

# کانسار مس رگه‌ای رشیدی، شمال خور، شرق ایران: مطالعات دگرسانی، کانی‌سازی، ژئوشیمیایی، میانبارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار

مریم جاویدی مقدم<sup>۱</sup>، محمدحسن کریم پور<sup>۲\*</sup> و آزاده ملک‌زاده شفارودی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
<sup>۲</sup> استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
<sup>۳</sup> دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۰۹

## چکیده

منطقه رشیدی بخشی از محدوده شمال خور بوده که در شرق ایران و در فاصله ۱۲۰ کیلومتری شمال غرب بیرجند واقع است. پی‌جویی اولیه در این منطقه به کمک پردازش داده‌های ماهواره‌ای ASTER با استفاده از الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی سبب شناسایی پهنه‌های دگرسانی پروپلیتیک، آرژلیک و اکسیدهای آهن شد. این گستره شامل برونزدهایی از سنگ‌های آذرآواری متعلق به ائوسن با ترکیب آندزیتی تا ریولیتی است که توسط دایک دیوریت پورفیری قطع شده‌اند. کانی‌سازی مس رگه‌ای در راستای سیستم شکستگی در واحد توف برش آندزیتی شکل گرفته است. کانی‌سازی رگه‌ای در دو مرحله شکل گرفته است که شامل: ۱- کوارتز، پیریت، کالکوسیت و تنانتیت و ۲- کوارتز، کالکوسیت، پیریت، اسفالریت است. بر پایه مطالعات میانبارهای سیال در بلورهای کوارتز همزمان با مرحله اول و دوم کانی‌سازی رگه‌ای، دمای همگن شدن به ترتیب بین ۲۵۱ تا ۲۹۳ و ۲۱۴ تا ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد و دامنه تغییرات شوری بین ۱۴/۴ تا ۲۳ و ۱۲ تا ۱۴/۲ درصد وزنی نمک طعام به دست آمده است. محدوده مقادیر  $\delta^{18}O$  اندازه‌گیری شده بر روی دو نمونه کوارتزی مربوط به مرحله اول و دوم کانی‌سازی به ترتیب ۱۹/۲۶ و ۱۴/۹۴ ‰ و  $\delta^{18}O$  سیال گرمایی در تعادل با کوارتز بر پایه دما به ترتیب ۱۰/۹۶ و ۴/۹۴ ‰ بوده که در محدوده آب‌های ماگمایی بوده و اختلاط با آب‌های جوی در مرحله دوم را آشکار می‌کند. بر پایه مطالعات زمین‌شناسی، ژئومتری رگه‌ای، داده‌های میانبارهای سیال و ایزوتوپی پایدار، کانسار مس رشیدی را می‌توان در رده کانسارهای مس رگه‌ای طبقه‌بندی نموده که در طول پهنه‌های گسلی تشکیل شده است.

**کلیدواژه‌ها:** کانی‌سازی، میانبار سیال، ایزوتوپ پایدار، رشیدی، شمال خور.

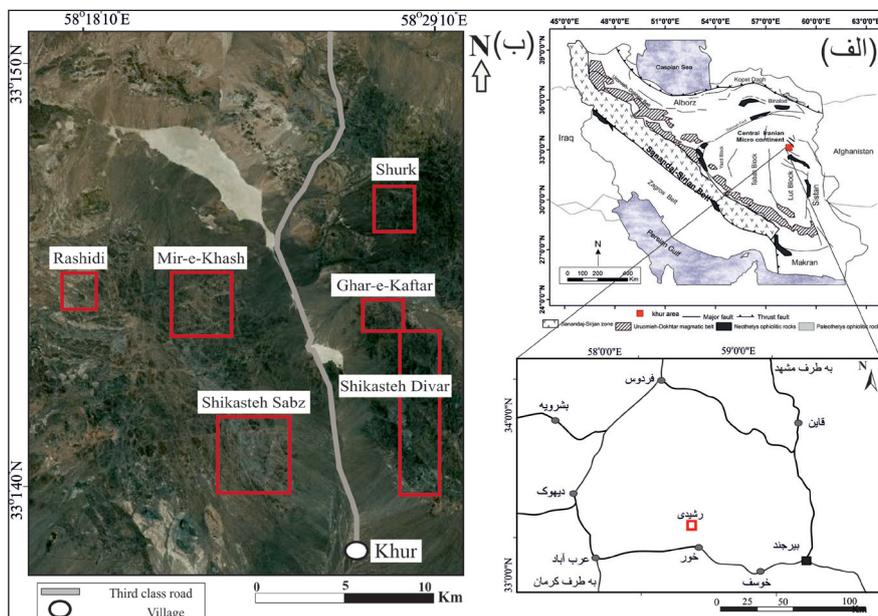
\*نویسنده مسئول: محمدحسن کریم‌پور

E-mail: karimpur@um.ac.ir

## ۱- پیش‌نوشتار

کانسار مس رشیدی در فاصله ۱۲۰ کیلومتری شمال غرب بیرجند و بر اساس تقسیمات ساختمانی- رسوبی ایران (آقاباتی، ۱۳۸۳) در شرق خرد قاره ایران مرکزی، در شمال غرب بلوک لوت واقع است (شکل ۱- الف). منطقه اکتشافی رشیدی در گستره‌ای بین طول‌های جغرافیایی ۵۸° ۱۶' ۵۵" تا ۵۸° ۱۵' ۲۰" شرقی و عرض‌های ۳۳° ۷' ۲۰" تا ۳۳° ۸' ۴۰" شمالی قرار دارد (شکل ۱- ب). مهم‌ترین ویژگی بلوک لوت که آن را از دیگر بخش‌های خرد قاره ایران مرکزی جدا می‌کند، وجود حجم عظیم ماگمانیسم ترشیاری، به ویژه سنگ‌های آتشفشانی

ائوسن است که با داشتن ضخامتی در حدود ۲۰۰۰ متر بیش از نیمی از بلوک لوت را پوشش داده‌اند. وجود فعالیت‌های ماگمایی گسترده با ویژگی‌های ژئوشیمیایی متفاوت در نقاط مختلف، باعث شده تا بلوک لوت پتانسیل بسیار مناسبی برای تشکیل انواع کانی‌سازی‌های فلزی و غیر فلزی از جمله مس پورفیری، طلا و نقره اپی‌ترمال و IOCG داشته باشد (Camp and Griffis, 1982; Karimpour, 2005; Richards et al., 2012; Malekzadeh Shafaroudi et al., 2015; Arjmandzadeh and Santos, 2014).



شکل ۱- الف) موقعیت جغرافیایی منطقه اکتشافی شمال خور و راه‌های دسترسی به آن؛ ب) موقعیت و راه دسترسی به منطقه

رشیدی در شمال خور بر روی تصویر ماهواره‌ای Google Earth.

است. نمودارهای مناسب در نرم افزار SPSS ترسیم شده است، ۷) تجزیه ایزوتوپی اکسیژن برای دو نمونه کوآرتز که مطالعات میانبارهای سیال روی آنها انجام گرفته بود، به منظور شناخت ماهیت سیال‌های منشأ کانی‌سازی در آزمایشگاه ایزوتوپی پایدار دانشگاه لوزان سوئیس انجام گرفته است. مقدار ایزوتوپ اکسیژن با توجه به استاندارد V-SMOW به صورت در هزار (‰) گزارش شد.

### ۳- زمین‌شناسی

منطقه رشیدی در شمال غرب بیرجند و در بخش جنوب شرقی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ سارغنج واقع است (لطفی، ۱۳۷۴). واحدهای آذرآواری (توف برش آندزیتی و توف برش ریولیتی) با سن انوسن در منطقه رشیدی گسترش زیادی داشته و به صورت توالی‌های متناوب قرار گرفته‌اند و دایک‌های دیوریتی آنها را قطع نموده است.

بر اساس بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی، واحد توف برش ریولیتی شامل یک سری از قطعات سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب عمدتاً ریولیتی است که به وسیله خاکسترهای ریولیتی تا داسیتی به هم جوش خورده‌اند. قطعات سنگ‌های آتشفشانی عمدتاً دارای ترکیب ریولیتی و به میزان کمتر داسیتی، آندزیتی و بازالتی است. قطعات در محدوده ۶۴ میلی‌متر تا ۶۵ سانتی‌متر، ۴۵ تا ۷۵ درصد حجم سنگ را تشکیل می‌دهند. قطعاتی با اندازه کوچک‌تر از ۶۴ میلی‌متر نیز بقیه حجم سنگ را تشکیل می‌دهند. توف برش آندزیتی بیشترین گسترش را در منطقه داشته (شکل ۲) و سنگ میزبان اصلی کانی‌سازی رگه‌ای است این واحد شامل قطعات کمی گرد شده تا گرد شده عمدتاً آندزیتی است که به وسیله خاکسترهای آندزیتی به هم جوش خورده‌اند. قطعات سنگی این واحد در حد آندزیت، تراکی آندزیت و به میزان خیلی کمتر داسیت است. اندازه قطعات عمدتاً کمتر از ۲ میلی‌متر بوده و قطعات تا ۴۰ سانتی‌متر (۳۰ تا ۳۵ درصد) هم دیده می‌شوند. دایک دیوریت پورفیری تنها واحد نیمه عمیق شناسایی شده در منطقه بوده که در مشاهدات صحرایی ارتباطی بین این واحد و کانی‌سازی مشاهده نشده است. دایک دیوریت پورفیری دارای روند تقریباً شرقی- غربی بوده و واحد توف برش ریولیتی را قطع نموده است (شکل ۲). بافت سنگ پورفیری بوده و فنوکریست‌های آن شامل پلاژیوکلاز از نوع الیگوکلاز- آندزین، هورنبلند، پیروکسن (اوژیت) است. زمینه سنگ نیز شامل کانی‌های یاد شده به همراه آلکالی فلدسپار نوع اورتوکلاز است. کانی‌های فرعی نیز شامل مگنتیت است.

