

تکامل سیال گرمابی در کانسار مس - طلای پورفیری دالی با استفاده از مطالعات ریزدماسنجی میان بارهای سیال

علیرضا زراسوندی¹، فاطمه اسدی^{1*}، هوشنگ پورکاسب¹، فرهاد احمدنژاد² و حسن زمانیان²

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

(2) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

دریافت: 1393/5/27، پذیرش: 1393/12/26

چکیده

کانسار مس - طلای پورفیری دالی در بخش مرکزی کمان ماگمایی ارومیه - دختر در شهرستان دلیجان، استان مرکزی واقع شده است. در این منطقه پورفیری‌های کانه‌دار میوسن با ترکیب غالب دیوریت و کوارتز دیوریت در امتداد شمال غرب - جنوب شرق درون سنگهای آندزیت تا آندزیت بازالت جای‌گیر شده‌اند. همچنین سیال گرمابی باعث غلبه بر فشار لیتوستاتیک در گسلها و شکستگیها شده و این گسلها میزبان گسترده و متنوعی از رگه‌ها و رگه‌چه‌های کانه‌های کوارتزی با بافت استوکورک گردیده‌اند. مشاهدات صحرایی و پتروگرافی صورت گرفته نشان می‌دهد که: پنج گروه اصلی رگه همراه با سه نسل کانه‌زایی در منطقه وجود دارد. همچنین پتروگرافی سیالات درگیر نشان می‌دهد که در کانسار دالی هفت گروه سیال درگیر شامل سیال درگیر تک‌فازی غنی از مایع (IA)، تک‌فازی غنی از بخار (IB)، دوفازی غنی از مایع (مایع + بخار) (IIA)، دوفازی غنی از بخار (بخار + مایع) (IIB)، سیال درگیر شور ساده (مایع + بخار + هالیت) (IIIA)، سیال درگیر شور حاوی کانی اپک (مایع + بخار + هالیت + پیریت + کالکوپیریت + همتایت) (IIIB) و سیال درگیر چندفازی (مایع + بخار + هالیت + سیلویت + همتایت + مگنتیت + پیریت + کالکوپیریت ± اریتروسیدریت) (IIIB) قابل مشاهده می‌باشند. مطالعات دماسنجی نشان می‌دهد که محدوده دمای همگن‌شدگی نهایی و شوری برای سیال درگیر دوفازی غنی از مایع و غنی از بخار 460°C تا 140°C و $25\text{ Wt.}\% \text{NaCl}$ تا 0 و برای سیالات شور ساده، شور حاوی کانی اپک و سیالات درگیر چندفازی 620°C تا 300°C و $75\text{ Wt.}\% \text{NaCl}$ تا 30 می‌باشد. همچنین فشار و عمق برای سیالات درگیر دوفازی غنی از مایع و غنی از بخار 500 bar تا 100 و 2 km تا $0/4$ و برای سیالات شور ساده، شور حاوی کانی اپک و سیالات درگیر چندفازی 620 bar تا 200 و 3 km تا $0/8$ می‌باشد. سیالات درگیر چندفازی با بیشترین فراوانی دمای همگن‌شدگی در گستره 620°C تا 420 و بیشترین فراوانی شوری در گستره $75\text{ Wt.}\% \text{NaCl}$ تا 70 نشان‌دهنده اولین سیالاتی هستند که سبب تشکیل کانسار دالی شده‌اند. سیالات ماگمایی دمای همگن‌شدگی و شوری بالایی دارند، اما شکستگیها باعث اختلاط سیالات ماگمایی و جوی و تشکیل میان‌بارهای IIB با دما و شوری پایین‌تر سیال ماگمایی می‌گردند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که در کانسار دالی فرآیندهای جوشش، سرد شدن، اختلاط و واکنش سیال - سنگ صورت گرفته است. مطالعه سیالات درگیر نمونه‌های کوارتزی حاصل از سیال کانه‌ساز در زون‌های دگرسانی پتاسیک و کوارتز - سرسیت - پیریت، کاهش درجه حرارت را از پهنه پتاسیک 620°C تا 300 به سمت کوارتز - سرسیت - پیریت 480°C تا 160 نشان می‌دهد که مطابق با سایر نهشته‌های پورفیری در جهان است.

واژه‌های کلیدی: سیال درگیر، دگرسانی، جوشش، مس - طلای پورفیری، کمان ماگمایی، دالی.

مقدمه

جای‌گیر شده در کمانهای ماگمایی مرتبط با فرورانش دانست. بخش نئوژن - پلیستوسن کمربند آتشفشانی ایران مرکزی که از آن با عنوان کمان ماگمایی ارومیه - دختر یاد می‌شود یکی

کانسارهای مس پورفیری را می‌توان محصول سردشدن سیستم‌های گرمابی مرتبط با نفوذیه‌های کم‌عمق پورفیری

شکستگیهای ریز یا رخهای کنای میزبان به‌دام افتاده‌اند. مطالعات سیالات درگیر در کانسارهای مس پورفیری می‌تواند ابزار مهمی جهت شناخت شرایط فیزیکیوشیمیایی سیال گرمابی مسوول دگرسانی و کانه‌زایی باشد (Calagari, 2004). خصوصیات فیزیکی و ترکیب سیالات گرمابی که از پتروگرافی و ریزدماسنجی سیالات درگیر به دست می‌آید شامل دما، فشار (یا عمق)، چگالی و ترکیب محلولهای اصلی (نمکها و گازها) هستند (John et al., 2010)، از طرف دیگر پی بردن به ماهیت و تکامل فاز سیال جهت توسعه مدل‌های تشکیل کانسار و اکتشاف آنها اساسی می‌باشد. هدف از این تحقیق بررسی تکامل زمین‌شناسی سیالات درگیر و تعیین ویژگیهای سیال گرمابی کانه‌دار در کانسار دالی با استفاده از مطالعه ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال است.

