

تکامل ماگمایی - گرمایی سیال کانه‌دار در کانسار مس - طلای پورفیری دالی با استفاده از شیمی کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز

هوشنگ پورکاسب^{1*}، علیرضا زراسوندی¹، مدینه ساعد¹ و علیرضا داوودیان دهکردی²

(1) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

(2) دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

دریافت مقاله: 1394/09/04، پذیرش: 1394/12/03

چکیده

کانسار مس - طلای پورفیری دالی در غرب روستای راهه، شهرستان دلیجان و در بخش مرکزی کمرند ماگمایی ارومیه - دختر قرار دارد و ناشی از نفوذ توده‌هایی با ترکیب دیوریت و کوارتز دیوریت به سن میوسن در سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیت تا آندزیت بازالت پورفیری الیگو - میوسن است. دگرسانی‌های پتاسیک، آرژلیک، پروپلیتیک و به‌طور محلی فلیک باعث افزایش شدت کانه‌زایی در بعضی مناطق شده‌اند. هدف از این پژوهش، بررسی ترکیب شیمیایی کانی‌های مؤثر بر کانه‌زایی و تکامل سیال کانه‌دار در ماگمای مولد و تأثیر آن در توان کانه‌زایی کانسار مورد نظر است. برای این منظور کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز در سنگ‌های کانه‌دار با استفاده از روش ریزپردازش الکترونی مورد بررسی قرار گرفتند و داده‌های به‌دست آمده با بررسی میان‌بارهای سیال در رگه‌های دخیل در کانه‌زایی تلفیق شدند. نتایج حاصل از بررسی‌های ریزپردازش الکترونی¹ نشان داد که آمفیبول‌های ماگمایی، از نوع کلسیک و در گستره منیزو هورنبلند، ادنیت، منیزو هستینگزیت و چرماکیت است. همچنین پلاژیوکلازها در گستره آندزین و لابرادوریت هستند. با توجه به دما-فشار سنجی، آمفیبول‌ها در فشار 3/5 تا 5/3 کیلو بار و دمای 818 تا 899 درجه سانتی‌گراد در محیطی با گریزندگی اکسیژن بالا و در شرایط اکسیدان شکل گرفته، این شرایط زمینه را برای حمل و انتقال مس و طلا فراهم می‌کند و بیانگر شرایط ماگمایی، ماگمای مادر پورفیری دالی است. نتایج به‌دست آمده از داده‌های ریزدماسنجی سیال در گیر مربوط به رگه‌های نابارور اولیه همراه با دگرسانی پتاسیک میزان دمای 340-620 درجه سانتی‌گراد، شوری 35-75% درصد وزنی را نشان می‌دهد که با توجه به دمای آمفیبول‌ها این افت دما بیانگر تغییر از شرایط ماگمایی به گرمایی و آغاز فرآیندهای کانه‌زایی در این کانسار است.

واژه‌های کلیدی: پلاژیوکلاز، آمفیبول، گریزندگی اکسیژن، ریزپردازش الکترونی، دالی، کمرند ماگمایی ارومیه - دختر

مقدمه

حاشیه‌های فعال فرورانشی (Sillitoe, 1972, 2010; Richards, 2003, 2005) و در امتداد حواشی صفحات همگرا توسعه یافته‌اند؛ جایی که فرورانش پوسته اقیانوسی و ماگماتیزم نوع کمائی، گرانیتوئیدهای آب‌دار و اکسیدی پوسته بالایی مرتبط با ماده معدنی را تشکیل می‌دهند (John et al., 2010). ذخایر بزرگ ممکن است در محور کمان، جایی که

کانسارهای مس پورفیری را می‌توان حاصل سرد شدن سیستم‌های گرمایی به‌همراه نفوذی‌های کم‌عمق با بافت پورفیری جایگیر شده دانست (Titley and Bean, 1981). این کانسارها معمولاً در امتداد کمربندهای آتشفشانی نفوذی کالک‌آلکالن، به‌صورت کمان‌های ماگمایی است که در بالای

1. Electron microprobe analyses (EMPA)

*مسئول مکاتبات: h.pourkaseb@scu.ac.ir

جریان ماگما بالاترین مقدار خود را دارد تشکیل شوند، (برای مثال: در کمربندهای ائوسن و میوسن پایانی - پلیوسن شیلی (Camus, 2005)). شایان ذکر است، بررسی‌های جدید نشان می‌دهد ذخایر مس پورفیری می‌توانند در محیط‌های برخوردی و پس از برخوردی نیز پیدا شوند (Richards, 2009). محققان اعتقاد دارند که بسیاری از سیستم‌های پورفیری مس، مولیدن و طلا توسط تزریق ماگمای آداکایتی اکسیدی غنی از آب، گوگرد و فلزات شکل می‌گیرند، به این معنی که ماگمای مولد این ذخایر باید از آب غنی باشد و حالت اکسیدی نیز داشته باشد (Wang et al., 2014; Sun et al., 2015) که این عوامل ارتباط منحصر به فرد خود را با ذخایر بزرگ پورفیری نشان می‌دهد؛ طوری که حمل و انتقال طلا و مس در fO_2 بالا توسط ماگمای کالک‌آلکانل آب‌دار به حداکثر می‌رسد (Wang et al., 2014). گریزندگی بالای اکسیژن از وفور کانی‌هایی مانند مگنتیت، هماتیت و انیدریت اولیه در تعادل با کانی‌های سولفید مس - آهن (کالکوپیریت، بورنیت) و همراهی ذخایر مس پورفیری با گرانیتوئیدهای اکسیدی نوع I یا گروه مگنتیت به‌دست می‌آید (Rowins, 2000) که بیانگر وجود شرایط اکسیدان در طی تحولات ماگمایی است و شرایط را برای جمع‌آوری، حمل و در نهایت ته‌نشست مس و طلا فراهم می‌کند. بدین ترتیب می‌توان چنین بیان کرد که ماگمای تکامل‌یافته حاصل از حالات اکسیداسیون بالا و محتوای آب زیاد، شرایط بسیار مطلوب را برای شکل‌گیری ذخایر پورفیری ماگمایی - گرمابی مس، مولیدن و طلا فراهم می‌کند. از عوامل بسیار مهم در شکل‌گیری توده‌های بارور مس، وجود شرایط اکسیدان، تفریق پیشرفته ماگما و تبلور بخشی یک کانی آب‌دار نظیر هورنبلند است (Zarasvandi et al., 2015a, 2015b). بسیاری از کانسارهای مس پورفیری از جمله کانسار دالی نیز در چنین شرایطی شکل گرفته‌اند (Zarasvandi et al., 2015b). این کانسار اولین کانسار گزارش شده غنی از طلا در ایران است. گرچه در گذشته بررسی‌هایی مانند سنگ‌شناسی، شیمی کانی‌ها (Ayati et al., 2012)، پترولوژی و زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی و نیمه آتشفشانی (Ayati et al., 2013)،

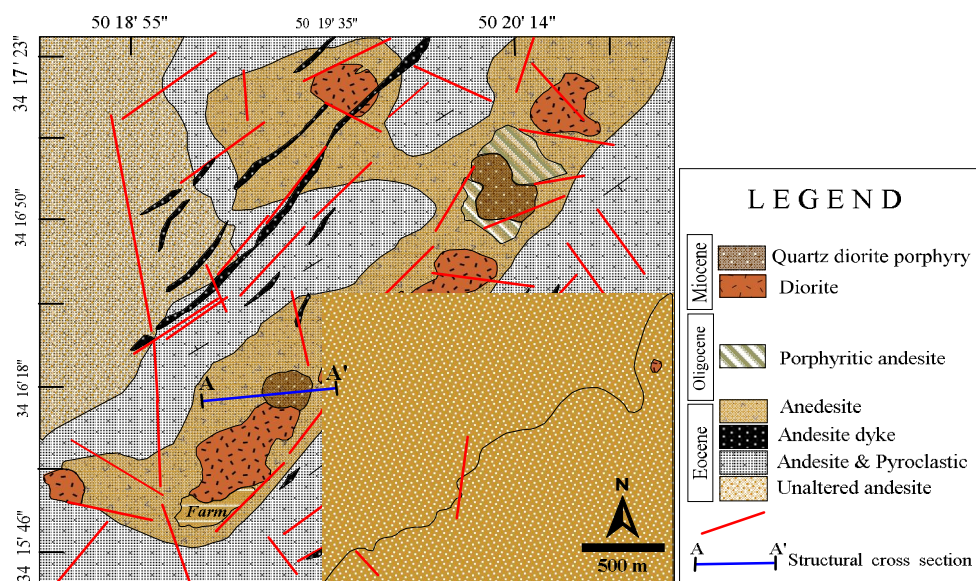
بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سیال در گیر (Asadi, 2015) و تکامل زمین‌شیمی و ویژگی سیالات (Zarasvandi et al., 2015b) بر روی این کانسار انجام شده؛ اما تاکنون بررسی جامعی در خصوص روند تکامل ماگمایی - گرمابی این کانسار بر اساس شیمی کانی‌های مولد در کانه‌زایی صورت نگرفته است. در این راستا، در این پژوهش با استفاده از آنالیز ریزپردازش الکترونی، به بررسی شیمی کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز، برای دستیابی به شرایط فیزیکی و شیمیایی ماگمای مولد کانه‌زایی و تأثیر آن در توان کانه‌زایی کانسار موردنظر پرداخته شده است. علاوه بر این نتایج به‌دست آمده با بررسی‌های پیشین نظیر بررسی‌های سیالات در گیر و لیزر اسپکتروسکپی رامان برای تعیین روند تکامل ماگمایی - گرمابی تلفیق شده است.

دگرسانی و کانه‌زایی

منطقه مورد بررسی در ورقه 1/100000 سلفچگان - خورهه (Alai Mahabadi et al., 2000) در 60 کیلومتری شمال شرق شهرستان اراک (مسیر جاده اراک - سلفچگان) و 40 کیلومتری شمال غرب دلیجان در نزدیکی روستای راوه واقع شده است. محدوده اکتشافی دالی از نظر موقعیت زمین‌ساختی در بخش مرکزی کمر بند ماگمایی ارومیه - دختر و در محل برخورد این کمر بند با زون دگرگونی سنندج - سیرجان قرار گرفته است. بررسی‌های زمین‌شناسی نشان می‌دهد که کانی‌سازی در منطقه دالی در رابطه با مجموعه‌هایی از استوک و دایک‌های کوارتز دیوریت پورفیری هستند (شکل 1) که در امتداد 55 درجه (شمال شرقی) و به طول 3 کیلومتر در داخل یک زون گسله به عرض 1 تا 2 کیلومتر و به مرکز یک استراتوولکان با ترکیب گدازه‌های آندزیتی و آذرآواری نفوذ کرده‌اند. برخی از توده‌های نفوذی و به‌طور محلی آتشفشانی منطقه تحت تأثیر محلول‌های گرمابی به دگرسانی‌های نوع پتاسیک، فلیک، آرژلیک، پروپلیتیک و سیلیسی تبدیل شده‌اند (شکل 2). در این کانسار دگرسانی پتاسیک با وجود کانی‌هایی همانند بیوتیت ثانویه، فلدسپات پتاسیم، مگنتیت و کوارتز قابل تشخیص است.

پروپلیتیک که بیرونی‌ترین دگرسانی در ذخایر پورفیری است در این ذخیره بیشترین گسترش را داراست. از نظر کانی‌شناسی کانی‌های غالب شامل اپیدوت، کلریت و کمی کلسیت است که به صورت پراکنده در زمینه‌ای دانه‌ریز از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز قرار گرفته‌اند. کلریت به صورت رگه‌چهای همراه با بیوتیت ثانویه دیده می‌شود. از کانه‌های مهم این دگرسانی می‌توان به وجود پیریت و کالکوپیریت که به صورت پراکنده قرار گرفته‌اند، اشاره کرد (Daneshjou, 2014). همچنین سه نسل اصلی رگه‌ها در کانسار دالی تشخیص داده شد، از جمله رگه‌های نسل اول شامل کوارتز اولیه + فلدسپار + مگنتیت \pm کالکوپیریت، رگه‌های نسل دوم حاوی کانی‌های سولفیدی مختلف از جمله کوارتز + پیریت + کالکوپیریت + بورنیت + کوولیت + کالکوسیت و در نهایت رگه‌های نسل سوم شامل کوارتز + کلریت + بیوتیت (Zarasvandi et al., 2015b).