### ۴- دگرسانی

طی این تحقیق، ابتدا به بررسی دگرسانی‌ها با استفاده از مطالعات دورسنجی پرداخته و سپس با استفاده از مطالعات صحرایی و پتروگرافی به تقسیم‌بندی زون‌های دگرسانی در منطقه پرداخته می‌شود.

#### ۴-۱. بررسی دگرسانی‌های موجود در منطقه با استفاده از دورسنجی

در این مطالعه از داده‌های سنجنده ASTER با شماره ۳۳۱-۰۳۰۸۰۱-۱B که در تاریخ ۲۰۰۱/۰۶/۱۸ تصویر برداری شده، استفاده شد. به منظور تفکیک پهنه‌های دگرسانی از روش نقشه‌بردار زاویه طیفی (Spectral Angel Mapper) استفاده شده است (جدول ۱). مقایسه کانی‌های کائولینیت، ایلیت و پیروفیلیت به دست آمده از پردازش تصاویر ASTER به عنوان شاخص پهنه دگرسانی آرژیلیک نشان می‌دهد که بیشتر در قسمت‌های غرب و جنوب غرب و به مقدار کمتر در مرکز منطقه گسترش یافته‌اند (شکل ۳- الف). مطالعه فراوانی کانی‌های کلریت و اپیدوت به دست آمده از پردازش تصاویر ASTER به عنوان شاخص پهنه دگرسانی آرژیلیک نشان می‌دهد که در بخش مرکزی تا جنوب غرب تصویر گسترش بیشتری یافته است. پهنه دگرسانی پروپلیتیک نسبت به آرژیلیک گسترش محدودی را نشان می‌دهد (شکل ۳- ب). همچنین، بررسی پراکندگی کانی‌های گوئیت و هماتیت به عنوان کانی‌های ثانویه معرف پهنه گوسان نشان می‌دهد که این کانی‌ها عمدتاً در غرب محدوده گسترش داشته‌اند. انطباق پهنه‌های دگرسانی نشان دهنده ساختار خطی با

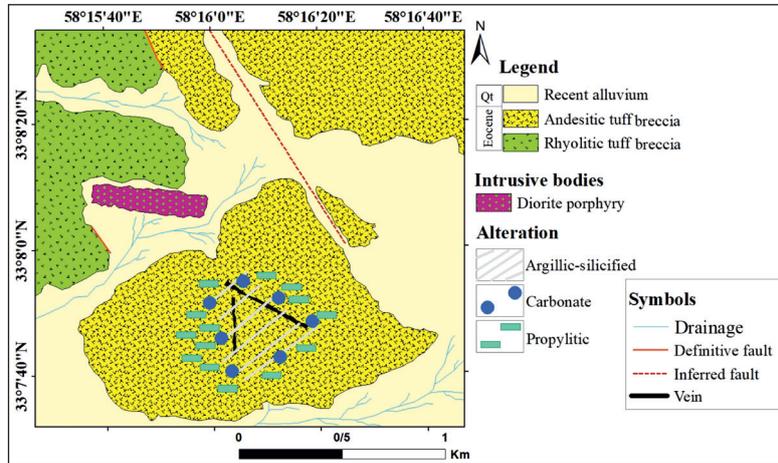
شمال خور به دلیل گسترش سنگ‌های آتشفشانی ترشیری، حضور کانی‌سازی‌های رگه‌ای نوع مس $\pm$  سرب $\pm$  روی (شورک) و مس (شکسته‌سبز، حوض دغ، مهرخش، رشیدی و غار کفتر) (Lotfi, 1982)، وجود حفاری‌های قدیمی و سرباره‌های فراوان، سیستم شکستگی‌ها و نفوذ دایک‌های متعدد (شکسته دیوار) حایز اهمیت است. سیستم شکستگی‌ها در شمال خور دارای دو راستای شمال غرب- جنوب شرق و شمال شرق- جنوب غرب بوده و کانی‌سازی‌ها در شمال خور عمدتاً در راستای شمال غرب- جنوب شرق شکل گرفته‌اند (لطفی، ۱۳۷۴). Bazin and Hubner (1969) کانسار مس رشیدی را جز کانسارهای مس رگه‌ای معرفی کردند. Lotfi (1982) اشاره مختصری به کانی‌شناسی منطقه رشیدی نموده است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی نحوه رخداد کانی‌سازی، ژئوشیمی ماده معدنی و دست‌یابی به شرایط دمایی و ایزوتوپی اکسیژن در کانسار مس رشیدی است. کانسارهای رگه‌ای فلزات پایه دارای تناژ پایین، عیار بالا و تشکیل رگه‌های متعدد در محدوده کانسار هستند (Ridley, 2013). بنابراین با توجه به وجود رگه‌های فراوان که احتمالاً نشان دهنده پتانسیل بالای کانی‌سازی در محدوده شمال خور است، به نظر می‌رسد بررسی دقیق کانی‌سازی کانسار رشیدی می‌تواند الگوی اکتشافی مناسبی برای رگه‌های دیگر در این محدوده فلززایی فراهم نماید.

### ۲- روش پژوهش

فعالیت‌های صورت گرفته در این پژوهش بر مبنای مشاهدات صحرایی و نمونه‌برداری، پردازش تصاویر ماهواره‌ای ASTER، مطالعات آزمایشگاهی و تجزیه نمونه‌هاست که شامل: ۱) پردازش داده‌های ماهواره‌ای ASTER به روش الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی، به منظور شناسایی و تفکیک کانی‌های شاخص زون‌های دگرسانی، ۲) نمونه‌برداری، تهیه و مطالعه ۴۵ مقطع نازک، ۱۲ مقطع نازک صیقلی و ۵ مقطع صیقلی از واحدهای سنگی و رگه‌های کانی‌سازی (از سطح رخنمون‌ها و ترانشه‌ها) به منظور بررسی‌های سنگ‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی و در نهایت تهیه نقشه زمین‌شناسی- دگرسانی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ از منطقه مورد مطالعه، ۳) برداشت ۹ نمونه لیتوژئوشیمیایی به روش خرده‌سنگی از محل رگه کانی‌سازی (از سطح رخنمون‌ها و ترانشه‌ها) و تجزیه نمونه‌ها به روش ICP-OES برای ۳۲ عنصر و تجزیه ۴ نمونه انتخابی از بین این نمونه‌ها برای عنصر طلا به روش fire assay در آزمایشگاه شرکت فرآوری مواد معدنی ایران است. حد آشکارسازی دستگاه در روش تجزیه ICP-OES برای عناصر مختلف متفاوت بوده که بین ۵ تا ۲۰ ppb و در روش fire assay برای طلا ۵ ppb است، ۴) برداشت و تجزیه ۴ نمونه از محل ترانشه‌ها و دگرسانی آرژیلیک برای شناسایی کانی‌های مجهول و آنالیز نمونه‌ها به روش XRD در آزمایشگاه شرکت فرآوری مواد معدنی ایران، ۵) روش تجزیه‌های الکترون پروب (Electron Probe Microanalysis; EPMA) بر روی ۲۸ نقطه به منظور تعیین ترکیب شیمیایی کانه‌ها، در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران با دستگاه EPMA مدل SX100 و مجهز به سیستم EDS با ولتاژ ۵۰ KV، شعاع پرتو X ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون و ساخت فرانسه انجام شده است. حد تشخیص عناصر از سدیم تا اورانیم در آن ۰/۱٪ و یا به عبارتی بالاتر از ۱۰۰ در یک میلیون بوده است، ۶) تهیه ۴ مقطع دوبر صیقل از رگه‌های کوآرتزی کانه‌دار بعد از مطالعات دقیق پاراژنزی برای مطالعه میانبارهای سیال. داماسنجی میان‌بارهای سیال به وسیله یک دستگاه سرد کننده و گرم کننده ساخت شرکت لینکهام مدل THM600 در دانشگاه فردوسی مشهد صورت گرفت. دقت کار دستگاه در مرحله سرد و گرم کردن  $\pm 1^{\circ}C$  و محدوده حرارتی دستگاه بین  $190^{\circ}C$  تا  $600^{\circ}C$  درجه سانتی‌گراد است. دستگاه در دمای کم توسط هپتان ( $90^{\circ}C$ ،  $-90^{\circ}C$ )، کلروفرم ( $63^{\circ}C$ )، کلروبنزن ( $45^{\circ}C$ ) و آب مقطر ( $0^{\circ}C$ ) کالیبره شد. کالیبراسیون در دمای  $45^{\circ}C$  با نقطه ذوب Merck استاندارد ۹۶۴۵ و در دمای  $306^{\circ}C$  با سدیم نترات انجام گرفت. مقدار شوری بر طبق Bodnar (1993) در سیستم  $H_2O$ -NaCl و مقدار دانسیته میانبارهای سیال با استفاده از نرم افزار FLINCOR و بر اساس اطلاعات داماسنجی بر طبق Brown and Lamb (1989) محاسبه شده

پردازش‌های ماهواره‌ای نقش مهمی در شناسایی گسترش دگرسانی‌ها در مجاورت محل کانی‌سازی‌های رگه‌ای در منطقه داشته و اکسیدهای آهن بیشترین انطباق را با گسترش زون کانی‌سازی نشان می‌دهند.