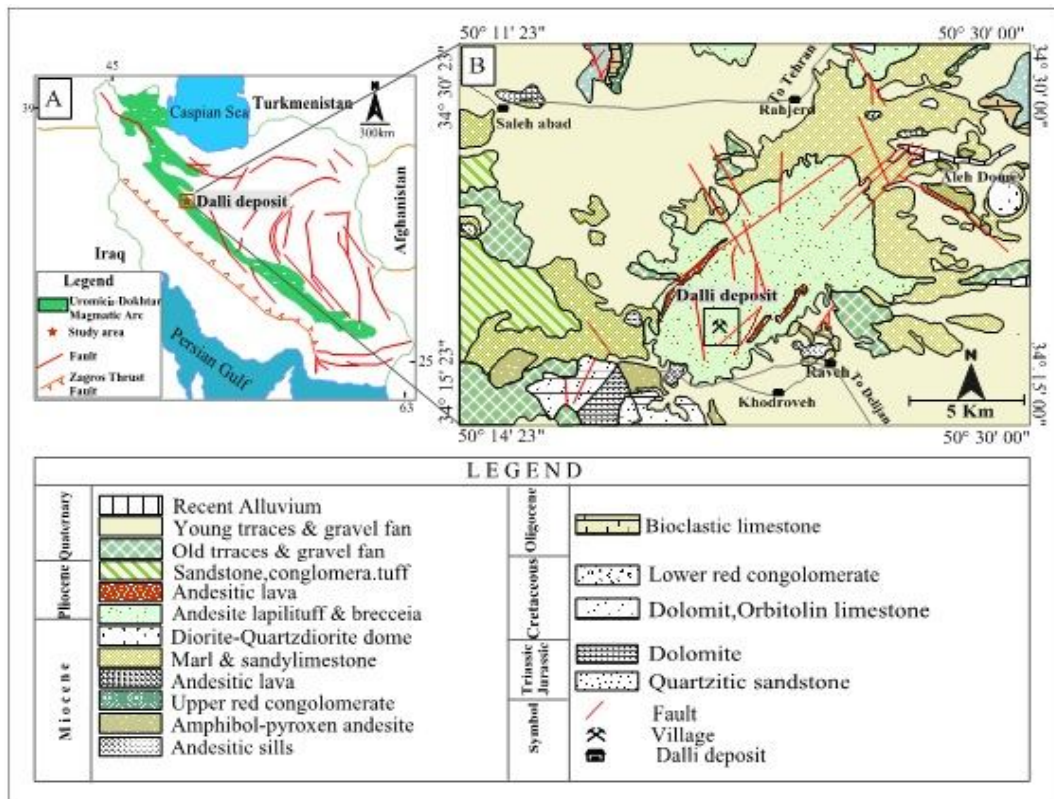
زمین‌شناسی کانسار

کمر بند مس پورفیری ایران در مرز غربی بلوک مرکزی ایران واقع شده و در برگیرنده کمان ماگمایی ارومیه- دختر با سنگهای نفوذی کالک‌آلکان می‌باشد (Hezarkhani, 2006; Zarasvandi et al., 2007). نفوذیهای پورفیری میزبان کانه، ترکیب گرانودیوریت تا کوارتز مونزونیت دارند (Zarasvandi et al., 2015). کانسار دالی در شمال شرق استان مرکزی و بر روی این کمان واقع شده است (شکل 1- A و B). مهمترین واحدهای چینه‌شناسی منطقه عبارتند از: رسوبات آبرفتی کواترنری، واحدهای آتشفشانی و نیمه‌آتشفشانی نئوژن (شکل 2- A) که طی دو مرحله ماگمایی تشکیل شده‌اند در مرحله اول فورانهای پس از برخورد در میوسن میانی تا بالایی است که شامل گدازه‌ها و آذرآوری‌ها با ترکیبی از بازالت‌اندزیت تا آندزیت (بازیک- حدواسط) می‌باشند و استراتوولکان‌های سخت حصار، آق‌بزرگ و کوه خستک را می‌سازند. فاز دوم با فورانهای آندزیتی- داسیتی بیانگر اسیدی‌تر شدن فعالیت‌های ماگمایی منطقه است و دارای آثاری تخریبی همچون گسترش دهانه آتشفشانی کوه خستک می‌باشد که به‌صورت گدازه و توده‌های نفوذی در واحدهای رسوبی قدیمی‌تر نفوذ کرده‌اند، رسوبات الیگومیوسن نیز شامل نهشته‌های کنگلومرایی و رسوبات آواری- تبخیری سازند قرمز پایینی، رسوبات دریایی سازند قم (شکل 2- B) و رسوبات تبخیری- قاره‌ای سازند قرمز بالایی‌اند

از زنجیره‌های استراتوولکانیکی و نفوذی‌های گرانیتوئیدی (ظاهراً با کنترل گسلی) است که مهمترین ذخایر مس پورفیری ایران را در خود جای داده است (Forster, 1978; Sillitoe, 1979; Shahabpour, 1999; Richards, 2003; Cooke et al., 2005; Shahabpour, 2005; Zarasvandi et al., 2005; Darabi et al., 2013a; نظر زراسوندی و همکاران (Zarasvandi et al., 2005)، سه ایالت مهم مس ایران در ارومیه- دختر قرار گرفته‌اند و بر همین اساس این واحد ساختاری به سه بخش تقسیم می‌شود، 1) ناحیه اردستان- سرچشمه- خارستان در مرکز و جنوب شرق ارومیه- دختر؛ در این ناحیه ذخایر بزرگی چون سرچشمه، میدوک و کاله کافی وجود دارند و علاوه بر آنها ذخایر اقتصادی و غیر اقتصادی همچون دره‌زرشک- علی‌آباد، آب دره، دره زر، سریدون و خارستان، 2) ناحیه ساوه- اردستان در مرکز ارومیه- دختر؛ که کانسار مس- طلای پورفیری دالی در این بخش قرار گرفته است، 3) تکاب- میانه، قره داغ- سبلان در شمال غرب ایران دومین ایالت مهم مس ایران به شمار می‌آید. کانسار دالی در استان مرکزی و 9 کیلومتری شمال غرب روستای راهه از توابع شهرستان دلیجان قرار دارد. ماگمای مادر سنگهای آتشفشانی و نیمه آتشفشانی نئوژن ناحیه دارای ترکیبات کالک‌آلکان با تاثیرپذیری از سیالات و رسوبات پوسته‌ای است. مطالعات جامعی در ارتباط با پتروژنز، تحولات ساختاری، ژئوشیمی، ژئوفیزیک، دگرسانی، زمین‌شناسی، مدل زایشی کانسار، تهیه نقشه‌های دگرسانی، توزیع عناصر بالقوه سمی، ارزیابی هاله‌های ژئوشیمیایی و مدل‌سازی زون‌های کانه‌ساز منطقه صورت گرفته است (Mohajjel and Proohan, 2005; Ayati et al., 2008; Ayati et al., 2013; Darabi et al., 2013b; Daneshjou, 2014; Saremi, 2014). کانسار دالی، 5/08 میلیون تن با عیار 0/65 گرم در تن طلا و 0/5 درصد مس می‌باشد. پژوهش حاضر برای اولین بار تکامل سیال گرمابی را با استفاده از مطالعه میان‌بارهای سیال در این کانسار مورد بررسی قرار داده است. مطالعات جدید سیالات درگیر در کانسارهای پورفیری صورت گرفته است (Rusk and Reed, 2008; Shen et al., 2010; Yong et al., 2012; Liu et al., 2012; Nateghi and Hezarkhani, 2013; Zarasvandi et al., 2013; Alizadeh and Hezarkhani, 2014; Siahcheshm et al., 2014). سیالات درگیر حجمهای کوچکی از سیال تشکیل‌دهنده کانسار هستند که ضمن تبلور کانیها یا پس از تبلور در

