

## کاربرد داده‌های کانه‌نگاری و سیالات درگیر در تعیین شرایط تشکیل کانسار مس پورفیری شمال شرق اراک

فریماه آیتی<sup>۱</sup>، هوشنگ اسدی هارونی<sup>۲</sup>، هاشم باقری<sup>۳</sup> و مهین منصوری اصفهانی<sup>۲</sup>  
<sup>۱</sup> استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام‌نور، تهران ۴۶۹۷-۱۹۳۹۵، ج.ا. ایران  
<sup>۲</sup> دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران  
<sup>۳</sup> گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

### چکیده

کانسار دالی در شمال شرق اراک و بر روی کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر واقع شده است و شامل توده‌های آتشفشانی- نیمه آتشفشانی با ترکیب دیوریت- کوارتز دیوریت پورفیری، آندزیت تا داسیت است که در مجموعه‌ای از گدازه‌ها و سنگ‌های آذرآواری با ترکیب آندزیتی نفوذ کرده‌اند. سه پهنه آلتراسیون اصلی در این منطقه شناسایی شده که شامل دگرسانی پتاسیک (بیوتیت ثانویه + مگنتیت + ارتوکلاز ثانویه)، فیلیک (سریسیت + کوارتز + پیریت) و پروپیلیتیک (کلسیت + کلریت + اپیدوت) است. بررسی‌های زمین‌شناسی، زمین‌شیمیایی و مطالعه سیالات درگیر، نشانگر حضور کانسار مس پورفیری غنی از طلا در منطقه است. مطالعه مقاطع صیقلی، حضور طلا به صورت ادخال در رگه‌های کوارتز و فازهای سولفیدی همچون کالکوپیریت را تأیید می‌کند. مطالعات سیالات درگیر نمونه‌های کوارتزی حاصل از سیال کانه‌ساز از پهنه‌های دگرسانی پتاسیک و فیلیک، دمای بین ۱۸۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد، شوری بین ۲۶ تا ۷۰ درصد بر حسب نمک طعام و کاهش درجه حرارت و شوری از پهنه پتاسیک به سمت پهنه فیلیک را نشان می‌دهد که مطابق با سایر نهشته‌های مس پورفیری جهان است.

واژه‌های کلیدی: سیالات درگیر، مس پورفیری، اراک

### مقدمه

تحولات ناشی از بسته شدن اقیانوس آلپی نئوتیس حاصل شده و یا به عبارتی حاصل هضم پوسته اقیانوسی

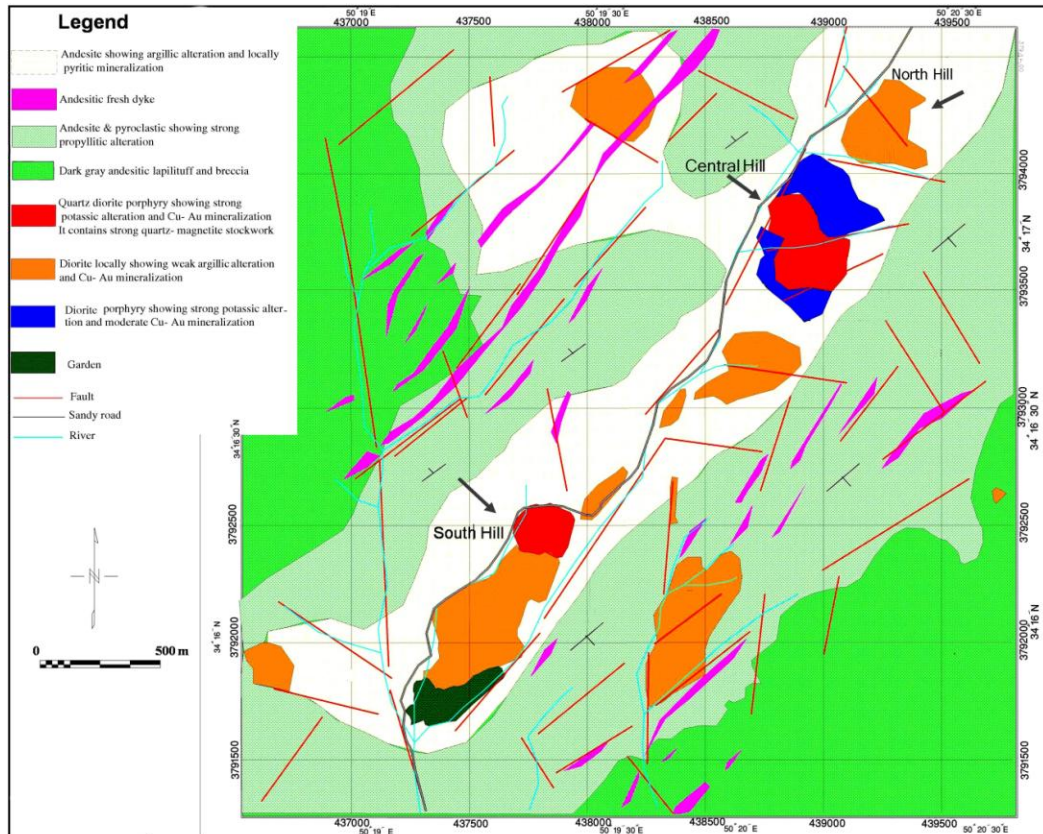
کمر بند ماگمایی ارومیه- دختر به علت اینکه در اثر

آذرآواری‌های آندزیتی (میوسن - پلیوسن) نفوذ کرده‌اند. رخنمون‌های اطراف نفوذی‌های کانی‌سازی شده، سنگ‌های آذرآواری و گدازه‌های هورنبلند-آندزیت با دگرسانی پروپیلیتیک هستند (شکل ۱). پهنه کانی‌سازی شده اصلی (توده جنوبی)، با ترکیب هورنبلند-دیوریت پورفیروئید و به شکل یک توده مخروطی برنزد دارد. این توده در بررسی‌های سطحی به وسیله دگرسانی پتاسیک، دگرسانی فلیک و همراه با رگه‌ها و استوک ورک‌های شدیداً سیلیسی مشخص می‌شود (شکل ۲). وجود استوک ورک‌های با تراکم بالای کوارتز-مگنتیت در نمونه‌های سطحی و مغزه‌های حفاری دلیلی بر تأثیر شدید محلول‌های گرمابی در سیستم دگرسانی منطقه است (شکل ۳). تراکم رگه‌ها و استوک ورک‌ها (کوارتز، مگنتیت و اکسید آهن) بسیار بالاست و به ۱۰ تا بیش از ۵۰ رگه در متر می‌رسد. بعضی از پهنه‌های رگه‌ای به قدری در هم آمیخته‌اند که باعث تشکیل رگه‌هایی با ۲/۵ تا ۴ متر عرض شده است. سه مرحله تشکیل این رگچه‌ها عبارتند از: رگچه‌های میلی‌متری مگنتیت، رگچه‌های کوارتز-مگنتیت-سولفید (با پهنای ۱ تا ۳ سانتی‌متر) و رگچه‌های کوارتز-اسپیکولاریت-سولفیدی. مگنتیت در پهنه پتاسیک غالب بوده و به بیش از ۵ درصد حجمی می‌رسد، در حالی که میزان اسپیکولاریت به حدود ۱۰ درصد حجمی می‌رسد. آثار کانی‌مالاکیت، آزوریت و کریزوکولا در رخنمون‌ها مشاهده می‌شود و مقدار آن به بیش از ۲ درصد حجمی کانسنگ می‌رسد. در حدود ۱/۷ کیلومتر به سمت شمال شرق، توده نفوذی دیگری به نام پورفیری مرکزی قرار دارد. این توده با دگرسانی پتاسیک و پروپیلیتیک، هسته‌ای از هورنبلند-بیوتیت تونالیت پورفیروئید دارد که به درون آندزیت‌های میزبان نفوذ کرده است (Ayati et al., 2008). در حدود ۱/۲ کیلومتر به سمت شمال شرق، منطقه کانی‌سازی شمالی با دگرسانی فلیک در حدود ۱۰۰ متر در ۵۰ متر دیده می‌شود که فقیر از مس و تا حدودی غنی از طلاست.

نئوتتیس از طریق فرورانش به زیر پوسته قاره‌ای است، مانند دیگر کمان‌های ماگمایی حاشیه قاره مانند آند (آمریکای جنوبی) و کردیلرا (آمریکای شمالی)، میزبان کانسارهای مس پورفیری به همراه دیگر کانسارهای وابسته (همچون طلا و مولیبدن) به این خاستگاه ژئودینامیکی است. بیش‌ترین کانسارهای مس پورفیری ایران مانند مس سرچشمه، میدوک و سونگون هم در این کمربند قرار دارند (Amidi, 1975; Forster, 1978). احتمال بالای پیدایش کانسارهای مس پورفیری در رابطه با پهنه فرورانش اقیانوس نئوتتیس و کمربند ماگمایی ارومیه-دختر ضرورت پی‌جویی و اکتشاف این نوع کانسار را در ایران توجیه می‌نماید. محدوده مورد بررسی عمدتاً از توده‌های نفوذی تا نیمه‌آشفشانی با ترکیب حدواسط تا اسیدی تشکیل شده است. با تأثیر محلول‌های گرمابی، انواع دگرسانی (پتاسیک، فلیک، پروپیلیتیک و به صورت محلی آرژیلیک) و به همراه آن کانه‌زایی مس و طلا در این مجموعه دیده می‌شود. نتایج آنالیز شیمیایی در بیشتر نمونه‌ها، تمرکز بالایی تا حد بیش از ۰/۷۵ درصد مس و حدود ۱/۲ گرم در تن طلا را نشان می‌دهد (آیتی و همکاران، ۱۳۸۷). این پژوهش به مطالعه سیالات درگیر و بررسی کانه‌نگاری به‌منظور بررسی شرایط تشکیل کانسار در محدوده مورد مطالعه می‌پردازد.