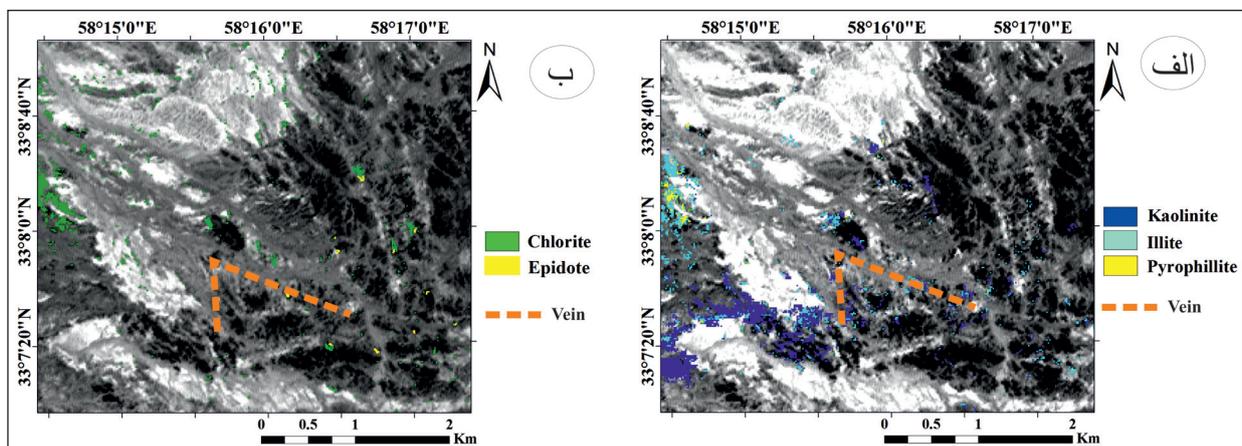
دارای راستای شمال غرب جنوب شرق در محدوده است (شکل ۳-پ). این ساختار خطی منطبق با امتداد محدوده رگه کانی‌سازی در منطقه مورد مطالعه است. حضور این دگرسانی‌ها با مشاهدات دقیق صحرایی نیز به اثبات رسیده‌اند. نتایج حاصل از



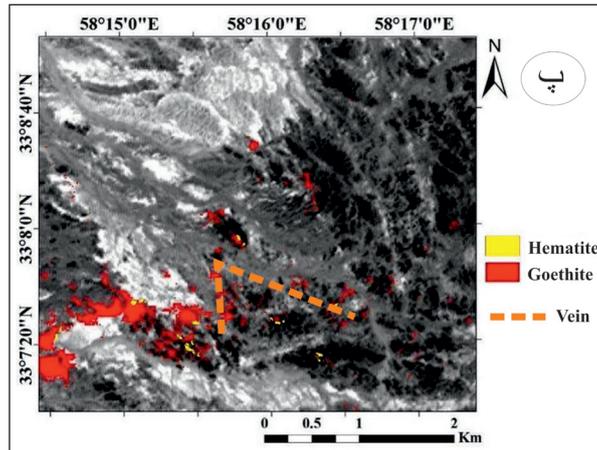
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی - دگرسانی منطقه رشیدی.

جدول ۱- زاویه طیفی بهینه محاسبه شده برای کانی‌های موجود در منطقه رشیدی.

کانی‌های دگرسانی	زاویه طیفی بهینه	کانی‌های دگرسانی	زاویه طیفی بهینه
کانولینیت	۰/۲۷۴۵	کلریت	۰/۳۲۵۴
ایلیت	۰/۲۳۵۰	هماتیت	۰/۲۴۷۵
پیروفیلیت	۰/۳۵۲۰	گوئیت	۰/۲۵۳۵
		ایدوت	۰/۳۳۷



شکل ۳- تصاویر ماهواره‌ای سنجنده ASTER از منطقه رشیدی که الف) دگرسانی آرزلیک، ب) دگرسانی پروپلیتیک؛



ادامه شکل ۳- تصاویر ماهواره‌ای سنجنده ASTER از منطقه رشیدی که (ب) کانی‌های گوتیت و ژاروسیت بر روی آن بارزسازی شده است.

است. دگرسانی پروپلیتیک ضعیف با فاصله از رگه، عمدتاً در واحدهای توف برش ریولیتی و آندزیتی دیده می‌شود. این دگرسانی باعث تبدیل هورنبلند به کلریت (۵ تا ۷ درصد) و اپیدوت (۸ تا ۱۰ درصد) شده است (شکل ۴-ج). شدت این دگرسانی با افزایش فاصله از رگه‌ها کاهش می‌یابد.

#### ۵- کانی‌سازی

کانی‌سازی رگه‌ای در منطقه رشیدی در راستای دو سیستم شکستگی که همدیگر را با زاویه ۵۰ درجه قطع می‌نمایند، شکل گرفته است (لطفی، ۱۳۷۴). این شکستگی‌ها، وابسته به یک سیستم گسلش اصلی با سوی شمال غرب- جنوب شرق بوده که در واحد توف برش آندزیتی شکل گرفته‌اند. عرض رگه‌ها از ۱۰ تا ۱۵ متر متغیر بوده (رگه همراه با پهنه دگرسانی‌ها) و طول رگه‌ها بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ متر است. همچنین این گسل با جابه‌جایی چپ‌گرد خود باعث ایجاد فضای مناسب در راستای تقریباً شمالی- جنوبی برای کانی‌سازی رگه‌ای شده است. فعالیت‌های معدن کاری قدیمی در منطقه رشیدی در امتداد رگه کوارتز- سولفیدی به منظور استخراج مس انجام شده است.

کانی‌سازی در سیستم رگه‌ای، در منطقه رشیدی را می‌توان به چهار مرحله تقسیم نمود. این مراحل عبارتند از: ۱- کانی‌سازی دانه پراکنده در سنگ میزبان مجاور رگه، ۲- کانی‌سازی رگه‌ای، ۳- ادامه کانی‌سازی رگه‌ای و ۴- رگچه‌های تأخیری (شکل ۵). کانی‌سازی اصلی رگه‌ای در طی مراحل ۲ و ۳ شکل گرفته است. در منطقه مورد مطالعه، بافت‌های برشی، قشری و جانیشینی در ماده معدنی شناسایی شد. در زیر به بررسی مراحل مختلف کانی‌سازی رگه‌ای، ساخت و بافت، کانه‌نگاری، کانی‌شناسی گانگ و توالی پاراژنری پرداخته می‌شود.

#### ۵-۱. کانی‌سازی دانه پراکنده

جانیشینی عمدتاً در سنگ میزبان توف برش آندزیتی، در مجاورت رگه دیده می‌شود. پیریت با ابعادی بین ۰/۲ تا ۰/۶ میلی‌متر به صورت دانه پراکنده مشاهده می‌شود (شکل ۶-الف). بر پایه داده‌های الکترون پروب (EPMA)، حضور عناصر مس، آرسنیک، نقره و جیوه در پیریت شناسایی شده است (جدول ۲). در این کانی، میانگین مقدار مس ۰/۳ (%wt)، آرسنیک ۰/۸ (%wt) و نقره ۰/۰۲ (%wt) است. بلورهای پیریت‌ها غالباً در اثر اکسیداسیون به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (ژاروسیت و گوتیت) تبدیل شده‌اند و اغلب قالب این کانی‌ها باقی مانده است.

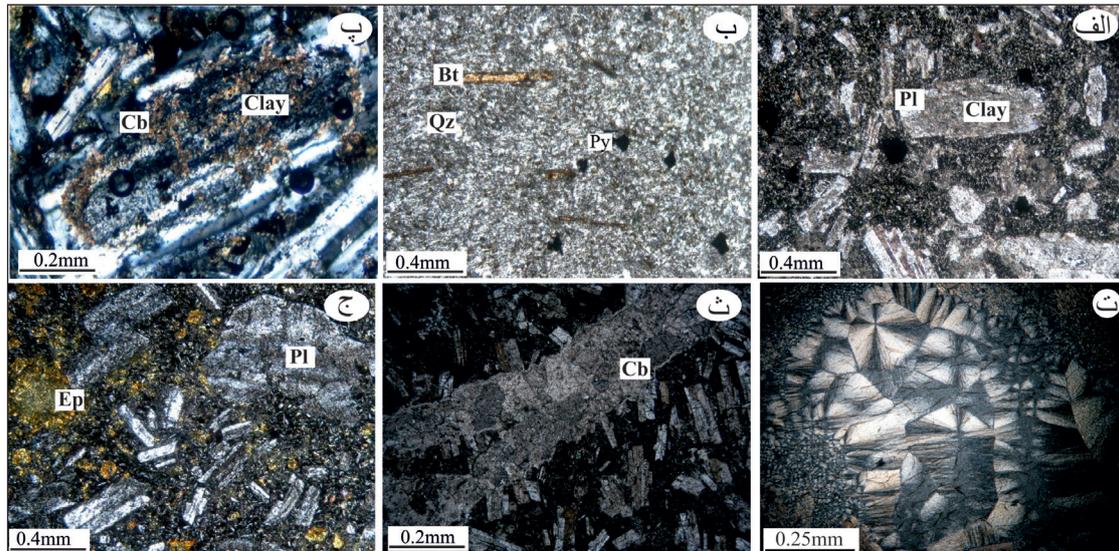
#### ۴-۲. مطالعه دگرسانی‌ها بر اساس مطالعات پتروگرافی و صحرایی

مطالعات پتروگرافی و کانی‌شناسی به روش XRD به همراه پیمایش‌های صحرایی به منظور بررسی گسترش پهنه‌های دگرسانی در منطقه رشیدی مورد استفاده قرار گرفت. پنج نوع دگرسانی اصلی در منطقه رشیدی شناسایی شده است که عبارتند از: ۱- آرژیلیک، ۲- سیلیسی-آرژیلیک، ۳- سیلیسی-کربناته، ۴- کربناتی، ۵- پروپلیتیک ضعیف. این دگرسانی‌ها دارای روند خطی بوده و گسترش محدودی در اطراف رگه‌ها از خود نشان می‌دهند. دگرسانی‌های آرژیلیک، سیلیسی-آرژیلیک و کربناته در مرکز سیستم و دگرسانی پروپلیتیک از اطراف دگرسانی‌های دیگر را در بر می‌گیرد (شکل ۲).