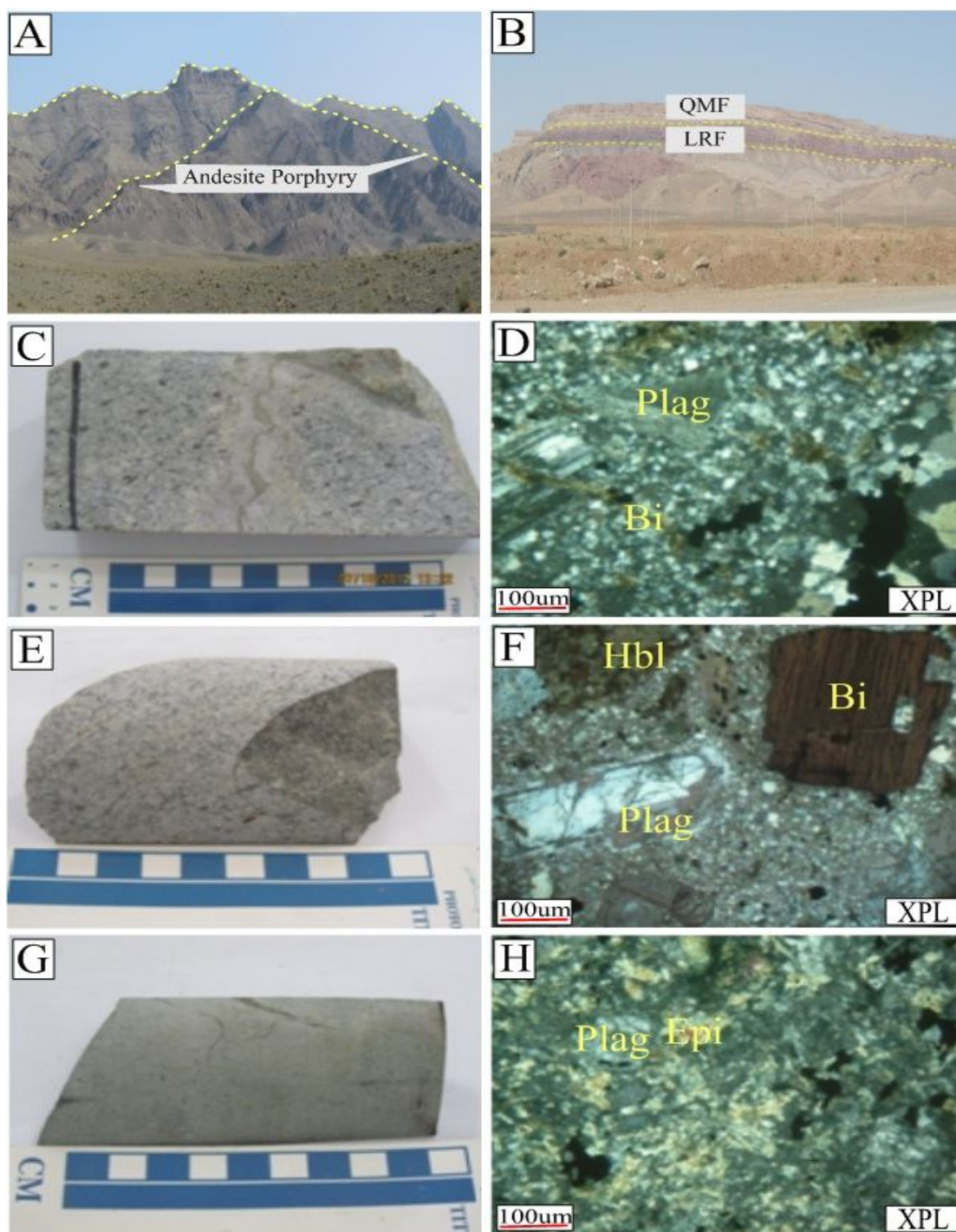
میزبان کانسار دالی ترکیبی در محدوده دیوریت (شکل 2- C و D-2) تا کوارتز دیوریت پورفیری (شکل 2- E و F-2) را نشان می‌دهد. واحد آتشفشانی منطقه نیز در گروه آندزیت تا آندزیت بازالت پورفیری نقش سنگ دیواره را ایفا می‌کنند. دگرسانی پروپلیتیک بیشترین گسترش را در منطقه داراست و تقریباً تنها با سنگ دیواره آندزیتی (شکل 2- G و H-2) همراه است. بخش شمالی کانسار دالی از دو استوک پورفیری با ترکیب سنگ‌شناسی کوارتز دیوریت پورفیری تشکیل شده که به درون سنگ دیواره آندزیتی نفوذ کرده است. دگرسانی این بخش عمدتاً شامل پتاسیک در بخش مرکزی و پروپلیتیک در بخش سنگ دیواره آندزیتی می‌باشد و آثار دگرسانی سرسیتی و آرژیلیک (تخریب فلدسپار) بسیار نادر و جزئی است (Saremi, 2014). این توده در بررسی‌های سطحی به وسیله دگرسانی‌های پتاسیک و کوارتز- سرسیت- پیریت و همراه با رگه‌ها و استوکورک‌های سیلیسی مشخص می‌شود.