### زمین‌شناسی منطقه

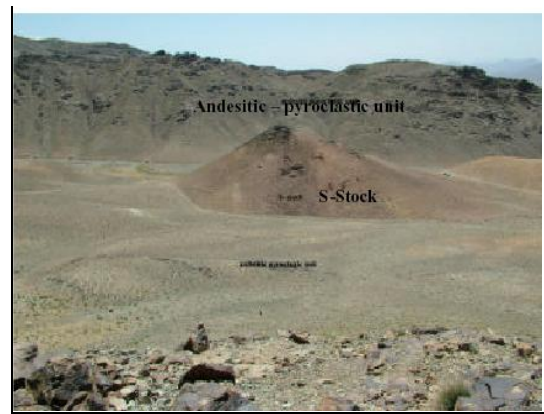
محدوده دالی در ۶۰ کیلومتری شمال شرق شهرستان اراک و از نظر ژئودینامیکی در نوار ماگمایی ارومیه-دختر و در جنوب‌غربی ورقه ۱/۲۵۰۰۰۰ قم (امامی، ۱۳۷۱) در محدوده جغرافیایی ۵۰°۱۵' تا ۵۰°۳۰' طول‌های شرقی و ۳۴°۱۴' تا ۳۴°۳۰' عرض‌های شمالی واقع شده است. توده‌های کانه‌زایی شده در یک امتداد ۵۵ درجه شمال شرقی به طول ۳ تا ۴ کیلومتر، در داخل یک پهنه گسله به عرض ۱ تا ۲ کیلومتر قرار دارند و به مرکز یک استراتوولکان متشکل از آندزیت-



شکل ۱- نقشه زمین شناسی و آلتراسیون منطقه به همراه مکان های اصلی کانی زایی (توده های جنوبی و مرکزی) (داده ها منتشر نشده است).



شکل ۳- استوک ورک های کوارتز- مگنتیت در توده جنوبی



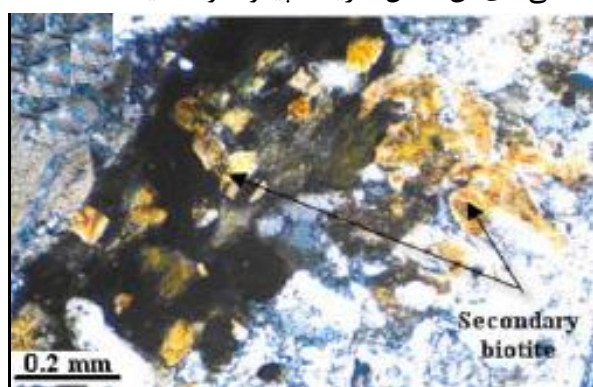
شکل ۲- پهنه کانی سازی شده اصلی (توده جنوبی)

کوارتز- مگنتیت، حضور اکسیدهای آهن، مشاهده کانی کالکوپیریت به صورت پراکنده در مغزه های حفاری، عیار بالا و همبستگی معنی دار و مثبت دو عنصر مس و طلا از جمله دلایل این پیشنهاد هستند (آیتی و همکاران، ۱۳۸۷).

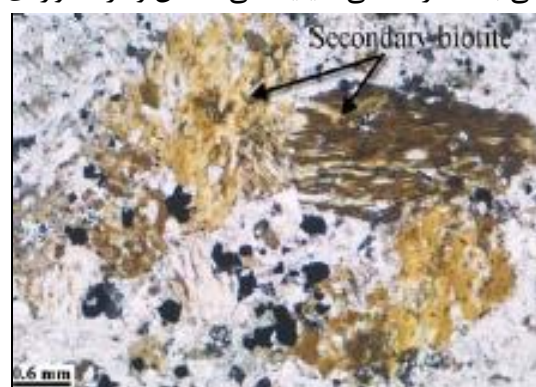
نتایج بررسی های سیالات درگیر نیز این موضوع را

بر پایه مطالعات زمین شناسی و زمین شیمیایی، فرضیه سیستم کانی سازی مس پورفیری غنی از طلا در منطقه بیش از پیش تقویت شد. وجود نفوذی های پورفیری فلسیک با ترکیب دیوریتی تا تونالیتی، دگرسانی های گرمابی از نوع پتاسیک، فلیک و پروپیلیتیک، حضور فراوان رگه ها و استوک ورک های

آرژیلیکی شدن همراه است. پهنه دگرسانی آرژیلیک در منطقه به صورت پراکنده و محلی در داخل سایر دگرسانی‌ها و در مجاورت رگه‌ها و درزه‌ها در رخنمون‌های سطحی مشاهده می‌شود. نمود این دگرسانی کم و بیش به صورت رسی شدن سنگ‌های میزبان و نیز توسط حضور کائولینیت مشخص می‌شود. دگرسانی پروپیلیتیک به صورت هاله سبزرنگی در خارجی ترین بخش کانسار مشاهده می‌شود و مجموعه کانی‌های آن شامل کلریت، اپیدوت و کلسیت است.



تأیید می‌نماید. پهنه دگرسانی پتاسیک در منطقه اکتشافی مورد بررسی توسط حضور بیوتیت ثانویه (شکل ۴)، فلدسپار پتاسیم ثانویه، مگنتیت، کوارتز، کالکوپیریت و پیریت و پهنه دگرسانی فلیک توسط حضور کوارتز، سریسیت و پیریت مشخص می‌شود. از آنجا که این مجموعه کانی‌ها به عنوان کانی‌های فرعی با مجموعه پتاسیک نیز رخ می‌دهد، شاخص پهنه فلیک، وجود این کانی‌ها بدون حضور فلدسپار پتاسیم است. این دگرسانی گاهی با دگرسانی سیلیسی شدن و در مواردی



شکل ۴- تشکیل بیوتیت ثانویه به خرج آمفیبول (پهنه آلتراسیون پتاسیک)

چسب، بریدن مقطع، صیقل دادن آن از دو طرف و آزاد کردن مقطع از روی لام به کمک استن است. در تمامی این مراحل نباید به مقطع حرارت و همچنین فشار بالایی وارد شود. در این مطالعه سعی شد نمونه‌ها تا ضخامت ۲۰۰ میکرون نازک شوند. مطالعات پتروگرافی ابتدا توسط میکروسکوپ معمولی و سپس با شکستن نمونه به ابعاد ۴ تا ۵ میلی‌متر، به وسیله دستگاه مطالعه سیالات درگیر از نوع Linkam مدل HF-S90 با کنترل حرارتی TMS92 و سیستم نمایش همزمان متصل به کامپیوتر در گروه زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان انجام شد.

#### کانه‌نگاری

پهنه‌ها و کانی‌های تشخیص داده شده در منطقه کانه‌زایی شده مورد بررسی با توجه به گمانه‌های حفاری

#### روش انجام پژوهش

به منظور بررسی انواع کانه‌ها، حدود ۱۵ مقطع صیقلی (مربوط به نمونه‌های سطحی و مغزه‌های حفاری) در دانشگاه بروکسل بررسی و آنالیز میکروسکوپ الکترونی (SEM) و (EDX Energy dispersive X-Ray) شدند. لازمه هرگونه مطالعه بر روی سیالات درگیر، نمونه برداری صحیح و آماده‌سازی مقاطع خوب و قابل استفاده در مطالعات میکرومتری است. نمونه برداری در منطقه مورد مطالعه با توجه به گسترش خوب استوکورک‌های سیلیسی، از این رگه‌ها انجام شد. برای مطالعه سیالات درگیر در مجموع ۲۰ مقطع دو بر صیقل از نمونه‌های کوارتز (استوکورک‌های حاوی کانه‌زایی) مربوط به تپه‌های جنوبی و مرکزی تهیه شد. مراحل تهیه مقاطع دو بر صیقل به‌طور خلاصه شامل پر کردن خلل و فرج مقطع بریده شده توسط

کولیت اکثراً به صورت جایگزین کالکوپیریت (محصولات دگرسانی کالکوپیریت) مشاهده می‌شوند و پوشش‌های نازکی را در طول شکاف‌ها یا روی این کانی تشکیل می‌دهند. در مقاطع صیقلی، خصوصاً نمونه‌های مربوط به تپه جنوبی، مگنتیت به‌عنوان کانی فلزی غالب شناخته شد. مگنتیت به‌صورت ریزدانه و ایدئومورف بوده و حاوی اذخال‌هایی از سولفیدها (عمدتاً کالکوپیریت و پیریت) است. در این مقاطع پدیده مارتیتی شدن به‌صورت ضعیف تا شدید مشهود است. بلورهای مگنتیت گاه بی‌شکل بوده که به‌علت تأثیر محلول‌های گرمابی و رخداد فرآیند جوشش، با بافت برشی یا کاتاکلاستیک بسیار زیبایی نمایان است (شکل ۵). در منطقه کانه‌زایی شده مورد بررسی، همچون دیگر کانسارهای مس پورفیری، مگنتیت اولیه در شرایط هیپوژن تشکیل می‌شود و اکسیدهای آهن همچون هماتیت و گوئیتیت که به محیط اکسیدان تری نیاز دارند، در پهنه اکسیدان و پهنه سوپرژن تشکیل می‌شوند.