دگرسانی آرژیلیک به صورت فراگیر بوده و اغلب بافت سنگ را کاملاً تحت تأثیر قرار داده است. این دگرسانی، غالباً واحد توف برش آندزیتی میزبان کانی‌سازی را تحت تأثیر قرار داده است. شدت این دگرسانی از حاشیه به سمت رگه افزایش می‌یابد. بر اساس مطالعات میکروسکوپی و XRD، کانی‌شناسی این زون شامل: کانی‌های رسی (کائولینیت و ایلیت) و سرسیت است و به میزان کمتر رگچه‌های کوارتزی در آن مشاهده می‌شود. کانی‌های رسی در حدود ۳۵ تا ۴۰ درصد، عمدتاً زمینه و بلورهای فلدسپار (شکل ۴-الف) را تحت تأثیر قرار داده‌اند. کوارتز به صورت کریپتوکریستالین در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد، همراه با سرسیت در متن سنگ و به شکل پراکنده یافت می‌شود.

دگرسانی سیلیسی-آرژیلیک و سیلیسی-کربناته عمدتاً به صورت رگه‌های کوارتزی همراه با ماده معدنی هستند. این دگرسانی‌ها به صورت سیلیسی شدن در سنگ میزبان نیز صورت گرفته است (شکل ۴-ب). در سنگ میزبان، در مجاورت رگه، پلاژیوکلازها به کانی‌های رسی (۴ تا ۵ درصد) و کربنات (۵ تا ۷ درصد) تبدیل شده‌اند (شکل ۴-پ) و زمینه ۵-۷ درصد سیلیسی شده است. اهمیت این زون‌ها به دلیل شکل‌گیری ماده معدنی در آن است. در رگه‌های کوارتزی، کوارتز با اشکال مختلف کوارتز بلورین، شانه‌ای، کوارتز ریز بلور، کلسدون (شکل ۴-ت) و اپال مشاهده می‌شود. در دگرسانی سیلیسی-کربناته، کلسیت به شکل جانیشینی و یا رگچه ظاهر می‌شود.

دگرسانی کربناتی عموماً به صورت رگه و رگچه‌های کربناتی است (شکل ۴-ث) که در بعضی قسمت‌ها رگه حاوی ماده معدنی را قطع می‌کند. همچنین کربنات به صورت پراکنده در سنگ میزبان (توف برش آندزیتی) نیز دیده می‌شود که عمدتاً پلاژیوکلازها و به میزان کمتر هورنبلندها را تحت تأثیر قرار داده



شکل ۴- الف) تصاویر میکروسکوپی از تبدیل پلاژیوکلاز به کانی‌های رسی در دگرسانی آرژیلیک در مجاور رگه؛ ب) سیلیسی شدن سنگ میزبان در دگرسانی سیلیسی-کربناتی؛ پ) تبدیل پلاژیوکلاز به کانی‌های رسی و کربنات در دگرسانی سیلیسی-کربناتی؛ ت) کلسدونی در رگه؛ ث) رگچه کربناته (کلسیت) در دگرسانی کربناتی؛ ج) اپیدوت در دگرسانی پروپلیتیک در منطقه رشیدی.

Minerals	Hypogene			Oxide zone
	Stage-1	Stage-2	Late Stage	
Pyrite	-----	-----		
Tennantite	-----			
Chalcocite	-----	-----		-----
Sphalerite	.....	-----		
Valleriite				-----
Covellite				-----
Azurite				-----
Malachite				-----
Hematite				-----
Goethite				-----
Limonite				-----
Quartz	-----	-----		
Calcite		-----	-----	
Illite	-----	-----		
Kaolinite	-----	-----		
Chlorite		-----	-----	
Epidote		-----		

شکل ۵- توالی پاراژنتیکی و ترتیب تشکیل کانی‌ها و کانه‌ها در کانسار مس در منطقه رشیدی.

جدول ۲- میانگین نتایج آنالیز EPMA برای کانی‌های سولفیدی اصلی در کانسار رشیدی.

کانی	کانی‌سازی	تعداد	Cu (wt.%)	S (wt.%)	Fe (wt.%)	As (wt.%)	Ag (wt.%)	Zn (wt.%)	Pb (wt.%)	Hg (wt.%)	Sb (wt.%)
پیریت	پراکنده	۳	۰/۳	۵۳/۰۱	۴۵	۰/۸	۰/۰۲	-	-	۰/۰۳	-
پیریت	رگه‌ای	۵	۱/۵	۵۱/۹	۴۶/۲	۰/۹	-	-	-	۰/۰۱	-
کالکوسیت	رگه‌ای	۱۲	۷۷/۲	۲۱/۸	۰/۰۵	۱/۰۲	۰/۳	-	-	-	۰/۰۲
تانیت	رگه‌ای	۸	۳۸/۲۶	۳۱/۴	۱۰/۴	۵/۳۷	۲/۷	۲/۳	۰/۰۶	-	۰/۵

### ۵-۲. کانی‌سازی مس رگه‌ای

در این مرحله کانی‌سازی مس رگه‌ای شامل کوارتز، پیریت، کالکوسیت و تانیت (شکل ۶- ب) همچنان ادامه یافته است. کانی‌سازی در این مرحله شامل کوارتز، پیریت، کالکوسیت و اسفالریت می‌باشد (شکل ۶- پ). میزان فراوانی پیریت در این مرحله نسبت به مرحله قبل کمتر است.

### ۵-۳. مطالعات کانه‌نگاری کانسار

در بخش درون‌زاد کانسار، کانی‌های سولفیدی شامل پیریت، کالکوسیت، اسفالریت و تانیت است. کانی باطله اصلی در اغلب کانسنگ‌ها کوارتز است. کالکوسیت فراوان‌ترین کانی سولفیدی در رگه‌ها است (شکل ۶- پ). این کانی در هر دو بخش درون‌زاد و برون‌زاد قابل مشاهده است. حضور بلورهای درشت، بدون حضور بقایای کالکوپیریت و نیز عدم حضور کالکوسیت به صورت حاشیه واکنشی، نشان‌دهنده اولیه بودن این کانه است. کالکوسیت با ابعادی بین ۰/۵ تا ۳ میلی‌متر و گاهی تا بیش از ۵ میلی‌متر همراه با پیریت، تانیت و به میزان کمتر اسفالریت در داخل رگه دیده می‌شود (شکل‌های ۶- ب و پ). بر پایه نتایج تجزیه ریز کاو الکترونی (EPMA)، حضور عناصر نقره و آنتیموان در کالکوسیت مشهود است (جدول ۲)، از سویی در این کانسار کانی‌های مجزای این عناصر دیده نشد. همچنین در ترکیب شیمیایی کانی کالکوسیت، عناصر Fe و As حضور دارند (جدول ۲ و شکل ۶- ت). در این کانی میانگین مقدار آهن (wt.%) ۰/۰۵، نقره (wt.%) ۰/۳، آنتیموان (wt.%) ۰/۰۲ و آرسنیک (wt.%) ۱/۰۲ است (جدول ۲). این کانی در برخی قسمت‌ها از حاشیه و محل شکستگی‌ها به کولیت، دیژنیت و اکسیدها و هیدرواکسیدهای مس (والریت) تبدیل می‌شود (شکل‌های ۶- ب و پ).

پیریت با ابعادی بین ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌متر اغلب همراه با کالکوسیت در رگه‌ها دیده می‌شود. بر پایه داده‌های تجزیه ریز کاو الکترونی (EPMA)، حضور عناصر مس، آرسنیک و به میزان خیلی کم جیوه در پیریت شناسایی شد (جدول ۲). در این کانی میانگین مقدار مس (wt.%) ۱/۵، آرسنیک (wt.%) ۰/۹، جیوه (wt.%) ۰/۰۳ است. در برخی نقاط، پیریت تبدیل به اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن شده (شکل ۶- ب) و گاهی فقط بقایای پیریت اولیه باقی مانده است. تانیت با ابعادی بین ۰/۲ تا ۰/۸ میلی‌متر اغلب همراه با کالکوسیت و در مرحله دوم دیده می‌شود (شکل ۶- پ). بر پایه داده‌های تجزیه ریز کاو الکترونی (EPMA)، حضور عناصر آهن، نقره، آنتیموان، روی و سرب در تانیت شناسایی شد (جدول ۲). در این کانی میانگین مقدار آهن (wt.%) ۱۰/۴، نقره (wt.%) ۲/۷، آنتیموان (wt.%) ۰/۵، روی (wt.%) ۲/۳ و سرب (wt.%) ۰/۰۶ است که فرمول تجربی برای این کانی در برخی بخش‌ها، از حاشیه به کولیت و کالکوسیت تبدیل شده است. اسفالریت به صورت بی‌شکل با اندازه چند میکرون تا ۰/۵ میلی‌متر و فراوانی کم در کانسنگ رگه‌ای دیده می‌شود. این کانی اغلب همراه با کانی کالکوسیت مشاهده می‌شود. اسفالریت در اواسط تا اواخر کانی‌سازی سولفیدی (عمدتاً در مرحله سوم)، تبلور یافته است.

