

مس رگه‌ای جنوب باختری سرخ‌کوه، بلوک لوت، خاور ایران: مطالعات کانی‌سازی، میانبارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن

احمد حسینیانی^۱، محمدحسن کریم‌پور^۲ و آناهیتا ملک‌زاده شفاوردی^۲

^۱دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۲۵

چکیده

منطقه اکتشافی جنوب باختری سرخ‌کوه بخشی از کمربند آتشفشانی- نفوذی در باختر بلوک لوت، جنوب باختری شهر بیرجند است. زمین‌شناسی منطقه متشکل از سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیت و بازالت بوده که نفوذ توده‌های نفوذی در مراحل زمانی متفاوت با ترکیب هورنلنددیوریت، هورنلندمیکرودیوریت، هورنلنددیوریت پورفیری، هورنلند کوآرتز دیوریت پورفیری و بیوتیت کوآرتز مونزونیت در آنها موجب دگرسانی گسترده و کانی‌سازی شده است. در بخش‌های شمال باختری منطقه کانی‌سازی رگه‌ای با امتداد شمال باختری- جنوب خاوری در سنگ میزبان هورنلند دیوریت پورفیری دیده می‌شود، که کانی‌سازی اصلی آن شامل کوآرتز، کالکوپیریت، پیریت و کانی‌های ثانویه آهن و مس است. این رگه، جوان‌ترین رخداد کانی‌سازی مرتبط با توده‌های نفوذی در بلوک لوت است (سن پس از میوسن). در مطالعه میانبارهای سیال اولیه در بلورهای کوآرتز همزمان با کانی‌سازی، سه نوع میانبار سیال دو فاز با چگالی مختلف شناسایی شد که دو نوع فراوان غنی از مایع دمای یکتواختی ۲۷۰ و ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهند. بر پایه ذوب آخرین قطعه یخ سیال نیز متوسط شوری این دو نوع میانبار سیال به ترتیب ۱۲ تا ۱۵ و ۱۶ تا ۱۹ درصد وزنی نمک طعام است. میانبارهای همگن شده به گاز، دمای یکتواختی و شوری کمی بیشتری دارند. با توجه به میزان دمای یکتواخت‌شدگی و شوری میانبارهای سیال و همچنین محاسبه چگالی و فشار این میانبارها، ژرفای حدود ۷۰۰ متر برای کانی‌سازی پیشنهاد می‌شود که معادل سطح فرسایش کنونی است. مطالعات ایزوتوپ‌های اکسیژن کوآرتز در رگه‌های کانی‌سازی نشان می‌دهد که مقادیر $\delta^{18}O$ کوآرتز میان ۸/۶۶ تا ۱۳/۰۹ در هزار و $\delta^{18}O$ سیال گرمایی در تعادل با کوآرتز بر پایه دما میان ۳/۰۶ تا ۷/۵۹ در هزار بوده که در محدوده آب‌های ماگمایی است. به‌طور کلی مطالعات میانبارهای سیال و ایزوتوپی نشانه همخوانی کانی‌سازی رگه‌ای جنوب باختری سرخ‌کوه با کانی‌سازی اپی‌ترمال است که با ماگمازایی توده نفوذی دیوریت در منطقه مرتبط است. محلول‌های ماگمایی منشأ یافته از توده دیوریتی در اثر تغییر در شرایط فیزیکوشیمیایی محلول و همچنین رخداد پدیده جوشش سبب نهشته شدن کانی‌ها در گسل به‌صورت رگه شده‌اند.

کلیدواژه‌ها: ایزوتوپ اکسیژن، میانبار سیال، کانی‌سازی رگه‌ای، جنوب باختری سرخ‌کوه، بلوک لوت.

نویسنده مسئول: محمدحسن کریم‌پور

E-mail: karimpur@um.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

محدوده اکتشافی جنوب باختری سرخ‌کوه در استان خراسان جنوبی، ۱۲۰ کیلومتری جنوب باختری شهر بیرجند، جنوب شهر خور و نزدیک به مرز سه استان خراسان جنوبی، یزد و کرمان قرار گرفته که مختصات محدوده ۱۲° ۳۲' تا ۱۴° ۳۲' شمالی و ۲۰° ۵۸' تا ۲۳° ۵۸' خاوری است.

از دید زمین‌شناسی منطقه جنوب باختری سرخ‌کوه در بخش باختری بلوک لوت جای گرفته است. بلوک لوت بخشی از خرد قاره ایران مرکزی است که میان گسل‌های نهندان (در خاور)، ناپند (در باختر)، درونه و کلرد (در شمال) و فرونشست جازموریان (در جنوب) قرار دارد (آقائباتی، ۱۳۸۳). زمین‌شناسی بلوک لوت به دلیل دور از دسترس بودن مورد ابهامات بسیاری است. در این بخش از ایران افزون بر شیل‌ها و سنگ‌های کربناتی موزوئیک، حجم سترگی از سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی‌های سنزوییک نیز دیده می‌شود.

توده‌های نفوذی سنزوییک بلوک لوت سبب تشکیل کانسارهای مختلف در مناطق مختلف شده است؛ که از جمله می‌توان به مناطق کانی‌سازی‌های پورفیری و اپی‌ترمال ماهرآباد (ملک‌زاده شفاوردی و کریم‌پور، ۱۳۹۰)، خوییک (Malekzadeh Shafaroudi et al., 2015)، خونیک (Samiee et al., 2016)، شوراب (Lotfi, 1982)، کوه‌شاه (Abdi and Karimpour, 2013)، چاه‌شلجمی (Arjmandzadeh et al., 2011)، بیسه (Nakhaei et al., 2015)، طاهرآباد (Nejafi et al., 2014)، قلعه‌زری (Karimpour, 2005) و غیره اشاره کرد. این فعالیت‌ها به پدیده‌هایی مانند فرورانش (Tirul et al., 1983; Camp and Griffis, 1982)، شرایط کشتی (Jung et al., 1983) و حتی فرورانش دوسویه (Arjmandzadeh et al., 2011) نسبت داده شده‌اند، که دامنه سنی ژوراسیک تا کواترنری را می‌توان برای آنها در نظر

گرفت (Karimpour et al., 2011). همچنین نتایج سن‌سنجی روی توده‌های نفوذی مختلف در بلوک لوت، پنجره زمانی ۴۲ تا ۳۳ میلیون سال پیش (اتوسن الیگوسن) را برای تشکیل این توده‌ها نشان می‌دهد (کریم‌پور و همکاران، ۱۳۹۱).

منطقه جنوب باختری سرخ‌کوه نیز یکی از مناطق دارای کانی‌سازی مرتبط با توده‌های نفوذی بلوک لوت است، که در آن کانی‌سازی و دگرسانی سنگ میزبان دیده می‌شود. در بخش‌های شمال باختری منطقه، کانی‌سازی رگه‌ای مس سنگ میزبان دیوریت را قطع کرده است که مطالعات میانبارهای سیال و همچنین ایزوتوپ‌های پایدار روی آن انجام شد. مطالعه میانبارهای سیال یکی از مهم‌ترین مطالعات برای شناسایی مراحل تشکیل کانی‌سازی است (Roedder, 1984). همچنین مطالعات ایزوتوپ‌های پایدار نیز برای تعیین ژنز و منشأ سیال کانه‌زا بسیار مفید است؛ بنابراین در این مطالعه با تأکید بر کانی‌سازی، به بررسی میانبارهای سیال و همچنین بررسی ایزوتوپ پایدار اکسیژن و در پایان منشأ کانی‌سازی در این بخش از بلوک لوت پرداخته شده است.

تاریخچه مطالعات انجام شده در منطقه جنوب باختری سرخ‌کوه، با توجه به فرارگیری محدوده در بخش باختری بلوک لوت و دور از دسترس بودن آن، ابهامات زیادی دارد که شامل نقشه‌های تهیه شده در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ ناپندان (Kluyver et al., 1981)، نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ جنوب سه‌چنگی (Blurian, 2004) و گزارش (Tarkian et al., 1983) است؛ به‌طور کلی مطالعات انجام شده روی این منطقه کم است.

۲- زمین‌شناسی منطقه جنوب باختری سرخ‌کوه

محدوده جنوب باختری سرخ‌کوه در بخش شمالی بر گره ۱:۱۰۰۰۰۰ جنوب سه‌چنگی (Blurian, 2004) جای گرفته است که بر پایه نقشه زمین‌شناسی جنوب سه‌چنگی سه واحد

– **کالکوپریت:** مقادیر باقیمانده کانی کالکوپریت در حدود ۱ درصد سطح مقطع است، ولی با در نظر گرفتن بخش‌های اکسید شده این کانی، که به اکسیدهای آهن ثانویه تبدیل شده است، فراوانی کالکوپریت به بیش از ۵ درصد نیز می‌رسد. کالکوپریت به صورت رگچه‌های سبز و به صورت هم‌رشدی با کوارتز دیده می‌شود. این کانی در نواحی شکستگی و همچنین از حاشیه به مقدار زیاد به گوئیت و اکسیدهای آهن ثانویه تبدیل شده است. تبدیل شدگی کالکوپریت به کالکوسیت و کولیت همچنین به صورت پراکنده دیده شد (شکل ۳ ب).

– **پیویت:** پیریت در بخش کانی‌سازی رگه‌ای فراوانی کمتر از ۱ درصد دارد و بیشتر به شکل رگچه‌ای جابگیرین شده است. این کانی بیشتر به اکسیدهای آهن ثانویه تبدیل شده و تنها گاهی آثار از آن باقی مانده است. هم‌رشدی این کانی با بلورهای کوارتز نشانه تشکیل هم‌زمان این کانی با کوارتز و کالکوپریت است.