کانی بیوتیت به دو صورت پراکنده و رگه‌چهای به رنگ قهوه‌ای روشن در واحد دیوریتی دیده می‌شود در صورتی که فلدسپات پتاسیم به شکل رگه و رگه‌چ در بخش کوارتز دیوریت دیده می‌شود. از کانه‌های مهم می‌توان به وجود پیریت، کالکوپیریت و مگنتیت اشاره کرد. دگرسانی فلیک نیز به رنگ سفید در مقیاس محلی با رگه‌چهای کوارتز دیده می‌شود. بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی، این دگرسانی از کلریت، سرسیت و کوارتز شکل گرفته است که این کانی‌ها از دگرسانی کانی‌های اولیه مانند بیوتیت، هورنبلند و پلاژیوکلاز تشکیل شده‌اند. کانه‌های مهم این دگرسانی شامل پیریت، کالکوپیریت و مقدار کمی بورنیت و کوولیت به صورت رگه‌ای است. دگرسانی آرژلیک با کانی‌های کوارتز، آلبیت، مونت موریلونیت و کانولینیت به صورت کانی‌های اصلی و کلریت، ایلیت و میکروکلین به صورت کانی‌های فرعی دیده می‌شود. دگرسانی



شکل 1. نقشه زمین‌شناسی کانسار مس-طلای پورفیری دالی. با تغییرات از اسدی هارونی (Asadi Harouni, 2010)

Fig. 1. Geological map of the Dalli porphyry Cu-Au deposit (Modified from Asadi Harouni, 2010)

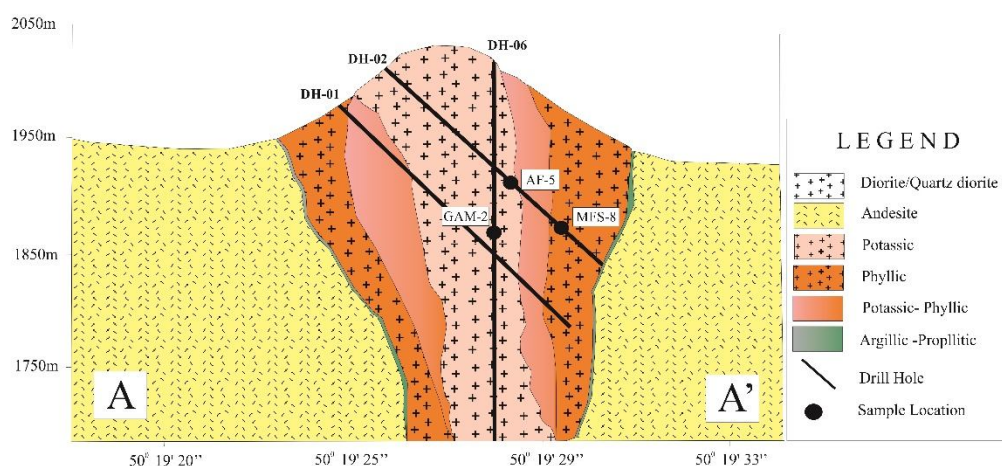
روش مطالعه

کمترین میزان دگرسانی در تابستان 1392 برداشت شد. برای بررسی‌های سنگ‌نگاری تعداد 20 مقطع نازک - صیقلی در کارگاه مقطع‌گیری دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز تهیه شد. بررسی‌های شیمی کانی بر روی دو کانی اصلی آمفیبول و پلاژیوکلاز انجام شد که بر روی کانی آمفیبول تعداد

برای دستیابی به شرایط فیزیکی و شیمیایی مؤثر در روند کانه‌زایی و تکامل ویژگی‌های ماگمایی و سیال گرمایی در کانسار دالی، پس از انجام بررسی‌های صحرایی تعداد 20 نمونه از گمانه‌های حفاری از توده‌های دیوریت و کوارتز دیوریتی با

است. برای محاسبه فرمول شیمیایی آمفیبول‌ها بر اساس 23 اتم اکسیژن از نرم‌افزار Minerals Spreadsheet software (Preston and Still, 2001) استفاده شده است، همچنین برای بررسی شرایط فیزیکی و شیمیایی مؤلفه‌هایی مانند دما، فشار، گریزندگی اکسیژن و میزان H_2O مذاب مدنظر است که از نمودارهای مورد نظر با استفاده از نرم‌افزارهای Excel، Amp-TB (Ridolfi et al., 2010)، PET (Dachs, 2004)، Gcdkit و CorelDRAW استفاده شده است که نتایج حاصل از این داده‌ها در جدول‌های 1 تا 3 ارائه شده است.

19 نقطه و پلاژیوکلازها تعداد 5 نقطه از توده کوارتز دیوریت با استفاده از روش ریزپردازش الکترونی در آزمایشگاه دانشگاه Montan Leoben کشور اتریش انجام شد. مدل دستگاه ریزپردازش الکترونی مورد استفاده، JEO JXA8200 است. آنالیز انجام شده توسط این دستگاه با ولتاژ شتاب‌دهنده 20KV، باریکه جریان 20nA، با قطر باریکه‌ای برابر $1\mu m$ و زمان شمارش حداکثر 20 ثانیه انجام شده است. لازم به ذکر است که محاسبه کاتیون‌ها و فرمول ساختاری کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز به ترتیب بر اساس 23 و 8 اتم اکسیژن انجام شده



شکل 2. نیم‌رخ عرضی از کانسار دالی و موقعیت گمانه‌های حفاری و نقاط نمونه‌برداری با تغییرات از اسدی هارونی (Asadi Harouni, 2010)

Fig. 2. Cross section of the Dalli deposit and Boreholes drilling and sampling points (Modified from Asadi Harouni, 2010)

آتشفشانی آندزیت تا آندزیت بازالت به وجود آمده است. از نظر کانی‌شناسی، مجموعه کانی‌های اصلی تشکیل دهنده این کانسار تقریباً یکسان و اغلب شامل درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، بیوتیت، آمفیبول و کوارتز در درون زمینه یک‌نواخت از کوارتز و پلاژیوکلاز و کانی‌های ثانویه نیز شامل کلریت، سرسیت، کلسیت، مگنتیت و هماتیت است. در توده‌های کوارتز دیوریتی آمفیبول‌دار، کانی کوارتز به سه صورت دیده می‌شود. در حالت اول به صورت درشت‌بلور با شکل‌های منظم تا نیمه شکل‌دار که بیانگر نسل اول کوارتز است، در حالت دوم کوارتز ریزدانه به صورت پراکنده و به فراوانی در زمینه مقاطع و در حالت سوم کوارتز به شکل رگه‌ای با بافت موزاییکی حاوی کانه فلزی

بحث و بررسی

سنگ‌نگاری

بررسی‌های کانی‌شناسی برای درک نحوه پیدایش، بافت، نوع کانی‌های موجود در سیستم کانی‌سازی - دگرسانی بسیار حائز اهمیت است. بر اساس مشاهدات صحرایی و بررسی‌های سنگ‌نگاری، مجموعه سنگ‌های این منطقه به طور عمده از گدازه‌های آندزیتی و آندزیت بازالت با سن ائوسن و دیوریت و کوارتز دیوریت آمفیبول‌دار با سن الیگو-میوسن که به صورت آتشفشانی و نیمه آتشفشانی و همچنین رسوبات و واریزه‌های عهد حاضر تشکیل شده است. این کانسار در اثر نفوذ توده‌هایی با ترکیب دیوریتی و کوارتز دیوریتی به درون سنگ‌های

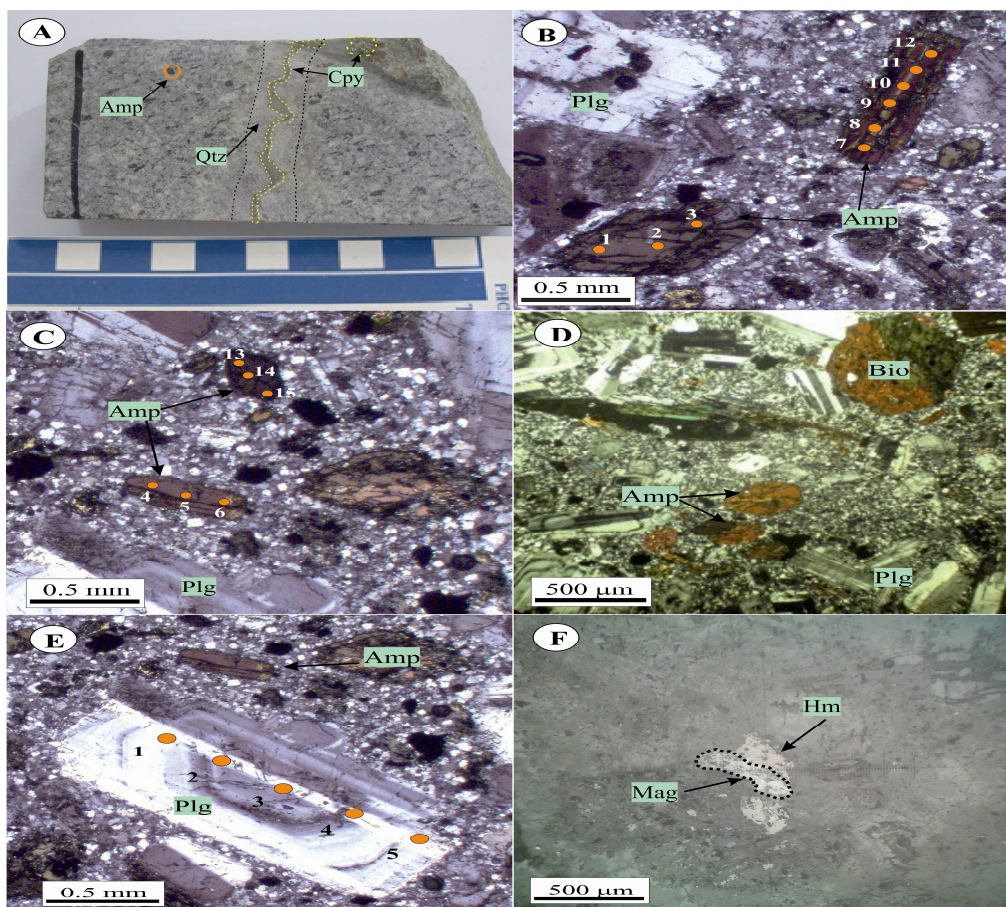
کالکوپیریت (شکل 3- A) که نشان‌دهنده عملکرد محلول‌های گرمایی تأخیری است. آمفیبول پس از پلاژیو کلاز در سنگ‌های این منطقه به صورت فراوان در مقاطع نازک و نمونه‌های دستی موجود است (شکل 3- B و C). در مقاطع میکروسکوپی این کانی به رنگ‌های سبز یا قهوه‌ای و به صورت شکل‌دار و نیمه شکل‌دار با مقاطع طولی و عرضی به وفور در این سنگ‌ها دیده می‌شود و ترکیب آنها بیشتر از نوع هورنبلند است. این درشت‌بلورهای هورنبلند در نمونه‌های دگرسان‌نشده، به صورت فاز اولیه که نشانگر ماگمای گرانیتوئیدی با محتوای بیش از 3% وزنی H_2O است (Hezarkhani, 2006). در برخی موارد هورنبلندها به صورت جزئی و یا کلی به بیوتیت تبدیل شده‌اند. حضور شکل‌های کاذب بیوتیت ثانویه به جای درشت‌بلور هورنبلند (شکل 3- D) در دگرسانی پتاسیک معمول است. بیوتیت نیز در این کانسار با چندرنگی قهوه‌ای، از دگرسانی هورنبلند شکل گرفته که بیانگر دگرسانی پتاسیک است، دیده می‌شود. پلاژیو کلازها که فراوانترین کانی در این توده است، به صورت کشیده و درشت‌بلورهای خودشکل تا نیمه شکل‌دار به صورت ریزبلورهایی در زمینه دیده می‌شود. اندازه این بلورها 4 تا 5 میلی‌متر است. این کانی دارای ماکل پلکانی و ساختمان منطقه‌ای مشخص است که در راستای حاشیه، شکستگی و مقدار کمی سرپستی شدن را نشان می‌دهند (شکل 3- E). منطقه‌بندی در پلاژیو کلازها را می‌توان به نوسانات فشار بخار آب (Yoder and Tilley, 1962) و یا شکل‌گیری آنها از یک ماگمای گرانیتوئیدی دانست. در مقاطع، مگنتیت به عنوان کانی فلزی همراه هماتیت، کالکوپیریت، پیریت دیده شد. در بعضی موارد پدیده مارتیتی شدن (شکل 3- F) نیز دیده می‌شود. این پدیده به جانشینی هماتیت به جای مگنتیت از طریق اکسیداسیون اطلاق می‌شود. شکل‌گیری هماتیت از مگنتیت از حاشیه صورت گرفته است.