شده و بررسی مقاطع در پهنه اکسید، سوپرژن و هیپوژن به شرح زیر هستند: پهنه اکسید با مجموعه کانی‌هایی همچون هماتیت، گوئیتیت، ژاروسیت، مالاکیت و آزوریت، پهنه سوپرژن با مجموعه کانی‌هایی همچون کالکوسیت، کالکوپیریت، کولیت و پیریت و پهنه هیپوژن با کانی‌هایی همچون بورنیت، کالکوپیریت، پیریت و مگنتیت مشخص می‌شوند (جدول ۱). پیریت با حفظ شکل بلوری خود و یا به‌صورت پرکننده رگچه‌ها و همجوار با رگچه‌های کوارتز در یال شمال - شمال غربی توده کانی‌سازی شده جنوبی و نیز در توده‌های مرکزی به میزان فراوان تر نسبت به توده جنوبی یافت می‌شود. کالکوپیریت به‌صورت ریزدانه و بی‌شکل، پرکننده رگچه‌هاست. همچنین دارای هم‌رشدی با پیریت بوده و گاهی به‌صورت اذخال در این کانی مشاهده می‌شود. کالکوسیت با رنگ خاکستری سفید متمایل به آبی و به‌صورت مجموعه چندین بلوری بدون شکل و پرکننده رگه‌ها حضور دارد. در مقاطع مورد مطالعه، کالکوسیت و

جدول ۱ - روابط پاراژنتیکی کانه‌های پهنه‌های مختلف در منطقه کانه‌زایی شده دالی

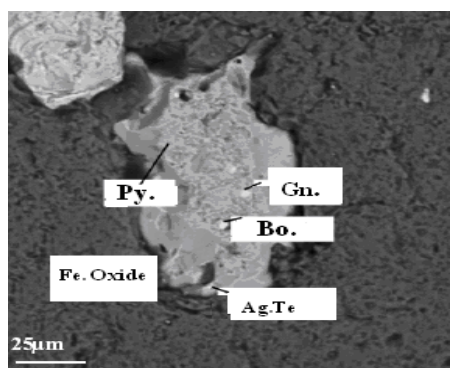
کانه	زون هیپوژن	زون سوپرژن	زون اکسید
کالکوپیریت			
پیریت			
بورنیت			
مگنتیت			
کالکوسیت			
کولیت			
هماتیت			
گوئیتیت			
ژاروسیت			
مالاکیت			
آزوریت			

دارای آهن فریک است که طی هوازگی کانی‌های سولفیدی آهن تشکیل می‌شود (Alpers and Brimhall, 1989). کانی‌های کالکوپیریت، پیریت،

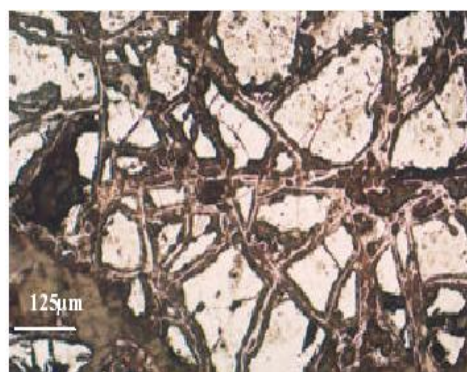
گوئیتیت از دیگر کانی‌های مشاهده شده در مقاطع صیقلی است که می‌تواند در نتیجه دگرسانی حرارت پایین هماتیت تشکیل شود. گوئیتیت معمولاً اولین کانی

SEM در دانشگاه بروکسل شناسایی و برای نخستین بار در این کانسر گزارش می‌شود. فرمول شیمیایی محاسبه شده این کانی  $(Pd_{0.74}Pt_{0.185})Te_{2.076}$  با نسبت عناصر استوکیومتری آن مطابقت می‌کند (شکل ۶ تا ۱۰ و جدول ۲).

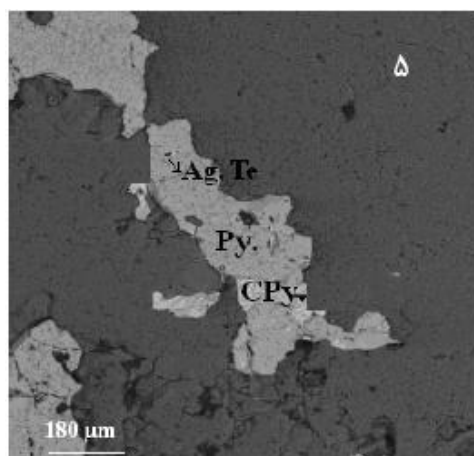
کالکوسیت و بورنیت از دیگر کانی‌های فلزی مشاهده شده در مقاطع است که گاه حاوی ادخال‌هایی از بیسموت، پلاتین و نقره هستند. از طرفی کالکوپیریت حاوی ادخال‌هایی از Pt-Pd-Te است که به‌عنوان کانی مرنسکیت ( $(Pd,Pt)Te_2$ ) توسط آنالیز



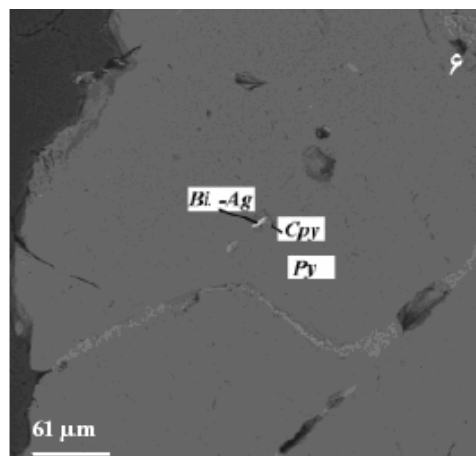
شکل ۶- ادخال گالن، بورنیت و تلورید نقره داخل پیریت (زمینه اکسید آهن)



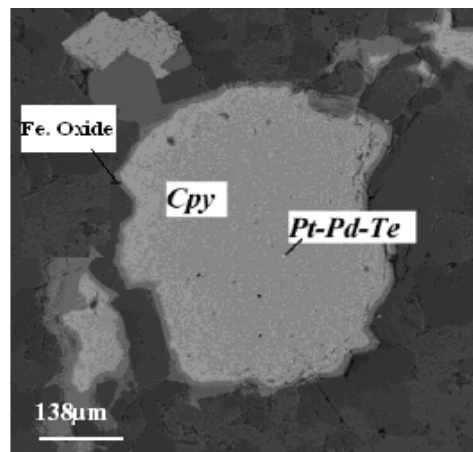
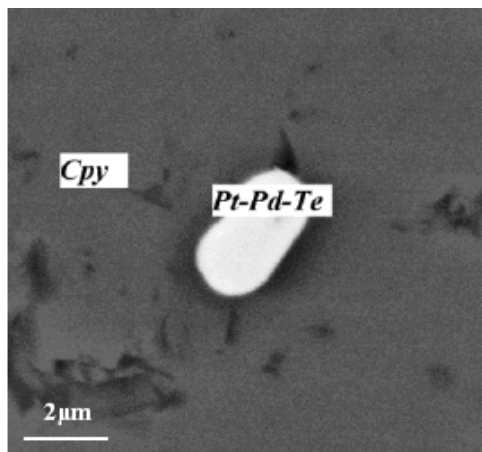
شکل ۵- بافت کاتاکلاستیک در مگنتیت



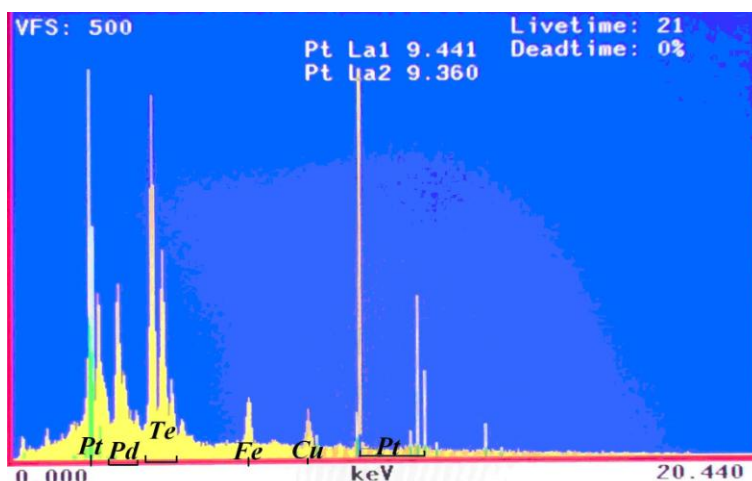
شکل ۸- ادخال بیسموت (Bi) - نقره (Ag) به همراه کالکوپیریت (پرکننده حفره) در زمینه پیریت



شکل ۷- جایگزینی پیریت توسط کالکوپیریت و حضور ادخال تلورید نقره در پیریت



شکل ۹- الف و ب) تصاویر SEM تهیه شده از کانی مرنسکیت (Me) در زمینه کالکوپیریت



شکل ۱۰- نمودار آنالیز کیفی از ادخال مرنسکیت در زمینه کالکوپیریت (آنالیز SEM)

جدول ۲- نتایج آنالیز EDX از کالکوپیریت و ادخال کانی مرنسکیت در داخل آن

Elements	Inclusion		Cpy	
	Atomic %	Wt %	Atomic %	Wt %
Te	60.92	69.78	0.0	0.0
S	-	-	58.09	42.61
Pd	21.85	20.73	0.0	0.0
Pt	5.44	9.49	0.11	0.48
Fe	-	-	22.03	28.15
Cu	-	-	19.77	28.75