که در اثر پس‌روپها، ایجاد شرایط کششی و پیش‌روی و در نهایت پس‌روپهای ناشی از تحولات نئوتتیس در بازه زمانی ائوسن تا میوسن نهشته شده‌اند (Shahabpour, 2007). واحدهای آتشفشانی نیز تحت تأثیر محلولهای گرمایی دچار دگرسانی و فرآیند کانه‌زایی شده‌اند. چینه‌های آتشفشانی میوسن و رخنمون سنگهای آتشفشانی و پیروکلاستیک‌ها در راستای شمال شرقی - جنوب غربی بیشتر از سی کیلومتر گسترش یافته‌اند (Asadi Haroni, 2008). کانسار دالی دارای دو تپه شمالی و جنوبی است که نتایج بررسی‌های صحرایی و مطالعات سنگ‌نگاری بیانگر تشکیل و زایش کانسار در طی سه مرحله شامل: 1) فوران توده‌های آتشفشانی در منطقه و نفوذ توده‌های درونی با ترکیب سنگ‌شناسی تقریباً مشابه با واحد ولکانیکی می‌باشد؛ 2) عملکرد سیالات گرمایی و رخداد دگرسانی درون‌زاد؛ 3) تأثیر سیالات جوی، که عمدتاً بر کانسار جنوبی است و باعث رخداد دگرسانی برون‌زاد و ایجاد کلاک آهنی به ضخامت تقریبی 1 تا 2 متر شده است.



شکل 1. A: نقشه موقعیت کانسار دالی (ساده شده از Stocklin and Setudinia, 1972)، B: نقشه زمین‌شناسی ناحیه‌ای کانسار دالی (ساده شده از Emami, 1991).

Fig. 1. A: location map of the Dalli deposit (modified after Stocklin and Setudinia, 1972), B: regional geological map of the Dalli deposit (modified after Emami, 1991).



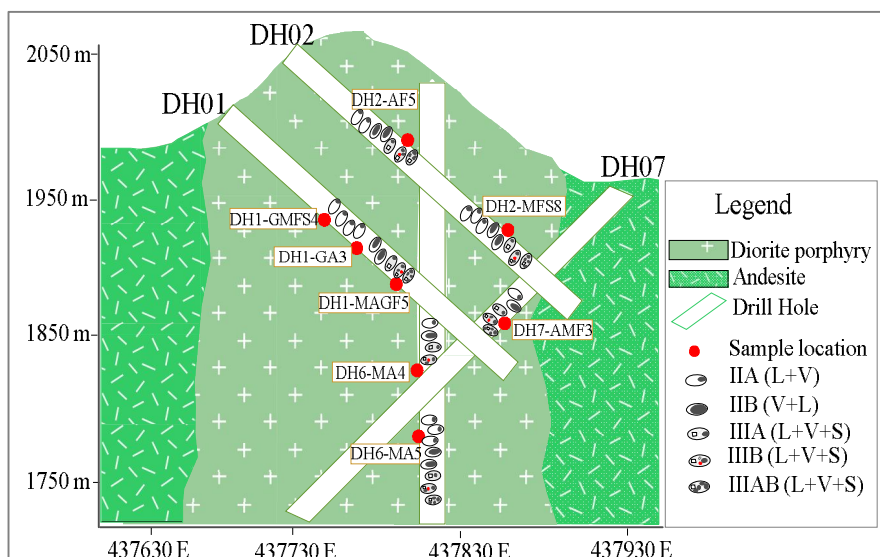
شکل 2. A: واحدهای آتشفشانی اطراف محدوده کانسار دالی، B: نمایی از سازندهای رسوبی، C: سنگ میزبان دیوریت پورفیری با رگه کوارتز کانه‌دار، D: تصویر میکروسکپی دیوریت پورفیری، E: سنگ میزبان کوارتز دیوریت پورفیری، F: تصویر میکروسکپی کوارتز دیوریت پورفیری، G: سنگ دیواره آندزیت پورفیری، H: تصویر میکروسکپی آندزیت پورفیری. (LRF= سازند قرمز پایینی، QMF= سازند قم، Plag= پلاژیوکلاز، Bi= بیوتیت، Hbl= هورنبلند، Epi= اپیدوت) (Rusk and Reed, 2008).

Fig. 2. A: volcanic rocks of the Dalli deposit, B: photograph showing sedimentary successions, C: hosted porphyritic diorite with ore-bearing quartz vein, D: photomicrographs of diorite porphyry, E: host-rock of quartz diorite porphyry, F: photomicrographs of quartz diorite porphyry, G: wall-rock of andesite porphyry, H: photomicrographs of andesite porphyry. (LRF= lower Red conglomerate formation, QMF= qom limestone, Plag= plagioclase, Bi= biotite, Hbl= hornblende, Epi= epidote) (Rusk and Reed, 2008).

روش مطالعه

به منظور طبقه‌بندی انواع رگه‌های موجود در کانسار، یازده نمونه از رگه و رگه‌چه‌های نمونه‌های سطحی و گمانه‌های اکتشافی (شکل 3)، مربوط به زون‌های دگرسانی پتاسیک، کوارتز-سرسیت-پیریت، پروپلیتیک و زون اکسیدی انتخاب شدند و یازده مقطع از آنها تهیه شد. اصول اولیه در طبقه‌بندی رگه‌ها و رگه‌چه‌ها با توجه به کانی‌شناسی آنها بوده و از روش سیلیتو (Sillitoe, 2010) برای تقسیم‌بندی اولیه رگه‌ها استفاده شده است. از این میان سه نمونه از گمانه DH1، دو نمونه از گمانه DH2، دو نمونه از گمانه DH6 و یک نمونه از گمانه DH7 برداشت شده و سه نمونه نیز مربوط به نمونه‌های سطحی S-15، S-11 و S-16 می‌باشد و یازده ویفر از آنها تهیه شد و حدود 170 آنالیز بر روی ویفرها صورت گرفت. نمونه‌های برداشت شده از گمانه‌ها مربوط به اعماق 270 m تا 56 هستند. مطالعات پتروگرافی بر روی رگه‌ها و طبقه‌بندی رگه‌ها و تهیه مقاطع دوبرصیقلی در دانشگاه شهید چمران اهواز و مطالعات ریزدماسنجی سیالات درگیر با استفاده از صفحه گرم‌کننده و منجمدکننده Linkham THMSG600 در دانشگاه لرستان انجام گرفته است. این دستگاه مجهز به سیستم خنک‌کننده Liquid Nitrogen LNP95 و