مطالعات زمین‌شیمی

شیمی کانی آمفیبول

با بررسی شیمی کانی‌های مختلف سنگ‌های تشکیل‌دهنده یک توده نفوذی، می‌توان شرایط دما و فشار (عمق) تشکیل آن را

تخمین زد. آمفیبول‌ها به عنوان کانی‌های اصلی سنگ‌ساز در طیف گسترده‌ای از سنگ‌های آذرین و دگرگون تشکیل می‌شوند. حضور این کانی در اغلب سنگ‌های آذرین و دگرگون تأییدکننده پایداری آن در دامنه گسترده‌ای از شرایط دما (400-1150 درجه سانتی‌گراد) و فشار (1 - 23 کیلو بار) است (Blundy and Holland, 1990). بنابراین می‌توان از آن به عنوان شاخصی برای ارزیابی شرایط تبلور ماگما مانند فشار، دما، میزان آب مذاب و گریزندگی اکسیژن بهره برد (Blundy and Holland, 1990). علاوه بر این، از ترکیب شیمیایی آمفیبول‌ها اغلب جهت متمایز کردن نفوذی‌های بارور از عقیم در کانسارهای مس پورفیری استفاده می‌شود (Chivas, 1981). به این معنا که آمفیبول‌های سنگ‌های کانه‌زایی، اغلب دارای تغییرات ترکیبی وسیعی هستند و رابطه مثبتی بین سیلیس و منیزیم را نشان می‌دهند؛ درحالی‌که آمفیبول‌های سنگ‌های بدون کانه‌زایی تا حدی غنی از آهن و تغییرات ترکیبی محدودی را نشان می‌دهند (Hendry et al., 1985). بررسی‌های اخیر بر روی پورفیری کانه‌دار زون ارومیه - دختر توسط زراسوندی و همکاران (Zarasvandi et al., 2015a) نشان‌داده است تمامی پورفیری‌های کانه‌دار دارای مقادیر بالای La/Sm و نیز دارای نسبت‌های بالای Sm/Yb، به همراه الگوی تقعر رو به بالا در الگوی عناصر نادر خاکی خود هستند که این موضوع به هضم پوسته ضخیم‌شده توسط ماگمای مادر پورفیری‌های کانه‌دار و نیز نقش آفرینی هورنبلند در خلال تکامل سیستم ماگمایی سیستم‌های پورفیری کانه‌دار زون ارومیه - دختر نسبت داده شده است. آمفیبول‌ها را با توجه به فرمول عمومی که به صورت $A B_2^{VI} C_5^{IV} T_8 O_{22} (OH)_2$ است و نیز کاتیون‌های مختلفی که متناسب با اندازه و شعاع یونی می‌تواند جایگزین موقعیت‌های A, B, C, T شود، رده‌بندی می‌کنند. بر اساس فرمول شیمیایی آمفیبول‌ها، عناصر متعددی در ساختار بلورین این کانی شرکت می‌کنند که میزان بعضی از عناصر موجود در این فرمول از جمله آلومینیوم، تیتانیم، کلسیم و سدیم تابع بعضی از مؤلفه‌ها مثل فشار، دما و گریزندگی اکسیژن است.



شکل 3. A: رگه کوارتزی همراه با کانه فلزی کالکوپیریت، B و C: مقطع میکروسکوپی آمفیبول‌های تجزیه‌شده و نقاط مورد نظر، D: بیوتیت‌های ثانویه که به جای آمفیبول قرار گرفته‌اند، E: کانی پلاژیوکلاز با ساختمان منطقه‌ای و F: کانی‌های هماتیت و مگنتیت در کانسار مس - طلای پورفیری دالی (Qtz: کوارتز، Cpy: کالکوپیریت، Amp: آمفیبول، Plg: پلاژیوکلاز، Bio: بیوتیت، Hm: هماتیت، Mag: مگنتیت) (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 3. A: Quartz vein associated with chalcopyrite, B, C: Analyzed amphiboles and desired points, D: Secondary biotite replaced amphibole, E: plagioclase with zoning, and F: hematite and magnetite of the Dalli Porphyry Cu- Au deposit (Qtz: quartz, Cpy: chalcopyrite, Amp: amphiboles, Plg: plagioclase, Bio: biotite, Hm: hematite, Mag: magnetite) (Whitney and Evans, 2010)

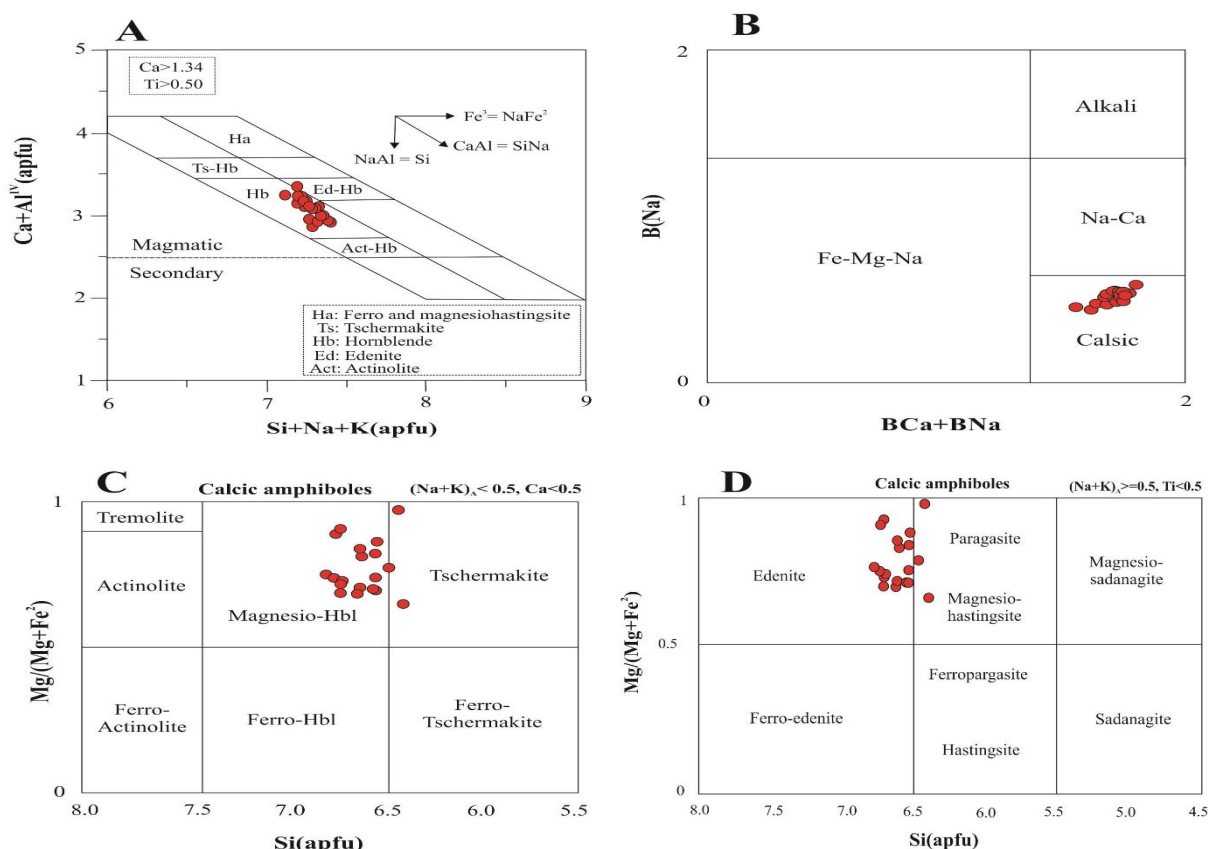
نتایج حاصل از تجزیه نقطه‌ای آمفیبول‌های کانسار دالی (جدول 1)، برای تشخیص آمفیبول‌های اولیه (ماگمایی) از آمفیبول‌های ثانویه استفاده شده است. همان‌طور که در نمودار پیشنهادی گرت و همکاران (Giret et al., 1980) ملاحظه می‌شود (شکل 4-A) نمونه‌های تجزیه شده آمفیبول در کانسار دالی همگی در گستره آمفیبول‌های نوع ماگمایی قرار می‌گیرند. همچنین ترکیب آمفیبول‌ها بر اساس عدد اتمی بر واحد فرمول Na و Ca در جایگاه B (Ca+Na) در گروه آمفیبول‌های نوع کلسیک (شکل 4-B) و دارای گستره ترکیبی منیزو هورنبلند،

از این رو، می‌توان از آنها برای فشار - دماسنجی آمفیبول‌ها استفاده کرد (Hammarstrom and Zen, 1986). طبق نظر لیک و همکاران (Leake et al., 1997) با توجه به نوع عناصری که در موقعیت B ساختمان بلوری قرار می‌گیرند آمفیبول‌ها را می‌توان به چهار گروه تقسیم‌بندی کرد که شامل:

- 1- آمفیبول‌های گروه منیزیم - آهن‌دار
- 2- آمفیبول‌های گروه کلسیک
- 3- آمفیبول‌های گروه سدیک - کلسیک
- 4- آمفیبول‌های گروه سدیک

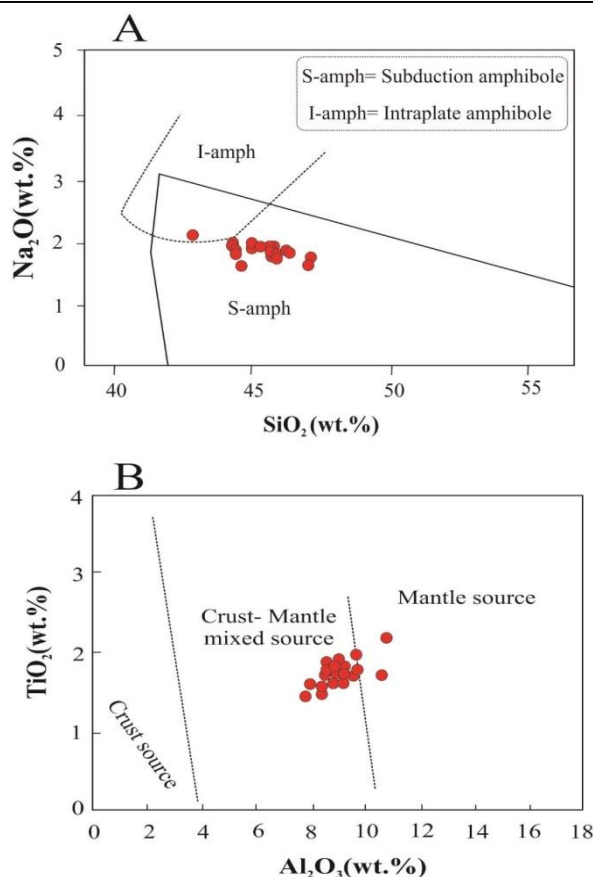
1/5 بیانگر آمفیبول‌های تشکیل شده در حاشیه فعال قاره‌ای است. میزان Al^{IV} به دست آمده برای آمفیبول‌های منطقه پایین‌تر از 1/5 و نشانگر محیط‌های فرورانشی است. اختلاط ماگما می‌تواند نقشی مهم در روند تکامل ماگما و کانه‌زایی ذخایر ایفا کند (Li and Santosh, 2014; Li et al., 2014). با توجه به این که جایگزین شدن دالی 29 میلیون سال بعد از شروع ماگماتیسیم در زون ارومیه-دختر بوده (میوسن) و زمان جای‌گیری هم‌زمان با برخورد و فشارش ناشی از پلیت عربی بوده است، به نظر می‌رسد رژیم زمین‌ساختی فشارشی شرایطی مناسب را برای هضم بیشتر سنگ‌های پوسته و برای ماگمای مادر دالی فراهم کرده است (Zarasvandi et al., 2015a). با توجه به این مطالب، نمونه‌های آمفیبول در کانسار دالی در محدوده اختلاط گوشته و پوسته قرار دارند (شکل B-5).

