان می‌دهد که سیال‌های ماگمایی و غیر ماگمایی اختلاط پیدا کرده و در تشکیل کانسار نقش داشته‌اند. نسبت Mn/Fe بیانگر شرایط اکسیداسیون - احیای سیال است و سیال‌های اکسیدان نسبت به سیال‌های احیایی دارای مقادیر بالاتری از Mn/Fe هستند (Yardley, 2005; Yardley and Graham, 2002). در کانسار جلال آباد، میانگین Mn/Fe در سیالات اندازه‌گیری شده

کربناته در کانسار عامل احیایی شدن سیالات هستند. در سیالات، شوری مهمترین تأثیر را در تمرکز فلزات دارد (Yardley, 2005) و Cl مهمترین کمپلکس انتقال‌دهنده فلزات در سیال‌های گرمایی محسوب می‌شود؛ به طوری که با افزایش آن تمرکز فلزات نیز افزایش می‌یابد (Gillen, 2010; Pollard, 2006). رخداد طلای نیترو همراه کالکوپریت و حضور سیالات درگیر با شوری بالا نشان‌دهنده انتقال مس و طلا از طریق کمپلکس کلر است (Rieger et al., 2010).

0/6 است و نشان‌دهنده غالب بودن شرایط احیایی در سیالات است. در نمودار Mn/Fe-Ca/K سیال‌ها با منشأ ماگمایی و غیر ماگمایی و شرایط اکسیدی و احیایی تفکیک شده‌اند و محدوده وسیع نسبت Mn/Fe و Ca/K مشخص شده است (شکل 11-B). بر اساس نمودار Mn/Fe-Ca/K سیال‌ها در کانسار منشأ ماگمایی و غیر ماگمایی داشته‌اند و هر دو شرایط اکسیدی و احیایی در سیال‌ها دیده می‌شود. قابلیت انحلال Fe در سیالات اکسیدان نسبت به سیالات احیایی کمتر است و وجود توالی‌های



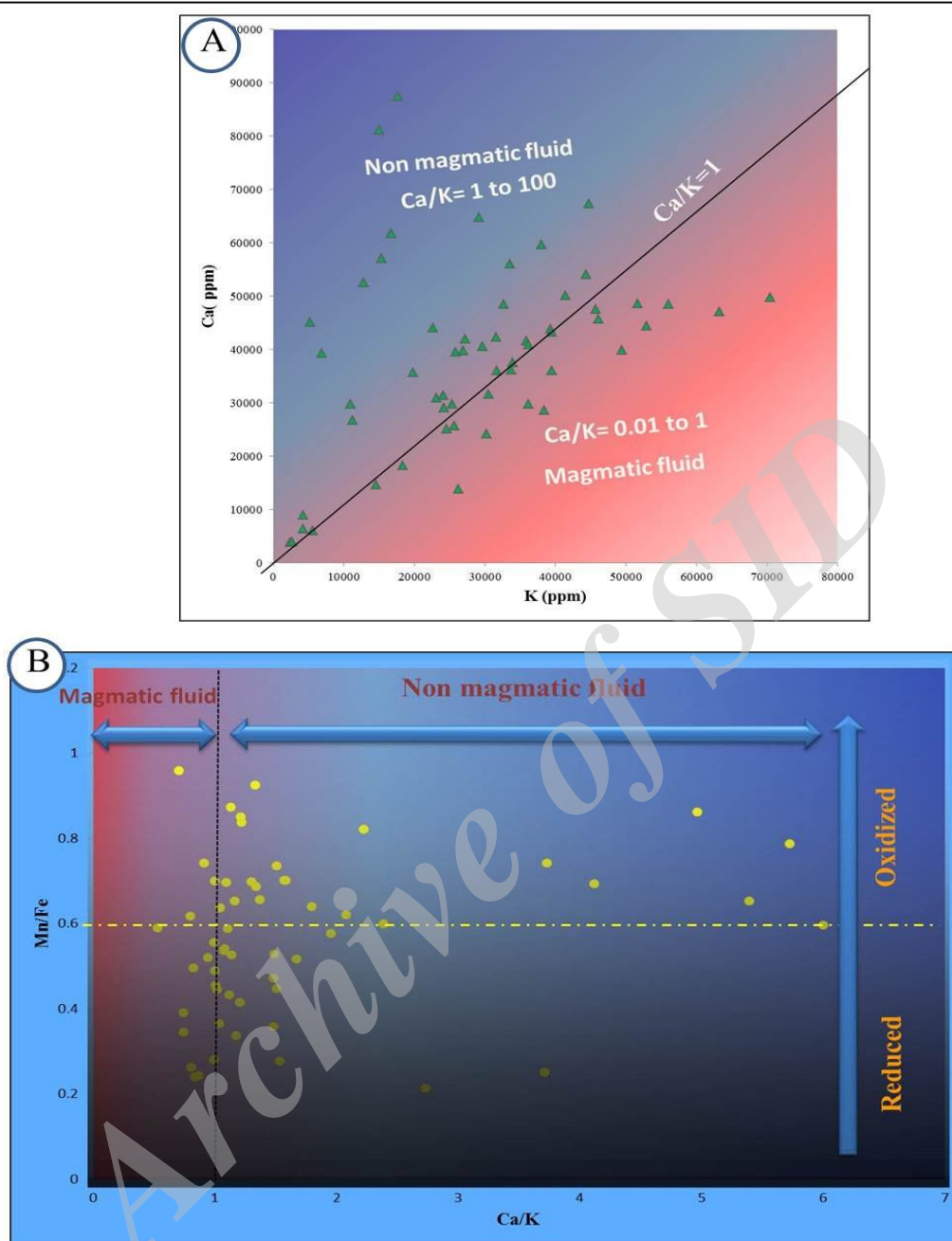
شکل 10. نمودارهای پراکندگی تمرکز کاتیون‌های اصلی در سیالات درگیر سه فازی (L+V+S) واقع در کوارتز در کانسار جلال‌آباد. A: Ca-Na، B: Na-K، C: Fe-Mn و D: Mn-Ca.