کنترل‌کننده دمایی T95-Linkampad- LCD Touch Screen می‌باشد که امکان کنترل سریع نسبت گرمایش و سرمایش و ثابت نگه‌داشتن دما را فراهم می‌کند. دامنه دمایی دستگاه 196- تا 600+ درجه سانتی‌گراد با دقت برابر با $\pm 0/1$ درجه سانتی‌گراد در بازه دمایی 70- تا 40+ درجه سانتی‌گراد، ± 2 درجه سانتی‌گراد در دماهای زیر 70- درجه سانتی‌گراد و ± 1 درجه سانتی‌گراد در دماهای بالای 100 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. دستگاه با سیالات درگیر مصنوعی در دماهای 56/6-، 0/01 و 374/1 درجه سانتی‌گراد کالیبره شده است. به منظور جلوگیری از ترکیدن سیالات درگیر در طی گرمایش، ابتدا فرآیند سرمایش بر روی آنها انجام پذیرفت و به منظور حصول اطمینان از دقت مشاهده رفتار ذوب، نرخ گرمایش به آهستگی ($0/2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$) صورت پذیرفته است. در حالی که به منظور جلوگیری از ثبات‌بخشی آهنگ سرمایش بالا بوده است. در این بررسیها با توجه به آن که دگرشکلی ممکن است سبب پدیده‌های تغییر میان‌بارهای سیال بعد از به‌دام افتادن از قبیل گردن‌دار شدن، نشست جزئی و کلی، آب‌شویی انتخابی و یا انتشار برخی متشکله‌ها گردد، سعی شده است تا از میان‌بارهایی با توزیع 3 بعدی، تصادفی و تک‌افتاده جهت ریزدماسنجی استفاده شود.



شکل 3. نقشه پروفیل و موقعیت گمانه‌های حفاری (ساده شده از Asadi Haroni et al., 2009) و نمونه‌هایی که برای ریزدماسنجی استفاده شد و سیالات درگیر تجمع‌یافته در این گمانه‌ها در کانسار دالی.

Fig. 3. Profile map and drill holes location (modified after Asadi Haroni et al., 2009) and samples that used for microthermometry and associated fluid inclusions in these holes in the Dalli deposit.

دگرسانی

از آثار مشاهده شده در منطقه رخداد فرآیندهای دگرسانی شبیه به سیستم‌های پورفیری شامل؛ پتاسیک، کوارتز-سرسیت-پیریت، پروپلیتیک و همراه با مقادیر ناچیزی دگرسانی آرژیلیک می‌باشد که به صورت هم‌مرکز از نفوذی‌های دیوریتی به سمت آندزیتی‌های دیواره گسترش یافته‌اند. دگرسانی پروپلیتیک به صورت هاله‌ای سبز رنگ که واحدهای آتشفشانی و آذرآواری پیرامون سنگ میزبان کانه‌زایی را پوشانده است، مشاهده کرد. این دگرسانی بیشترین همراهی را با سنگ دیواره آندزیتی منطقه دارد و در کل منطقه دارای گسترش و تأثیر چشم‌گیری می‌باشد (شکل 4-A). از لحاظ کانی‌شناسی کانیهای عمده این دگرسانی عبارتند از: اپیدوت، کلریت و به مقادیر کمتر کلسیت (شکل 4-B). دگرسانی آرژیلیک بیشتر به‌طور محلی گسترش یافته و در اعماق از شدت کمتری برخوردار است (شکل 4-C). آثار آن بیشتر به صورت تخریب واحدهای سنگی و تبدیل کانیهای سیلیکاته به کانیهای رسی در نمونه‌های دستی قابل تشخیص است. از کانیهای غالب این دگرسانی در کانسار دالی می‌توان به وجود کوارتز، آلیت، مونت‌موریلونیت و کائولینیت به صورت فاز اصلی و کلریت، اپلیت و میکروکلین به صورت فاز فرعی اشاره کرد (شکل 4-D). این ترکیب کانی‌شناسی بیانگر وجود دگرسانی آرژیلیک حدواسط است. دگرسانی کوارتز-سرسیت-پیریت در محدوده کانسار دالی بیشترین تأثیر خود را در منطقه جنوبی در واحدهای آندزیتی نشان می‌دهد، که آثار آن به صورت واحدهای نسبتاً سست به رنگ سفید تا سبز کم‌رنگ با گسترشی در مقیاس محلی و اغلب همراه با حضور رگه‌چه‌های کوارتز دیده می‌شود. براساس مطالعات کانی‌شناسی کانیهای تشکیل‌دهنده این دگرسانی عبارتند از: کلریت، سرسیت، کوارتز و پیریت (شکل 4-E). از آن‌جا که این مجموعه کانیها به‌عنوان کانیهای فرعی با مجموعه پتاسیک نیز رخ می‌دهند، شاخص پهنه کوارتز-سرسیت-پیریت، وجود این کانیها بدون حضور فلدسپات پتاسیم است. عمده این کانیها از تخریب و دگرسانی کانیهای مافیک اولیه همچون بیوتیت و هورنبلند و همچنین پلاژیوکلاز به‌وجود آمده‌اند. آثار تخریب فلدسپات‌ها به سرسیت بیشتر در مرزها و شکستگیهای موجود در درشت‌بلورهای فلدسپات قابل مشاهده است. از کانه‌های مهم این زون در منطقه پیریت و کالکوپیریت