– **کانی‌های ثانویه مس:** شامل کالکوسیت، کولیت، مالاکیت و آزوریت هستند. این کانی‌ها از اکسیدشدگی کانی‌های سولفیدی اولیه مانند کالکوپریت حاصل شده‌اند. کالکوسیت و کولیت فراوانی کمتر از ۰/۵ درصد دارند و تنها به همراه رگچه‌های کالکوپریت اکسید شده دیده می‌شوند (شکل ۳ ب). کانی آزوریت نیز فراوانی چندانی ندارد و این در صورتی است که مالاکیت حدود ۴ تا ۵ درصد سطح رگه کانی‌سازی را تشکیل داده است و به رنگ سبز در ترانشه حفر شده در رگه به فراوانی به چشم می‌خورد (شکل ۲). در مقیاس میکروسکوپی مالاکیت به صورت توده‌ای و همچنین رگچه‌ای جابگیرین شده است (شکل ۳ ج).

– **اکسیدهای آهن ثانویه:** اکسیدهای آهن ثانویه حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد کانی‌سازی رگه‌ای را تشکیل می‌دهند که بیشتر از اکسیدشدگی کانی‌های سولفیدی اولیه تشکیل شده‌اند. کانی‌های اصلی آنها شامل هماتیت و گوئیت است که به صورت رگچه‌ای، بافت کلوform و بافت شبکه‌ای جابگیرین شده‌اند (شکل ۳ د)، که به همراه آنها اکسیدهای منگنز و همچنین ود مس (copper wad) نیز دیده می‌شود. در جدول ۱ روابط پاراژنزی کانه‌ها در مس رگه‌ای جنوب باختری سرخ‌کوه ارائه شده است.

۴- مطالعات میان‌بارهای سیال

در مطالعات میان‌بارهای سیال کانی کوارتز به دلیل شفافیت، فراوانی و نبود رخ کانی مناسبی است (Walshe and Hobbs, 1999). بر این اساس در منطقه جنوب باختری سرخ‌کوه ۱۲ مقطع دوربرصقل از محل کانی‌سازی تهیه شد (جدول ۲)، که مطالعات میان‌بارهای سیال اولیه روی کانی کوارتز انجام گرفت که هم‌زمان با کانی‌های سولفیدی تشکیل شده است. میان‌بارهای سیال اولیه با ویژگی‌هایی مانند موازی بودن با سطوح بلوری و همچنین به صورت پراکنده در متن کانی میزبان (کوارتز) شناسایی شد.

۴-۱. سنگ‌نگاری میان‌بارهای سیال

اندازه میان‌بارهای سیال در منطقه جنوب باختری سرخ‌کوه میان ۵ تا ۲۰ میکرون متفاوت است و بیشتر آنها اندازه‌ای در حدود ۱۰ تا ۱۲ میکرون دارند. اندازه بزرگ میان‌بار سیال در برخی از نمونه‌های مورد مطالعه یکی از نشانه‌های جوشش در منطقه است.

بر پایه تقسیم‌بندی (Shepherd et al., 1985) میان‌بارهای سیال در منطقه شامل انواع زیر هستند:

– **میان‌بارهای تک‌فازی (Ia) (نوع I):** این میان‌بارها عموماً در پهنه‌های رشد بلورهای کوارتز تشکیل می‌شوند (Graupner et al., 2000) و حضور آنها نشانه رخداد پس از به دام افتادن سیال است. اگرچه شمار این میان‌بارها زیاد بوده ولی برای مطالعه مناسب نیستند.

– **دوفازی فنی از مایع (I+V) (نوع IIa):** بیشتر میان‌بارهای سیال از این نوع هستند و بیشتر مطالعات روی این میان‌بارها انجام شد. این نوع میان‌بارها شامل دو گروه مختلف هستند؛ میان‌بارهای نوع IIa1 که بیشتر کروی شکل هستند و حجم فاز بخار حدود ۳۰ درصد است (شکل‌های ۴ الف و ب). این گروه میان‌بارهای سیال چگالی متوسط دارند. گروه دوم میان‌بارهای نوع IIa2 که شکل بی‌نظم، کشیده و گاه کروی دارند

لایت‌اندزیت کوارتزلایت کربستالتوف، هورنلند‌اندزیت پروکسن‌اندزیت با سن ائوسن و دوبریت پورفیری (با سن جوان‌تر از ائوسن) سنگ‌های اصلی منطقه را تشکیل می‌دهند. در مطالعات میکروسکوپی مقاطع نازک، سنگ‌های آذرین بر پایه ترکیب سنگ‌شناسی، بافت و حضور کانی‌های مایفیک قابل تقسیم به دو دسته سنگ‌های بیرونی و سنگ‌های نیمه‌ژرف درونی هستند. سنگ‌های بیرونی شامل بازالت، اندزیت بازالتی (Basaltic Andesite)، اندزیت، هورنلند‌اندزیت، هورنلند‌تراکی‌اندزیت، کوارتز‌تراکی‌اندزیت، کوارتز‌اندزیت پورفیری و کربستالتوف و سنگ‌های نیمه‌ژرف درونی شامل هورنلند‌دوبریت، هورنلند‌دوبریت پورفیری، هورنلند‌کوارتز‌دوبریت پورفیری، هورنلند‌میکرودوبریت و بیوتیت کوارتز‌مونزونیت هستند. سنگ‌های آتشفشانی دارای گسترش کمی بوده و بیشتر محدود به بخش‌های خاوری و جنوبی منطقه بوده که برخی از واحدهای آن در نقشه در مقیاس ۱:۱۰۰۰ منطقه حضور ندارند (شکل ۱).

در منطقه جنوب باختری سرخ‌کوه سنگ‌های نیمه‌ژرف و درونی به درون واحدهای آتشفشانی نفوذ کرده و موجب دگرسانی (کوارتز سربست پیریت (QSP)، آرژیلیک، پروپیلیتیک، کربناتی و سیلیسی) و کانی‌سازی (پراکنده‌دانه، رگه‌ای و رگچه‌ای) در آن شده‌اند. توده نفوذی با ترکیب بیوتیت کوارتز‌مونزونیت عامل دگرسانی QSP و آرژیلیک و گاه سیلیسی در منطقه بوده و احتمالاً مرتبط با کانی‌سازی مس پورفیری است (حسین‌خانی و همکاران، ۱۳۹۴). این توده نفوذی در بخش‌های مرکزی محدوده گسترش قابل توجهی دارد. توده‌های هورنلند‌دوبریت، هورنلند‌دوبریت پورفیری، هورنلند‌کوارتز‌دوبریت پورفیری، هورنلند‌میکرودوبریت به صورت تپه‌ماهرهای کوچک به درون بیوتیت کوارتز‌مونزونیت نفوذ کرده‌اند و در بیشتر موارد دگرسانی کربناتی و پروپیلیتیک این توده‌ها را همراهی می‌کند. کانی‌سازی رگه‌ای نیز تنها توده‌های دوبریتی و دگرسانی‌های مرتبط با این توده‌ها را قطع کرده است. با توجه به اینکه رگه‌های اپی‌ترمال مرتبط با ذخایر پورفیری به فراوانی در پیرامون ذخایر پورفیری تشکیل می‌شوند، این پدیده در روابط سنی نسبی میان واحدهای مختلف در منطقه بررسی و در مراحل بعد با نتایج آزمایشگاهی بررسی شد. روابط سنی نسبی میان توده‌های نفوذی و رگه کانی‌سازی نشان می‌دهد که سنگ‌های آتشفشانی قدیمی‌ترین واحدهای منطقه را تشکیل می‌دهند که سپس توده نفوذی بیوتیت کوارتز‌مونزونیت در آن نفوذ کرده است. توده‌های نیمه‌ژرف با ترکیب چیره دوبریتی آخرین فاز فعالیت ماگمایی در منطقه (با سن میوسن زیرین، روش تعیین سن زیرکن) هستند که توده بیوتیت کوارتز‌مونزونیت را قطع و به درون آن نفوذ کرده‌اند. کانی‌سازی رگه‌ای نیز در منطقه توده‌های نفوذی دوبریتی را قطع کرده است، بنابراین نسبت به این توده‌های نفوذی دوبریتی جوان‌تر است. با توجه به پنجمه زمانی کانی‌سازی‌های مرتبط با توده‌های نفوذی در بلوک لوت (ائوسن الیگوسن) (کریم‌پور و همکاران، ۱۳۹۱)، رگه کانی‌سازی منطقه مورد مطالعه جوان‌ترین رخداد کانی‌سازی مرتبط با توده‌های نفوذی در بلوک لوت است.