Fig. 10. Scatter plots of the concentrations of major cations in primary three phase fluid inclusion (L+V+S) hosted in quartz in the Jalal Abad deposit. A: Ca vs. Na, B: K vs. Na, C: Fe vs. Mn, and D: Mn vs. Ca

فضای خالی، برشی، رگه- رگه‌چه‌ای است. دگرسانی‌های شاخص در کانسار جلال‌آباد اغلب از نوع دگرسانی‌های سدیک- کلسیک، پتاسیک، سریسیتی شدن، کلریتی شدن، سیلیسی شدن و کربناتی است.

نتیجه‌گیری

در کانسار جلال‌آباد، کانی‌سازی به صورت اپی‌ژنتیک و در سنگ‌های رسوبی و ولکانیک گروه ریزو رخ داده است. بافت‌های ماده معدنی اغلب به صورت توده‌ای، افشان، پرکننده



شکل 11. نمودارهای پراکندگی تمرکز کاتیون‌های اصلی در سیالات درگیر سه فازی (L+V+S) واقع در کوارتز. A: Ca در مقابل K و B: Mn/Fe در مقابل Ca/K

Fig. 11. Scatter plots of the concentrations of major cations in fluid inclusions hosted in quartz. A: Ca vs. K, and B: Mn/Fe ratios vs. Ca/K.

تله افتادن سیال‌های درگیر 260 تا 440 درجه سانتی‌گراد است و محدوده وسیعی را نشان می‌دهد. نتایج آنالیز شیمیایی سیالات درگیر نشان می‌دهد که در برخی از سیال‌ها مقدار $Ca < K$ و در برخی دیگر از سیالات $Ca > K$ است و این نشان‌دهنده حضور

اغلب سیال‌های درگیر دیده شده در نمونه‌های بررسی شده کانسار جلال‌آباد از نوع سه فازی (L+V+S) است و فاز جامد غالب در نمونه‌ها هالیت است. شوری سیال‌های درگیر از 30 تا 52 درصد وزنی معادل نمک طعام متغیر است. حداقل دمای به

در گیر وجود دارد و نشان‌دهنده منشأ ماگمایی و غیر ماگمایی سیال‌هاست. سیال‌های ماگمایی دارای مقادیر بیشتری Fe و Cu نسبت به سیال‌های غیر ماگمایی است. بررسی‌های انجام شده، نشان داد که کانسار جلال‌آباد مشابه کانسارهای IOCG است و سیالات ماگمایی و غیر ماگمایی در کانی‌سازی نقش داشته‌اند.