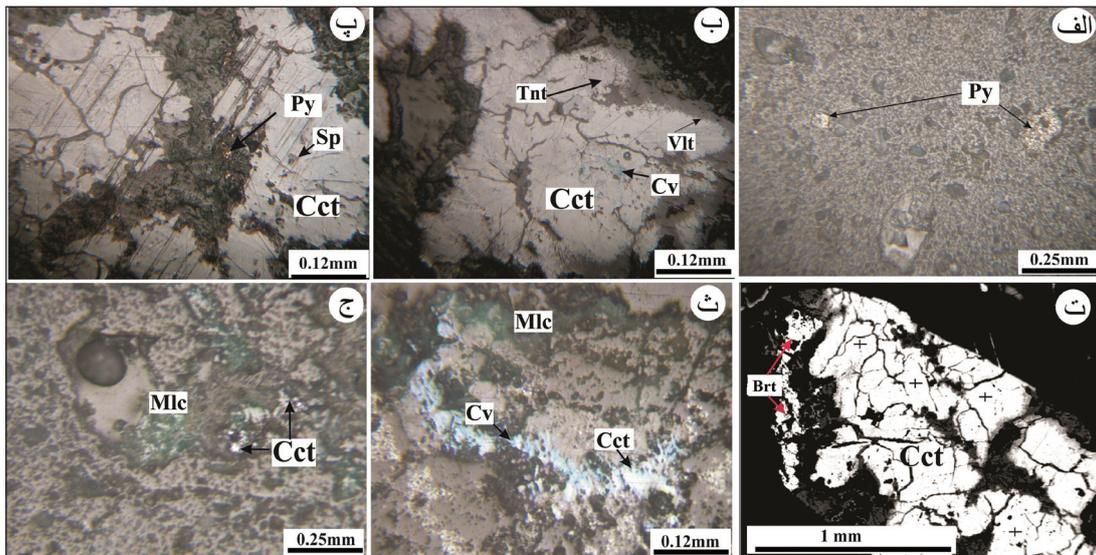
کانی‌سازی درون‌زاد تحت تأثیر فرآیندهای اکسیداسیون و فروشست قرار گرفته است. به طوری که در زون اکسیدان، کانی‌های برون‌زاد بر کانی‌های درون‌زاد غلبه دارند. مهم‌ترین کانی برون‌زاد کالکوسیت است که با دیگر کانی‌های برون‌زاد از قبیل مالاکیت، آزوریت، والریت، کولیت، دیژنیت و کانی‌های اکسیدی-هیدرواکسیدی آهن (گوتیت، جاروسیت و هماتیت) همراه است.

کالکوسیت برون‌زاد اغلب در این زون همراه با کولیت و دیژنیت دیده می‌شود. در بعضی قسمت‌ها تشخیص بین کالکوسیت درون‌زاد و برون‌زاد بسیار مشکل است (شکل‌های ۶- ث و ج). کولیت دومین کانه فراوان در بخش برون‌زاد بعد از کالکوسیت است. این کانه به صورت نواری در حاشیه و اطراف شکستگی‌های کانی کالکوسیت دیده می‌شود (شکل ۶- ث). دیژنیت همراه با کولیت ولی با فراوانی کمتری در زون برون‌زاد دیده می‌شود. مالاکیت عمدتاً در حفرات و به صورت توده‌ای تا کلو فرمی دیده می‌شود. این کانی عمدتاً در زون اکسیدان و در سطح رگه به خوبی قابل شناسایی است (شکل ۶- ج). آتاکامیت طی مطالعات XRD شناسایی شد. والریت یک هیدرواکسید مس است که در حاشیه کانی کالکوسیت دیده می‌شود. این کانی در زون برون‌زاد از اکسیداسیون کالکوسیت تشکیل می‌شود و عمدتاً به صورت دندردی در اطراف شکستگی‌ها و حاشیه کانی کالکوسیت قابل مشاهده است. هیدرواکسیدها و اکسیدهای آهن در سطح رخنمون رگه قابل شناسایی هستند. گوتیت اکسید آهن اصلی ناشی از اکسیداسیون پیریت بوده که به صورت رگچه‌ای و پراکنده قابل مشاهده است. در بعضی قسمت‌ها در اثر فرایندهای اکسیداسیون تنها قالب‌هایی از پیریت باقی مانده است. هماتیت نسبت به گوتیت گسترش کمتری داشته و عمدتاً در حفرات و یا حاشیه رگه قابل شناسایی است.

کوارتز به عنوان مهم‌ترین کانی باطله همراه با کانی‌سازی بوده که اغلب با بافت قشری دارد (شکل ۷- الف). کوارتز با ابعادی از ۰/۳ تا ۳ میلی‌متر اغلب به صورت بلوری همراه با ماده معدنی و همچنین به صورت پراکنده در سنگ میزبان در مجاورت رگه دیده می‌شود. همچنین در برخی نقاط، قسمت‌ها کانی‌سازی همراه با کوارتز کریستالین شکل گرفته است. کلسیت تیغه‌ای مربوط به فازهای تأخیری فرآیندهای گرمایی منطقه است (شکل ۷- ب). باریت با فراوانی کم در مراحل آخر کانی‌سازی به صورت رشته‌ای مشاهده می‌شود (شکل ۷- پ).

### ۶- ژئوشیمی پهنه‌های دگرسانی-کانی‌سازی

به منظور انجام مطالعات ژئوشیمیایی، ۹ نمونه از بخش‌های مختلف پهنه‌های دگرسانی-کانی‌سازی برداشت شد. مقادیر میانگین اندازه‌گیری شده در این رگه‌ها برای مس ۴۰۶۷۲/۴ گرم بر تن، نقره ۲۱/۰۸ گرم بر تن، آرسنیک ۳۷۶/۷ گرم بر تن، روی ۶۹/۵ گرم بر تن، سرب ۱۳۴/۳ گرم بر تن و مولیبدن ۱۶۲/۴ گرم بر تن است. آنتیموان فقط در یک نمونه ۱۲ گرم بر تن اندازه‌گیری شده و در سایر نمونه‌ها زیر حد تشخیص دستگاه است (جدول ۳).



شکل ۶- الف) تصویر میکروسکوپی از پیریت به صورت دانه پراکنده در زون آرزلیک؛ ب) بقایای کانی پیریت همراه با کالکوسیت؛ پ) کانی‌های کالکوسیت، تنانتیت و تبدیل کالکوسیت از محل درزها به کولیت و از حاشیه به والریت؛ ت) تصویر میکروسکوپ الکترونی از کانی کالکوسیت (موقعیت تعدادی از نقاط آنالیز شده به روش EPMA نشان داده شده است)؛ ث) تصویر میکروسکوپی از مالاکیت، کالکوسیت و کولیت در رگه؛ ج) مالاکیت همراه با کالکوسیت در رگه. علائم اختصاری Vlt، Tnt، Sp، Mlc، Cv، Cct، Py به ترتیب پیریت، کالکوسیت، کولیت، مالاکیت، اسفالریت، باریت، تنانتیت و والریت هستند (Whitney and Evans, 2010).



شکل ۷- الف) بافت قشری در رگه کوآرتز همراه با ماده معدنی؛ ب) کلسیت تیغه‌ای؛ پ) باریت به فرم رشته‌ای.

جدول ۳- نتایج حاصل از تجزیه نمونه‌های برداشت شده از محل رگه در منطقه رشیدی.

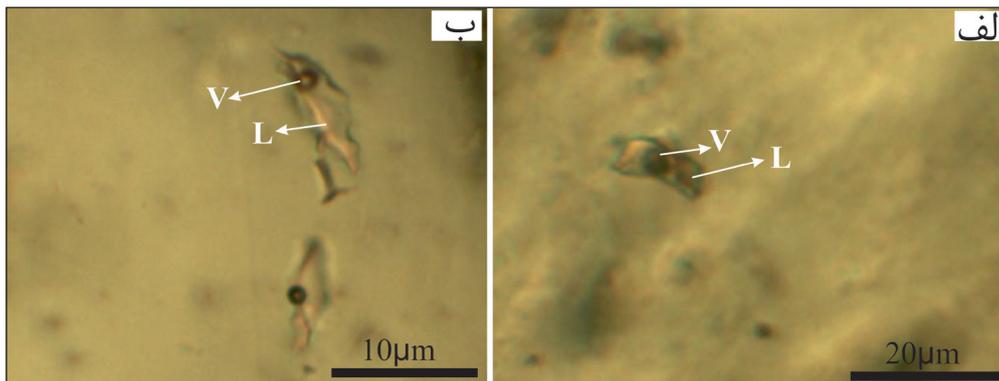
	Cu (ppm)	Ag (ppm)	Sb (ppm)	Zn (ppm)	Pb (ppm)	As (ppm)	Mo (ppm)	Mn (ppm)
<b>D.L. (ppb)</b>	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
<b>M-1</b>	۴۲۳۴۲	۱۳/۳	۱۲	۶۵	۸۳	۱۶۵	۹	۹۵
<b>M-2</b>	۱۳۵۰۶	۵/۳	-	۴۱	۲۶	۸۶	۴	۴۹
<b>M-3</b>	۲۸۹۶۱	۱۱/۲	-	۸۱	۱۲۵	۴۸۶	۱۹	۱۳۷
<b>M-4</b>	۲۳۱۸۵	۶/۸	-	۱۶۴	۹۶	۲۳۸	۸	۱۵۶
<b>M-5</b>	۳۳۶۷۸	۹/۹	-	۶۴	۱۲۵	۳۷۵	۴۰	۹۴
<b>M-6</b>	۴۲۵۹۰	۲۶/۸	-	۴۱	۱۵۹	۲۸۵	۳۵/۲	-
<b>M-7</b>	۵۳۴۳۰	۴۹/۷	-	۷۲	۱۶۶	۵۷۶	۳۵/۶	-
<b>M-8</b>	۶۱۹۸۰	۱۴۲/۶	-	۱۲	۲۷۶	۸۰۱	۱۳۶۸	-
<b>M-9</b>	۶۶۳۸۰	۴۵/۷	-	۸۶	۱۵۳	۳۷۹	۳۸/۵	۱۱