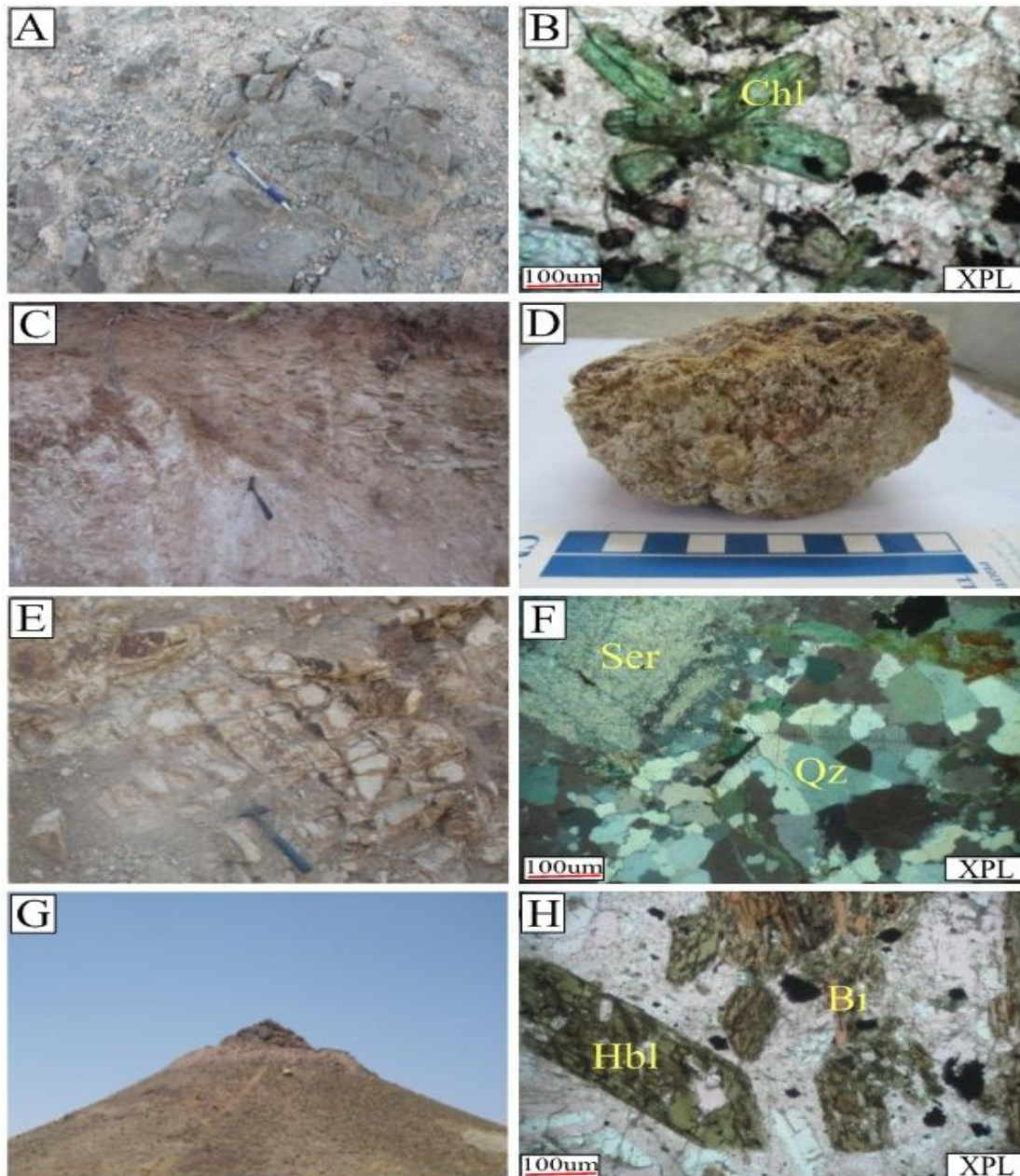
و مقادیر ناچیز بورنیت و کوولیت به صورت رگه می‌باشد (شکل 4-F). از ویژگیهای بارز دگرسانی فیلیک در منطقه همراهی آن با استوکورک‌های کوارتزی را می‌توان بیان کرد که نشانه‌ای از حضور دگرسانی سرسیت سفید در کانسار است (Sillitoe, 2010). دگرسانی پتاسیک شامل فازهای فلدسپات پتاسیم و بیوتیت است؛ فلدسپات پتاسیم، کانی پتاسیم غالب در سنگ دیواره‌های سیلیسی یا گرانیتوئیدها (شکل 4-G) می‌باشد، در حالی که بیوتیت کانی پتاسیم غالب در سنگ دیواره‌های مافیک و متوسط می‌باشد. کانیهای سولفیدی در این دگرسانی عبارتند از؛ بورنیت، کالکوپیریت و یا پیریت (John et al., 2010; Sillitoe, 2010). در کانسار مورد مطالعه دگرسانی پتاسیک با حضور کانیهای بیوتیت ثانویه، فلدسپات پتاسیم، مگنتیت و کوارتز در بخش مرکزی استوک‌های نفوذی (سنگ میزبان دیوریت-کوارتز دیوریت) قابل تشخیص است (شکل 4-H). کانیهای بیوتیت به دو صورت پراکنده و رگه‌چه‌ای با رنگ قهوه‌ای روشن که بیانگر نسبت Mg/Fe بیشتر است اغلب در واحدهای دیوریتی دیده می‌شود در حالی که کانیهای فلدسپات پتاسیم بیشتر به صورت رگه و رگه‌چه‌های صورتی رنگ مشخص در بخشهای سیلیسی شناسایی شدند.

پتروگرافی و رده‌بندی رگه‌های کانه‌دار

توالی و ترتیب رگه‌های در ذخایر مس پورفیری برای نخستین بار توسط گوستافسون و هانت (Gustafson and Hunt, 1975) به دقت شرح داده شد و مطالعات گسترده بعدی که به‌میزان بالایی قابل توجه هستند عبارتند از؛ پولارد و تیلور و مسترمن و همکاران (Pollard and Taylor, 2002; Masterman et al., 2005). در تمامی این مطالعات معیار اصلی برای طبقه‌بندی رگه‌ها و رگه‌چه‌ها، کانی‌شناسی می‌باشد، که با توجه به کانی‌شناسی و با در نظر گرفتن عمق تشکیل، دگرسانی، فراوانی، ضخامت و تقدم و تأخر رگه‌ها نسبت به هم، در گروه‌های مختلف قرار می‌گیرند. طبق تقسیم‌بندی سیلیتو (Sillitoe, 2010) که بر اساس کانی‌شناسی، رگه‌ها را دسته‌بندی کرده است، در حالت کلی رگه‌چه‌ها ممکن است به سه زیر گروه تقسیم شوند: 1) رگه‌چه‌های اولیه، حاوی کوارتزد و در آنها کانیهای سولفیدی دیده نمی‌شود؛ اگر در این رگه‌ها مگنتیت دیده شود به آنها

سولفید - کوارتز متبلور همراه با حاشیه‌های دگرسانی تخریبی و فلدسپات غالب (نوع D).

(نوع M) گویند؛ 2) رگه‌چه‌های حاوی سولفید، با کوارتز دانه‌ای غالب (نوع A و B)؛ 3) رگه‌ها و رگه‌چه‌های تأخیری،



شکل 4. تصاویر صحرایی و میکروسکوپی انواع دگرسانیها در کانسار دالی، A: سنگهای آندزیتی با دگرسانی پروپلیتیک، B: تصویر میکروسکوپی سنگ آندزیتی، C: دگرسانی آرژیلیک، D: نمونه دگرسانی آرژیلیک، E: دگرسانی کوارتز - سرسیت - پیریت، F: تصویر میکروسکوپی دگرسانی کوارتز - سرسیت - پیریت، G: دگرسانی پتاسیک، H: تصویر میکروسکوپی دگرسانی پتاسیک. (Chl= کلریت، Ser= سرسیت، Qz= کوارتز، Bi= بیوتیت، Hbl= هورنبلند) (Rusk and Reed, 2008).