۳- کانی‌سازی

مس رگه‌ای جنوب باختری سرخ‌کوه با طول بیش از ۲۰۰ متر و ستبرای حدود ۲ متر در سنگ میزبان هورنلند‌دوبریت پورفیری رخنمون دارد (شکل ۲). روند این رگه شمال باختری جنوب خاوری بوده و شیب آن قابل تشخیص نیست. دگرسانی پیرامون رگه کربناتی و پروپیلیتیک است. دگرسانی QSP نیز گاهی در حاشیه به صورت همپوشانی با دگرسانی کربناتی پروپیلیتیک تشکیل شده است. مطالعات کانه‌نگاری روی مقاطع صیقلی تهیه شده نشان دهنده نتایج زیر است:

– **کوارتز:** با فراوانی بیش از ۲۰ درصد به همراه کانی‌های اکسیدی و سولفیدی مس آهن، کانی‌های اصلی رگه را تشکیل می‌دهند. کوارتز به همراه کانی‌سازی به صورت بلورهای درشت ۲ تا ۳ میلی‌متری دیده می‌شود. هم‌رشدی کوارتز با کانی‌های سولفیدی اولیه نشانه تشکیل هم‌زمان کانی‌های سولفیدی به همراه محلول‌های سیلیسی دار بوده است. کوارتز در بخش کانی‌سازی رگه‌ای بیشتر هم‌بند است و بافتی مشابه بافت گرانولار دارد (شکل ۳ الف).

نوع IIa2 شوری ۱۶ تا ۱۹ و میانبراهای نوع IIa1 شوری ۱۲ تا ۱۵ درصد وزنی نمک طعام دارند. در همه میانبراهای سیال، به دلیل اینکه مقدار شوری کمتر از ۲۶ درصد وزنی نمک طعام است، کانی‌هالیت تشکیل نشده است. میزان Te (دمای نقطه یوتکتیک میانبراهای سیال) نیز در همه میانبراهای سیال اندازه‌گیری شده میان ۴۱ تا ۴۵ است.

در میانبراهای سیال مطالعه شده در منطقه اکتشافی جنوب باختری سرخ‌کوه دمای همگن‌شدگی در برابر شوری در شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشخص است روند نمونه‌های مطالعه شده دارای یک محدوده کاملاً مشخص است و در این نمودار با خطوط کنتوری با چگالی یکسان می‌توان مقدار چگالی سیال را نیز تعیین کرد (Bodnar, 1983)، که بر پایه آن چگالی میانبراهای سیال در محدوده ۰/۸ تا ۰/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب قرار می‌گیرد (شکل ۶). با توجه چگالی به دست آمده و اعمال آن در نمودار چگالی سیال در برابر دمای همگن‌شدگی و همچنین میزان شوری، می‌توان میزان فشار را نیز به دست آورد، که با توجه به چگالی به دست آمده و همچنین میانگین دمای همگن‌شدگی ۲۹۰ درجه سانتی‌گراد محدوده فشار ۵۰ تا ۸۰ بار به دست می‌آید (۰/۵ تا ۰/۸ مگاپاسکال) (شکل ۷). با توجه به فشار به دست آمده از نمودارهای یاد شده نیز ژرفای کانی‌سازی و در نتیجه سطح فرسایش برآورد می‌شود. بر پایه ژرفای به دست آمده، بر پایه فشار سیال کانه‌ساز در برابر دمای کانی‌سازی (دمای همگن‌شدگی)، ژرفای ۸۰۰ تا ۹۰۰ متر (بر پایه فشار هیدروستاتیک) و ژرفای ۴۰۰ تا ۵۰۰ متر (بر پایه فشار لیتوستاتیک) برای منطقه اکتشافی جنوب باختری سرخ‌کوه به دست می‌آید (شکل ۸). بنابراین کانی‌سازی در زمان حال در سطح فرسایشی حدود ۷۰۰ متر (میانگین دو فشار به دست آمده) قرار دارد.

با مطالعات میانبراهای سیال در کانی‌سازی رگه‌ای جنوب باختری سرخ‌کوه به این نکته می‌توان دست یافت که تغییر شرایط فیزیکوشیمیایی حاکم بر محلول مانند تغییرات pH به همراه جوشش احتمالاً سبب تنه‌شد کوارتز و سولفیدها شده است. با توجه به بررسی‌های کانه‌نگاری و حضور کانی‌های کوارتز، پیریت و کالکوپریت به صورت رگه‌ای و همچنین نتایج تجزیه‌های ژئوشیمیایی پیشین که طلا تا ۰/۴ ppm مس تا ۳٪، سرب (۰/۳ درصد) و روی (۰/۵ درصد) اندازه‌گیری شده است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۴)، چنین دریافت می‌شود که کانی‌سازی می‌تواند در ارتباط با محلول‌های ماگمایی در رگه تشکیل شده باشد. در این رگه‌ها طلا ممکن است از محلول جامد مس آهن سولفور توسط محلول‌های کانسار ساز دما پایین و تأخیری جدا شود (Kesler et al., 2002). همچنین با توجه به بررسی میانبراهای سیال روی نمودار شوری در برابر دمای همگن‌شدگی (Wilkinson, 2001)، کانی‌سازی رگه‌ای محدوده جنوب باختری سرخ‌کوه با کانسارهای اپی‌ترمال همخوانی دارد (شکل ۹). گفتنی است که این رگه تفاوت‌هایی نیز با کانسارهای اپی‌ترمال دارد، که از جمله آن سنگ میزبان در کانسارهای اپی‌ترمال سنگ‌های آتشفشانی است و در رگه دارای کانی‌سازی در منطقه جنوب باختری سرخ‌کوه سنگ‌های آتشفشانی با فاصله کمی بیشتر از رگه قرار دارند (شکل ۱). همچنین دگرسانی سنگ میزبان رگه نیز پروپیلینیک و کربناتی است که با دگرسانی‌های معمول در پیرامون رگه‌های اپی‌ترمال سولفیداسیون بالا و پایین مشابه نیست. دمای کانی‌سازی نیز بیشتر در محدوده کانسارهای اپی‌ترمال و در برخی از میانبراهای سیال کمی بیشتر است.

۵- ایزوتوپ‌های اکسیژن

مطالعه ایزوتوپ‌های پایدار یکی از بخش‌های مهم مطالعه ذخایر معدنی را تشکیل می‌دهد. تعیین نسبت‌های ایزوتوپی در رابطه با منشأ سیال‌های کانه‌ساز، دمای تشکیل کانه و شرایط فیزیکوشیمیایی نهشته شدن کانسار بسیار مهم است (Hoefs, 2004; Sharp, 2006).

ترکیب ایزوتوپی آب مرتبط با تشکیل کانسارهای گرمابی و دگرسانی سنگ دیواره وابسته به آن را به دو صورت مختلف می‌توان ارزیابی کرد: (۱) اندازه‌گیری

و حجم فاز بخار حدود ۴۰ تا ۴۵ درصد حجم سیال است. چگالی این میانبراهای به نسبت کم است.

– **دوفازی غنی از گاز (V+L) (نوع IIb):** مقدار حجم فاز مایع حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد حجم میانبر سیال است. این میانبرها فراوانی بسیار کم و شکلی به نسبت کروی دارند. چگالی این میانبرها به دلیل حجم بودن فاز بخار (حدود ۸۰ درصد) کم است. مطالعات دماسنجی میانبراهای سیال بیشتر روی میانبراهای نوع IIa1 و IIa2 انجام شد. همچنین به تعداد جزئی میانبراهای نوع IIb نیز بررسی شدند. در هنگام مطالعه میانبرها از آنها عکس‌برداری شد که پدیده‌هایی مانند گردن‌دار شدن (Necking down) (شکل ۴ ث) و همچنین حرکت براونی فاز بخار در آنها دید شد. میانبرهای سیال از دید نوع سیال نیز شامل میانبرهای سیال اولیه و ثانویه هستند که میانبرهای سیال ثانویه به صورت خطی و ریز هستند (شکل ۴ ج) و برای مطالعات دماسنجی مناسب نیستند.

۴-۲. مطالعات ریز دماسنجی

مطالعات دماسنجی میانبرهای سیال در مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران و توسط میکروسکوپ پلاریزان مدل Zeiss و مجهز به Stage با مدل THMS60 (تحمل دمایی ۱۹۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد)، LNP (کنترل گرما برای سرمایش) و TP94 (کنترل گرما برای گرمایش) با مدل Linkam انجام شده است. در مرحله گرمایش میانبر سیال تا زمان همگن‌شدگی به یک فاز اصلی گرما داده شد و در لحظه همگن‌شدگی به یک فاز، دما که همان دمای Th است پادداشت شد. این دما با اعمال تصحیحات فشار، دمای تشکیل کانی کوارتز بوده که به همراه کانی‌های سولفیدی در رگه کانی‌سازی تشکیل شده است. در منطقه جنوب باختری سرخ‌کوه به دلیل شواهد جوشش تصحیحات فشار انجام نشد. از جمله شواهد جوشش وجود میانبرهای سیال بزرگ و همچنین میانبر سیال با دو فاز مایع و گاز است که در یکی فاز مایع چیره بوده و در دیگری فاز گاز با چگالی متفاوت، از دیگر نشانه‌های جوشش است. تقریباً بیشتر میانبرها در منطقه به فاز مایع همگن شدند؛ اگرچه میانبرهای نوع IIb به فاز گاز همگن شدند. مطالعات دماسنجی نشان می‌دهد میانگین دمای همگن‌شدگی همه میانبرهای سیال در منطقه دمای ۲۹۱ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۵ الف). در بررسی دمای یکنواختی دستجات مختلف میانبرهای سیال ۲ گروه دمای مختلف را می‌توان از یکدیگر جدا کرد. دماهای حدود ۴۰۰ درجه در میانبرهایی که به فاز گاز همگن شدند (نوع IIb)، اندازه‌گیری شد. در نمونه‌هایی که به فاز مایع همگن شدند، میانبرهای نوع IIa2 میانگین دمای همگن‌شدگی در حدود ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد دارند که مرتبط با کانی‌سازی کوارتز کالکوپریت است. میانگین دمای همگن‌شدگی در میانبرهای نوع IIa1 نیز حدود ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد است. در این میانبرهای سیال کمترین دمای همگن‌شدگی مربوط به کوارتز در پاراژن با همایت با دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد است. بنابراین در نمودار دمای همگن‌شدگی میانبرهای سیال، دو محدوده دمایی چیره ۲۷۰ و ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد دیده می‌شود. نوع دگرسانی نیز تا حدی با محدوده‌های مختلف دمایی ارتباط دارد و در بخش‌های با دمای پایین‌تر دگرسانی کربناتی چیره است. در کانسارهای رگه‌ای میانبرهای سیال با دمای ۱۷۰ درجه با نمک‌گونگی پایین تا متوسط معمولاً مرتبط با نواحی حاشیه‌ای رگه هستند که در این حوضه محلول‌های جوی با محلول‌های ماگمایی کمی آمیختگی دارند (Takenouchi, 1980).