ندارد. همچنین، میانبرهای سیال ثانویه نیز مشاهده شده است که عمدتاً در امتداد شکستگی‌های بلور و در اندازه‌هایی از ۲ تا ۵ میکرون قابل شناسایی بودند. مطالعات گرمایش و سرمایش بر روی میانبرهای سیال اولیه دو فاز غنی از مایع با میزبان کانی کوارتز انجام گرفت. در برخی از آنها نیز به دلیل نامناسب بودن اندازه میانبر سیال برای عملیات سرمایش، فقط دما اندازه‌گیری شد. طی این تحقیق، تعداد ۲ مقطع دو بر صیقلی و تعداد ۲۸ میانبر سیال (انواع L-V) در مرحله اول و ۲ مقطع دو بر صیقلی و تعداد ۳۶ سیال درگیر (انواع L-V) در مرحله دوم کانی‌سازی رگه‌ای اندازه‌گیری شده است (جدول ۴). نکته مشابه در سیال همه مراحل کانی‌سازی این است که در هیچ یک از میانبرهای سیال کانی نوزاد دیده نشد، و نخستین دمای ذوب یخ ( $T_{fm}$ ) در این نمونه‌ها بین ۵۵- تا ۵۵/۷- (میانگین ۵۶/۲- برای ۶۴ میانبرهای سیال) است (جدول ۴). نخستین دمای ذوب یخ در سیستم دوتایی  $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$  بیشتر از ۲۰/۸- است (Bodnar, 1993). برای نمونه‌های مورد مطالعه،  $T_{fm}$  پایین‌تر از این دما است (جدول ۴) که این امر بیانگر حضور نمک‌های دیگر علاوه بر  $\text{NaCl}$  در سیال کانه‌ساز است. مقایسه نخستین دمای ذوب یخ در سیستم‌های دوتایی  $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$  مختلف (Shepherd et al., 1985; Davis et al., 1990; Gokce, 2000; Prokofiev et al., 2010) پیشنهاد می‌کند که سیال گرمابی شامل  $\text{NaCl} - \text{H}_2\text{O} + \text{CaCl}_2 \pm \text{FeCl}_2 \pm \text{MgCl}_2$  و سایر نمک‌ها است.

مس با نقره همبستگی مثبت بالا (۰/۷۱۸) و با آرسنیک همبستگی مثبت متوسطی (۰/۶۴۵) نشان می‌دهد. همچنین آرسنیک دارای همبستگی مثبت بالا با نقره (۰/۸۲۹) است (جدول ۴). این همبستگی‌ها و عدم حضور آنتیموان (فقط در یک نمونه ۱۲ گرم در تن گزارش شده است) می‌تواند به حضور این عناصر (مس، نقره و آرسنیک) در میزبان تنازیت نسبت داده شود.

#### ۷- نتایج مطالعات میانبرهای سیال

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، دو مرحله اصلی در کانسار مس رشیدی شناسایی شده است. مطالعات میانبرهای سیال بر روی کانی کوارتز مرتبط با کانی‌سازی در هر یک از این مراحل صورت گرفت. میانبرهای سیال بر اساس پیشنهاد (Roedder, 1984) و Shepherd et al. (1985) و Goldstein (2003) شناسایی شدند. در نمونه‌های مورد مطالعه ۳ نوع میانبر سیال قابل تفکیک هستند. بیشتر میانبرهای سیال شناسایی شده دو فاز و از نوع فازهای مایع و بخار (L-V) هستند بیشتر حجم این سیالات را مایع تشکیل می‌دهد. به طوری که مقدار فاز مایع موجود در آنها ۷۰ تا ۸۰ درصد است و همگی به صورت اولیه تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۸- الف و ب). تعداد کمی از سیالات از نوع تک فاز مایع (L) هستند. در میانبرهای سیال غنی از بخار (V)، جابجایی گاز بیش از ۹۵٪ از حجم میانبر سیال است و امکان مشاهده فاز مایع وجود



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی از میانبرهای سیال الف) میانبرهای سیال دو فاز (LV) در کوارتز مرحله اول؛ ب) کوارتز مرحله دوم کانی‌سازی.

جدول ۴- خلاصه نتایج مطالعات میانبرهای سیال در کانه‌زایی رگه‌ای در منطقه رشیدی.

شماره نمونه	کانی میزبان	نوع میانبرهای سیال	ابعاد (μm)	نوع میانبر سیال	تعداد میانبر سیال	Th (°C)	$T_{fm}$ (°C)	$T_{mice}$ (°C)	شوری Wt. % (NaCl)	چگالی
M-6A	کوارتز	P	۲-۱۲	L-V	۱۶	۲۵۱-۲۹۳	-۵۵ تا -۵۷/۲	-۲۱ تا -۱۰/۵	۱۴/۴-۲۳	۰/۸۹ تا ۰/۹۹
M-6B	کوارتز	P	۳-۸	L-V	۱۲	۲۵۲-۲۹۰	-۵۷ تا -۵۶/۴	-۱۷/۵ تا -۱۰	۱۴-۲۰/۸	۰/۹۰-۰/۹۶
M-10A	کوارتز	P	۵-۱۰	L-V	۱۲	۲۱۴-۲۷۰	-۵۷/۲ تا -۵۵	-۱۰/۳ تا -۸/۳	۱۲-۱۴/۲	۰/۸۹-۰/۹۵
M-10B	کوارتز	P	۴-۱۵	L-V	۲۴	۲۱۷-۲۵۰	-۵۶ تا -۵۷	-۹/۴ تا -۸/۴	۱۲-۱۳/۳	۰/۹۱ تا ۰/۹۵

در این مرحله ۲۱۴ تا ۲۷۰ درجه سانتی گراد و میانگین دما ۲۳۶ درجه سانتی گراد است (شکل ۹-الف). شوری میانبارهای سیال این مرحله از ۱۲ تا ۱۴/۲ درصد وزنی (میانگین ۱۲/۷ درصد وزنی) متغیر است (شکل ۹-ب).

#### ۸- نتایج تصحیحات ایزوتوپی اکسیژن

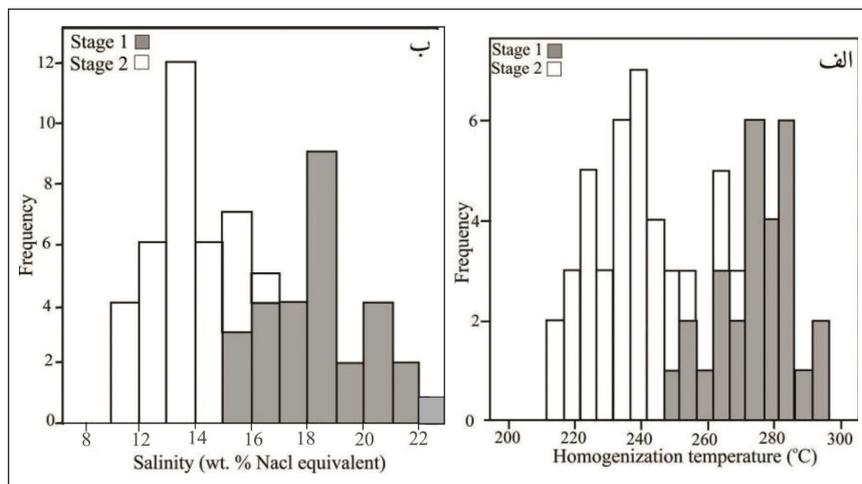
نتایج به دست آمده از مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  در کانی کوارتز نسبت به استاندارد V-SMOW (%) در جدول ارائه شده است. اما با توجه به ضرورت محاسبه مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  سیال کانه دار بوده، با توجه به نتایج دماسنجی میانبارهای سیال، نمونه‌های مورد مطالعه تصحیح دمایی شدند. در تصحیحات دمایی، برای محاسبه اکسیژن موجود در سیال کانه ساز از معادله Zhang et al. (1989) استفاده شده است. با توجه به تصحیحات دمایی صورت گرفته، مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  محاسبه شده در سیال کانه دار کوارتز مربوط به رگه‌های کوارتز-کانی سازی در مرحله اول و دوم کانی سازی در منطقه رشیدی به ترتیب  $+10/96$  و  $+4/94$  است (جدول ۵).

#### ۷-۱. مرحله اول کانی سازی (میانبارهای سیال با میزبانی زون دگرسانی سیلیسی-آرژلیک)

میانبارهای سیال در نمونه‌های کوارتز این مرحله، عمدتاً بی‌شکل تا میله‌ای بوده و اندازه آنها بین ۸ تا ۱۲ میکرون است (شکل ۸-الف). دامنه حرارتی دمای همگن شدن در این مرحله ۲۵۱ تا ۲۹۳ درجه سانتی گراد و میانگین دما ۲۷۴ درجه سانتی گراد است (شکل ۹-الف). همچنین شوری میانبارهای سیال این مرحله از ۱۴/۴ تا ۲۳ درصد وزنی (میانگین ۱۷/۷ درصد وزنی) متغیر است (شکل ۹-ب).

#### ۷-۲. مرحله دوم کانی سازی (میانبارهای سیال با میزبانی زون دگرسانی سیلیسی-کربناته)

میانبارهای سیال در نمونه‌های کوارتز این مرحله، بی‌شکل تا بیضوی بوده و اندازه آنها بین ۲ تا ۱۰ میکرون است (شکل ۸-ب). غالب اندازه گیری‌های ریزدماسنجی بر روی ابعاد ۵ تا ۱۰ میکرون صورت گرفته است. دامنه حرارتی دمای همگن شدن



شکل ۹- الف) نمودار دمای همگن شدن میانبارهای سیال؛ ب) نمودار شوری میانبارهای سیال برای مراحل مختلف کانی سازی رگه‌ای در منطقه رشیدی.

جدول ۵- مقادیر ایزوتوپی پایدار اکسیژن در کانسار رشیدی.