بیگا (فیلیپین)، بوشچکول (قزاقستان)، الاسیت (بلغارستان) یافت شده‌اند (Berzina et al., 2007). با توجه به مطالعات تجربی، میزان زیادی از Pt و Pd توسط کمپلکس‌های کلریدی و توسط محلول‌های گرمابی در شرایط بالای فوگاسیته اکسیژن ( $\log f_{O_2} > -25$ ) و یا شرایط اسیدی ( $pH < 2$ ) در حرارت ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد حمل می‌شوند (Gammons et al., 1992). کانی‌های اصلی هیپوزن در منطقه شامل پیریت، کالکوپیریت و بورنیت است. کالکوپیریت و پیریت به صورت پراکنده و یا پرکننده رگچه‌ها مشاهده می‌شوند. بورنیت می‌تواند با کالکوپیریت و کالکوسیت به شکل‌های مختلف هم‌رشدی داشته باشد و یا جانشین کالکوپیریت شود (شکل ۱۱). خارج شدن آهن طی هوازدگی سوپرژن، افزایش غلظت مس از سطح به سمت پایین در اثر فرآیند شستشو و کاهش فوگاسیته سولفور باعث دگرسانی و تبدیل

از جمله کانسارهای مس پورفیری که کانی مرنسکیت از آن‌ها گزارش شده است می‌توان به کانسار مس-مولیبدن پورفیری روسیه (Berzina et al., 2007) و منگولیا (Vitaliy et al., 2001) اشاره نمود. نهشته‌های مس پورفیری غنی از طلا در محیط‌های جزایر قوسی در مقایسه با نهشته‌های محیط‌های حاشیه قاره‌ای دارای میزان بالاتری از Pt+Pd هستند (Tarkian et al., 1999). شایان ذکر است که نوع ماگما، سن زمین‌شناسی و ترکیب شیمیایی بر روی میزان این عناصر تأثیری ندارد (Tarkian et al., 1999). کانی‌های گروه پلاتین در نهشته‌های مس پورفیری در تعداد محدودی از کانسارها گزارش شده است. این کانی‌ها (اساساً مرنسکیت بدون بیسموت، گاهی اوقات محلول‌های جامد مرنسکیت-مونشئیت) به صورت انکلوزیون در کالکوپیریت، بورنیت و به ندرت در پیریت، در کانسارهایی همچون اسکوری (یونان)، سانتو توماس و

گاهی اوقات، پوسته‌هایی از کالکوپیریت بر روی کوولیت دیده می‌شود. مطالعات مختلف بر روی نهشته معدنی مورد بررسی مشخص نمود که این نهشته حامل طلا است (آیتی و همکاران، ۱۳۸۷). به‌منظور تشخیص دقیق‌تر طلای آزاد در مقاطع، از آنالیز میکروسکوپ الکترونی استفاده شد که حضور این عنصر را تأیید نمود. این بررسی‌ها نشان داد که اکثر کانی‌سازی مس در پهنه پتاسیک و کانی‌سازی طلا نیز در فاز همراه با دگرسانی پتاسیک و در مرحله بعدی همراه با استوک ورک‌های سیلیسی مربوط به این پهنه صورت گرفته است (آیتی و همکاران، ۱۳۸۷). در اکثر سیستم‌های مس پورفیری، طلا ارتباط نزدیکی با مس دارد و در اغلب اوقات در طول مراحل اولیه دگرسانی و کانه‌زایی، همراه مس است. بالاترین میزان مس و طلا معمولاً در قسمت مرکزی نهشته‌ها (پهنه پتاسیک) رخ می‌دهد. میزان طلا در سیالات کانسار ساز حرارت بالا، به‌علت قابلیت انحلال پذیری بالاتر آن، بیشتر است. در نهشته مورد بررسی همچون دیگر نهشته‌های مس پورفیری، طلا به‌صورت ادخال در سولفیدهای مس-آهن-سولفور و همچنین درون باطله سیلیسی مشاهده می‌شود (شکل‌های ۱۴ تا ۱۸).

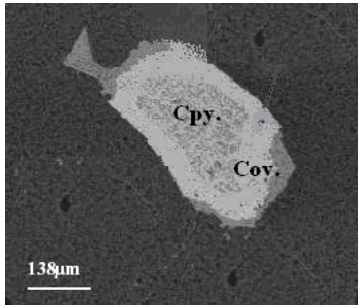
### مطالعه سیالات درگیر

مطالعه سیالات درگیر، ما را در بیان حقایقی از مراحل تشکیل نهشته‌های معدنی یاری می‌نماید (Roedder, 1984). مطالعه سیالات درگیر اولیه ثابت کرده است که بهترین وسیله تعیین دمای نهشته است. نبود رخ، شفافیت کانی و توانایی تبلور مجدد آسان، کانی کوارتز را به یک میزبان مناسب برای سیالات درگیر تبدیل کرده است (Walshe and Hobbs, 1999). بنابراین بررسی‌های ریزدماسنجی بر روی سیالات درگیر موجود در ۲۰ مقطع دو بر صیقل کوارتز مربوط به رگه‌ها و استوک ورک‌های مرتبط با کانه‌زایی منطقه انجام شد.

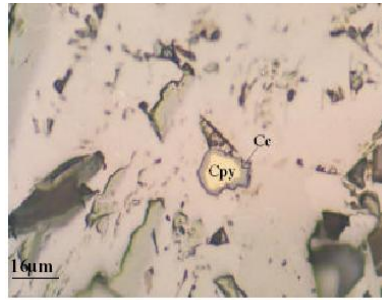
کالکوپیریت و بورنیت به کالکوسیت می‌شود که با رنگ خاکستری آبی، باقی‌مانده‌های کالکوپیریت را احاطه می‌کند (شکل ۱۲)، در حقیقت کالکوپیریت توسط کانی‌های ثانوی مس مانند کالکوسیت جایگزین می‌شود. سرد شدن، اختلاط سیالات، جوشش و واکنش سیال-سنگ نقش مهمی در رسوب کالکوپیریت و مس از سیالات گرمایی دارد. علاوه بر این، رقیق‌شدگی سیالات کانه‌زای شور نیز باعث رسوب مس از سیالات می‌شود (Ulrich et al., 2002). کالکوپیریت می‌تواند جایگزین پیریت (شکل ۷)، پیروتیت و اسفالریت شود و خود توسط هماتیت، مگنتیت به همراه تشکیل بورنیت یا کالکوسیت جایگزین شود (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). در اکثر موارد، کالکوپیریت یک کانی اولیه و هیپوژن است. در فرآیند سوپرژن و نیز در پهنه اکسیدان، هماتیت جانشین کالکوپیریت می‌شود. اکسیداسیون کالکوپیریت بستگی به شرایط محیط دارد. در بعضی موارد، هوازدگی، مستقیماً توسط ایجاد لیمونیت مشخص می‌شود. با وجود این، معمولاً یک لایه بسیار نازک از کالکوسیت یا کوولیت در ابتدا تشکیل می‌شود (شکل ۱۳). در طول این فرآیند، قسمت اصلی مس از کالکوپیریت خارج شده و در سطح یا زیر سطح ایستایی دوباره رسوب می‌کند. قسمتی از مس هم در قسمتی از کانسار که حاوی کربنات باشد (پهنه گوسان با گسترش محدود در منطقه مورد بررسی) به‌صورت مالاکیت و یا دیگر کانی‌هایی از این قبیل، باقی می‌ماند. در کل می‌توان گفت که کانی‌های غنی از مس، از کانی‌های فقیر از مس به‌صورت توالی زیر تشکیل می‌شوند:

کالکوپیریت ← بورنیت ← کوولیت ← کالکوسیت  
 دو عضو میانی (بورنیت و کوولیت) اغلب اوقات، غایب هستند. گاهی اوقات و در مواقعی که آب و محلول‌های مورد نیاز برای این واکنش‌ها، غنی از آهن و فقیر از مس باشند، حالت عکس رخ می‌دهد. تحت این شرایط، برای مثال می‌توان پوسته‌هایی از کالکوپیریت را در شکستگی‌های موجود در بورنیت مشاهده کرد یا

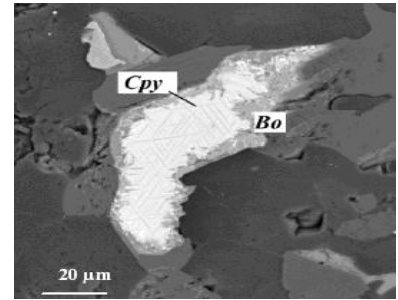




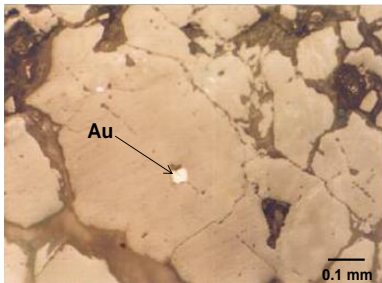
شکل ۱۳- جایگزین شدن کالکوپیریت توسط کولیت



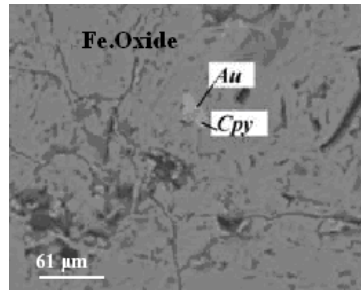
شکل ۱۲- جانشینی کالکوپیریت توسط کالکوسیت (Cc) در پهنه غنی سازی ثانویه (شرایط هوازدگی سوپرژن)



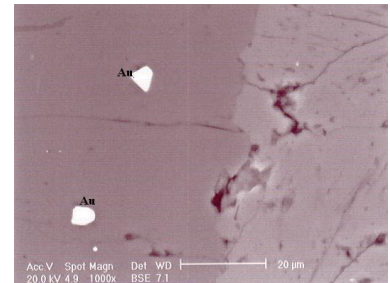
شکل ۱۱- اکسولوشن تیغه‌های کالکوپیریت در بورنیت