ادنیت، منیزو هستگزیت و چرماکیت است (شکل‌های C-4 و D). از طرفی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی آمفیبول‌ها، برای مقایسه محیط‌های تکتونوماگمایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، به‌طوری که آمفیبول‌های وابسته به محیط‌های فرورانش (S-amph) میزان Na_2O و TiO_2 کمتری نسبت به انواع درون صفحه‌ای (I-amph) دارند. بر اساس این ویژگی نمودار رده‌بندی تکتونوماگمایی (Coltorti et al., 2007)، برای آمفیبول‌های این منطقه ترسیم شد که آمفیبول‌ها در گستره آمفیبول‌های مرتبط با محیط فرورانش قرار گرفتند (شکل 5-A)، همچنین $Al^{IV} = 1/5$ به عنوان مرز جدایش محیط تکتونوماگمایی آمفیبول‌ها در نظر گرفته شده است؛ به گونه‌ای که مقادیر بالای 1/5 مربوط به آمفیبول‌هایی است که در محیط‌های زمین‌ساختی جزایر قوسی شکل می‌گیرند و مقادیر پایین‌تر از



شکل 4. A: تقسیم‌بندی آمفیبول‌های اولیه (ماگمایی) و ثانویه (Giret et al., 1980)، B: نمودار تقسیم‌بندی آمفیبول‌ها (Leake et al., 1997)، C و D: طبقه‌بندی آمفیبول‌های نوع کلسیک (Leake et al., 1997)

Fig. 4. A: Classification primary (magmatic) and secondary amphiboles (Giret et al., 1980), B: Classification diagram of amphiboles (Leake et al., 1997), C and D: Classification of the calcic amphiboles (Leake et al., 1997)



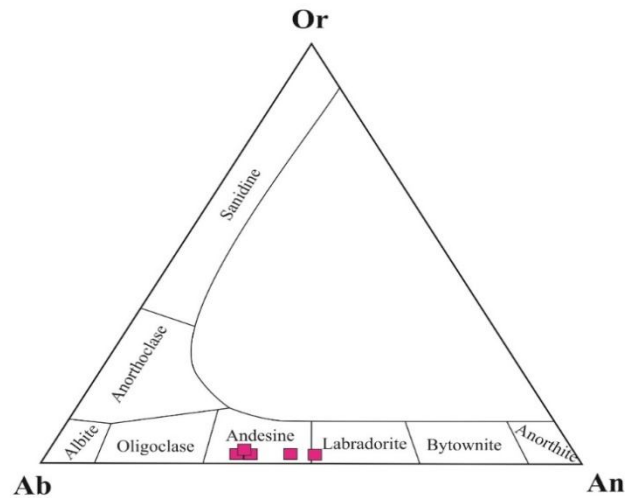
شکل 5. A: نمودار رده‌بندی تکتونوماگمایی آمفیبول‌ها (Coltorti et al., 2007) و B: نمودار TiO₂ در مقابل Al₂O₃ آمفیبول‌ها (after Jiang and An, 1984)

Fig. 5. A: Tectono- magmatic Classification Diagram of amphiboles (Coltorti et al., 2007), and B: Plot of TiO₂ vs. Al₂O₃ for amphiboles (after Jiang and An, 1984)

شیمی کانی پلاژیو کلاز

پلاژیو کلازها از جمله کانی‌های مهم و اصلی در ترکیب بسیاری از سنگ‌های آذرین است. استفاده از ترکیب پلاژیو کلازها به تعیین شرایط تحول سنگ‌های دربرگیرنده آنها کمک بسیاری می‌کند؛ زیرا ترکیب این کانی نسبت به دما، فشار و محتوای آب موجود در مذاب بسیار حساس است (Pletchov and Gerya, 1996; Putirka, 2005; Almeev and Ariskin, 1996). الگوی منطقه‌بندی در پلاژیو کلازها اطلاعات بسیار مهمی را درباره فرآیندهای ماگمایی در اختیار ما قرار می‌دهد. الگوی منطقه‌بندی در پلاژیو کلازها، تغییرات ترکیب مذاب، مواد فرار، دما و فشار را ثبت می‌کند (Smith and Brown, 1988). بررسی کانی‌های پلاژیو کلاز در کانسار دالی بر پایه نتایج حاصل از تجزیه ریزپردازش الکترونی استوار است. فرمول

ساختاری کانی‌ها بر مبنای 8 اتم اکسیژن و 5 کاتیون محاسبه شده است (جدول 2). این آنالیزها نشان می‌دهند که بلورهای پلاژیو کلاز دارای منطقه‌بندی ترکیبی ناچیز هستند. گستره ترکیبی پلاژیو کلازها از Or_{0.015}، Ab_{0.48} تا An_{0.50} متغیر است. بیشتر ترکیب Or_{0.018}، Ab_{0.62}، An_{0.35} متغیر است. بیشتر ترکیب پلاژیو کلازهای موجود در کانسار دالی در تقسیم‌بندی نمودار مثلثی آلایت - آنورتیت - ارتو کلاز (Deer et al., 1991) در گستره آندزین - لابرادوریت قرار می‌گیرد (شکل 6). این گستره تغییرات جزئی در بلورهای پلاژیو کلازها از جنبه‌های بسیار مهم است؛ زیرا در زمین فشارسنجی بر مبنای محتوای آلومینیوم بلورهای آمفیبول، جزئی بودن تغییرات ترکیبی در پلاژیو کلازها بسیار حائز اهمیت است (Hollister et al., 1987).



شکل 6. طبقه‌بندی پلاژیوکلازها بر اساس ترکیب شیمیایی در کانسار مس- طلای پورفیری دالی (Deer et al., 1991)

Fig. 6. Plagioclases classification based on chemical composition of the Dalli Porphyry Cu- Au deposit (Deer et al., 1991)

جدول 1. نتایج تجزیه ریزپردازش الکترونی کانی آمفیبول کانسار مس- طلای پورفیری دالی (ترکیب شیمیایی و فرمول ساختاری آمفیبول‌ها بر اساس 23 اتم اکسیژن)

Table 1. EMPA analyses results of amphibole of the Dalli Porphyry Cu- Au deposit (Chemical composition and structural formula of amphiboles based on 23 oxygen atoms)

Rock Name.		Quartz Diorite Porphyry							
Sample No.	Amp-1	Amp-2	Amp-3	Amp-4	Amp-5	Amp-6	Amp-7	Amp-8	Amp-9
SiO ₂	43.6	45.18	44.68	44.69	45.97	46.24	45.19	44.6	45.45
TiO ₂	2.21	1.84	1.96	1.74	1.86	1.78	1.78	1.83	1.85
Al ₂ O ₃	10.81	9.61	9.66	9.53	9.06	8.77	9.18	9.78	9.48
FeO	15.64	14.7	15.13	13.98	13.92	14.87	15.15	15.34	14.57
MnO	0.49	0.52	0.46	0.52	0.53	0.5	0.45	0.5	0.49
MgO	11.26	12.73	12.34	13.15	13.3	12.82	12.39	12.2	12.57
CaO	10.93	10.7	10.86	11.13	10.95	10.87	10.7	10.82	10.95
Na ₂ O	2.14	1.92	1.87	1.84	1.8	1.89	1.99	2.01	1.95
K ₂ O	1.02	0.82	0.91	0.91	0.77	0.69	0.85	0.88	0.88
Ca	1.725	1.677	1.7	1.742	1.683	1.688	1.655	1.68	1.708
Ti	0.245	0.202	0.215	0.191	0.201	0.194	0.193	0.199	0.203
Na	0.611	0.545	0.53	0.521	0.5	0.531	0.557	0.565	0.55
Mg	2.473	2.776	2.687	2.863	2.843	2.77	2.667	2.635	2.728
Fe ⁺²	1.278	1.107	1.108	0.943	0.597	1.196	0.521	0.722	1.195
Al ^{iv}	1.6123	1.39152	1.47306	1.473	1.470	1.29	1.474	1.53	1.38
Al ^{vi}	0.264	0.187	0.190	0.167	0.123	0.199	0.087	0.132	0.242

(Amp: amphibole)

ادامه جدول 1. نتایج تجزیه ریزپردازش الکترونی کانی آمفیبول کانسار مس- طلای پورفیری دالی (ترکیب شیمیایی و فرمول ساختاری آمفیبول‌ها بر اساس 23 اتم اکسیژن)

Table 1. (Continued). EMPA analyses results of amphibole of the Dalli Porphyry Cu- Au deposit (Chemical composition and structural formula of amphiboles based on 23 oxygen atoms)

Rock Name.		Quartz Diorite Porphyry								
Sample No.	Amp-10	Amp-11	Amp-12	Amp-13	Amp-14	Amp-15	Amp-16	Amp-17	Amp-18	Amp-19
SiO ₂	44.88	45.85	45.79	46.92	47	45.95	46.36	44.59	45.74	44.86
TiO ₂	1.73	1.75	1.47	1.57	1.61	1.62	1.45	1.98	1.93	1.78
Al ₂ O ₃	10.53	8.71	8.38	8.52	8.02	8.87	7.93	9.43	9.45	9.42
FeO	13.46	14.07	13.69	12.65	13.43	14.12	13.57	14.72	14.55	14.84
MnO	0.43	0.48	0.5	0.45	0.48	0.42	0.48	0.48	0.4	0.5
MgO	11.22	13.12	13.47	14.04	13.73	13.14	13.93	12.53	12.81	12.66
CaO	9.62	10.85	10.54	10.69	10.65	10.75	10.69	10.86	10.82	10.72
Na ₂ O	1.63	1.94	1.85	1.64	1.77	1.77	1.84	1.95	1.92	2.02
K ₂ O	0.7	0.71	0.67	0.63	0.61	0.72	0.6	0.84	0.77	0.78
Na	0.471	0.542	0.527	0.454	0.491	0.5	0.521	0.555	0.53	0.56
Ti	0.194	0.19	0.163	0.169	0.173	0.178	0.159	0.219	0.207	0.191
Ca	1.536	1.675	1.66	1.636	1.633	1.68	1.673	1.708	1.652	1.643
Mg	2.493	2.818	2.952	2.989	2.928	2.857	3.033	2.742	2.721	2.699
Fe ⁺²	0.877	0.488	0.988	0.249	0.309	1.063	0.94	1.113	0.38	0.032
Al ^{iv}	1.312	1.393	1.267	1.298	1.275	1.299	1.230	1.453	1.482	1.584
Al ^{vi}	0.53	0.086	0.184	0.135	0.076	0.225	0.134	0.177	0.105	0.003

(Amp: amphibole)

جدول 2. نتایج تجزیه ریزپردازش الکترونی کانی پلاژیوکلاز در کانسار مس- طلای پورفیری دالی (ترکیب شیمیایی پلاژیوکلازها و فرمول ساختاری بر اساس 8 اتم اکسیژن)

Table 2. EMPA analyses results of plagioclase of the Dalli Porphyry Cu- Au deposit (Chemical composition and structural formula of amphiboles based on 8 oxygen atoms)

Rock Name.		Quartz Diorite Porphyry				
Sample No.		plg-1	plg-2	plg-3	plg-4	plg-5
SiO ₂		59.25	55.7	56.66	58.42	59.01
TiO ₂		0	0.08	0	0.05	0.07
Al ₂ O ₃		26.16	28.51	27.77	26.33	24.89
Fe ₂ O ₃		0.24	0.28	0.24	0.23	0.22
CaO		7.53	10.11	9.26	7.74	6.92
Na ₂ O		7.08	5.39	5.59	6.9	6.65
K ₂ O		0.41	0.26	0.32	0.42	0.3
Al		1.368	1.506	1.466	1.387	1.33
Fe ³		0.008	0.009	0.008	0.008	0.008
Ca		0.358	0.485	0.444	0.371	0.336
Na		0.609	0.468	0.517	0.598	0.584
K		0.023	0.015	0.018	0.024	0.017
X _{An}		0.36	0.50	0.45	0.37	0.35
X _{Ab}		0.61	0.48	0.52	0.60	0.62
X _{Or}		0.023	0.015	0.018	0.024	0.018

(Plg: Plagioclase), (An: Anorthite), (Ab: Albite), (Or: Orthoclase)

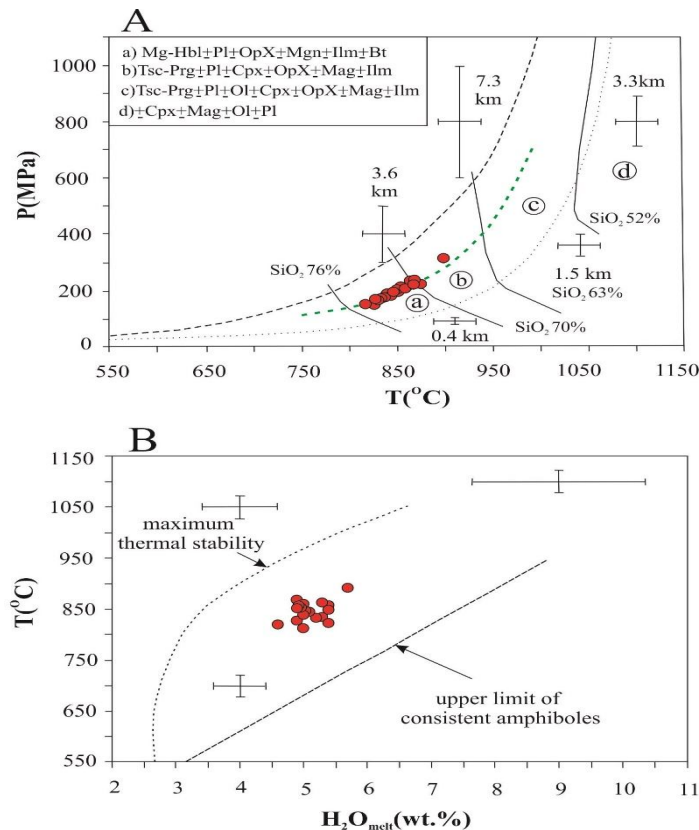
مطالعات دما- فشارسنجی و تعیین گریزندگی اکسیژن