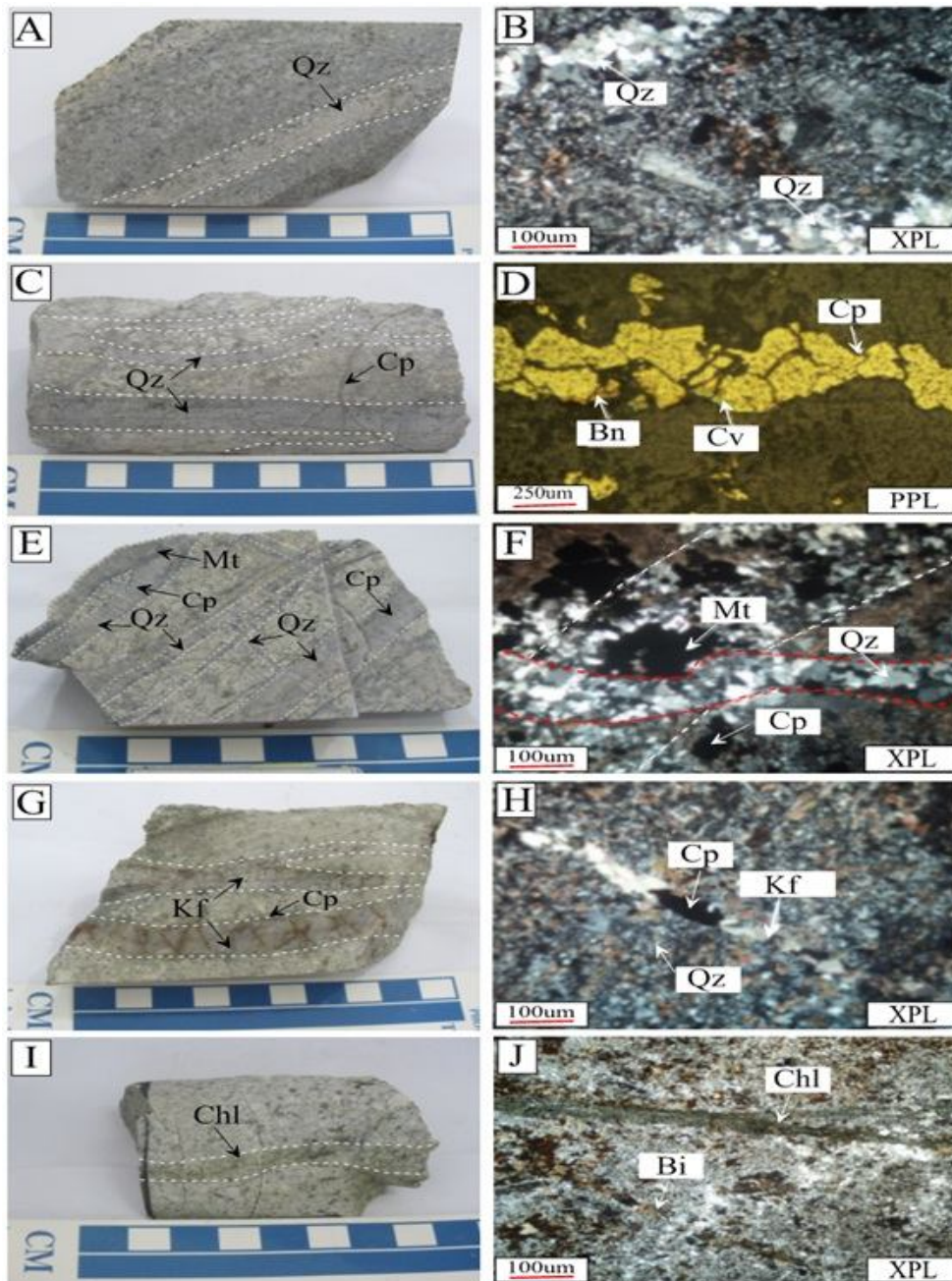
Fig. 4. Field photographs and photomicrographs of alterations types in the Dalli deposit, A: andesite rocks with propylitic alteration, B: photomicrographs of andesite rock, C: argillic alteration, D: sample of argillic alteration, E: quartz-sericite-pyrite alteration, F: photomicrographs of quartz-sericite-pyrite alteration, G: potassic alteration, H: photomicrographs of potassic alteration. (Chl= chlorite, Ser= sericite, Qz= quartz, Bi= biotite, Hbl= hornblende) (Rusk and Reed, 2008).

(al., 2014). حجم کمتر کالکوپیریت در گروه 3 رگه‌ها، با گروه 2 رگه‌ها رابطه دارد و نشان می‌دهد که سیالات در خلال دوباره باز شدن رگه‌های گروه 2 گردش داشته‌اند (Hezarkhani, 2009). تراکم رگه‌ها و استوک-ورک‌های حاوی کوارتز، مگنتیت همراه با دیگر اکسیدهای آهن (غالباً ثانویه) دلیل محکمی است که سیالات گرمایی در دگرسانی منطقه تأثیر به‌سزایی داشته‌اند. رگه‌چه‌های کوارتز اولیه \pm سولفید نیز با زون پتاسیک مرتبطند و رفتار آنها نشان‌دهنده تشکیل آنها تحت فشار لیتوستاتیک می‌باشد، اما در زون‌های دگرسانی فیلیک و آرژیلیک که رژیم‌های هیدروستاتیک غالب است، بیشتر فضاهای خالی را پر می‌کنند (Siahcheshm et al., 2014). جدول 1 توالی پاراژنتیکی کانه‌زایی را در کانسار دالی نشان می‌دهد.