سیال‌های ماگمایی و غیر ماگمایی (سیال‌های حوضه‌ای) در سیال‌های در گیر است. در سیال‌های ماگمایی $K > Ca$ است و مقدار متوسط Ca/K در سیال‌های در گیر برابر 1/75 است. در کانسار جلال‌آباد، سیال‌های در گیر آنالیز شده محدوده وسیعی از Fe و Cu را نشان می‌دهد. در سیال‌های آنالیز شده مقادیر Fe بیش از 10000 گرم بر تن و کمتر از آن در نتایج آنالیز سیال‌های

References

- Appold, M.S., Numelin, T.J., Shepherd, T.J. and Chenery, S.R., 2004. Lim it's on the metal content of fluid inclusions in gangue minerals from the Viburnum Trend, southeast Missouri, determined by laser ablation ICP-MS. *Economic Geology*, 99(1):185-198.
- Appold, M.S. and Wenz, Z.J., 2011. Composition of Ore Fluid Inclusions from the Viburnum Trend, Southeast Missouri District, United States: Implications for Transport and Precipitation Mechanisms. *Economic Geology*, 106(1): 55-78.
- Baker, T., Mustard, R., Williams, P.J., Dong, G., Fisher, L., Mark, G. and Ryan, C.G., 2008. 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(6): 599-608.
- Barton, M.D. and Johnson, D.A., 2004. Footprints of Fe-oxide (Cu-Au) systems: University of Western Australia. Centre for Global Metallogeny Special Publication, 33:112-116.
- Barton, M.D., Kreiner, D.C., Jensen, E.P. and Girardi, J.D., 2011. Superimposed hydrothermal systems and related IOCG and porphyry mineralization near Copiapo. Proceedings of the 11th Biennial SGA Meeting, Society for Geology Applied to Ore Deposits, Antofagasta, Chile.
- Fisher, L.A. and Kendrick, M.A., 2008. Metamorphic fluid origins in the Osborne Fe oxide-Cu-Au deposit, Australia: Evidence from noble gases and halogens. *Mineralium Deposita*, 43(5): 483-497.
- Gillen, D., 2010. A study of IOCG-related hydrothermal fluid in the Wernecke Mountains, Yukon Territory, Canada. Ph.D. thesis, James Cook University, Queensland, Australia, 562 pp.
- Graupner, T., Bratz, H. and Klemd, R., 2005. LA-ICP-MS micro-analysis of fluid inclusions in quartz using a commercial Merchantek 266 nm Nd:YAG laser: a pilot study. *European Journal of Mineralogy*, 17(1): 93-102.
- Groves, D.I., Bierlein, F.P., Meinert, L.D. and Hitzman, M.W., 2010. 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(3):641-654.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N. and Einaudi, M.T., 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, 58(1-4): 241-287.
- Huckriede, R., Kursten, M. and Venzlaff, H., 1962. Geology of Kerman and Saghand. Geological Survey of Iran, Tehran, Report 51, 197 pp.
- Hunt, J.A., Baker, T., Cleverly, J., Davidson, G.J., Fallick, A.E. and Thorkelson, D.J., 2011. 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(10): 1425-1445.
- Mehrabi, B and Karimi, B., 2003. Jalal-Abad as a hydrothermal iron oxide deposit. The 22nd Geosciences Symposium, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Nabavi, M.H., 1979. An introduction to geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 110 pp. (in Persian)
- Pollard, P.J., 2006. An intrusion-related origin for Cu-Au mineralization in iron oxide- copper-