برای تعیین شرایط تبلور درشت‌بلورها، از روش زمین دما- فشارسنجی استفاده می‌شود. وفور کانی مانند آمفیبول به صورت درشت‌بلور در سنگ‌های منطقه گویای غنی‌بودن ماگمای در حال تبلور از آب است. به همین جهت آمفیبول برای تعیین فشار حاکم بر محیط تبلور ماگما و از طرفی بهترین وسیله در دما و فشارسنجی سنگ‌های آذرین کالک‌آلکالن به کار برده می‌شود. بر اساس خواص فیزیکی و شیمیایی، بافت و ترکیب فرمول جدیدی برای محاسبات دما- فشارسنجی آمفیبول‌ها در ماگماهای کالک- آلکالن مرتبط با محیط‌های فرورانش پیشنهاد شده است (Ridolfi et al., 2010). در این روش از آلومینیوم موجود در ترکیب آمفیبول‌ها برای محاسبات فشارسنجی استفاده شده است که شرایط تبلور و پایداری آنها به دست می‌آید (جدول 3). فشارسنجی محاسبه شده (P_5) برای توده کوارتز دیوریت کانسار دالی با استفاده از این روش بین 136-287 مگاپاسکال (میانگین، 185 مگاپاسکال) برآورد شده است. طبق نمودار دما- فشار (شکل 7-A)، آمفیبول‌های دالی به طور عمده در دو محدوده a که شامل منیزو هورنبلند \pm پلاژیوکلاز، ارتوپروکسن، مگنتیت، ایلمنیت، بیوتیت است، قرار گرفته‌اند و تنها 1 نمونه در گستره b چرماکیت - پاراگازیت \pm پلاژیوکلاز \pm کلینوپروکسن \pm ارتوپروکسن \pm مگنتیت \pm ایلمنیت دیده می‌شود. که با توجه به بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی این کانی‌ها به استثنای ارتوپروکسن در منطقه همراه با آمفیبول وجود داشته‌اند. همچنین روش‌های دیگری برای برآورد فشار شکل‌گیری آمفیبول‌ها مطرح شد، این روش‌ها مبتنی بر اندازه‌گیری مقدار Al موجود در آمفیبول هستند؛ زیرا مقدار Al در ارتباط مستقیم با عمق جایگزینی توده است. به طور مثال هامسترام و زن (Hammarstrom and Zen, 1986) معتقدند در سنگ‌های گرانیتی فشار تبلور، مقدار Al را کنترل می‌کند. بر این اساس برای برآورد فشار تبلور آمفیبول‌ها از چهار روش مرسوم (زمین فشارسنجی محتوای Al در هورنبلند) (P_1 - P_4) استفاده شده است و نتایج به دست آمده به همراه فرمول‌های مربوطه در جدول 3 ارائه شده است. این چهار روش برآورد

فشار، مستقل از دماست. از طرفی میزان Al^{vi} موجود در ترکیب آمفیبول نسبت به H_2O_{melt} حساس بوده و از آن برای برآورد دقیق پایداری و تبلور آمفیبول استفاده می‌شود. میزان آب ماگما جهت تبلور آمفیبول‌ها طبق روش ریدولفی و همکاران (Ridolfi et al., 2010) نیز برای این کانی محاسبه شد. از آنجایی که میزان بالای آب ماگمایی، پیش‌شرطی لازم برای جای‌گیری کم‌عمق پوسته‌ای ماگماهای کم‌کانی و تشکیل سیستم‌های ماگمایی - گرمایی با توانایی کانه‌زایی است؛ حضور معمول درشت‌بلورهای هورنبلند یا بیوتیت می‌تواند بیانگر میزان بالای آب ماگمایی باشد. عادی‌ترین فازهای ماگمایی آب‌دار در ماگماهای حدواسط، هورنبلند (1 تا 2% وزنی آب) و بیوتیت (2 تا 4% وزنی آب) هستند (Cloos, 2001). طبق بررسی‌های نانی (Naney, 1983) برای تشکیل هورنبلند ماگمایی نیازمند فشار بیش از 1 تا 2 کیلو بار و میزان آب بیش از 2 تا 4% درصد وزنی است و در مقابل تبلور آنها فقط به ندرت بیش از 1 درصد وزنی آب ماگمایی را مصرف می‌کند. این نشان می‌دهد که نسبت آب در طی تفریق افزایش می‌یابد؛ اما تأثیر آن کم است. در حالت کلی می‌توان بیان کرد حضور هورنبلند به صورت درشت‌بلور نشان‌دهنده ماگمایی حدواسط با بیش از 3% وزنی H_2O است که باعث اشباع شدن آب در طی تبلور اولیه می‌شود (Whitney, 1975; Whitney and Stormer, 1985). همچنین از ویژگی‌های مهم پورفیری‌های بارور فراوانی مودال کانی‌های روشن بر تیره و همچنین برتری مودال هورنبلند بر بیوتیت است. طبق پژوهش‌های انجام‌شده توسط زراسوندی و لیاقت (Zarasvandi and Liaghat, 2005) کانه‌زایی‌های مس پورفیری معمولاً در یک ماگمای کالک‌آلکالن آب‌دار انجام می‌شود. احتمالاً همراه با تبلور هورنبلند مقادیر زیادی مس از سیستم آزاد می‌شود و عناصر نامتحرک در ساختار هورنبلند تمرکز می‌یابند و از طرفی مهمترین پدیده رایج در سنگ‌های مس‌دار تبلوربخشی هورنبلند و در سنگ‌های گرانیتوئیدی که کانه‌زایی مس ندارند، تبلوربخشی پلاژیوکلاز است. در کانسار دالی کانی هورنبلند بسیار دیده می‌شود و میزان آب برای تبلور هورنبلند از 4/6 تا 5/7% درصد وزنی (میانگین: 5%) (شکل 7-

نمایش می‌دهند. با توجه به این که Y هم‌زمان با تفریق ماگما به صورت ترجیحی در ساختار هورنبلند تجمع می‌یابد، این موضوع می‌تواند نشانه‌ای بر نقش آفرینی هورنبلند در خلال تکامل سیستم ماگمایی دالی باشد (Müntener et al., 2001; Davidson et al., 2007).

(B) در نوسان است که به روشنی نشان‌دهنده تبلور آن از یک ماگمای کالک‌آلکان غنی از آب است. شایان ذکر است، بررسی‌های زمین‌شیمیایی انجام‌شده توسط زراسوندی و همکاران (Zarasvandi et al., 2015b) بر روی تکامل پتروژنی ماگمای مادر پورفیری دالی نشان می‌دهد که پورفیری مادر دالی هم‌زمان با افزایش میزان SiO_2 روند کاهش Y را



شکل 7. A: نمودار دما در برابر فشار (Ridolfi et al., 2010) و B: نمودار میزان آب مذاب در برابر دما، کانی آمفیبول کانسار مس-طلای پورفیری دالی (Ridolfi et al., 2010)

Fig. 7. A: P-T diagram (Ridolfi et al., 2010), B: $\text{H}_2\text{O}_{\text{melt}}$ -T diagram amphibole of the Dalli Porphyry Cu- Au deposit (Ridolfi et al., 2010)

میزان Al موجود در هورنبلند تأثیرگذارند. بلانندی و هولند (Blundy and Holland, 1990) روشی را برای دماسنجی بر اساس تبادل Si، Al، Na برای زوج کانی هورنبلند با پلاژیوکلاز در سنگ‌های نفوذی بر مبنای واکنش ادنیت - ترمولیت با استفاده از زوج کانی آمفیبول - پلاژیوکلاز همزیست پیشنهاد کرده‌اند. آمفیبول‌هایی که مورد دما- فشارسنجی قرار می‌گیرند، باید کاملاً همزیست باشند. این روش تنها برای سنگ‌های اسیدی و

زمین دماسنجی هورنبلند-پلاژیوکلاز

مهمترین و شاید کاربردی‌ترین روش تعیین دمای توده‌های نفوذی، روش زمین دماسنجی هورنبلند- پلاژیوکلاز است که یکی از روش‌های معمول برای دماسنجی سنگ‌های کالک‌آلکان محسوب می‌شود. استین و دیتل (Stein and Dietl, 2001) اعتقاد دارند، علاوه بر فشار، عواملی مانند دما، گریزندگی اکسیژن، ترکیب سنگ کل و فازهای همزیست، بر

نمودار P-T چهار خط نسبتاً خمیده به موازات محور T است (شکل 8) از طرفی با استفاده از زمین دماسنج هولند و بلاندی (Holland and Blundy, 1994) در فشارهای مختلف، دمای تبلور به دست آمد که حاصل آن چهار خط نسبتاً راست به موازات محور P است (شکل 8) محل تلاقی این خطوط در نمودار P-T چهار نقطه بود که برای چهار جفت کانی آمفیبول و پلاژیوکلاز به دست آمد (جدول 4). گستره دما و فشار که از این محاسبات به دست می‌آید به ترتیب 777 تا 850 درجه سانتی‌گراد و فشار بین 1 تا 4 کیلو بار است. دمای متوسط به دست برابر با 812°C در فشار متوسط 2/5 کیلو بار است. این بدین معناست که بلورهای آمفیبول در عمق حدود 9 کیلومتر تبلور شده‌اند که می‌تواند بیانگر دمای شرایط ماگمایی در کانسار مس - طلای پورفیری دالی باشد.

حدواسط که حاوی کوارتز و درصد An پلاژیوکلاز آنها کمتر از 0/92 بوده و تعداد اتم Si در فرمول ساختاری آنها کمتر از 7/8 است، به کار می‌رود. نتایج تجزیه پلاژیوکلازهای دارای این ویژگی در جدول 2 ارائه شده است که ترکیب شیمی این پلاژیوکلازها را در محدوده آندزین تا لابرادوریت نشان می‌دهد (شکل 6). این زمین‌دماسنج قابلیت استفاده در دماهای 400 تا 1000 درجه سانتی‌گراد و فشارهای 1 تا 15 کیلو بار را داراست. از آنجا که محاسبه دما در این روش تابعی از فشار است، لازم است تا فشار نیز محاسبه شود. بدین منظور، چهار جفت آمفیبول و پلاژیوکلازهای همزیست، انتخاب و محاسبات زمین‌دماسنجی و زمین‌فشارسنجی برای آنها انجام شد. برای این منظور در ابتدا با استفاده از زمین‌فشارسنجی اندرسون و اسمیت (Smith, Anderson and 1995) در دماهای متفاوت، فشار برای هر کدام از این چهار آمفیبول محاسبه شد که نتایج این کار در

جدول 3. نتایج حاصل از محاسبات زمین-فشارسنجی و تعیین ویژگی‌های فیزیکی و ترکیبی بلورهای آمفیبول برای کانسار مس - طلای پورفیری دالی

Table 3. The results of the calculation of Geothermo-barometer and determination of the physical properties and composition of amphibole crystals in the Dalli porphyry Cu- Au deposit.

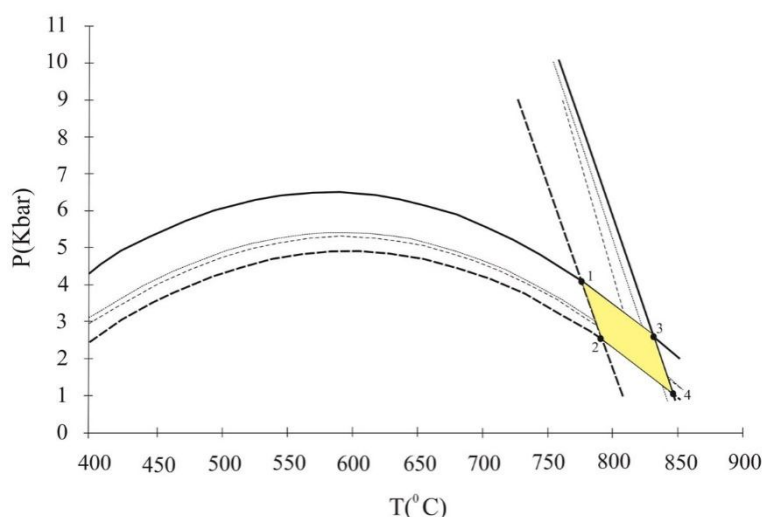
Rock Name.		Quartz Diorite Porphyry							
Sample No.	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	T(°C)	P ₅ (MPa)	Log fO ₂	ΔNNO	H ₂ O _{melt} (%)
Amp-1	5.48	5.7	4.45	5.9	899	287	-11.7	0.1	5.7
Amp-2	3.9	4.09	3.18	4.46	854	185	-11.9	0.8	5
Amp-3	4.4	4.6	3.56	4.9	858	189	-11.9	0.7	4.9
Amp-4	4.3	4.4	3.47	4.8	875	203	-11.4	0.9	4.9
Amp-5	3.7	3.8	3.01	4.2	851	177	-11.8	0.9	5.1
Amp-6	3.5	3.6	2.84	4	838	165	-12.2	0.8	5.2
Amp-7	4.45	4.03	2.88	4.4	851	187	-12.1	0.7	5
Amp-8	4.48	4.6	3.6	4.9	869	217	-11.8	0.6	5.3
Amp-9	4.2	4.3	3.39	4.7	864	212	-11.9	0.7	5.4
Amp-10	5.3	5.6	4.32	5.7	-	-	-	-	-
Amp-11	3.47	3.5	2.75	4	844	165	-12	0.9	5
Amp-12	3.37	3.4	2.67	3.84	833	154	-11.9	1.2	4.9
Amp-13	3.27	3.3	2.58	3.79	828	155	-11.9	1.3	5.4
Amp-14	2.87	2.8	2.25	3.42	818	138	-12.3	1.2	5
Amp-15	3.72	3.8	2.96	4.2	840	171	-12	1	5.3
Amp-16	2.92	2.9	2.29	3.45	826	136	-12	1.3	4.6
Amp-17	4.27	4.4	3.43	4.7	867	200	-11.8	0.7	5
Amp-18	4.06	4.2	3.2	4.54	855	195	-11.9	0.8	5.4
Amp-19	4.06	4.2	3.2	4.54	862	198	-11.8	0.8	5.1