$\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}(\text{‰})$	1000 ln $\alpha$ (Zhang et al., 1989)	$T_{\text{mean}}(\text{°C})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{quartz}}(\text{‰})$	مرحله کانی سازی	شماره نمونه
+۱۰/۹۶	۸۳	۲۷۴	+۱۹/۲۶	۱	M-6A
+۴/۹۴	۱۰	۲۳۶	+۱۴/۹۴	۲	M-10A

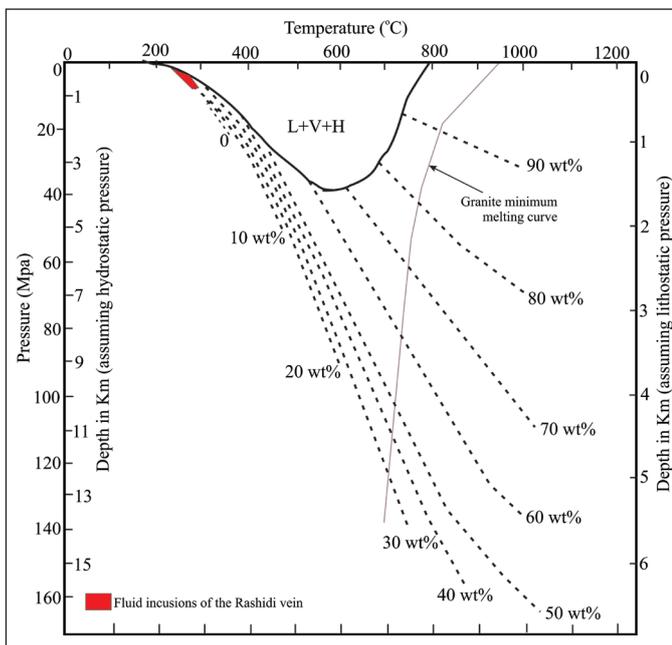
#### ۹- بحث

داده‌های ایزوتوپی اکسیژن مربوط به مرحله اول کانی سازی رگه‌ای منطقه رشیدی  $+10/96$  ‰ است که کمی بیشتر از محدوده کانسارهای گرمایی با منشأ ماگمایی است. ایزوتوپ اکسیژن در کانسارهای گرمایی با منشأ ماگمایی بین ۶ ‰ تا ۱۰ ‰ در نوسان است (Taylor, 1997). با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه هیچگونه رخداد دگرگونی صورت نگرفته است نمی‌توان منشأ سیال را مرتبط با فرایندهای دگرگونی دانست. Taylor (1974) معتقد است که محلول‌هایی که از واحدهای اسیدی گرانیتی

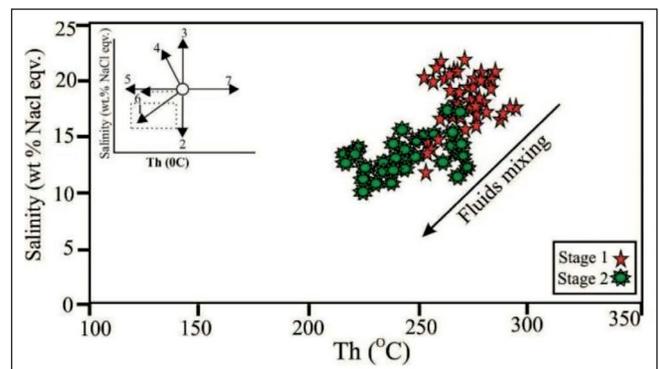
پاراژنز کانی شناسی در کانسارهای رگه‌ای، نشان دهنده تغییر از پیریت-کائولینیت-ایلینیت (دگرسانی آرژلیک) به کانی سازی اصلی همراه با کوارتز (دگرسانی سیلیسی-آرژلیک، سیلیسی-کربناته) و در نهایت رگچه‌های تأخیری کربناتی (دگرسانی کربناتی) است. تغییرات در مجموعه پاراژنز نشان دهنده تکامل سیالات گرمایی و تکامل سیال از شرایط pH اسیدی به شرایط pH قلیایی است (Simmons and Christenson, 1994; Thiersch et al., 1997)

ایزوتوپی اکسیژن در کانی‌سازی رگه‌ای حاکی از تأثیر هر دو عامل واکنش سیالات با سنگ‌های دیواره و اختلاط سیال گرمایی با آب‌های جوی است که موجب افزایش pH و نهشت سولفید به همراه آن شده است. با توجه به وجود شواهد بافتی از وجود جوشش، می‌توان آن را به عنوان یک عامل دیگر علاوه بر اختلاط در تنه‌نشست فلزات مؤثر دانست. از شواهد جوشش می‌توان به وجود بافت قشری و کلسیت تیغه‌ای در رگه اشاره کرد (Nash, 1976; Bodnar, 1995; Hedenquist, et al., 1998). در کانسارهای اپی‌ترمال، میزان طلا به شوری سیال کانه‌ساز بستگی دارند. انواع غنی از طلا با سیال با شوری کمتر و نوع فلزات پایه و نقره با سیال با شوری بالاتر همراه هستند (Seward and Barnes, 1997; Henley, 1986). بنابراین عدم حضور طلا در کانی‌سازی رگه‌ای می‌تواند به دلیل شوری بالای سیال کانه‌ساز و فقدان جوشش زیاد در محیط تشکیل باشد. طلا ممکن است از محلول جامد مس-آهن-سولفور توسط محلول‌های کانسار ساز دما پایین و تأخیری جدا شود (Kesler et al., 2002). از ویژگی‌های سیستم‌های اپی‌ترمال این است که دمای همگن شدن آنها بسیار نزدیک به دمای به دام افتادن شان است. از آنجا که فشار آنها در حین به دام افتادن بسیار پایین است و نیازی به تصحیح ندارد (Wilkinson, 2001)، در نتیجه می‌توان عمق تشکیل آن را تخمین زد که بر اساس نمودار (Fournier 1999) حدود ۷۰۰ متر است (شکل ۱۱).

تا توانایی منشأ می‌گیرند می‌توانند  $\delta^{18}\text{O}$  تا ۱۳% داشته باشند، درحالی‌که مقادیر معمول برای این محلول‌ها تا ۱۰% است. این واحدها اغلب آغشتگی با پوسته فوقانی را نشان می‌دهند (Bindeman, 2008; Auer et al., 2009). بنابراین مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  در کانی‌سازی‌های رگه‌ای، نشان دهنده منشأ ماگمایی سیالات کانه‌ساز و ماگما دارای ترکیبی گرانودیوریتی تا توانایی بوده و تا حدودی آغشتگی با پوسته داشته است. در مرحله دوم کانی‌سازی در منطقه رشیدی، مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  اندازه‌گیری شده در کوآرتز ۴/۹۴% بوده که تهی شدگی در  $\delta^{18}\text{O}$  را نشان می‌دهد. این امر می‌تواند در اثر اختلاط آب‌های جوی با سیالات گرمایی در این مرحله از کانی‌سازی باشد (e.g., Giggenbach and Stewart, 1982). لازم به ذکر است که برای تأیید منشأ و نحو شکل‌گیری کانی‌سازی در منطقه رشیدی نیاز به داده‌های ایزوتوپ پایدار بیشتری است. کاهش دما و شوری در میانبرهای سیال، با روند مخلوط شدگی دو سیال دما بالا-شوری بالا با سیال دما پایین-شوری پایین مطابقت دارد (شکل ۱۰). در سیستم‌های اپی‌ترمال با شوری نسبتاً بالا، نقره و فلزات پایه عمدتاً توسط کمپلکس‌های کلریدی (Seward and Barnes, 1997) و طلا توسط کمپلکس‌های بی‌سولفیدی حمل می‌شوند (Palyanaova, 2008; Benning and Seward, 1996). از عواملی که باعث تنه‌نشست کمپلکس‌های کلریدی می‌شود می‌توان به افزایش pH و رقیق شدگی توسط آب‌های جوی اشاره کرد. مطالعات میانبرهای سیال و



شکل ۱۱- نمودار فشار-درجه حرارت نشان دهنده رابطه فازها در سیستم  $\text{NaCl-H}_2\text{O}$  در فشارهای هیدرو استاتیک و لیتو استاتیک. L = liquid, V = vapor, H = halite. (Fournier, 1999). خط چین‌ها کانتورهای ثابت درصد وزنی  $\text{NaCl}$  محلول در شوره هستند. خط باریک خاکستری منحنی کمترین ذوب گرانیب را مشخص می‌کند. خط ضخیم مشکی مرز سه فاز، L+V+H را برای سیستم  $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$  با  $\text{Na/K}$  در محلول ثابت شده به وسیله آل بیت و K-فلدسپار در درجه حرارت‌های مشخص نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- نمودار دمای همگن شدن در مقابل شوری میانبرهای سیال در کانی‌سازی‌های رگه‌ای رشیدی. روندهای ممکن تکامل سیال در نمودار دما-شوری از Shepherd et al. (1985). روند ۱=مخلوط شدگی سیال A با سیال سردتر و شوری کمتر B، روند ۲ و ۳=مخلوط شدگی سیال A با سیالات دیگر با شوری مختلف ولی دمای یکسان، روند ۴=شوری فاز باقیمانده در اثر جوشش افزایش پیدا کرده است، روند ۵= سرد شدگی سیال، روند ۶= باریک شدگی میانبرهای سیال، روند ۷= تراوش میانبرهای سیال در طول گرمایش.

## ۱۰- نتیجه گیری

این احتمال وجود دارد که همه رگه‌ها در این محدوده مربوط به یک سیستم گرمایی واحد بوده و شناخت هر چه بیشتر این ذخایر از لحاظ نحوه تشکیل و منشأ عناصر و محلول کانه دار و ساختارهای زمین‌شناسی، گام مثبتی در جهت اکتشاف بهتر آنها خواهد بود.

## سپاسگزاری

این پروژه با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد طبق طرح پژوهشی شماره 3/22731 انجام شده است. از حمایت مالی سازمان توسعه و نوسازی معدن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) و انجام برخی از آنالیزها در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران سپاسگزاریم.