در آزمایش انجماد، میانبر سیال تا مرحله‌ای که فاز مایع آن به فاز جامد تبدیل شود، سرد شد. پس از سرد کردن، نمونه دوباره گرم شده تا جایی که آخرین بلور یخ ذوب شود (Twice). از دمای ذوب آخرین قطعه یخ برای بررسی شوری در نمونه‌ها استفاده شد که میان دمای ۹/۵ تا ۱۴/۵ متغیر است؛ با استفاده از این مقادیر و همچنین نمودارهای مربوط به شوری، مقدار شوری سیال را می‌توان اندازه‌گیری کرد (Shepherd et al., 1985). مقدار شوری در همه نمونه‌ها میان ۱۲ تا ۱۹ درصد با میانگین ۱۴/۸ درصد وزنی نمک طعام اندازه‌گیری شد (شکل ۵ ب). در این میان میانبرهای نوع IIb دارای شوری ۱۹ درصد وزنی نمک طعام هستند. میانبرهای

آذرین و نبود شواهد دگرگونی در ناحیه جنوب باختری سرخ‌کوه و به‌طور عام در گستره ماگمایی بلوک لوت، نقش آب دگرگونی و آب‌سازندی در تشکیل این رگه‌ها را نمی‌کند و احتمال مخلوط‌شدگی ضعیف آب‌های جوی را کمی بالا می‌برد. در جدول ۴ نتایج مطالعات میان‌بارهای سیال و همچنین $\delta^{18}\text{O}$ در سیال در تعادل با کانی کوارتز در مس رگه‌ای جنوب باختری سرخ‌کوه با تعدادی از کانسارهای اپی‌ترمال و پورفیری ایران مقایسه شده است.

۶- نتیجه‌گیری

همان‌گونه که اشاره شد بلوک لوت به دلیل فراوانی فعالیت‌های ماگمایی دوران ائوسن میزان کانسارهای مختلف مرتبط با فعالیت ماگمایی است. یکی از این مناطق کانی‌سازی منطقه اکتشافی جنوب باختری سرخ‌کوه است که کانی‌سازی گرمایی با ویژگی‌هایی مشابه با کانسارهای اپی‌ترمال در سامانه‌های گسلی رخ داده و متشکل از کانی‌های سولفیدی اولیه کالکوپریت و پیریت در رگه‌های سیلیسی است. کانه‌های سولفیدی اولیه در بخش‌های سطحی به اکسیدهای آهن ثانویه و همچنین کانی‌های ثانویه مس تبدیل شده‌اند. مطالعات ریزدماسنجی روی بلورهای کوارتز هم‌پارازتر با کانی‌های سولفیدی نشانه دمای کانی‌سازی ۲۹۱ درجه سانتی‌گراد و میانگین شوری ۱۴/۸ درصد وزنی نمک طعام است. سیال‌های شور دارای املاح همچون نمک طعام نقش لیگندهای کلر را در انتقال فلزات نشان می‌دهند. همچنین بر پایه چگالی سیال و فشار محاسبه شده برای کانی‌سازی به ترتیب ۰/۸ تا ۰/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۵۰ تا ۸۰ بار، ژرفای کانی‌سازی و همچنین سطح فرسایش کنونی در حدود متوسط ۷۰۰ متر به دست آمد. مطالعات ایزوتوپی به همراه نتایج حاصل از مطالعات میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد که منشأ محلول مولد کانی‌سازی مرتبط با فعالیت‌های ماگمایی است.

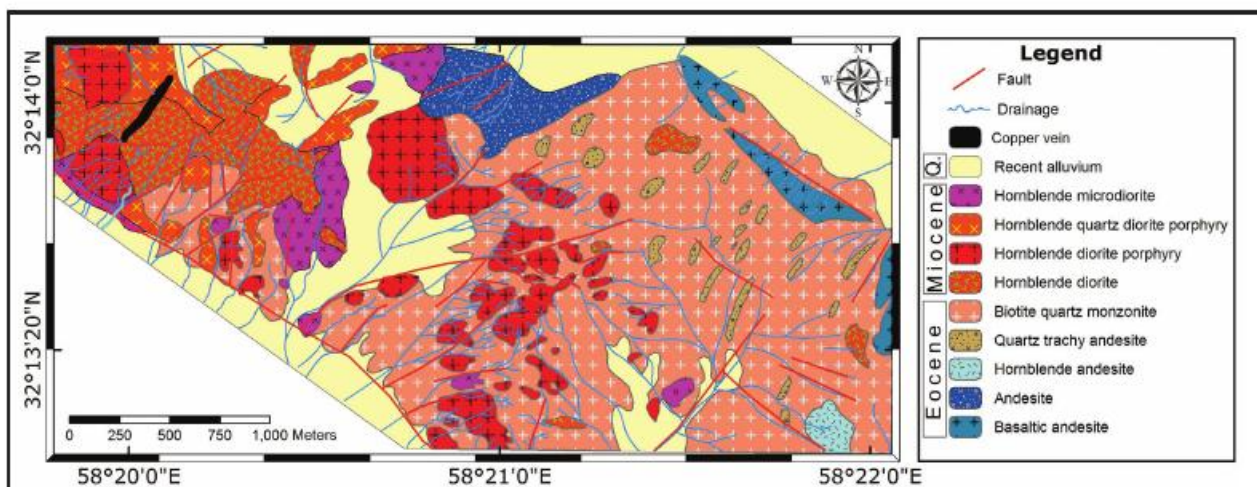
بررسی‌های پیشین انجام شده نشان می‌دهد که بهینه‌های دگرسانی QSP حاصل از نوده بیوتیت کوارتز مونزونیت در منطقه احتمالاً مرتبط با کانی‌سازی مس پورفیری هستند. همچنین نوده‌های دوبریت از فاز ماگمایی بیوتیت کوارتز مونزونیت مجزا است که کانی‌سازی رگه‌ای مرتبط با این نوده‌هاست. با توجه به این مطالعات و همچنین بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده شواهد غیرمرتبط بودن کانی‌سازی رگه‌ای با نوده‌های مونزونیت و کانی‌سازی پورفیری تقویت می‌یابد. بنابراین چنین دریافت می‌شود که کانی‌سازی رگه‌ای مستقل از نوده‌های مونزونیتی و مرتبط با نوده‌های نفوذی دوبریتی در منطقه است.

مستقیم سیال به‌صورت ادخال در کانی (۲) به دست آوردن مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ و δD سیال گرمایی که اکسیژن و هیدروژن را با کانی‌ها در دمایی خاص متعادل کرده است (Hung and Taylor, 1974). از آنجا که ترکیب ایزوتوپی آب ممکن است از راه تبادل با اکسیژن و هیدروژن کانی میزان تغییر یابد، روش اول با محدودیت روبه‌رو است. روش دوم کاملاً بر پایه تبادل آب کانی و معادلات دماسنجی ایزوتوپی برای تعیین دما استوار است.

با توجه به اینکه آب بیشترین بخش سیال‌های کانه‌ساز را تشکیل می‌دهد، اطلاعات در مورد منشأ آن در هر نظریه تشکیل ذخایر معدنی بنیادین است (Hoefs, 2004). بنابراین با تجزیه کانی‌های اکسیدی مانند کوارتز و به دست آوردن معادله تفکیک برای آب در سیال در تعادل با کانی، می‌توان $\delta^{18}\text{O}$ سیال‌های کانه‌ساز را به دست آورد. در این محاسبات ممکن است خطاهایی مانند تردید در دمای همگن‌شدگی میان‌بارهای سیال یا تفاوت در معادلات تفکیک ایزوتوپی نیز وجود داشته باشد که قابل چشم‌پوشی است و این روش به‌طور گسترده استفاده می‌شود.

در آماده‌سازی اکسیژن موجود در کانی برای تجزیه، ابتدا اکسیژن از راه فلوروری کردن با F_2 یا ترکیب برموفلورور (BrF₃) یا کلوروفلورور (ClF₃) از سیلیکات و اکسید جدا می‌شود. پس از آن در لوله‌های نیکلی در دمای ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد اکسیژن آن آزاد و سپس برای اندازه‌گیری در طیف‌سنج جرمی در دمای بالا به CO₂ کاهیده می‌شود (Hoefs, 2004).