$P_1 (\pm 3\text{kbar}) = -3.92 + 5.03 \text{ Al}^{\text{tot}}$, (Hammarstrom and Zen, 1986), $P_2 (\pm 0.5\text{kbar}) = -3.46 + 4.23 \text{ Al}^{\text{tot}}$, (Hollister et al., 1987), $P_3 (\pm 1\text{kbar}) = -4.76 + 5.64 \text{ Al}^{\text{tot}}$, (Johnson and Rutherford, 1989), $P_4 (\pm 0.6\text{kbar}) = -3.01 + 4.76 \text{ Al}^{\text{tot}}$, (Schmidt, 1992), $T(^{\circ}\text{C}) = -151.487 \times (\text{Si} + {}^{[4]}\text{Al}/15 - 2 \times {}^{[4]}\text{Ti} - {}^{[6]}\text{Al}/2 - {}^{[6]}\text{Ti}/1.8 + \text{Fe}^{+3}/9 + \text{Fe}^{+2}/3.3 + \text{Mg}/26 + {}^{\text{B}}\text{Ca}/5 + {}^{\text{B}}\text{Na}/1.3 - {}^{\text{A}}\text{Na}/15 + {}^{\text{A}}\square/2.3) + 2041$, (Ridolfi et al., 2010); $P_5 (\text{MPa}) = 19.209 \times e^{(1.438 \times \text{Al}^{\text{tot}})}$, (Ridolfi et al., 2010), $\text{Log } f\text{O}_2 = -25018.7/(T + 273.15) + 12.981 + (0.046 \times P \times 10^{-1})/(T + 273.15) + (-0.5117 \times \ln(T + 273.15)) + \Delta\text{NNO}$, (O'Neill and Pownceby, 1993), (Hirschmann et al., 2008), $\Delta\text{NNO} = 1.644 \times (\text{Mg} + \text{Si}/47 - {}^{[6]}\text{Al}/9 - 1.3 \times {}^{[6]}\text{Ti} + \text{Fe}^{+3}/3.7 + \text{Fe}^{+2}/5.2 - {}^{\text{B}}\text{Ca}/20 - {}^{\text{A}}\text{Na}/2.8 + {}^{\text{A}}\square/9.5)$, (Ridolfi et al., 2010), $\text{H}_2\text{O}_{\text{melt}} (\text{wt.}\%) = 5.215 \times ({}^{[6]}\text{Al} + {}^{[4]}\text{Al}/13.9 - (\text{Si} + {}^{[6]}\text{Ti})/5 - {}^{\text{C}}\text{Fe}^{+2}/3 - \text{Mg}/1.7 + ({}^{\text{B}}\text{Ca} + {}^{\text{A}}\square)/1.2 + {}^{\text{A}}\text{Na}/2.7 - 1.56\text{K} - (\text{Fe}^{+2}/(\text{Fe}^{+2} + \text{Mg}))/1.6$, (Ridolfi et al., 2010).

جدول 4. محاسبه دما و فشار تشکیل توده نفوذی با تلفیق دو روش زمین دماسنجی (Holland and Blundy, 1994) و زمین فشارسنجی در کانسار مس- طلای پورفیری دالی (Anderson and Smith, 1995)

Table 4. Calculation of pressure and temperature of the intrusions by combining the two methods of Geothermometry (Holland and Blundy, 1994) and Geobarometry in the Dalli porphyry Cu- Au deposit (Anderson and Smith, 1995)

Sample No.	mineral	P(kbar)	T (°C)
1	Amp-Pl	4	777
2	Amp-Pl	2.6	790
3	Amp-Pl	2.5	830
4	Amp-Pl	1.0	850
Average	-	2.5	812



شکل 8. نتایج زمین فشارسنجی آمفیبول و زمین دماسنجی آمفیبول - پلاژیوکلاز از توده گرانیتوئیدی کانسار مس- طلای پورفیری دالی، چهارگوش رنگی گستره تغییرات دما و فشار را نشان می‌دهد. نمودار بر مبنای محاسبات زمین فشارسنجی و زمین دماسنجی و با استفاده از نرم‌افزار PET (Dachs, 2004) ترسیم شده است.

Fig. 8. The results of the geobarometer and the thermometer amphibole - plagioclase from intrusion of the Dalli porphyry Cu- Au deposit, color shows temperature and pressure range. Calculations are based on Diagram of land pressure thermometer and using application PET (Dachs, 2004) drawn.

گریزندگی اکسیژن

مفهوم گریزندگی اکسیژن که برای اولین بار توسط اگستر و ونز (Eugster and Wones, 1963) معرفی شده است، به عنوان متغیر کنترل کننده توانایی اکسایشی یا به عبارتی فشاربخشی اکسیژن بیان می‌شود. گریزندگی اکسیژن دارای اهمیت سنگ شناختی است و در ارتباط با رخداد ذخایر فلزی ماگمایی در حالت اکسیده یا کاهیده کاربرد دارد (Frost, 1991). مقدار گریزندگی اکسیژن ماگما به مواد، خاستگاه و محیط

زمین ساختی آن وابسته است، به طوری که ماگماهای گرانیتی مشتق شده از رسوبات معمولاً حالت احیا دارند، در حالی که گرانیت‌های نوع I، نسبتاً اکسیدان هستند (Helmy et al., 2004). همچنین ماگماهای با اکسایش بالا در مرز ورقه‌های همگرا تشکیل می‌شوند (Ewart, 1979). یکی از روش‌های ارزیابی گریزندگی اکسیژن در سنگ‌های نفوذی، بررسی ترکیب آمفیبول‌هایی است که از نظر شیمیایی دارای $Fe_{tot}/Fe_{tot} + Mg > 0/3$ و مقدار نسبت $Al^{iv} > 0/7$ هستند.

پورفیری Butte در آمریکا در ارتباط با ماگمای مادر اکسیدی هستند (Sun et al., 2015). البته لازم به یادآوری است، بررسی‌های اخیر نشان‌دهنده رخداد‌های محدودی از کانسارهای پورفیری با ماگمای مادر احیایی نظیر کانسار Baogutu در کمربند کوه‌زایی آسیای میانه است (Sun et al., 2015). طبق نظر سان و همکاران (Sun et al., 2015) کانه‌زایی سولفید در کانسارهای پورفیری با احیای سولفات کنترل می‌شود که این عامل خود ریشه در تبلور ابتدایی مگنتیت (از ماگمای اولیه اکسیدی) دارد. علاوه بر این در ماگماهای اکسیدی، حجم بیشتری از گوگرد به شکل سولفات نسبت به حالت احیایی قابل انتقال است.

مطالعه سیالات در گیر

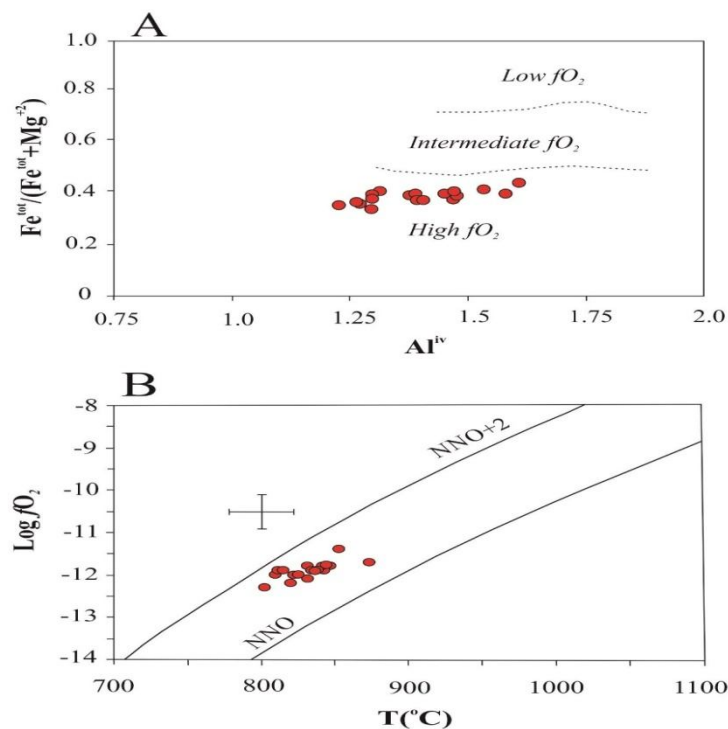
بررسی سیالات در گیر نقشی مهم در تعیین خاستگاه سیالات و فلزات در سیستم‌های مس پورفیری ایفا می‌کند (Wilkinson, 2001). علاوه بر این محاسبه دما، عمق و فشار زمان تشکیل، نوع سیستم و شیمی سیالات به‌دام افتاده مواردی هستند که بررسی سیالات در گیر آنها را مشخص می‌کنند. فرآیندهای کانی‌سازی توسط عواملی از قبیل حرارت، فشار، PH و عملکرد سیالات ماگمایی و جوی کنترل می‌شود (Pirajno, 1992). بسیاری از محققان اعتقاد دارند که سیالات و شاید اغلب فلزات مهم شکل‌دهنده کانسارهای پورفیری از توده نفوذی مشتق شده‌اند.

طبق بررسی‌های سیالات در گیر به‌همراه لیزر اسپکتروسکوپی رامان زراسوندی و همکاران (Zarasvandi et al., 2015b) پنج نوع از سیالات در گیر، در کانسار دالی تشخیص داده شد که شامل: 1) دو فاز غنی از مایع (مایع + بخار) (IIA، 2) دو فاز غنی از بخار (بخار + مایع) (IIB، 3) سیال در گیر شور ساده (مایع + بخار + هالیت) (IIIA، 4) سیال در گیر شور حاوی کانی اوپک (مایع + بخار + هالیت + پیریت + کالکوپیریت + هماتیت) (IIIB و 5) سیال در گیر چند فاز (مایع + بخار + هالیت + انیدریت + هماتیت + مگنتیت + پیریت + کالکوپیریت) (IIIB) هستند. همچنین همان‌طور که پیشتر ذکر شد، طبق بررسی‌های پیشین انجام شده بر روی فازهای

طبق رده‌بندی اندرسون و اسمیت (Anderson and Smith, 1995)، اگر میزان $Fe_{tot}/Fe_{tot}+Mg$ بین 0/6-0 باشد نشان‌دهنده گریزندگی بالای اکسیژن، 0/8-0/6 گریزندگی اکسیژن حدواسط و از 0/8-1 نشان‌دهنده گریزندگی پایین اکسیژن است. چنانچه در (شکل A-9) نشان‌داده شده است، آمفیبول‌های مورد بررسی در کانسار دالی در شرایط گریزندگی نسبتاً بالا تشکیل شده‌اند. همچنین طبق محاسبات ریدولفی و همکاران (Ridolfi et al., 2010) از منیزیم موجود در آمفیبول‌ها برای محاسبات گریزندگی اکسیژن (ΔNNO) در ماگماهای کالک‌آلکالن می‌توان استفاده کرد. نسبت گریزندگی اکسیژن محاسبه‌شده از ترکیب آمفیبول در کانسار دالی از منیزیم هستینگزیت دما بالا ($T=899^{\circ}C$, $\Delta NNO+0/1$) تا منیزیم هورنبلندهای دما پایین ($T=818^{\circ}C$, $\Delta NNO=+1/2$) افزایش می‌یابد. (شکل B-9). این تنوع مطابق با بازه گریزندگی اکسیژن به‌دست آمده برای ماگماهای کالک‌آلکالن یعنی $\Delta NNO -1$ تا $+3$ توسط ریدولفی و همکاران (Ridolfi et al., 2010) است، در توده گرانیتوئیدی دالی نیز مقدار گریزندگی اکسیژن افزایش یافته که بیانگر حضور ماگمای اکسیدی طی شرایط ماگمایی این کانسار است و پژوهش‌های ژنگ و همکاران et al., 2014) (Zhong al., نشان می‌دهد، رخداد هماتیت و مگنتیت و نیز انیدریت در سیالات در گیر اولیه می‌تواند نشانه‌ای بر ماگمای مادر اکسیدی باشد. بررسی‌های سیالات در گیر به‌همراه لیزر اسپکتروسکوپی رامان بر روی رگه‌های در گیر در کانه‌زایی پورفیری دالی توسط رضایی و همکاران (Rezaei et al., 2015) و نیز زراسوندی و همکاران (Zarasvandi et al., 2015b) نشان می‌دهد که سیالات در گیر اولیه در نسل اول رگه‌های نابارور همراه با دگرسانی پتاسیک این کانسار واجد کانی‌های هماتیت، مگنتیت و انیدریت است که این موضوع می‌تواند بیانگر دوام شرایط گریزندگی اکسیژن بالا از شرایط ماگمایی تا ابتدای شرایط گرمایی (شروع دگرسانی پتاسیک) در این کانسار باشد. امروزه مشخص شده است اغلب کانه‌زایی‌های پورفیری دنیا نظیر Bajo de la Alumbrera در آرژانتین، کانسار Tongkuangyu در چین و یا کانسار مس - مولیبدن

میزان شوری و دمای آنها کاسته شده است. این کاهش در نتیجه اختلاط سیالات ماگمایی اولیه با آب‌های جوی است که باعث تکامل سیال در جهت شوری کمتر می‌شود. بررسی سیالات درگیر چندسازه موجود در رگه‌های کوارتز اولیه نابارور همراه با دگرسانی پتاسیک، بیشینه دمای 620°C و شوری 75 Wt.\% NaCl را نشان داد که نشان‌دهنده شروع شرایط گرمابی در کانسار دالی است. با توجه به دماسنجی کانی‌های ماگمایی آمفیبول که دمای 818 تا 899 درجه سانتی‌گراد و فشار $3/5$ تا $5/3$ کیلو بار را نشان دادند، این شرایط نشان‌دهنده کاهش 279 درجه‌ای دما از شرایط ماگمایی به شرایط گرمابی است.