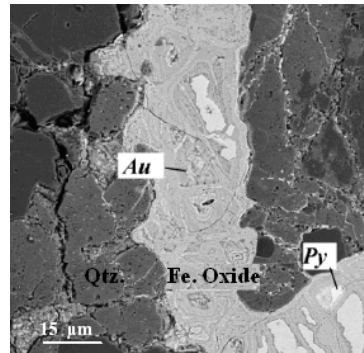
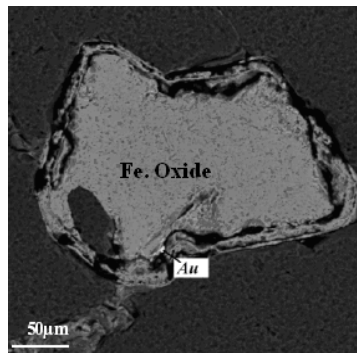
شکل ۱۷- حضور طلا به صورت ادخال در باطله سیلیسی



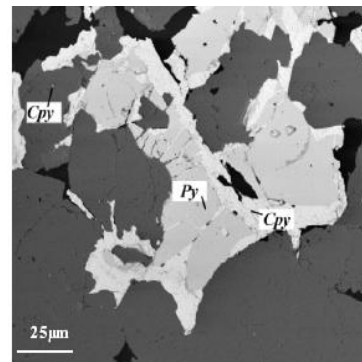
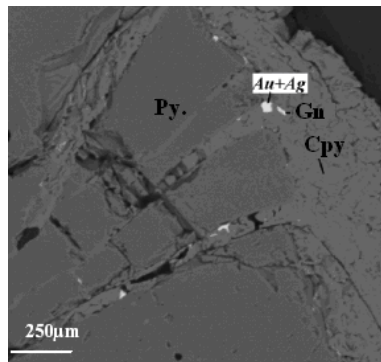
شکل ۱۵- حضور ادخال طلا در کالکوپیریت در زمینه‌ای از اکسید آهن درون رگه سیلیسی



شکل ۱۴- حضور طلا در زمینه سیلیسی (تصویر SEM)



شکل ۱۶- الف و ب) ادخال طلا درون اکسید آهن در زمینه سیلیسی



شکل ۱۸- الف و ب) همیافتی پیریت و کالکوپیریت (جایگزینی پیریت توسط کالکوپیریت) و حضور ادخال‌هایی از طلا، نقره و گالن درون کالکوپیریت

- ۲- سیالات درگیر نوع  $L+V+S$ : سیالات درگیر سه فازه
- ۳- سیالات درگیر نوع  $L+V+S1+S2$ : سیالات درگیر چند فازه

### مطالعات ریزدماسنجی

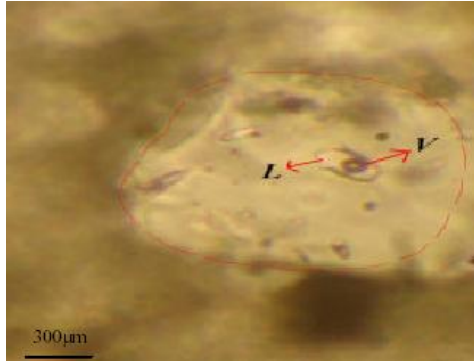
دماسنجی سیالات درگیر در مقیاس میکروسکوپی در بخش گرمایش انجام شد. در این مرحله با انتخاب سیالات نسبتاً بزرگ و قابل کار، مشخصات سیال مانند شکل، نوع سیال (اولیه یا ثانویه)، ترکیب فازی (جامد-مایع-گاز) بررسی شد و عکسبرداری در مواردی که امکان پذیر بود، انجام شد. سپس صورت پذیرفت. در مرحله مطالعه گرمایش سیالات درگیر، برای به دست آوردن دمای همگن شدن سیال درگیر، نمونه به قدری حرارت داده شد تا سیال همگن و یکدست شود. در نمونه‌های اندازه‌گیری شده، زمانی که حباب گاز ناپدید شد، دما را یادداشت کرده که این همان دمای همگن شدن (Th) است که با کمی اغماض همان درجه حرارت تشکیل کانی است (Roedder, 1984). تقریباً اکثر سیالات مورد مطالعه به فاز مایع همگن شدند. گاهی در هنگام حرارت دادن، حتی در آخرین حد ظرفیت حرارت‌دهی دستگاه، هیچ‌گونه تغییری در حجم حباب گاز به وجود نیامده و در درجه حرارت بالای ۶۰۰ درجه سانتیگراد هم حباب‌ها ناپدید نشدند (جدول ۳). در سیالات درگیر حاوی بلور دختره‌الیت، در آغاز افزایش حرارت، این بلور شروع به گرد شدن می‌کند و این هم‌زمان با کاهش حجم حباب است. در هنگام حرارت دادن، دو نوع همگن شدن (هموژنی‌زاسیون) رخ می‌دهد: ۱- مایع بخش اعظم میان‌بار را فراگرفته و حباب گاز در خور توجه نیست. پس از گرما دادن، حجم مایع بیشتر می‌شود و حباب‌های گاز کوچک‌تر شده و در

### بررسی ویژگی‌های سیالات درگیر در محدوده مورد مطالعه

در نمونه‌های مورد مطالعه اندازه سیالات درگیر بین حدود ۵ تا ۱۰ میکرون متغیر است. بزرگ‌ترین سیالات درگیر از نوع سه فازی (جامد-مایع-گاز) هستند اما از فراوانی کمتری نسبت به سیالات درگیر دو فازی برخوردارند. با بررسی‌های میکروسکوپی مشخص شد که فراوان‌ترین سیالات سه فازی منطبق بر بزرگ‌ترین اندازه‌های سیالات (۵ تا ۱۰ میکرون) و فراوان‌ترین سیالات دو فازی منطبق با کوچک‌ترین اندازه‌های سیالات (در حد ۵ میکرون) هستند. در مطالعه اخیر، سیالات دو فازی بیشتر به شکل کروی، استوانه‌ای و نامنظم هستند. سیالات سه فازی بیشتر به شکل‌های چندضلعی، بیضوی و نامنظم دیده می‌شوند. در نمونه‌های مورد مطالعه، اکثر سیالات درگیر، دو فازی (غنی از مایع) و چند فازی همراه با بخار (مایع+بخار+هماتیت) شناسایی بر اساس خصوصیات ظاهری مانند رنگ و شکل و هالیت) و گاهی تک فازی غنی از گاز هستند. در نمونه‌های کوارتز مورد مطالعه انواع سیالات درگیر اولیه و منفرد و سیالات درگیر ثانویه دیده می‌شوند (شکل‌های ۱۹ تا ۲۴). نسبت فاز مایع به گاز در دو فازی‌ها متفاوت است. گاهی حباب گاز بسیار کوچک و گاهی اکثر حجم سیال درگیر را در بر گرفته است که تشکیل این سیالات درگیر را در دمای بالا نشان می‌دهند. سیالات درگیر ثانویه اغلب ریز و به صورت ردیفی در یک امتداد (راستای صفحات شکستگی کوارتز) قرار دارند (شکل ۲۴) و نسبت‌های فازی آن‌ها متفاوت است. سیالات درگیر اولیه رگه‌های کوارتز در مشاهدات میکروسکوپی، کامل‌تر، شکیل‌تر و نیز درشت‌تر از انواع ثانویه به نظر می‌آیند. از مطالعه بلورهای کوارتز در رگه‌های منطقه مورد مطالعه، سه نوع سیال درگیر شناسایی شده است.

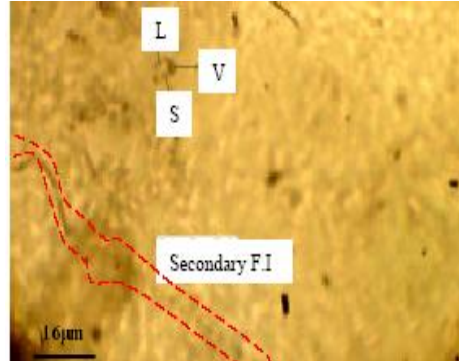
- ۱- سیالات درگیر نوع  $L+V$ : سیالات درگیر دو فازه (High vapour, High liquid)

در فاز مایع می‌نامند، ۲- در نوع دوم همگن‌شدن، حباب گاز بزرگ و بخش مایع کوچک هستند.