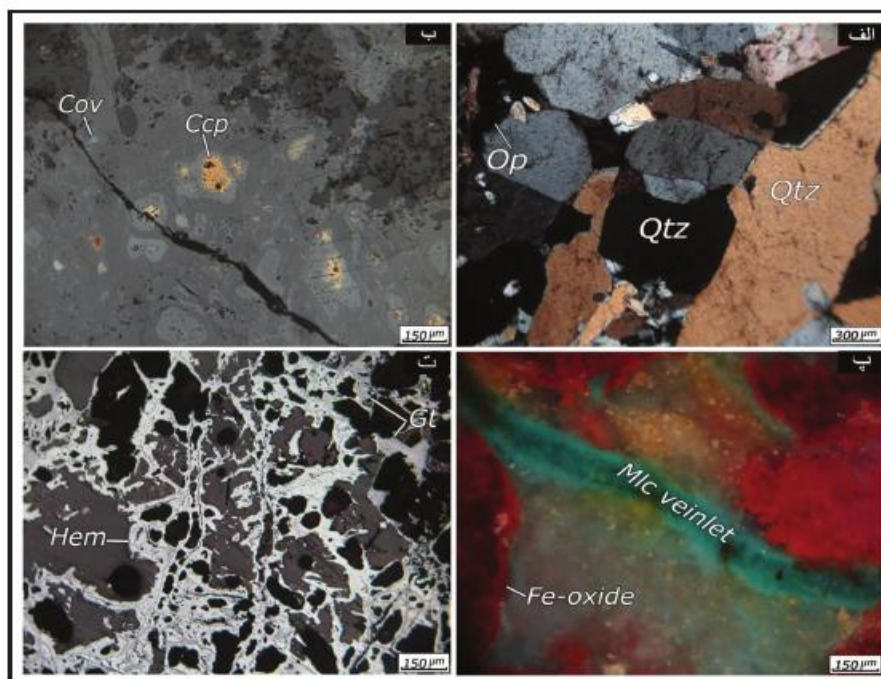
به منظور شناخت ماهیت سیال‌های منشأ رگه‌های سیلیسی و تکمیل مطالعات میان‌بارهای سیال، ۴ نمونه برای تجزیه ایزوتوپی اکسیژن انتخاب شد. تجزیه‌ها در آزمایشگاه ایزوتوپ‌های پایدار دانشگاه انتاریو غربی (University of Western Ontario) در کانادا انجام شد که آن نتایج بر پایه استاندارد میانگین آب اقیانوس گزارش شده است (جدول ۳). مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ کوارتز در بخش کانی‌سازی رگه‌ای در منطقه جنوب باختری سرخ‌کوه میان ۸/۶۶+ تا ۱۳/۰۹+ در هزار (میانگین ۱۰/۸۱+) است. ترکیب ایزوتوپی سیال گرمایی در تعادل با رگه‌های کوارتز در جنوب باختری سرخ‌کوه با استفاده از معادلات تفکیک ایزوتوپی کوارتز آب (Zheng, 1993) به دست آمد. برای محاسبه تفکیک ایزوتوپی کوارتز آب از میانگین دمای یکتواختی میان‌بارهای سیال در کوارتز استفاده شد. با استفاده از این محاسبات، $\delta^{18}\text{O}$ سیال گرمایی در تعادل با کوارتز در محدوده کانی‌سازی میان ۴/۰۶+ تا ۷/۵۹+ در هزار است (جدول ۳ و شکل ۱۰). با توجه به این مقادیر، $\delta^{18}\text{O}$ سیال گرمایی در تعادل با کوارتز در محدوده آب‌های ماگمایی جای می‌گیرد (شکل ۱۰). در این میان حضور گسترده سنگ‌های



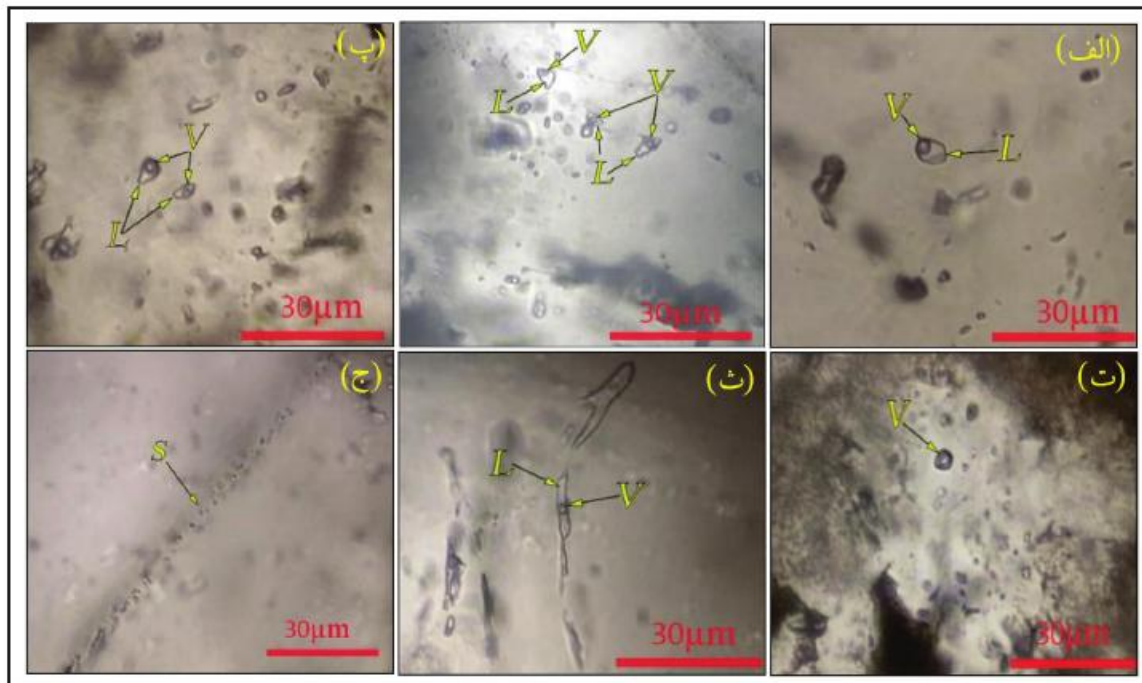
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ بخش شمالی منطقه جنوب باختری سرخ‌کوه که رگه کانی‌سازی مس روی نقشه مشخص شده است.



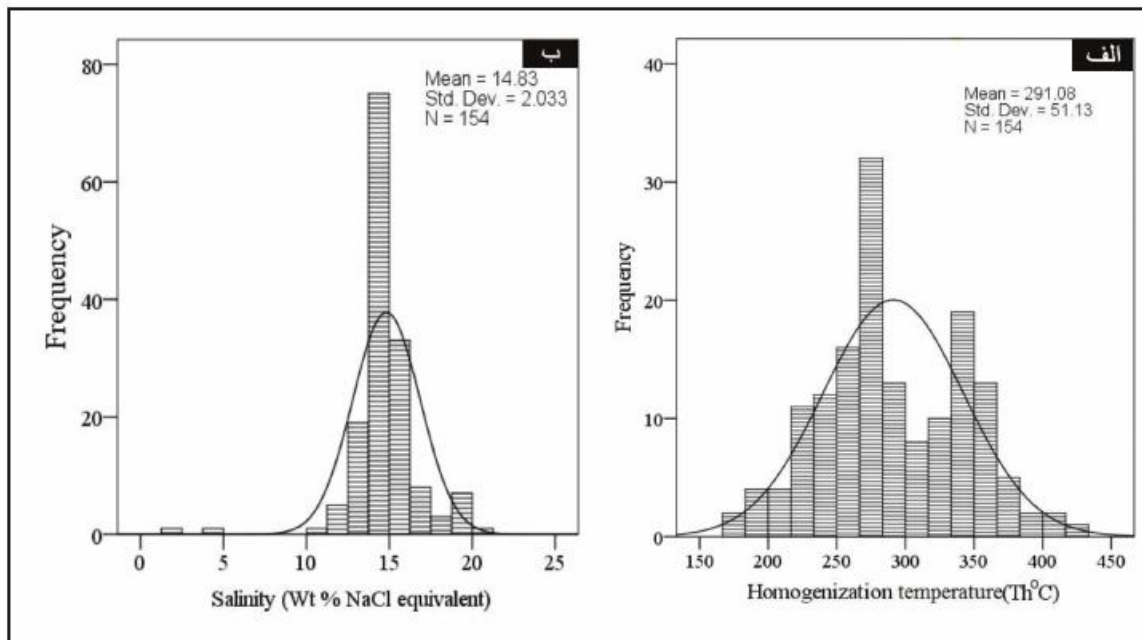
شکل ۲- نمایی از ترانشه حفر شده در بخش کانی سازی رگه‌ای که مالاکیت بر سطح سنگ‌ها به فراوانی دیده می‌شود (دید به جنوب باختری).