سیالات درگیر این کانسار با لیزر اسپکتروسکوپی رامان رضایی و همکاران (Rezaei et al., 2015) نشان‌دهنده شده است که سیالات اولیه خارج شده از ماگمای مادر این کانسار دارای فاز بخار CO_2 و نیز دارای ماهیت اکسیدی بوده‌اند؛ به‌طوری‌که رگه‌های اولیه کوارتزی همراه با دگرسانی پتاسیک این کانسار دارای سیالات درگیر چندسازه حاوی کانی‌های انیدریت و همتایت هستند، از طرفی طبق داده‌های ریزدماسنجی (Asadi, 2015; Zarasvandi et al., 2015b) می‌توان میان‌بارهای سیال کانسار دالی را به دو گروه تقسیم کرد، از جمله (1) میان‌بارهای با شوری و دمای بالا و (2) میان‌بارهای با شوری و دمای پایین. این داده‌ها نشان می‌دهد که میان‌بارهای با شوری و دمای بالا از یک منبع ماگمایی مشتق شده‌اند که به تدریج از



شکل 9. A: نمودار گریزندگی اکسیژن بر پایه ترکیب آمفیبول (Anderson and Smith, 1995) و B: نمودار گریزندگی اکسیژن در برابر دما (after Ridolfi et al. 2010)

Fig. 9. A: Oxygen fugacity diagram based on the composition of the amphibole (Anderson and Smith, 1995), and B: $\log f\text{O}_2$ -T diagram (after Ridolfi et al. 2010)

نتیجه‌گیری

(1) آمفیبول‌های موجود در سنگ‌های کوارتز دیوریت در کانسار دالی همگی از نوع ماگمایی، در گروه آمفیبول‌های

با توجه به داده‌های به‌دست آمده، می‌توان چنین نتیجه گرفت که:

دادند نشان‌دهنده کاهش 279 درجه‌ای دما از شرایط ماگمایی به شرایط گرمایی است.

(6) زمین‌شیمی آمفیبول نشان‌دهنده غالب‌بودن شرایط اکسیدان در ماگمای مادر کانسار دالی است و با توجه به گریزندگی اکسیژن بالا ($+0/1 = \text{NNO}$) شرایطی مساعد برای شروع کانه‌زایی در این کانسار ایجاد شده است.

(7) با توجه به بررسی میان‌بارهای سیال، سیالات اولیه خارج شده از ماگمای مادر این کانسار دارای ماهیت اکسیدی بوده‌اند؛ به‌طوری‌که رگه‌چه‌های اولیه کوارتزی همراه با دگرسانی پتاسیک این کانسار دارای سیالات درگیر چندسازه حاوی کانی‌های انیدریت و همتایت هستند. این موضوع نشان می‌دهد محیط اکسیدی از شرایط ماگمایی تا ابتدای گرمایی غالب بوده است.

(8) تبلور ابتدایی مگنتیت در محیط اکسیدان و نیز خروج CO_2 در ابتدای شرایط گرمایی (دگرسانی پتاسیک) باعث ایجاد شرایط مناسب کانه‌زایی سولفیدی شده است.

کلسیک و از نوع منیزو هورنبلند، ادنیت، منیزو هستتگزیت و چرمایت است.

(2) از نظر محیط زمین‌ساختی این آمفیبول‌ها بیشتر در محدوده آمفیبول‌های وابسته به مناطق فروورانش (S-amph) قرار می‌گیرند. همچنین با توجه به جای‌گیری توده نفوذی دالی هم‌زمان با برخورد و فشارش ناشی از پلیت عربی، به نظر می‌رسد رژیم زمین‌ساختی فشارشی شرایطی مناسب را برای هضم بیشتر سنگ‌های پوسته برای ماگمای مادر دالی فراهم کرده است.

(3) پلاژیوکلازهای این کانسار تغییرات ترکیبی محدودی دارند و اغلب در محدوده آندزین و لابرادوریت قرار می‌گیرند.

(4) دماسنجی به‌روش هورنبلند - پلاژیوکلاز حداقل و حداکثر دمای به تعادل رسیدن این دو زوج کانی را به‌ترتیب 777 و 850 درجه سانتی‌گراد در فشار 1 تا 4 کیلو بار برآورد می‌کند که بیانگر آخرین مرحله تبلور توده در این کانسار است.

(5) با توجه به دماسنجی کانی‌های ماگمایی آمفیبول که دمای 818 تا 899 درجه سانتی‌گراد و فشار 3/5 تا 5/3 کیلو بار را نشان

References

- Alai, Mahabadi, S., Kohansal, R., Ghomian, Y. and Soltani, M.V., 2000. Geological map of SALAFCHEGAN-KHORHE, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Almeev, R.R. and Ariskin, A.A., 1996. Mineral-melt equilibria in a hydrous basaltic system: computer modeling. *Geochemistry International*, 34(7): 563-573.
- Anderson, J.L. and Smith, D.R., 1995. The effects of temperature and $f\text{O}_2$ on the Al-in hornblende barometer. *American Mineralogist*, 80(5-6): 549-559.
- Asadi, F., 2015. The Investigation characteristics of Physico-Chemical of the fluid inclusions at the Dalli Cu-Au porphyry deposit, Delijan, Markazi province. M.Sc. Thesis, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran, 118 pp. (in Persian with English abstract)
- Asadi Harouni, H., 2010. Final exploration report at Dalli Cu-Au deposit. Unpublished report (Industry, Mine and Trade of Central Province), Central Province, Report DP-01, 40 pp.
- Ayati, F., Noghreyan, M.K. and Khalili, M., 2012. Petrographic and mineral-chemistry of the magmatic-alteration zones South of Salafchegan. *Petrology*, 2(8): 1-20. (in Persian with English abstract)
- Ayati, F., Yavuz, F., Asadi Harouni, H., Richards, J.P. and Jourdan, F., 2013. Petrology and geochemistry of calc-alkaline volcanic and subvolcanic rocks, Dalli porphyry copper-gold deposit, Markazi Province, Iran. *International Geology Review*, 55(2): 158-184.
- Blundy, J.D. and Holland, T.J.B., 1990. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole plagioclase geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104(2): 208-224.
- Camus, F., 2005. The Andean porphyry systems. In: T.M. Porter (Editor), *Super Porphyry Copper & Gold Deposits - A Global Perspective*. PGC Publishing, Adelaide, pp. 45-63.
- Chivas, A.R., 1981. Geochemical evidence for magmatic fluids in porphyry copper mineralization. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 78(4):389-403.
- Cloos, M., 2001. Bubbling Magma Chambers, Cupolas and Porphyry Copper Deposits. *International Geology Review*, 43(4): 285-311.

- Coltorti, M., Bondaiman, C., Faccini, B., Grégoire, M., O'Reilly, S.Y. and Powell, W., 2007. Amphiboles from suprasubduction and intraplate lithospheric mantle. *Lithos*, 99(1-2): 68-84.
- Dachs E., 2004. PET: Petrological elementary tools for Mathematica an update. *Computers and Geoscience*, 30(2):173-182.
- Daneshjou, M., 2014. Geology, Geochemistry and Gensis model of the Dalli Cu-Au Porphyry Deposit, Delijan, Markazi province. M.Sc. Thesis, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran, 141 pp. (in Persian with English abstract)
- Davidson, J., Turner, S., Handley, H., Macpherson, C. and Dosseto, A., 2007. Amphibole "sponge" in arc crust? *Geology*, 35(9): 787-790.
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1991. An introduction to rock forming mineral. Longman, London, 787 pp.
- Eugster, H.P. and Wones, D.R., 1963. Stability Relations of the Ferruginous Biotite, Annite. *Journal of Petrology*, 3(1): 82-125.
- Ewart, A., 1979. A review of the mineralogy and chemistry of tertiary recent dacitic, latitic, rhyolitic and related salic volcanic rocks. In: B. Fred (Editor), *Trondhjemites, dacites, and related rocks*. Springer- Verlag, Berlin, pp. 12-101.
- Frost, B.R., 1991. Introduction to oxygen fugacity and its petrologic importance. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 25: 1-9.
- Giret, A., Bonin, B. and Leger, J.M., 1980. Amphibole compositional trends in oversaturated and undersaturated alkaline plutonic ring-complexes. *Canadian Mineralogist*, 18(4): 481-495.
- Hammarstrom, J.M. and Zen, E., 1986. Aluminum-in-hornblende: an empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist*, 71(11-12): 1297-1313.
- Helmy, H.M., Ahmed, A.F., El Mahallawi, M.M. and Ali, S.M., 2004. Pressure, temperature and oxygen fugacity conditions of calc-alkaline granitoids, Eastern Desert of Egypt, and tectonic Implication. *Journal of African Earth Science*, 38(3): 255-268.
- Hendry, D.A.F., Chivas, A.R., Long, J.V.p. and Reed, S.J.B., 1985. Chemical differences between minerals from mineralizing and barren intrusions from some North American porphyry copper deposits. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 89(4): 317-329.
- Hezarkhani, A., 2006. Hydrothermal evolution of the Sar-Cheshmeh porphyry Cu-Mo deposit, Iran: Evidence from fluid inclusions. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(4-6): 409-422.
- Hirschmann, M.M., Ghiorso, M.S., Davis, F.A., Gordon, S.M., Mukherjee, S., Grove, T.L., Krawczynski, M., Medard, E. and Till, C.B., 2008. Library of Experimental Phase Relations (LEPR): A database and Web portal for experimental magmatic phase equilibria data. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(3): 1-15.
- Holland, T.J.B. and Blundy, J.D., 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116: 433-447.
- Hollister, L.S., Grissom, G.C., Peters, E.K., Stowell, H.H. and Sisson, V.B., 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American Mineralogist*, 72(3-4): 231-239.
- Jiang, C.Y. and An, S.Y., 1984. On chemical characteristics of calcic amphiboles from igneous rocks and their petrogenesis significance. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 03: 1-9. (in Chinese with English abstract)
- John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D., Blakely, R.J., Robert, J., Bodnar, J.H., Dilles, F.G., Fred T. Graybeal, John L., Mars, D.K., McPhee, R., Seal, Ryan D., Taylor. and Peter G. Vikre., 2010. Porphyry Copper Deposit Model, Chapter B of Mineral Deposit Models for Resource Assessment. U.S. Geological Survey, U.S.A, Report 2010-5070 B, 166 pp.
- Johnson, M.C. and Rutherford, M.J., 1989. Experimental calibration of the aluminium-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks. *Geology*, 17(9): 837-841.
- Leake, B.E., Woolley, A.R., Arps, C.E.S., Birch, W.D., Gilbert, M.C., Grice, J.D., Hawthorne, F.C., Kato, A., Kisch, H.J., Krivovichev, V.G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J.A., Maresch, W.V., Nickel, E.H., Rock, N.M.S., Schumacher, J.C., Smith, D.C., Stephenson, N.C.N., Ungaretti, L., Whittaker, E.J.W. and Youzhi, G., 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals