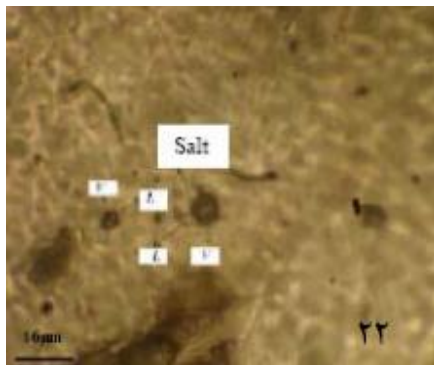


شکل ۲۰- سیالات درگیر دو فاز غنی از مایع ( $L > V$ )

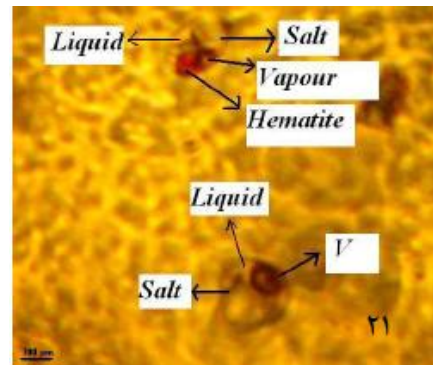
نهایت ناپدید می‌شود و تمام حجم درون سیال درگیر را مایع پر می‌کند. این پدیده را همگن‌شدن



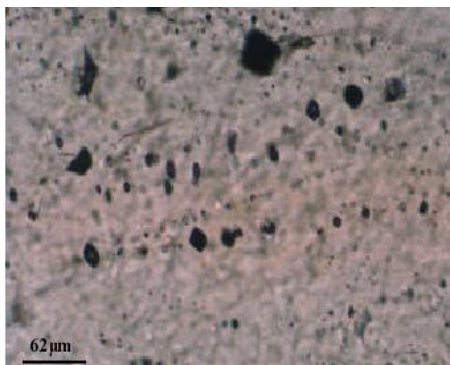
شکل ۱۹- سیال درگیر اولیه ( $L > V > S$ ) و ثانویه



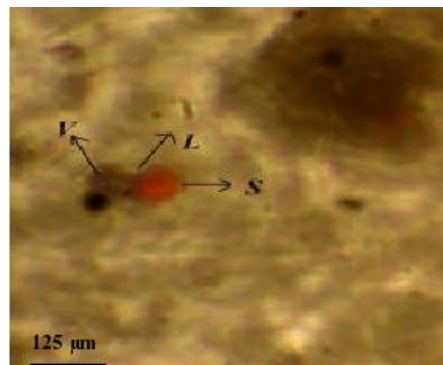
شکل ۲۲- سیالات درگیر دو فاز ( $L+V$ ) و سه فاز ( $L+V+S$ ) با حباب گاز بزرگ ( $V > L$ ) (نشانه جوشش)



شکل ۲۱- همجواری سیالات درگیر سه فاز (مایع+گاز+نمک) و چندفازی (مایع، گاز، هماتیت (رنگ قرمز) با بلورهای درشتی از نمک)



شکل ۲۴- سیالات درگیر ثانویه ریز با نسبت‌های فازی متفاوت



شکل ۲۳- بلور هماتیت در سیال سه فاز همراه حباب بزرگ گاز

سیلویت است. حضور بلورهای دختر با نمک‌گونگی بالا مانند هالیت (معمولی‌ترین بلور دختر) و کم و بیش سیلویت می‌تواند حاکی از حضور محلول‌های گرمابی غنی از کمپلکس‌های کلرید باشد که این کمپلکس‌ها

این نوع پدیده را همگن‌شدن در فاز گاز می‌نامند. در مطالعه نمونه‌های منطقه مورد بررسی حالت همگن‌شدن سیالات درگیر اکثراً به صورت مایع است. اکثر بلورهای دختر مشاهده شده شامل هالیت و هماتیت و گاهی

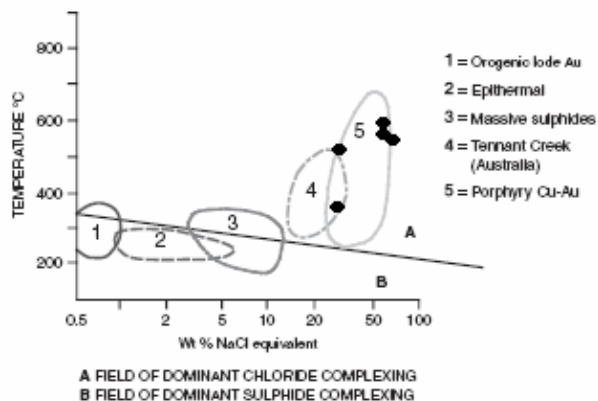
حالتی که بخار با مایع به حال تعادل بوده است. در نتیجه این جوشش، قسمتی از مس موجود در محلول می‌تواند اکثراً به صورت کالکوپیریت نهشته شود. درجه حرارت تشکیل آن‌ها بین بیش‌تر از ۶۰۰ درجه سانتیگراد تا حدود ۳۶۰ درجه سانتیگراد متغیر است. بیش‌ترین فراوانی درجه همگن شدن مربوط به دمای حدود ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد است که به طور تقریبی منطبق بر بالاترین دماهاست. شواهد بسیار محکمی وجود دارد که بیانگر فرآیند جوشش در کانسارهای مس پورفیری از جمله در منطقه مورد مطالعه است. این شواهد نشان می‌دهد که جوشش، بخش مهمی از فرآیندهای کانسارسازی را تشکیل می‌دهد، به طوری که به نظر می‌رسد بایستی ارتباط زمانی و مکانی مابین فرآیند جوشش محلول و تشکیل کانسار وجود داشته باشد. شرایط جدید فیزیکوشیمیایی، تغییرات در pH و درجه حرارت در گذر از شرایط لیتوستاتیک به هیدروستاتیک، که همراه مرحله جوشش اتفاق می‌افتد (Cunningham, 1978)، به احتمال زیاد سبب ترسیب کوارتز و انواع سولفیدها می‌شود. حضور فراوان استوک ورک‌ها و رگه‌های سیلیسی در منطقه و همراهی رگه‌های مگنتیت، کوارتز و آثاری از پیریت و کالکوپیریت به صورت پراکنده یا رگه‌ای مثال بارز این رخداد است.

در تصویر ۲۷ فراوانی درجه همگن شدن نسبت به دو فاز یا سه فاز بودن سیالات درگیر در نمونه‌های منطقه آورده شده است. سیالات با شوری (نمک‌گونی) کم در دمای پایین و سیالات با شوری زیاد در دماهای بالا همگن می‌شوند. همزیستی سیالات درگیر شور با سیالات درگیر غنی از بخار نشان دهنده جوشش با حرارت بالاست. نتایج مطالعات سیالات درگیر در نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که سیالات درگیر با نمک‌گونی بالا در پهنه پتاسیک و در محدوده مرکزی کانسار به وجود می‌آیند در حالی که سیالات درگیر با نمک‌گونی پایین تا متوسط و درجه حرارت

باعث انتقال فلزات پایه می‌شوند (شکل ۲۵). در نمونه‌هایی که شوری بالاتری دارند، اندازه بلور بزرگتر است. سیالات درگیر مورد مطالعه با توجه به حضور هالیت، شوری نسبتاً بالایی دارند (بالای ۲۶ درصد وزنی نمک طعام) که جهت تشکیل کانسارهای اقتصادی مس پورفیری مهم هستند. محلول‌های گرمایی غنی از کلرورسدیم قادرند مس را از ماگما جدا کنند. برای سیالات درگیری که حاوی هالیت هستند، جهت تعیین شوری نیازی به روش انجماد و ذوب مجدد نیست، بلکه برای تعیین شوری می‌توان از دمای انحلال هالیت استفاده نمود (شکل ۲۶ و جدول ۴). در نمونه‌های مورد بررسی، متوسط شوری در نمونه‌های اندازه‌گیری شده ۴۶/۵ درصد وزنی نمک طعام است که بسیار بالا است. حداکثر شوری در سیالات ۷۱ درصد است. مثال‌هایی از تعیین شوری سیال با استفاده از دمای ذوب هالیت در نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۵ خلاصه شده است. الگوی توزیع سیالات درگیر از الگوی پهنه‌بندی دگرسانی - کانی‌زایی نهشته پورفیری تبعیت می‌کند. مطالعه سیالات درگیر در منطقه که بر روی نمونه‌های پهنه پتاسیک و فیلیک انجام گرفت، کاهشی را در درجه حرارت و شوری سیالات از پهنه پتاسیک به سمت پهنه فیلیک نشان می‌دهد. درجه حرارت محلول‌ها در پهنه پتاسیک از حدود ۳۵۰ تا ۶۵۰ درجه سانتیگراد در تغییر است. سیالات به دام افتاده در کانی کوارتز از دامنه وسیع دمای یکنواخت‌شدگی برخوردار هستند. بیش‌ترین درجه حرارت همگن شدن در نمونه‌های مورد مطالعه، مربوط به دمای حدود ۶۰۰ درجه سانتیگراد (پهنه پتاسیک) و کم‌ترین درجه حرارت همگن شدن مربوط به دمای حدود ۲۰۰ درجه سانتیگراد (پهنه فیلیک) است (جدول ۳). در چندین نمونه مربوط به پهنه دگرسانی فیلیک، سیالات درگیر اکثراً ریز و تک‌فازی (L) تا دو فازی (L+S) هستند. همجواری سیالات درگیر چندفازه با سیالات درگیر غنی از گاز، مبین حبس شدن سیالات در نقطه جوشش است، یعنی در

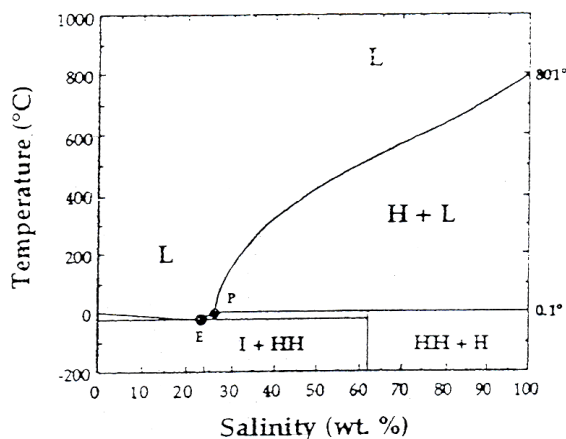
همگن شدن پایین در پهنه‌های فیلیک و آرژیلیک و یا حتی در حاشیه توده معدنی به وجود می‌آیند. در حقیقت، حوزه فعالیت محلول‌های با منشأ ماگماتیک در هسته پهنه کانه‌زایی شده و حوزه فعالیت محلول‌های با منشأ جوی در حاشیه این پهنه است (Takenouchi, 1980).