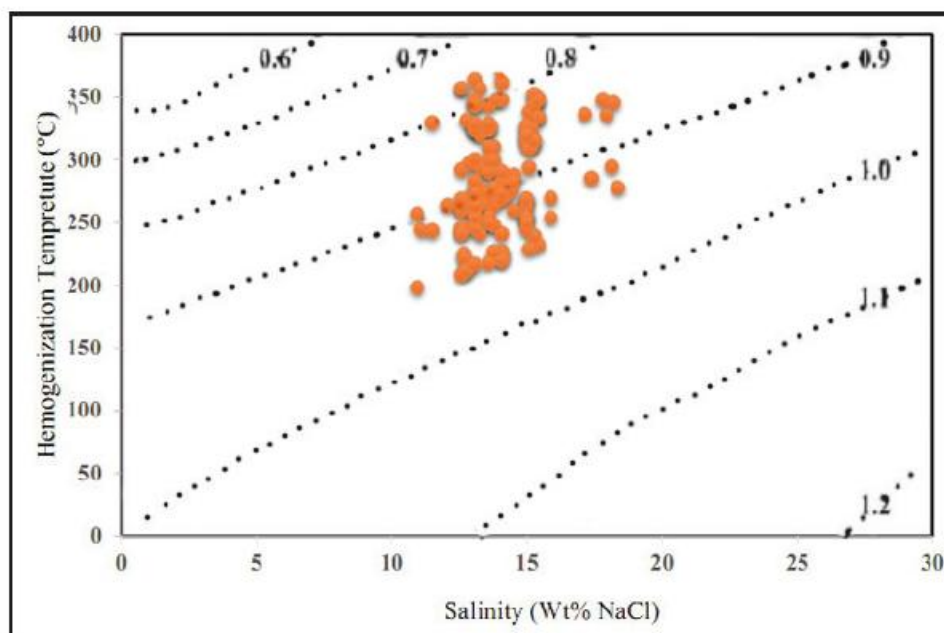
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی کانی سازی رگه‌ای در منطقه جنوب باختری سرخ‌کوه الف) بلورهای کوارتز هم‌بعد که کانی‌های فلزی (پاکت) به صورت هم‌شدی با آنها رشد کرده‌اند؛ ب) کالکوپیریت به صورت رگچه‌های بدنسب ستر که بیشتر به اکسیدهای آهن و همچنین کانی‌های ثانویه مس (کولیت) تبدیل شده است؛ پ) رگچه مالاکیت به رنگ سبز به همراه اکسیدهای آهن که کانی‌های اصلی پهنه اکسیدی هستند؛ ت) همایت و گوتیت به صورت بافت شبکه‌ای (boxwork) حاصل از اکسیدشدگی. =Qtz= کوارتز، =Ccp= کالکوپیریت، =Cov= کولیت، =Hem= همایت، =Mlc= مالاکیت، =Gt= گوتیت، =Op= کانی کدر) (نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از Whitney and Evans, 2010).



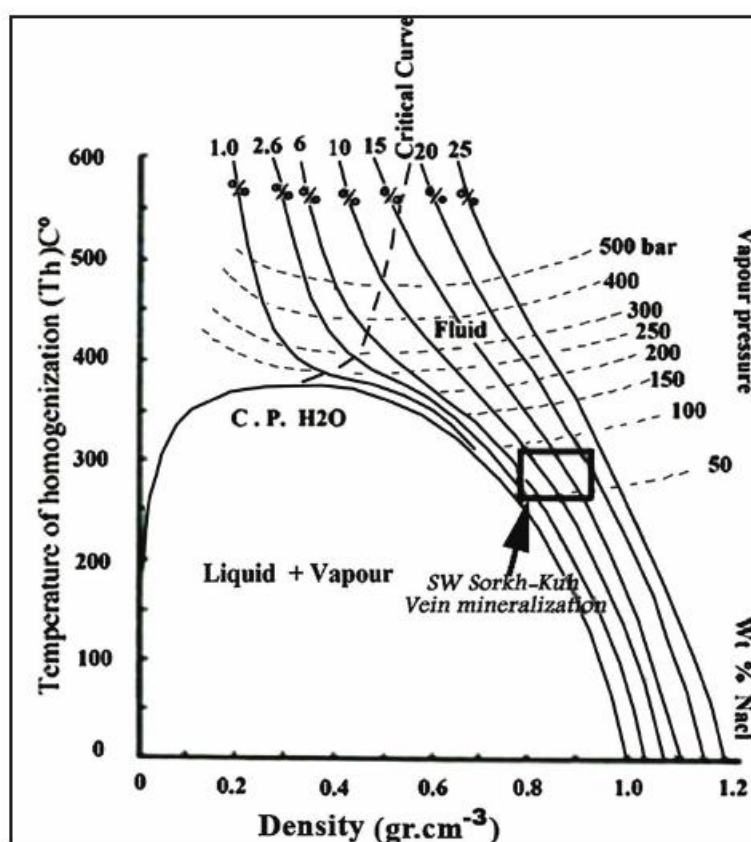
شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی میانبره‌های سیال در منطقه جنوب باختری سرخ‌کوه؛ الف) میانبره سیال کروی شکل و دوفازی غنی از مایع؛ ب) میانبره سیال بی‌شکل دوفازی غنی از مایع (نوع IIa1)؛ پ) میانبره سیال دوفازی غنی از مایع (نوع IIa2)؛ ت) میانبره سیال دوفازی که بیش از ۹۰ درصد حجم میانبره را گاز تشکیل داده است (نوع IIb)؛ ث) پدیده گردن‌دار شدن در میانبره‌های سیال که سبب کشیده شدن میانبره‌های سیال شده است؛ ج) میانبره‌های سیال ثانویه در امتداد شکستگی ایجاد شده در کوارتز.



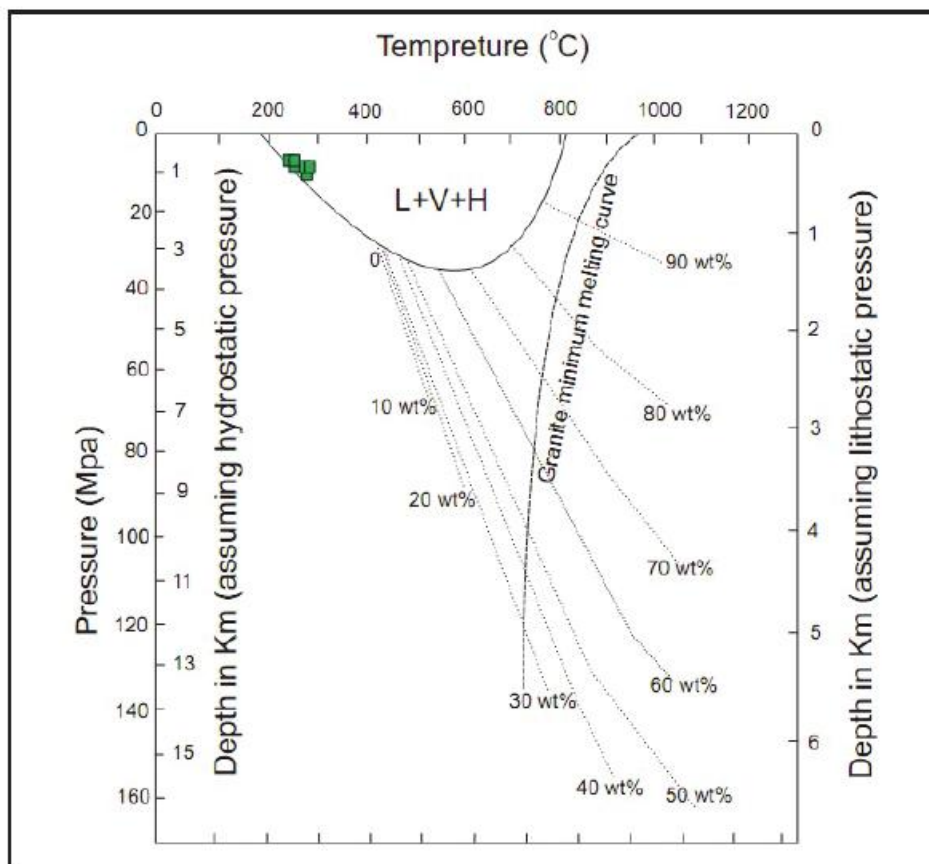
شکل ۵- الف) نمودار دمای یکنواختی مربوط به میانبره‌های سیال در کانی‌سازی رگه‌ای در منطقه جنوب باختری سرخ‌کوه با دمای میانگین ۲۹۱ درجه سانتی‌گراد و دو محدوده دمایی چیره ۲۷۰ و ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد؛ ب) نمودار شوری میانبره‌های سیال در منطقه بر حسب درصد وزنی نمک طعام با متوسط ۱۴/۸ درصد.



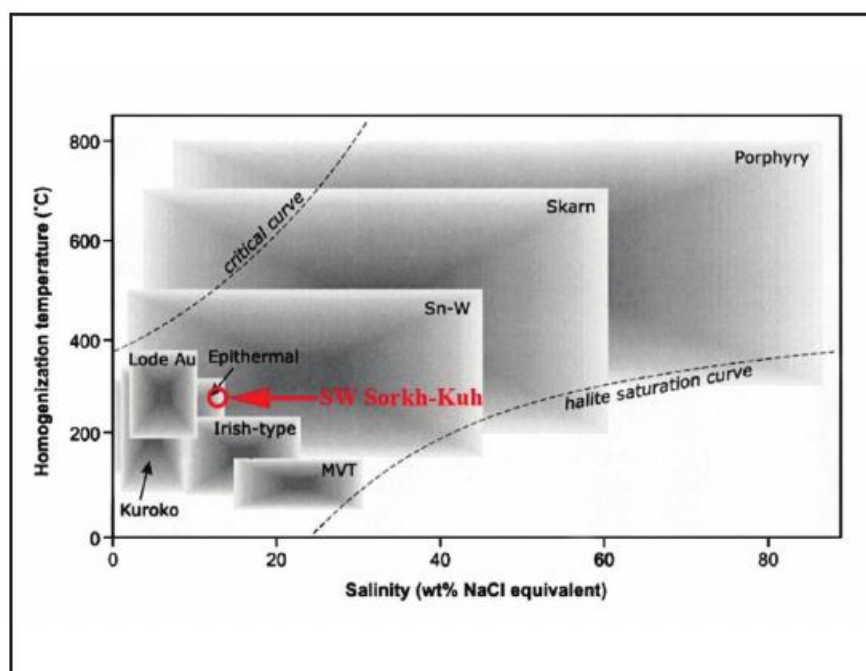
شکل ۶- چگالی میانبرهای سیال در نمونه‌های مورد مطالعه در کانی‌سازی مس رگدای منطقه جنوب باختری سرخ‌کوه بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب (Bodnar, 1983).