- gold (IOCG) provinces. *Mineralium Deposita*, 41(2): 179–187.
- Ramezani, J. and Tucker, R.D., 2003. The Saghand region, central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics. *American Journal of Science*, 303(7): 622-665.
- Rieger, A.A., Marschik, R. and Diaz, M., 2010. The hypogene iron oxide copper–gold mineralization in the Mantoverde District. Northern Chile. *Economic Geology*, 105(7): 1271–1299.
- Roeder, E., 1984. *Fluid Inclusions*. Mineralogical Society of America, Washington, 644 pp.
- Shepherd, T.J. and Chenery, S.R., 1995. Laser ablation ICP-MS elemental analysis of individual fluid inclusions: An evaluation study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(19):3997–4007.
- Stoffell, B., Wilkinson, J.J. and Jeffries, T.E., 2004. Metal transport and deposition in hydrothermal veins revealed by 213nm UV laser ablation microanalysis of single fluid inclusions. *American Journal of Science*, 304(6): 533–557.
- Stosch, H.G., Romer, R.L. and Daliran, F., 2011. Uranium–lead ages of apatite from iron oxide ores of the Bafq District, East-Central Iran. *Mineralium Deposita*, 46(1): 9–21.
- Technoexport., 1976. Results of the survey of Zarand ore deposit. National Iranian Steel Company, Tehran, 104 pp.
- Vahdati Daneshmand, F., 1990. Geological studies of Zarand area. Geological Survey of Iran, Tehran, 100 pp.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1-4): 229–272.
- Wilkinson, J.J., Stoffell, B., Wilkinson, C.C., Jeffries, T.E. and Appold, M.S., 2009. Anomalously metal-rich fluids from hydrothermal ore deposits. *Science*, 323(5915): 764–767.
- Williams, P.J., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontbote, L., DeHaller, A., Mark, G., Oliver, N.H.S. and Marschik, R., 2005. Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distribution and possible modes of origin. *Economic Geology*, 100(100th Ann): 371–405.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185-187.
- Yardley, B.W.D., 2005. 100th Anniversary Special Paper: metal concentrations in crustal fluids and their relationship to ore formation. *Economic Geology*, 100(4): 613–632.
- Yardley, B.W.D. and Graham, J.T. 2002. The origin of salinity in metamorphic fluids. *Geofluid*, 2(4): 249-256.
- Zhang, H.F., Zhu, R.X., Santosh, M., Ying, J.F., Su, B.X. and Hu, Y., 2013. Episodic widespread magma underplating beneath the North China Craton in the Phanerozoic: implications for craton destruction. *Gondwana Research*, 23(1): 95–107.



Chemical Compositions of Fluid Inclusions in the Jalal –Abad iron oxide deposit, North West of Zarand, Using LA-ICP-MS Microanalysis

Behrouz Karimi Shahraki* and Behzad Mehrabi

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

Submitted: Sept. 7, 2015

Accepted: Dec. 8, 2015

Keywords: *Magnetite, Fluid inclusion, IOCG deposit, LA-ICP-MS, Jalal-Abad*

Introduction

The Poshtebadam Bafq Zarand district in central Iran is a world class iron oxide province. This region contains over two billion tons of iron ore reserves within more than 34 major magnetic anomalies and deposits in an area of 7,500 km² (Stosch et al., 2011). The Jalal-Abad iron ore deposit (200Mt at 45% Fe, 1.18% S and 0.08% P) is located 38 km northwest of Zarand, 16 km southeast of the Rizu town in the Kerman province, Iran. Iron ore deposits are hosted by the Early Cambrian Rizu Series, composed mainly of sedimentary, volcanic and volcanoclastic rocks which are dominated by dolomite, sandstone, shale, siltstone, tuff, ignimbrite and rhyodacite. The origin of the iron oxide deposits is controversial and various genetic models have been suggested. Some researchers believe in magmatic origins or Kiruna type, while others suggest metasomatic replacement from pre-existing rocks (Stosch et al., 2011). LA-ICP-MS has been used to characterize the multi element chemistry of the diverse fluid inclusions found in the Jalal–Abad iron oxide deposit. The aim of this investigation was to understand the genesis of the ore body and identify possible hydrothermal fluid sources in the Jalal-Abad district.

Sampling and method of study

About 100 samples from different types of ore were collected from surface outcrops and a drill core whose association with mineralization are well established. Thin sections, polished thin sections and polished sections were prepared. SEM studies (FEI 5900LV) and LA-ICP-MS analyses of fluid inclusions were carried out in the School of Earth and Environment, the University

of Leeds, UK. Fluid inclusions were studied using a Linkam THM-600 heating-freezing stage mounted on Zeiss petrography microscope at the Iranian Mineral Processing Research Center.