- and Mineral Names. *Canadian Mineralogist*, 35(1): 219–246.
- Li, S.R. and Santosh, M., 2014. Metallogeny and craton destruction: records from the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 56: 376–414.
- Li, S.R., Santosh, M., Zhang, H.F., Luo, J.Y., Zhang, J.Q., Li, C.L., Song, J.Y. and Zhang, X.B., 2014. Metallogeny in response to lithospheric thinning and craton destruction: geochemistry and U–Pb zircon chronology of the Yixingzhai gold deposit, central North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 56: 457–471.
- Müntener, O., Kelemen, P.B. and Grove, T.L., 2001. The role of H₂O during crystallization of primitive arc magmas under uppermost mantle conditions and genesis of igneous pyroxenites: an experimental study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(6): 643–658.
- Naney, M.T., 1983. Phase equilibria of rock-forming ferromagnesian silicates in granitic systems. *American Journal of Science*, 283(10): 993–1033.
- O'Neill, H.S.C. and Pownceby, M.L., 1993. Thermodynamic data from redox reactions at high temperatures. I. An experimental and theoretical assessment of the electrochemical method using stabilized zirconia electrolytes, with revised values for the Fe–FeO, Co–CoO, Ni–NiO, and Cu–Cu₂O oxygen buffers, and new data for the W–WO₂ buffer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 114(3): 296–314.
- Pirajno, F., 1992. *Hydrothermal mineral deposits*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 703 pp.
- Pletchov, P.Y. and Gerya, T.V., 1998. Effect of H₂O on plagioclase-melt equilibrium. *Experiment in Geosciences*, 7(2): 7–9.
- Preston, J. and Still, J., 2001. Mineral chemistry Spreadsheet V 15. Electronic internet publication, www.earth.ox.ac.uk/~davewa/pt/tools/formula.xls
- Putirka, K.A., 2005. Igneous thermometers and barometers based on plagioclase plus liquid equilibria: tests of some existing models and new calibrations. *American Mineralogist*, 90(2-3): 336–346.
- Rezaei, M., Zarasvandi, A., Azimzadeh, A.M. and Pourkaseb, H., 2015. Fluid inclusion petrography evaluation of Dalli porphyry copper-gold deposit using laser Raman spectroscopy analysis. 18th Symposium of the Geological Society of Iran, Tarbiat Modares University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian with English abstract)
- Richards, J.P., 2003. Tectono-Magmatic Precursors for Porphyry Cu-(Mo-Au) Deposit Formation. *Economic Geology*, 98(8): 1515–1533.
- Richards, J.P., 2005. Cumulative Factors in the Generation of Giant Calc-Alkalic Porphyry Cu Deposits. In: T.M. Porter (Editor), *Super Porphyry Copper & Gold Deposits - A Global Perspective*. PGC Publishing, Adelaide, pp. 7–25.
- Richards, J.P., 2009. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere. *Geology*, 37(3): 247–250.
- Ridolfi, F., Renzulli, A. and Puerini, M., 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: An overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(1): 45–66.
- Rowins, S.M., 2000. Reduced porphyry copper-gold deposits: A new variation on an old theme. *Geology*, 28(6): 491–494.
- Schmidt, M.W., 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(2): 304–310.
- Sillitoe, R.H., 1972. A Plate Tectonic Model for the Origin of Porphyry Copper Deposits. *Economic Geology*, 67(2): 184–197.
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41.
- Smith, J.V. and Brown, W.L., 1988. *Feldspar Minerals. Crystal structures, physical, chemical, and microstructural properties*. Springer-Verlag, New York. 809 pp.
- Stein, E. and Dietl, C., 2001. Hornblende thermobarometry of granitoids from the Central Odenwald (Germany) and their implications for the geotectonic development of the Odenwald. *Mineralogy and Petrology*, 72(1): 185–207.
- Sun, W., Huang, R.F., Li, H., Hu, Y.B., Zhang, C.C., Sun, S.J., Zhang, L.P., Ding, X., Li, C.Y., Zartman, R.E. and Ling, M.X., 2015. Porphyry deposits and oxidized magmas. *Ore Geology Reviews*, 65: 97–131.
- Titley, S.R. and Beane, R.E., 1981. Porphyry copper deposits. Part 1. Geologic Setting, Petrology, and Tectogenesis. In: J.W.

- Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Richards (Editors), Economic Geologists, 75th Anniversary Volume. Society of Economic Geologists, U.S.A, pp. 214-234.
- Wang, R., Richards, J.P., Hou, Z.Q., Yang, Z.M., Gou, Z.B. and DuFrane, A., 2014. Increasing Magmatic Oxidation State from Paleocene to Miocene in the Eastern Gangdese Belt, Tibet: Implication for Collision-Related Porphyry Cu-Mo \pm Au Mineralization. *Economic Geology*, 109(7): 1943–1965.
- Whitney, J.A., 1975. Volatiles in magmatic systems, in *Fluid-mineral equilibria in hydrothermal systems*. *Reviews in Economic Geology*, 1: 155-175.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185-187.
- Whitney, J.A. and Storme jr, J.C., 1985. Mineralogy, petrology, and magmatic conditions from the Fish Canyon Tuff, central San Juan volcanic field, Colorado. *Journal of Petrology*, 26(3): 726-762.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55: 229-272.
- Yoder, H.S. and Tilley, G.E., 1962. Origion of basalt magmas: an experimental study of natural and synthetic rock systems. *Journal of Petrology*, 3(3): 342-532.
- Zarasvandi, A. and Liaghat, S., 2005. Discrimination of Productive and Nonproductive Porphyritic Intrusions in the South of Khezr-Abad area, Yazd: Using by REE Geochemistry. *Proceeding of 9th symposium of Geological Society of Iran*, Kharazmi University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian with English abstract)
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Sadeghi, M., Lentz, D., Adelpour, M. and Pourkaseb, H., 2015a. Rare earth element signatures of economic and sub-economic porphyry copper systems in Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), Iran. *Ore Geology Reviews*, 70: 407-423.
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J., Lentz, D., Azimzadeh, A.M. and Pourkaseb, H., 2015b. Geochemistry and fluid characteristics of the Dalli porphyry Cu–Au deposit, Central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 175-191.
- Zhong, J., Chen, Y., Pirajno, F., Chen, J., Li, J., Qi, J. and Li, N., 2014. Geology, geochronology, fluid inclusion and H–O isotope geochemistry of the Luoboling Porphyry Cu–Mo deposit, Zijinshan Orefield, Fujian Province, China. *Ore Geology Reviews*, 57: 61–77.



Magmatic-hydrothermal fluid evolution of the Dalli porphyry Cu-Au deposit; using Amphibole and Plagioclas mineral chemistry

Houshang Pourkaseb^{1*}, Alireza Zarasvandi¹, Madineh Saed¹ and Ali Reza Davoudian Dehkordy²

1) Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2) Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Submitted: Nov. 25, 2015

Accepted: Feb. 22, 2016

Keywords: *Plagioclas, Amphibole, Oxygen fugacity, EMPA, Dalli, Urumieh- Dokhtar Magmatic Arc*

Introduction

The formation of porphyry copper deposits is attributed to the shallow emplacement, and subsequent cooling of the hydrothermal system of porphyritic intrusive rocks (Titley and Bean, 1981). These deposits have usually been developed along the chain of subduction-related volcanic and calc-alkalin batholiths (Sillitoe, 2010). Nevertheless, it is now confirmed that porphyry copper systems can also form in collisional and post collisional settings (Zarasvandi et al., 2015b). Detailed studies on the geochemical features of ore-hosting porphyry Cu-Mo-Au intrusions indicate that they are generally adakitic, water and sulfur- riched, and oxidized (Wang et al., 2014). For example, high oxygen fugacity of magma has decisive role in transmission of copper and gold to the porphyry systems as revealed in (Wang et al., 2014). In this regard, the present work deals with the mineral chemistry of amphibole and plagioclase in the Dalli porphyry Cu-Au deposit. The data is used to achieve the physical and chemical conditions of magma and its impact on mineralization. Moreover, the results of previous studies on the hydrothermal system of the Dalli deposit such as Raman laser spectroscopy and fluid inclusion studies are included for determination of the evolution from magmatic to hydrothermal conditions.

Materials and methods

In order to correctly characterize the physical and chemical conditions affecting the trend of mineralization, 20 least altered and fractured samples of diorite and quartz-diorite intrusions

were chosen from boreholes. Subsequently, 20 thin-polished sections were prepared in the Shahid Chamran University of Ahvaz. Finally, mineral chemistry of amphibole and plagioclase were determined using electron micro probe analyses (EMPA) in the central lab of the Leoben University.

Results

Amphibole that is one of the the main rock-forming minerals can form in a wide variety of igneous and metamorphic rocks. Accordingly, amphibole chemistry can be used as an indicator for characterizing the conditions involved during the evaluation of magma crystallization i.e., pressure, temperature, liquid water content and oxygen fugacity. Most recent studies on the porphyry copper intrusions in the Urumieh-Dokhtar magmatic arc by (Zarasvandi et al., 2015a), indicate that all of the mineralized porphyry systems (Dalli porphyry is included) consistently show high levels of La/Sm and Sm/Yb, with concave upward patterns in the rare earth elements' spider diagrams. Importantly, such features indicate high crustal assimilation in a relatively thickened crust and provide insight into the contribution of hornblende during the development of mineralized porphyry systems in the Urumieh- Dokhtar belt. The results of this study indicate that amphiboles of Dalli intrusions belong to the calsic group and range in composition from magnesio- hornblende, to edenite, magnesiohastingsite, and tschermakite. (Ridolfi et al., 2010), indicating that the alumina content of amphibole could be used for geobarometry. The calculations of geobarometry

*Corresponding authors Email: h.pourkaseb@scu.ac.i

for quartz diorite intrusions of Dalli indicate that they formed in the pressure range of 136 to 287 (MPa). Also, calculation of magmatic water content using amphibole geochemistry indicates that the water content of quartz diorite intrusions in the Dalli were between 4.6- 5.7 (wt. %). The results of plagioclase chemistry indicate that there is a little zoning in this mineral. Also, the plagioclase composition varies from Or_{0.01} to Ab_{0.48}, An_{0.50}, Or_{0.018}, Ab_{0.62} and An_{0.35}. They mostly have Andesine and Labradorite compositions.

Discussion

Amphibole minerals of the Dalli intrusions are calcic type and exhibit geochemical signatures of subduction zones. Also, characterizing the source of ore-hosting intrusions with amphibole chemistry indicate that parental magma of Dalli intrusion were generated from mixing of mantle melts with crustal materials. It seems that in an ongoing process of closure of Neo-Tethys, during compression and crustal shortening favourable conditions were provided for mixing of mantle melts with crustal materials. The geothermobarometry calculations using amphibole and plagioclase minerals indicate conditions of 777-850 °C and 1-4 Kbar, representing magmatic stage of Dalli intrusions. Also, amphibole minerals are characterized by $Fe_{tot}/Fe_{tot} + Mg > 0.3$ and $Al^{IV} > 0.7$ which reveal the presence of primary oxidative magma in the Dalli porphyry Cu-Au deposit. Oxidative conditions seem to have prevailed during the onset of the hydrothermal stage of the Dalli porphyry deposit. This is because it has been confirmed by laser Raman spectroscopy analyses that the most primitive quartz veins in the potassic alteration of the Dalli deposit are characterized by the presence of anhydrite and hematite minerals (see Zarasvandi et al., 2015b). Also, microthermometry results on the most primitive barren quartz veins in potassic alteration represent temperatures as high as 620°C which indicate the

beginning temperature of hydrothermal conditions.

Acknowledgements

Many thanks are due to the office of vice-chancellor of the Shahid Chamran University of Ahvaz for valuable information concerning the field work and sampling.

References

- Ridolfi, F., Renzulli, A. and Puerini, M., 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: An overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(1): 45–66.
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41.
- Titley, S.R. and Beane, R.E., 1981. Porphyry copper deposits. Part 1. Geologic Setting, Petrology, and Tectogenesis. In: J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Richards (Editors), *Economic Geologists, 75th Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, U.S.A, pp. 214–234.
- Wang, R., Richards, J.P., Hou, Z.Q., Yang, Z.M., Gou, Z.B. and DuFrane, A., 2014. Increasing Magmatic Oxidation State from Paleocene to Miocene in the Eastern Gangdese Belt, Tibet: Implication for Collision-Related Porphyry Cu-Mo ±Au Mineralization. *Economic Geology*, 109(7): 1943–1965.
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Sadeghi, M., Lentz, D., Adelpour, M. and Pourkaseb, H., 2015a. Rare earth element signatures of economic and sub-economic porphyry copper systems in Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), Iran. *Ore Geology Reviews*, 70: 407–423.
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J., Lentz, D., Azimzadeh, A.M. and Pourkaseb, H., 2015b. Geochemistry and fluid characteristics of the Dalli porphyry Cu–Au deposit, Central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 175–191.