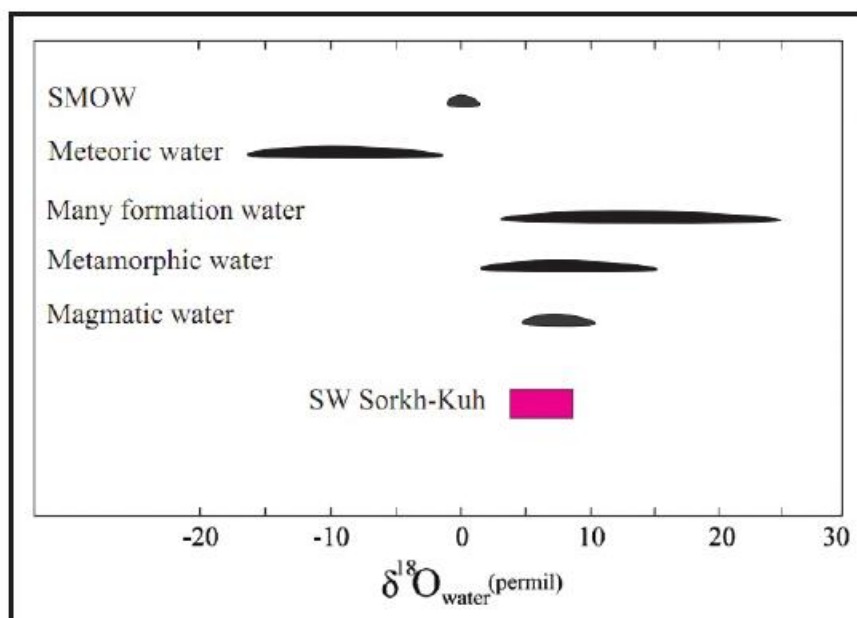
شکل ۷- نمودار دما-چگالی با اعمال شوری برای تعیین مقدار فشار سیال که بین ۵۰ تا ۸۰ بار است (Fisher, 1976).



شکل ۸- نمودار فشار در برابر دمای همگن‌شدگی میانارهای سیال برای محاسبه ژرفای گانی‌سازی (Fournier, 1987). محل فرارگیری نمونه‌های منطقه اکتشافی جنوب باختری سرخ‌کوه نیز روی شکل مشخص شده است.



شکل ۹- نمودار شوری در برابر دمای همگن‌شدگی در میانارهای سیال مطالعه شده که گانی‌سازی رگه‌ای محدوده جنوب باختری سرخ‌کوه در محدوده کانسارهای اپی‌ترمال جانمایی می‌شود (Wilkinson, 2001) که نشانه همخوانی داشتن ویژگی‌های گانی‌سازی این رگه با کانسارهای اپی‌ترمال است.



شکل ۱۰- نمودار مقادیر $\delta^{18}O$ برای ترکیب ایزوتوپی سیال گرمایی در تعادل با کوارتز در رگه های سیلیس میزان کانی سازی محدوده جنوب باختری سرخ کوه. در این نمودار کوارتز در محدوده آب های ماگمایی جانبایی شده است که نشانه حضور سیال های ماگمایی در تشکیل رگه دارای کانی سازی است. محدوده آب های ماگمایی از Sheppard (1986) محدوده آب های سازندی از Hoefs (2004)، محدوده آب های جوی از Canig (1961) و محدوده آب های دگرگونی از Taylor (1979) گرفته شده است.

جدول ۱- توالی پاراژنزی کانه ها در منطقه اکتشافی جنوب باختری سرخ کوه.

Minerals	Early	Late
Quartz	[Large horizontal bar spanning both Early and Late stages]	
Pyrite	[Small horizontal bar in Early stage]	
Chalcopyrite	[Medium horizontal bar in Early stage]	
Chalcocite		[Small horizontal bar in Late stage]
Covellite		[Small horizontal bar in Late stage]
Hematite		[Medium horizontal bar in Late stage]
Goethite		[Medium horizontal bar in Late stage]
Malachite		[Large horizontal bar in Late stage]
Azurite		[Small horizontal bar in Late stage]
Mn oxide		[Small horizontal bar in Late stage]

جدول ۲- ویژگی‌های نمونه‌های برداشت شده برای مطالعات میانبارهای سیال کانی‌سازی رگه‌ای جنوب باختری سرخ‌کوه.

Sample No.	X (UTM)	Y (UTM)	Alteration	Description
S 80	625114	3567198	propylitic	quartz-pyrite
S81	625251	3567287	propylitic-QSP	quartz-pyrite-chalcopyrite
S 82	625441	3567277	propylitic	quartz-chalcopyrite
S 83	625441	3567382	Carbonatic-propylitic	quartz-Fe oxide
S 84	625509	3567430	propylitic	quartz-Fe oxide
S 85	625430	3567319	propylitic	quartz-Fe oxide-malachite
S 86	625218	3567226	propylitic	quartz-malachite
S 87	625332	3567292	propylitic	quartz vein
S 88	625383	3567364	Carbonatic-propylitic	quartz-Fe oxide
S 89	625591	3567428	propylitic	quartz vein
S 90	625694	3567373	Carbonatic-propylitic	quartz-pyrite
S 91	625127	3567153	propylitic	quartz-Fe oxide

جدول ۳- نتایج تجزیه ایزوتوپی اکسیژن در کانی‌های کوارتز بر حسب در هزار نسبت به SMOW همچنین $\delta^{18}O$ سیال گرمایی در تعادل با کانی کوارتز با توجه به دمای همگن‌شدگی به دست آمده است.

Sample No.	Mineral	$\delta^{18}O$ quartz VSMOW (‰)	T (°C)	$\delta^{18}O$ water VSMOW (‰)
S-83	Quartz-vein	10.82	297.6	3.72
S-85	Quartz-vein	10.66	282.2	3.06
S-87	Quartz-QSP	13.09	352.3	7.59
S-91	Quartz-QSP	12.67	287.8	5.27

جدول ۴- مقایسه نتایج حاصل از مطالعات میانبارهای سیال و همچنین $\delta^{18}O$ در سیال در تعادل با کانی کوارتز در مس رگه‌ای جنوب باختری سرخ‌کوه با تعدادی از کانسارهای انتخابی مس ایران.

$\delta^{18}O$ water (SMOW) (‰)	Hemogenization Temp ratute (oC)	Salinity (Wt% NaCl)	نام کانسار
+۷/۳	۳۳۲-۴۰۰	۴۰-۴۷	خوپیک- پورفیری- دگرسانی QSCP (Malekzadeh Shafaroudi et al., 2015)
+۷/۶ - +۴/۴	۲۵۰-۳۰۰	۲۰	سونگون- پورفیری- پهنه پر- پلیتیک (Calagari, 2003)
	۳۳۲-۴۵۰	۳۰-۵۱	مید-ک- پورفیری (Hassanzadeh, 1993)
+۱۰/۷۲ - +۸/۱۲	۴۱۰	۴۰	چهل کوره- رسوبی (معانی، جو، ۱۳۸۶)
+۶/۰۴ - +۱/۸	۱۷۵-۳۵۰	۳۳	چاه‌مسی- اپی‌ترمال (حسینخانی، ۱۳۸۸؛ مدرک، ۱۳۸۸)
۷/۵۹ - +۳/۰۶	۲۷۰-۳۳۰	۱۲-۹۱	جنوب باختری سرخ‌کوه

کتابناری

- آفانی، ع. ۱۳۸۳. زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۳ ص.
- حسینی، الف، ۱۳۸۸- زمین شناسی، جایگاه نکتونوماگمایی و ارزیابی پتانسیل کانی سازی مس- طلا در کانسار چاه مسی (شمال شهربابک)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۰ صفحه.
- حسینی، ا.، کریم پور، م. ح. و ملکزاده شفارودی، ا. ۱۳۹۴. سنگ شناسی، کانی شناسی زون های دگرسانی و اکتشافات ژئوشیمیایی در منطقه اکتشافی جنوب باختری سرخ کوه، شرق ایران، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، جلد ۲۳، شماره دوم، ۱۴ ص.
- کریم پور، م. ح.، ملکزاده شفارودی، ا.، فارمر، ل. و استرن، ج. ۱۳۹۱. پتروژنز گرانیتوئیدها، سن سنجی زیرکن به روش U-Pb، ژئوشیمی ایزوتوپ های Sr-Nd و رخداد مهم کانی سازی ترشیری در بلوک لوت، شرق ایران، مجله زمین شناسی اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد، شماره ۱، جلد ۴، ۲۷ ص.
- مدرک، ه. ۱۳۸۸- ویژگی های کانی سازی، دگرسانی و ماهیت سیال های کانه ساز در ذخیره چندفلزی چاه مسی و ارتباط آن با کانسار مس پورفیری میدوک، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۶۱ صفحه.
- معانی جو، م. ۱۳۸۶. ژئوشیمی، شناخت منشأ سیالات کانه ساز و نحوه تشکیل کانسار مس چهل کوره (شمال غرب زاهدان). رساله دکترای دانشگاه شهید بهشتی، ۱۶۸ ص.
- ملکزاده شفارودی، ا. و کریم پور، م. ح. ۱۳۹۰. سن سنجی زیرکان به روش اورانیم سرب در منطقه اکتشافی مس طلا پورفیری ماهرآباد، شهادی بر دوره متالونیک ائوس مبیان در ذخایر پورفیری در شرق ایران، مجله زمین شناسی اقتصادی، شماره ۱، جلد ۳، ۲۰ ص.