همگن شدن پایین در پهنه‌های فیلیک و آرژیلیک و یا حتی در حاشیه توده معدنی به وجود می‌آیند. در حقیقت، حوزه فعالیت محلول‌های با منشأ ماگماتیک در

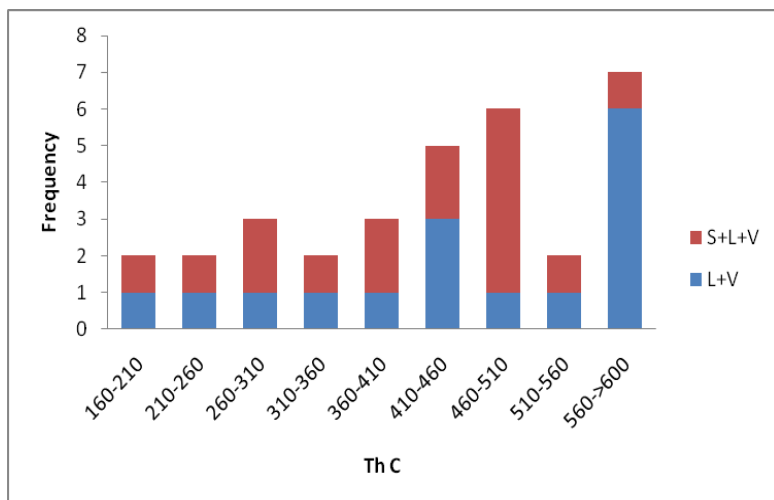


1) Archaean orogenic Au; 2) Epithermal Au-Ag; 3) Volcanogenic massive sulphide; 4) Tennant Creek Au-Cu, Australia; 5) Porphyry Cu-Au (large et al., 1988)

شکل ۲۵- نمودار دمای همگن شدن - شوری سیالات درگیر در سیستم‌های کانسار ساز گرمایی (large et al., 1988)



شکل ۲۶- روابط فاز اشباع از بخار در سیستم NaCl-H<sub>2</sub>O در دمای بالا (Bodnar and Roedder, 1997)



شکل ۲۷- فراوانی داده‌های حاصل از درجه همگن شدن نسبت به سیالات دو فازی و سه فازی بر حسب درجه سانتیگراد

جدول ۳- خلاصه‌ای از درجه حرارت‌های همگن شدن در سیالات درگیر مطالعه شده (پهنه‌های پتاسیک و فیلیک کانسار دالی)

ردیف	شماره نمونه	Th °C	NaCl %wt	تعداد و نوع فازها	اولیه / ثانویه / کاذب	ملاحظات
۱	D0	510	27.8	L+V+S1+S2	اولیه	پهنه دگرسانی پتاسیک
۲	D1	440	-	L+V+S	اولیه	پتاسیک
۳	D1	440	-	L+V+S	اولیه	پتاسیک
۴	DII	600<	59.6	L+V+S	اولیه	پتاسیک
۵	DII	340	-	L+V+S	اولیه	پتاسیک
۶	D.T	400	-	L+V+S	اولیه	پتاسیک
۷	D.T	430	-	L+V+S	اولیه	پتاسیک
۸	DT1	600<	-	L+V+S	اولیه	پتاسیک
۹	DT1	600<	-	L+V+S	اولیه	پتاسیک
۱۰	DT2	570	68.2	L+V+S	اولیه	پتاسیک
۱۱	DT2	570	71	L+V+S	اولیه	پتاسیک
۱۲	DT3	466	-	L+V	اولیه	پتاسیک
۱۳	DT4	470	65.3	L+V+S	اولیه	پتاسیک
۱۴	DT5	470	-	L+V	اولیه	پتاسیک
۱۵	DT5	483	-	L+V	اولیه	پتاسیک
۱۶	DT6	440	-	L+V	اولیه	پتاسیک
۱۷	DT6	440	-	L+V	اولیه	پتاسیک
۱۸	DT7	360	28.45	L+V+S	اولیه	پتاسیک
۱۹	DT7	360	-	L+V	اولیه	پتاسیک
۲۰	Ph1	305	-	L+V	اولیه	پهنه دگرسانی فیلیک
۲۱	Ph1	305	26.8	L+V+S	اولیه	فیلیک
۲۲	Ph2	305	-	L+V	اولیه	فیلیک
۲۳	Ph2	305	-	L+V	اولیه	فیلیک
۲۴	Ph3	300	-	L+V	اولیه	فیلیک
۲۵	Ph4	270	26.56	L+V+S	اولیه	فیلیک
۲۶	Ph5	270	-	L+V	اولیه	فیلیک
۲۷	Ph6	165	-	L+V	اولیه	فیلیک
۲۸	Ph7	184	-	L+V	اولیه	فیلیک
۲۹	Ph7	184	-	L+V	اولیه	فیلیک
۳۰	Ph8	184	-	L+V	اولیه	فیلیک

جدول ۴- محاسبه شوری سیال با استفاده از دمای ذوب (هموژن شدن) هالیت (Bodnar et al., 1997)

Tm halite	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	26.2	26.3	26.4	26.5	26.7	26.8	27	27.2	27.4	27.7
100	28.2	28.3	28.6	28.9	29	29.7	30.1	30.5	30.9	31.4
200	31.9	32.4	32.9	33.5	34.1	34.7	35.3	36	36.7	37.4
300	38.2	38.9	39.8	40.6	41.5	42.4	43.3	44.3	45.3	46.4
400	47.4	48.5	49.7	50.8	52	53.3	54.5	55.8	57.1	58.4
500	59.8	61.1	62.5	63.9	65.3	66.8	68.2	69.6	71.1	72.5
600	74	75.4	76.9	78.3	79.7	81.1	82.5	83.9	85.3	86.6
700	87.9	89.2	90.5	91.8	93	94.2	95.4	96.6	97.7	98.9
800	100									

جدول ۵- تعیین درصد شوری (با استفاده از دمای ذوب هالیت) در نمونه‌های مربوط به پهنه پتاسیک و فیلیک

ردیف	تعداد فازها	Th °C	Tm NaCl	NaCl %wt
1	3	340	115	28.45
2	3	510	97	27.8
3	3	570	560	68.2
4	3	570	579	71
5	3	600	498	59.6
6	3	305	50	26.8
7	3	270	35	26.56

## مطالعه سیالات درگیر در کانسارهای مس پورفیری

### و تعیین نوع ذخیره

مطالعه سیالات درگیر زیادی بر روی سیستم‌های مس پورفیری انجام شده است. این مطالعات نقش مهمی در تعیین منشأ سیالات و فلزات در سیستم‌های مس پورفیری بازی می‌کنند. امروزه معمولاً پذیرفته شده است که سیالات و احتمالاً اغلب فلزات مورد نیاز برای تشکیل کانسارهای پورفیری از یک میزبان نفوذی مشتق شده‌اند. بر اساس مطالعه سیالات درگیر، کانسارهای مس پورفیری از نظر دمایی معمولاً در محدوده ۲۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد و شوری در محدوده ۲۵ تا ۷۰ درصد وزنی معادل نمک طعام واقع می‌شوند (Walshe and Hobbs, 1999). در شکل ۲۵ محدوده ذخایر معدنی بر اساس داده‌های دمای همگن شدن و شوری نشان داده شده‌اند که این محدوده‌ها منعکس کننده ویژگی‌های اصلی سیالات درگیر در آن‌هاست. بر اساس مقایسه این نمودار با دمای شوری‌های حاصل از مطالعات سیالات درگیر، ذخیره مورد مطالعه جزو ذخایر نوع پورفیری است (شکل ۲۵). بر مبنای بررسی‌های انجام شده، گزینه احتمالی زیر را در خصوص حضور طلا به صورت ادخال در ساختار سولفیدها در محدوده مورد مطالعه می‌توان بیان نمود: با توجه به مطالعات سیالات درگیر در نمونه‌های مربوط به منطقه معدنی مورد مطالعه (وجود حرارت بالا در پهنه پتاسیک) و با توجه به همبستگی مثبت بین مس و طلا (آیتی و همکاران، ۱۳۸۷) می‌توان چنین اظهار داشت که طلا همراه با محلول‌های کانه‌ساز توسط کمپلکس‌های کلریدی و شاید بی‌سولفیدی حمل شده و با تغییرات شرایط فیزیکوشیمیایی محیط و محلول، از جمله کاهش حرارت، فشار، رخداد جوشش، کاهش فوگاسیته سولفور (به‌علت نهشته شدن کانی‌های سولفیدی)، کمپلکس‌های حامل این عنصر ناپایدار شده و بنابراین طلا آزاد و وارد کانی‌های سولفیدی شده است

و همراه آن‌ها رسوب می‌کند. به عبارتی می‌توان بیان کرد که حضور طلا در ساختار کالکوپیریت و همچنین به صورت ادخال‌های آزاد در این نهشته، به‌علت جانمایی طلا به جای مس در سولفیدهای نسبتاً حرارت بالای مس-آهن-سولفور است که با کاهش حرارت از حدود بیش از ۶۰۰ درجه سانتیگراد به حدود ۲۵۰ درجه سانتیگراد، طلا از ساختار کالکوپیریت آزاد و به صورت ادخال درون آن مشاهده می‌شود. از طرفی در مقاطع صیقلی مطالعه شده، ادخال‌های طلا درون باطله سیلیسی هم مشاهده می‌شود (شکل‌های ۱۵ تا ۱۷).