Result and discussion

Jalal Abad deposit is hosted by the early Cambrian volcano-sedimentary rocks of the Rizu series. Stratabound mineralization occurs in a variety of forms being massive, disseminated, replacement, open space filling, veins and breccias. Immediate host rocks include sandy siltstone, acidic volcanic rocks and dolomite. The Jalal Abad deposit mainly consists of iron oxides (magnetite, hematite and goethite), pyrite, chalcopyrite, and malachite that occur in massive, brecciated, open space filling, disseminated and vein forms. Hematite mostly occurs close to the surface and along fractured zones, formed as a secondary mineral due to magnetite oxidation and it is rare at depth. Pyrite is the most important sulphide mineral and is associated with magnetite, calcite, quartz, talc, dolomite, actinolite and chlorite. Copper mineralization at shallow levels is mainly in oxides formed from sulphide oxidation and at deeper levels primary chalcopyrite is also associated with magnetite. Cu mineralization is formed as disseminated or in veins form. Native gold was detected as inclusions smaller than 50 μm in chalcopyrite. Common alteration minerals are goethite, pyrite, talc, actinolite, chlorite, tremolite, dolomite, quartz, calcite, albite and sericite. The earliest hydrothermal alteration includes Na-Ca alteration which is associated with actinolite, magnetite and pyrite. Multiphase fluid inclusions (L+V+S) in quartz are abundant and homogenization

*Corresponding authors Email: behrouzkarimi1389@gmail.com

temperatures are in the range of 260 to 440°C. Salinities vary between 30 to 52 wt% NaCl equivalents.

The concentrations of Na and K are in the range 26906 to 140716 ppm and 2372 to 70484 ppm, respectively. Fe content varies from 576 to 16076 ppm with an average of 6914 ppm and Cu contents vary from 51 to 3204 ppm with a mean of 792 ppm. The Na/Ca values for fluid inclusions vary from 0.38 to 37.51 with a mean of 3.79. The average content of Na is 61511 ppm which is in agreement with salinity of fluid inclusions measured by microthermometry techniques. Magmatic fluids normally yield $K > Ca$, with Ca/K ratios between 0.01 to 1, whereas non magmatic fluids are often richer in Ca with Ca/K between 1 to 100 (Yardley, 2005). The amounts of Fe and Cu in magmatic fluids are commonly above 10000 and 1000 ppm, respectively. However, it depends on chlorinity (Fisher and Kendrick, 2008; Gillen, 2010; Appold and Wenz, 2011). Mn concentrations are 424 to 3645 ppm, with an average concentration of 7581 ppm. Mn/Fe ratio is varied from 0.21 to 1.87 with an average of 0.60. The wide range of homogenization temperature (170 -450 °C) and salinity (31- 52 wt % NaCl equiv) of the fluid inclusions and ratios of K/Ca in fluid inclusions indicate different fluid sources with magmatic and basinal type fluids (Yardley, 2005). Mn/Fe ratios in fluid inclusions are in wide ranges (0.21 -1.87) which indicate the presence of both reduced type and oxidized type fluids (Fisher and Kendrick, 2008).

Results

In addition to iron oxide, economical Cu mineralization occurs in the Jalal Abad deposit with Au, Bi and As mineralization with insignificant apatite. The K, Fe, Ca, Na and Cu

concentrations in fluid inclusions are most probably related to the mixing of magmatic and basinal fluids. The mineralogical, microthermometry and chemistry of fluid inclusions data show that magmatic-hydrothermal metal bearing fluids, nonmagmatic hydrothermal fluids and mixing of them are responsible for iron-Cu-Au mineralization (IOCG) in the Jalal-Abad deposit.

References

- Appold, M.S. and Wenz, Z.J., 2011. Composition of Ore Fluid Inclusions from the Viburnum Trend, Southeast Missouri District, United States: Implications for Transport and Precipitation Mechanisms. *Economic Geology*, 106(1): 55-78.
- Fisher, L.A. and Kendrick, M.A., 2008. Metamorphic fluid origins in the Osborne Fe oxide-Cu-Au deposit, Australia: Evidence from noble gases and halogens. *Mineralium Deposita*, 43(5): 483-497.
- Gillen, D., 2010. A study of IOCG-related hydrothermal fluid in the Wernecke Mountains, Yukon Territory, Canada. Ph.D. thesis, James Cook University, Queensland, Australia, 562 pp.
- Stosch, H.G., Romer, R.L. and Daliran, F., 2011. Uranium-lead ages of apatite from iron oxide ores of the Bafq District, East-Central Iran. *Mineralium Deposita*, 46(1): 9-21.
- Yardley, B.W.D., 2005. 100th Anniversary Special Paper: metal concentrations in crustal fluids and their relationship to ore formation. *Economic Geology*, 100(4): 613-632.