کانی‌سازی گرمایی در منطقه رشیدی مشابه با کانسارهای مس رگه‌ای در سامانه گسلی، در سنگ میزبان آتشفشانی (توف برش آندزیتی) و از کانی‌های سولفیدی اولیه کالکوسیت، تنانتیت، پیریت و اسفالریت شکل گرفته است. با توجه به داده‌های دماسنجی و ژئوشیمی ایزوتوپی، سیال کانه‌ساز منشأ ماگمایی داشته که همزمان با کاهش دما و حرکت به سمت بالا (از طریق سیستم شکستگی‌ها)، با آب‌های جوی آمیخته و منجر به شکل‌گیری کانی‌سازی شده است. در بلوک لوت به دلیل فراوانی فعالیت‌های ماگمایی در دوران تشریری کانسارهای مختلف مرتبط با ماگماتیسم در آن شکل گرفته است. محدوده شمال‌خوری از این مناطق است که رگه‌های متعدد مس رگه‌ای در سیستم گسلی شکل گرفته‌اند. با توجه به منشأ ماگمایی در کانی‌سازی منطقه رشیدی،

## کتابنگاری

آفانباتی، س.ع.، ۱۳۸۳- زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.  
 لطفی، م.، ۱۳۷۴- نقشه زمین‌شناسی سارخنج، مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

## References

- Arjmandzadeh, R. and Santos, J. F., 2014- Sr-Nd isotope geochemistry and tectonomagmatic setting of the Dehsalm Cu-Mo porphyry mineralizing intrusives from Lut Block, eastern Iran. *International Journal of Earth Sciences*, 103 (1): 123-140.
- Auer, S., Bindeman, I., Wallace, P., Ponomareva, V. and Portnyagin, M., 2009- The origin of hydrous, high- $\delta^{18}O$  voluminous volcanism: Diverse oxygen isotope values and high magmatic water contents within the volcanic record of Klyuchevskoy volcano, Kamchatka, Russia, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157 (2): 209-230.
- Bazin, D. and Hubner, H., 1969- Copper Deposits in Iran, Geological survey of Iran, Tehran, 232 pp.
- Benning, L. G. and Seward, T. M., 1996- Hydrosulphide complexing of Au (I) in hydrothermal solutions from 150-400 C and 500-1500 bar, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60 (11): 1849-1871.
- Bindeman, I., 2008- Oxygen isotopes in mantle and crustal magmas as revealed by single crystal analysis, *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 69 (1): 445-478.
- Bodnar, R. J., 1993- Revised equation and table for determining the freezing point depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solutions, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57 (3): 683-684.
- Bodnar, R. J., 1995- Fluid inclusion evidence for a magmatic source for metals in porphyry copper deposits. In: J.F.H. Thompson (Editor), *Mineralogical Association of Canada Short Course Volume 23, Magmas, Fluids and Ore Deposits*, 139-152.
- Brown, P. E. and Lamb, W. M., 1989- P-V-T properties of fluids in the system H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl: New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53 (6): 1209-1221.
- Camp, V. E. and Griffis, R. J., 1982- Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran, *Lithos*, 15 (3): 221-239.
- Davis, D. W., Lowenstein, T. K. and Spencer, R. J., 1990- Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in systems NaCl-H<sub>2</sub>O, NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O, NaCl-MgCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O and NaCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54 (3): 591-601.
- Fournier, R. O., 1999- Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment, *Economic Geology*, 94 (8): 1193-1212.
- Giggenbach, W. F. and Stewart, M. K., 1982- Processes controlling the isotopic composition of steam and water discharges from steam vents and steam-heated pools in geothermal areas, *Geothermics*, 11 (2): 71-80.
- Gokce, A., 2000- Ore deposits, Cumhuriyet University Publication 100: 1-336.
- Goldstein, R. H., 2003- Petrographic Analysis of Fluid Inclusions. In I. Samson, A. Anderson, D. Marshall (Editors), *Fluid inclusions: Analysis and interpretation*, Mineralogical Association of Canada, Short Course Handbook, 32: 9-53.
- Hedenquist, J. W., Arribas, A. and Reynolds T. J., 1998- Evolution of an intrusion centered hydrothermal system: Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines, *Economic Geology*, 93 (4): 373-404.
- Henley, R. W., 1986- Primary controls on epithermal mineralization in the Taupo volcanic zone: International volcanological congress, proceeding of symposium 5: volcanism, hydrothermal systems and related mineralization, 99 pp.

- Karimpour, M. H., 2005- Comparison of Qaleh Zari Cu–Au–Ag deposit with other iron oxides Cu–Au (IOCG-Type) deposits & newclassification. *Iran. J. Crystallography and Mineralogy*, 13: 165–184.
- Kesler, S. E., Chryssoulis, S. L. and Simon, G., 2002- Gold in porphyry copper deposits: its abundance and fate, *Ore Geology Reviews* 21: 103-124.
- Lotfi, M., 1982- Geological and geochemical investigations on the volcanogenic Cu, Pb, Zn, Sb ore-mineralization in the Shurab-Gale Chah and northwest of Khur (Lut, east of Iran), Unpublished Ph.D thesis, der Naturwissenschaften der Universitat Hamburg.
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M. H. and Stern, C. R., 2015- The Khopik porphyry copper–gold prospect, Lut Block, Eastern Iran: geology, alteration, mineralization, fluid inclusion, and oxygen isotope studies. *Ore Geology Review*, 65 (2): 522-544.
- Nash, J. T., 1976- Fluid inclusion petrology, data from porphyry copper deposits and applications to exploration, United States Geological Survey, Professional Paper, 907-D: 1-16.
- Palyanaova, G., 2008- Physicochemistry modeling of the coupled behavior of gold and silver in hydrothermal processes, gold fineness, Au/Ag ratios and their possible implications, *Chemical Geology*, 255 (3): 399-413.
- Prokofiev, V. Y., Garofalo, P. S., Bortnikov, N. S., Kovalenker, V. A., Zorina, L. D., Grichuk, D. V. and Selektor, S. L., 2010- Fluid inclusion constraints on the genesis of gold in the Darasun district (eastern Transbaikalia), Russia, *Economic Geology*, 105 (2): 395–416.
- Richards, J. P., Spell, T., Rameh, E., Raziq, A. and Fletcher, T., 2012- High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu ± Mo ± Au potential: examples from the Tethyan arcs of Central and Eastern Iran and Western Pakistan. *Economic Geology*, 107: 295-332.
- Ridley, J., 2013- *Ore Deposit Geology*, New York, NY, Cambridge University Press.
- Roedder, E., 1984- Fluid inclusions, *Reviews in Mineralogy*, 12: 644 pp.
- Seward, T. M. and Barnes, H. L., 1997- Metal transport by hydrothermal ore fluids, *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 3: 435-486.
- Shepherd, T., Rankin, A. H. and Alderton, D. H. M., 1985- A practical guide to fluid inclusion studies, Blackie, Glasgow, 239 pp.
- Simmons, S. F. and Christenson, B. W., 1994- Origins of calcite in a boiling geothermal system, *American Journal of Science*, 294 (3): 361-400.
- Taylor, H. P., 1974- The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition, *Economic Geology*, 69 (6): 843-883.
- Taylor, H. P., 1997- Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits, In: H.L. Barnes (Editor), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*: New York, John Wiley and Sons, 229-302.
- Thiersch, P. C., Williams-Jones, A. E. and Clark, J. R., 1997- Epithermal mineralization and ore controls of the Shasta Au–Ag deposit, Toodogone District, British Columbia, *Mineralium Deposita*, 32 (1): 44-57.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W., 2010- Abbreviations for names of rock-forming minerals, *American Mineralogist*, 95 (1): 185-187.
- Wilkinson, J. J., 2001- Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits, Elsevier, *Lithos*, 55 (1): 229-272.
- Zhang, L. G., Liu, J. X., Zhou, H. B. and Chen, Z. S., 1989- Oxygen isotope fractionation in the quartz-water-salt system, *Economic Geology*, 84 (6): 1643-1650.

# Rashidi copper vein deposit, North Khur, Eastern Iran: hydrothermal alteration, mineralization, geochemistry, fluid inclusion and stable isotope investigations

M. Javidi Moghaddam<sup>1</sup>, M. H. Karimpour<sup>2\*</sup> and A. Malekzadeh Shafaroudi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>P.h.D., Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>2</sup>Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>3</sup>Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received: 2018 April 28

Accepted: 2019 April 29

## Abstract

The Rashidi area, which comprises a part of the north Khur in eastern Iran is located at 120 km northwest of Birjand city. Preliminary prospecting in the area using the image processing of ASTER data by Spectral Angle Mapper (SAM) algorithm resulted in the identification of propylitic and argillic alteration zones together with iron oxy-hydroxide minerals. The area consist of outcrops of Eocene pyroclastic rocks ranging from andesitic to rhyolitic in composition, intruded by diorite porphyry dikes. Vein mineralization in the area was mainly occurred along a fracture system hosted by andesitic tuff breccia unit. Vein copper mineralization was formed during two stages including the: (1) quartz-pyrite-chalcocite-tennantite assemblage, and (2) quartz-chalcocite-pyrite-sphalerite assemblage. Based on fluid inclusion studies on primary fluid inclusions within quartz minerals of stage 1 and 2 represented by homogenization temperatures varies between 251 and 293°C and from 214 to 270°C, salinities between 14.4 and 23 and from 12 to 14.2 wt.% NaCl respectively. The values of  $\delta^{18}\text{O}$  for quartz in the first and second stages of vein mineralization was 19.26 and 14.94 and the amount of  $\delta^{18}\text{O}$  water in equilibrium with quartz was 10.96 and 4.94 respectively that shows a magmatic origin and mixing with meteoric water in the second stage. Based on geology, vein geometry, fluid inclusion, and stable isotope geochemistry, the Rashidi Cu deposit can be classified as vein-type copper deposits, which has been formed along fault zones.

**Keywords:** Mineralization, Fluid inclusion, Stable isotope, Rashidi, North Khur.

.For Persian Version see pages 265 to 276

\*Corresponding author: M. H. Karimpour; Email: karimpur@um.ac.ir