Kesler و همکاران (۲۰۰۲) بر این باور هستند که طلا ممکن است از محلول جامدهای مس-آهن-سولفور توسط محلول‌های کانسارساز حرارت پایین و تأخیری، جدا شود. این فرآیند می‌تواند به آزاد شدن ذرات و دانه‌های طلا و گسترش آن در کل مجموعه کانسار و یا حتی تمرکز آن در بیرون از پهنه کانسارسازی شده منجر شود. احتمالاً این فرآیند می‌تواند حضور طلا به صورت ذرات آزاد درون رگچه‌های سیلیسی در اطراف نهشته معدنی مورد بررسی را توجیه نماید.

### نتیجه‌گیری

در منطقه کانه‌زایی مورد بررسی، پهنه اکسید با مجموعه کانی‌هایی همچون هماتیت، گوتیت، ژاروسیت، مگنتیت، مالاکیت و آزوریت، پهنه سوپرژن با مجموعه کانی‌هایی همچون کالکوسیت، کوولیت، پیریت و پهنه هیپوژن با کانی‌هایی مانند بورنیت، کالکوپیریت، پیریت و مگنتیت مشخص می‌شوند. وجود نفوذی‌های پورفیری فلسیک با ترکیب حدواسط تا اسیدی، دگرسانی‌های گرمایی از نوع پتاسیک، فلیک و پروپیلیتیک، حضور فراوان رگه‌ها و استوک ورک‌های کوارتز-مگنتیت، حضور اکسیدهای آهن، مشاهده کانی کالکوپیریت

نیز در فاز همراه با دگرسانی پتاسیک و در مرحله بعدی همراه با استوک ورک‌های سیلیسی مربوط به این پهنه رخ داده است. بالاترین میزان مس و طلا معمولاً در قسمت مرکزی نهشته‌ها (پهنه پتاسیک) رخ می‌دهد. یکی از پدیده‌هایی که هنگام نفوذ محلول‌های کانه‌ساز به درون سنگ‌های میزبان در منطقه باعث عدم پایداری کمپلکس‌ها شده، پدیده جوشش است. شواهدی همچون همسان شدن بعضی از سیالات درگیر به صورت فاز گاز و ترکیدگی برخی از سیالات درگیر در هنگام عمل گرمایش قبل از یکنواخت شدن، دلالت بر رخداد پدیده جوشش - در اثر کاهش فشار در درون گسل‌ها و پهنه‌های برشی کانه‌زایی شده نهشته مورد مطالعه و یا غالب شدن فشار هیدروستاتیک بر لیتوستاتیک - دارد. از طرفی کاهش درجه حرارت و فشار می‌تواند از عوامل مهم برای کانه‌زایی در این نهشته باشد.

### سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از راهنمایی‌های آقای دکتر طباطبایی عضو هیأت علمی دانشکده معدن دانشگاه صنعتی اصفهان تشکر و قدردانی نمایند.

به صورت پراکنده در مغزه‌های حفاری، عیار بالا و همبستگی معنی‌دار و مثبت دو عنصر مس و طلا از جمله دلایل مبنی بر حضور کانسار مس پورفیری غنی از طلا در منطقه است. در نهشته معدنی مورد بررسی، طلا به صورت دانه‌های آزاد در فازهای سولفیدی همچون کالکوپیریت و نیز در زمینه اکسید آهن و کوارتز دیده می‌شود. مطالعات سیالات درگیر در نمونه‌های کوارتزی حاصل از سیال کانه‌ساز، دمای بین ۱۸۰ تا بیش از ۶۰۰ درجه سانتیگراد و شوری تا ۷۰ درصد بر حسب نمک طعام و کاهش درجه حرارت و شوری سیالات از پهنه پتاسیک به سمت پهنه فیلیک را مشخص می‌نماید. با توجه به مطالعات سیالات درگیر در نمونه‌های مربوط به منطقه معدنی مورد مطالعه و با توجه به همبستگی مثبت بین مس و طلا می‌توان چنین اظهار داشت که طلا همراه با محلول‌های کانه‌ساز توسط کمپلکس‌های کلریدی و بی‌سولفیدی حمل شده و با تغییرات شرایط فیزیکوشیمیایی محیط و محلول، کمپلکس‌های حامل این عنصر ناپایدار شده و بنابراین طلا آزاد شده و وارد کانی‌های سولفیدی شده و همراه آن‌ها رسوب می‌کند. بررسی‌ها نشان داد که اکثر کانی‌سازی مس در پهنه پتاسیک و کانی‌سازی طلا

### منابع

- آیتی، ف.، اسدی، ه.، نقره‌ئیان، م. و خلیلی، م. (۱۳۸۷) گزارش مقدماتی از اکتشاف مس پورفیری در استان مرکزی. مجله علمی - پژوهشی دانشگاه اصفهان ۵: ۲۷۷-۲۹۹.
- آیتی، ف. (۱۳۸۸) ماگماتیسم نئوژن در شمال شرق اراک و آلتراسیون‌های گرمایی وابسته. پایان‌نامه دکتری، دانشگاه اصفهان، ایران.
- امامی، م. (۱۳۷۱) شرح نقشه زمین‌شناسی چهارگوش قم، مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰. سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور، تهران.
- Alpers, C. N. and Brimhall, G. H. (1989) Paleohydrologic evolution and geochemical dynamics of cumulative supergene metal enrichment at La Escondida, Atacama Desert, Northern Chile. *Economic Geology* 84: 229-251.
- Amidi, S. M. (1975) Contribution a' l'etude stratigraphique, petrologique et petrographique des roches magmatiques de la region Natanz-Nain-Surk (Iran central). Ph.D. Thesis, University of Grenoble, France.



- Ayati, F., Yavuz, F., Noghreyan, M., Asadi Haroni, H. and Yavuz, R. (2008) Chemical characteristics and composition of hydrothermal biotite from the Dalli porphyry copper prospect, Arak, central province of Iran. *Journal of Mineralogy and petrology* 94: 107-122.
- Berzina, A. N., Sotnikov, V. I., Economou-Eliopoulos, M. and Eliopoulos, D. G. (2007) First finding of merenskyite (Pd, Pt)Te<sub>2</sub> in porphyry Cu-Mo ores in Russia. *Russian Geology and Geophysics* 48: 656-658.
- Bodnar, R. J. and Roedder, E. (1997) Fluid inclusion studies of hydrothermal ore deposits, In: Barnes, H. L. (Ed.): *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. John Wiley & Sons, Inc., New York. 3<sup>rd</sup> edition 657-698.
- Cunningham, C. G. (1978) Pressure gradients and boiling as mechanisms for localizing ore in porphyry systems. *Journal of Research of the US Geological Survey* 6: 745-754.
- Forster, H. (1978) Continental drift in Iran in relation to the Afar structure. In: Pilger, A. and Rosler, A. (Eds.) *Afar between continental and oceanic rifting*. Schweizerbartsche Verlags buch handlung, Stuttgart 182-190.
- Gammons, C. H., Bloom, M. S. and Yu, Y. (1992) Experimental investigation of the hydrothermal geochemistry of platinum and palladium: I. Solubility of platinum and palladium sulphide minerals in NaCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions at 300 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56: 3881-3894.
- 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.
- Large, R. R., Bull, S. W., Cooke, D. R. and McGoldrick, P. J. (1998) A genetic model for the HYC deposit, Australia, based on regional sedimentology, geochemistry and sulfide-sediment relationship. *Economic Geology* 93:1345-1569.
- Roedder, E. (1984) Fluid inclusion review in mineralogy. Mineralogical Society of America, Book Crafters, Inc., Chelsea, Michigan.
- 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. and Stribrny, B. (1999) Platinum-group elements in porphyry copper deposits: a reconnaissance study. *Mineralogy and Petrology* 65: 161-183.
- Ulrich, T., Guenther, D. and Heinrich, C. A. (2002) The evolution of a porphyry Cu-Au deposits, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions; Bajo de la Alumbrera, Argentina. *Economic Geology* 96: 1743-1774.
- Vitaliy, I. S., Berzina, A. N., Eliopoulos, M. E. and Eliopoulos, D. G. (2001) Palladium, platinum and gold distribution in porphyry Cu-Mo deposits of Russia and Mongolia. *Ore Geology Reviews* 18: 95-111.
- 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.



## **Application of mineralography and fluid inclusion data to determine the formation conditions of porphyry copper deposit, NE Arak**

**Farimah Ayati <sup>1\*</sup>, Houshang Asadi Harouni <sup>2</sup>, Hashem Bagheri <sup>3</sup>  
and Mahin Mansouri Isfahani <sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Department of Geology, Payame Noor University, 19395-4697 Tehran, I. R. of Iran

<sup>2</sup> Department of Mining, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

<sup>3</sup> Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

### **Abstract**

The Dalli area located northeast of Arak and lies in the Urumieh-Dokhtar magmatic belt. The mineralized area is hosted by volcanic-subvolcanic bodies comprising of diorite-quartz diorite andesite to dacite rocks that intruded into the andesite and pyroclastic rocks. Three main alteration zones including potassic (secondary biotite, magnetite and secondary orthoclase), phyllic (sericite, quartz and pyrite) and propylitic (calcite, chlorite and epidote) are recognized in this area. The geological, geochemical and fluid inclusion investigations show that mineralization in the studied area is of gold-rich porphyry copper type. Gold is observed as an inclusion within chalcopyrite and silicic veins. Fluid inclusion studies in silicic veins show that the homogenization temperature and the salinity is about 180 to 600 °C and 26 to 70% wt NaCl respectively. The temperature and salinity of fluids decreases from potassic to phyllic alteration zone consistent with other Cu porphyry deposits in the world.

**Key words:** Fluid inclusion, Porphyry copper, Arak