References

- Abdi, M. and Karimpour, M. H., 2013- Petrochemical characteristics and timing of Middle Eocene granitic magmatism in Kooch-Shah, Lut Block, Eastern Iran. *Acta Geol. Sin.* 87 (4): 1032-1044.
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M. H., Mazaheri, S. A., Santos, J. F., Medina, J. M. and Homam, S. M., 2011- Sr-Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut Block, eastern Iran). *Journal of Asian Earth Sciences* 41: 283-296.
- Blurian, Gh., 2004- Explanatory text of Jonube-Sehchangi. Geological Quadrangle Map 1:100000, No. 7654. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Bodnar, R., 1983- A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and P-V-T-X properties of inclusion fluid. *Economic Geology* 78: 535-542.
- Camp, V. and Griffis, R., 1982- Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos* 15: 221-239.
- Calagari, A. S., 2003- Stable isotope (S, O, H and C) studies of the phyllic and potassic-phyllic alteration zones of the porphyry copper deposit at Sungun, East Azarbaijan, Iran. *Journal of Asian Earth Science* 21: 767-780.
- Carig, H., 1961- Isotopic variations in meteoric waters. *Science, N.Y.*, 133: 1702-1703.
- Fisher, J. R., 1976- The volumetric properties of H₂O-A graphical portrayal. *J. Res. US Geol. Surv.* 4: 93-189.
- Fournier, R. O., 1987- Conceptual models of brine evolution in magmatic-hydrothermal systems. U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 1350: 1487-1506.
- Graupner, T., Götze, J., Kempe, U. and Wolf, D., 2000- CL for characterizing quartz and trapped fluid inclusions in mesothermal quartz veins: Qolqoleh Au ore deposit, Uzbekistan. *Mineralogical Magazine*, v. 64: 1007-1016.
- Hassanzadeh, J., 1993- Metallogenetic and tectono-magmatic events in SE sector of the Cenozoic active continental margin of central Iran (Shahr-e-Babak, Kerman province). Ph.D. thesis, university of California, Los Angeles, 204 p.
- Hoefs, J., 2004- Stable isotope geochemistry, Springer-Verlog, Berlin, 224p.
- Hung, P. and Taylor, J.R., 1974- The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problem of hydrothermal alteration and ore deposition. *Economic Geology*, v. 69: 843-883.
- Jung, D., Keller, J., Khorasani, R., Marcks, Chr., Baumann, A. and Horn, P., 1983- Petrology of the Tertiary magmatic activity the northern Lut area, East of Iran. Ministry of mines and metals, GSI, geodynamic project (geotraverse) in Iran 51: 285-336.
- Karimpour, M. H., 2005- Comparison of Qaleh Zari Cu-Au-Ag deposit with other iron oxides Cu-Au (IOCG-Type) deposits and new classification, Iran. *J. Crystallogr. Mineral.* 13: 165-184.
- Karimpour, M. H., Stern, C. R., Farmer, L., Saadat, S. and Malekzadeh shafaroudi, A., 2011- Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block, Eastern Iran. *Journal of Geopersia* 1 (1): 19-36.
- 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.
- Kluyver, H. M., Griffis, R. and Alavi, M., 1981- Explanatory text of the Nayband. Geological Quadrangle Map 1:250000, No. J8. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Lotfi, M., 1982- Geological and geochemical investigations on the volcanogenic Cu, Pb, Zn, Sb ore-mineralizations in the Shurab-Gale Chah and northwest of Khur (Lut, east of Iran). Ph.D thesis, der Naturwissenschaften der Universität Hamburg, Germany, pp. 151.

- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M. H. and Stern, C. R., 2015- The Khopik porphyry copper prospect, Lut Block, Eastern Iran: Geology, alteration and mineralization, fluid inclusion, and oxygen isotope studies. *Ore Geol. Rev.* 65 (2): 522-544.
- Najafi, A., Karimpour, M. H. and Ghaderi, M., 2014- Application of fuzzy AHP method to IOCG prospectivity mapping: A case study in Taherabad prospecting area, eastern Iran. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 33: 142-154.
- Nakhaei, M., Mazaheri, S. A., Karimpour, M. H., Stern, C. R., Zarrinkoub, M. H., Mohammadi, S. S. and Heydarian shahri, M. R., 2015- Geochronologic, geochemical, and isotopic constraints on petrogenesis of the dioritic rocks associated with Fe skarn in the Bisheh area, Eastern Iran. *Arab. J. Geosci.*: 1-15.
- Roedder, E., 1984- Fluid inclusions. In: Ribbe, P.E. (Ed.), *Reviews in Mineralogy*, vol. 12. Mineral Soci Am (644 pp.).
- Samiee, S., Karimpour, M. H., Ghaderi, M., Haidarian Shahri, M. R., Klöetzli, U. and Santos, J. F., 2016- Petrogenesis of subvolcanic rocks from the Khunik prospecting area, south of Birjand, Iran: Geochemical, Sr-Nd isotopic and U-Pb zircon constraints. *Journal of Asian Earth Sciences* 115: 170-182.
- Sharp, Z., 2006- Principles of stable isotope geochemistry, Pearson Prentice Hall, USA, 344p.
- Shepherd, T., Rankin, A. H. and Alderton, D. H. M., 1985- A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies. Blackie, London.
- Sheppard, S. M., 1986- Characterization and isotope variation in natural waters, In: Stable isotopes in high temperature in geological processes, Valley, J.W., Taylor, H.P., and O'Neil, J.R., (eds.). *Mineral. Soc. Am. Rev. Mineral* 16: 165-184.
- Takenouchi, S., 1980- Preliminary studies of fluid inclusions of the Santo Tomas II (philex) and Tapien (Mar copper) porphyry copper deposits in the Philippines. *Mineralogy, special issue* 8: 140-150.
- Tarkian, M., Lotfi, M. and Baumann, A., 1983- Tectonic, magmatism and the formation of mineral deposits in the central Lut, east Iran, Ministry of mines and metals, GSI, ggeodynamic project (geotraverse) in Iran, No. 51: 357-383.
- Taylor, H. P., 1979- Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits. In: Barnes, H.L., (Ed.), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 2nded, Wiley, New York, pp.236-277: 798 p.
- Tirrul, R., Bell, I. R., Griffis, R. J. and Camp, V. E., 1983- The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America, Bull* 94: 134-156.
- Walshe, J. L. and Hobbs, B. E., 1999- Hydrothermal systems, giant ore deposits and a new paradigm for predictive mineral exploration. *CSIRO Exploration and Mining Research Reviews* 30-31.
- Whitney D. L. and Evans B. W., 2010- Abbreviations for names of rock-forming minerals, *American Mineralogist*, Volume 95: 185-187.
- Wilkinson, J. J., 2001- Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits, *Litos*, v.55: 229-272.
- Zheng, Y. F., 1993- Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicate minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta* 57: 1079-1091.

SW Sorkh-Kuh copper vein, Lut block, Eastern Iran: mineralization, fluid inclusions and oxygen stable isotopes studies

A. Hossainkhan¹, M. H. Karimpour^{2*} and A. Malekzadeh Shafaroudi³

¹Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

²Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received: 2016 February 27

Accepted: 2016 June 14

Abstract

The SW Sorkh-Kuh area makes part of the Tertiary volcanic-plutonic rocks in the west of the Lut Block, SW of Birjand city. Geology of this area consists of andesitic and basaltic volcanic rocks intruded by hornblende diorite, hornblende microdiorite, hornblende diorite porphyry, hornblende quartz diorite porphyry and biotite quartz monzonite, which caused extensive alteration and mineralization. The vein mineralization with a NW-SE trend have been observed in the NW portion of the area which is composed of quartz, chalcopyrite, pyrite and Fe-Cu secondary minerals. This vein is the youngest occurrence of mineralization, related to intrusive rocks, in the Lut Block (after Miocene). Primary fluid inclusions of quartz in paragneiss with mineralization, revealed three types of two phases inclusions with difference in density, which liquid rich phases have an average 270 and 330°C of homogenization temperature. Based on freezing studies, calculated temperature of last melting point of these fluids equals to 12-15 and 16-19% wt eq. NaCl, respectively. Some fluids, which homogenized to gas, have more homogenization temperature and salinity. In evaluation of depth, using homogenization temperature, salinity, density and pressure of fluid inclusion, 700 m depth was calculated for mineralization, corresponding to the present erosion surface. $\delta^{18}O$ values of quartz in mineralized vein and fluid in equilibrium with quartz have a range between +8.66 – +13.09‰ and +3.06 – +7.59, respectively. It could be inferred that the source of ore-forming fluids was magmatic in the mineralized vein. In general, stable isotope and fluid inclusion studies show similarity of mineralization of the SW Sorkh-Kuh with epithermal deposits in which mineralization is related to the dioritic intrusive rocks. The changes in fluid composition and boiling resulted in mineralization along a fault as vein.

Keywords: Oxygen isotope, Fluid inclusion, Vein mineralization, SW Sorkh-Kuh, Lut Block.

For Persian Version see pages 165 to 176

*Corresponding author: M. H. Karimpour, E-mail: karimpur@um.ac.ir