پتروگرافی سیالات درگیر

پتروگرافی سیالات درگیر در مقاطع نازک می‌تواند اطلاعات کمی در ارتباط با ترکیبات اصلی، سن نسبی و تحولات سیالات به‌وجودآورنده ذخایر مس پورفیری را بر پایه تشخیص کانیهای نوزاد و برخی گازها، پاراژنز مجموعه‌های سیالات درگیر و تشخیص میزان و یا انواع نسبت‌های فازی درون سیالات درگیر را فراهم کنند. با توجه به حضور کانی کوارتز در انواع رگه‌های موجود در کانسار دالی و شفافیت زیاد این کانی برای به‌دام انداختن سیالات درگیر نسبتاً بزرگ، نمونه‌ها از رگه و رگه‌چه‌های حاوی کوارتز و از زون‌های دگرسانی پتاسیک-کوارتز-سرسیت-پیریت، پتاسیک، کوارتز-سرسیت-پیریت و پروپلیتیک انتخاب شدند. بخش اعظم رگه و رگه‌چه‌ها در زون پتاسیک-کوارتز-سرسیت-پیریت قرار داشت و به همین علت بیشتر نمونه‌ها از این زون برداشت شد. توزیع سیالات درگیر در کانسار دالی بیشتر به‌صورت اولیه و تعداد اندکی هم به‌صورت ثانویه کاذب در طول سطوح رشد بلورهای کوارتز است. سیالات درگیر اولیه رگه‌های کوارتز در مشاهدات میکروسکوپی، کامل‌تر، شکیل‌تر و نیز درشت‌تر از انواع ثانویه کاذب مشاهده شدند، در حالی که سیالات درگیر ثانویه اغلب ریز و به‌صورت ردیفی در یک امتداد (راستای صفحات شکستگی کوارتز) قرار دارند. مطالعات پتروگرافی نشان می‌دهد که سیالات درگیر کانسار دالی ابعادی از 5 میکرون تا بیش از 20 میکرون، به ندرت تا 43 میکرون را هم نشان داده‌اند.

با توجه به این مطلب که کانه‌زایی به‌صورت رگه‌ای و استوک-ورک در کانسار دالی گسترش خوبی دارد، بر اساس مطالعه مقاطع صیقلی پنج نوع رگه با ترکیب کانی‌شناسی زیر در این کانسار شناسایی شده است. رگه‌های گروه I: این گروه شامل رگه‌های کوارتز دانه‌درشت تا دانه‌ریزند و فاقد کانه‌زایی می‌باشند. کوارتزهای دانه درشت رگه‌های نسل اول و کوارتزهای دانه ریز رگه‌های نسل آخر را تشکیل می‌دهند (شکل 5-A و 5-B). رگه‌های گروه II: این رگه‌ها شامل کوارتز + پیریت + کالکوپیریت \pm بورنیت \pm کوولیت \pm کالکوسیت هستند که غالباً نسل دوم و سوم رگه‌ها را شامل می‌شوند (شکل 5-C و 5-D). رگه‌های گروه III: کوارتز + مگنتیت \pm کالکوپیریت و از لحاظ سنی عموماً جزو نسل اول رگه‌ها هستند که تعداد آنها نسبت به رگه‌های گروه I کمتر است (شکل 5-E و 5-F). رگه‌های گروه IV: فلدسپات پتاسیم \pm کوارتز \pm کالکوپیریت که نسل دوم رگه‌ها را تشکیل می‌دهند (شکل 5-G و 5-H). رگه‌های گروه V: شامل رگه‌های کلریت و بیوتیت هستند و نسل سوم رگه‌ها را تشکیل می‌دهند (شکل 5-I و 5-J)، که طبق گفته سیلیتو (Sillitoe, 2010) بیشتر این رگه‌ها مربوط به قسمت مرکزی و عمقی کانسارند و همراه با دگرسانی‌های پتاسیک، پتاسیک-کوارتز-سرسیت-پیریت و کوارتز-سرسیت-پیریت تمرکز یافته‌اند. رگه‌های گروه I، III و IV عمدتاً در زون دگرسانی پتاسیک دیده می‌شوند. رگه‌های گروه II، III و IV در زون دگرسانی پتاسیک-کوارتز-سرسیت-پیریت دیده می‌شوند. رگه‌های گروه V بیشترین پراکندگی را در زون دگرسانی پروپلیتیک دارند. ضخامت رگه‌ها در زون‌های آرژیلیک و پروپلیتیک حدوداً 6 mm می‌باشد (Darabi et al., 2013a). وجود رگه‌های کوارتز کانه‌دار و بدون کانه‌زایی همراه با کانیهای اکسید آهن و کربنات مس بیانگر تأثیر محلول‌های گرمایی و جوی در محدوده کانسار است. وجود کالکوپیریت و مگنتیت در رگه‌ها گویای این است که سیالات اولیه (ماگمایی) در تنه‌شست مس، آهن و گوگرد نقش داشته‌اند و با ادامه جوشش، سیالات با شوری بیشتر باعث تشکیل یک سری شکستگی‌های هیدرولیکی شده که با کوارتز و سولفید پر می‌شوند. تشکیل رگه‌های کوارتز اولیه مستقیماً با تشکیل دگرسانی پتاسیک اولیه مرتبط است و غالباً با کانه‌زایی مس و طلا پورفیری در کانسارها همراه می‌باشد (Siahcheshm et



شکل 5. تصاویر نمونه دستی و مقاطع میکروسکوپی رگه‌های مختلف در کانسار دالی، A: رگه کوارتز بدون کانه‌زایی (رگه نوع I)، B: تصویر میکروسکوپی رگه نوع I، C: رگه کوارتز با کالکوپیریت (رگه نوع II)، D: تصویر میکروسکوپی رگه نوع II، E: رگه کوارتز با کالکوپیریت و مگنتیت (رگه نوع III)، F: تصویر میکروسکوپی رگه نوع III، G: رگه فلدسپات پتاسیم با کالکوپیریت (رگه نوع IV)، H: تصویر میکروسکوپی رگه نوع IV، I: رگه کلریت (رگه نوع V)، J: تصویر میکروسکوپی رگه نوع V. (Qz= کوارتز، Cp= کالکوپیریت، Cv= کوولیت، Bn= بورنیت، Mt= مگنتیت، Kf= ک-فلدسپات پتاسیم، Chl= کلریت، Bi= بیوتیت) (Rusk and Reed, 2008).

Fig. 5. Photographs and photomicrographs of different veins in the Dalli deposit, A: barren quartz vein (vein type I), B: photomicrographs of vein type I, C: quartz vein with chalcopyrite (vein type II), D: photomicrographs of vein type II, E: quartz vein with chalcopyrite and magnetite (vein type III), F: photomicrographs of vein type III, G: k-feldspar vein with chalcopyrite (vein type IV), H: photomicrographs of vein type IV, I: chlorite vein (vein type V), J: photomicrographs of vein type V. (Qz= quartz, Cp= chalcopyrite, Cv= covellite, Bn= bornite, Mt= magnetite, Kf= k-feldspar, Chl= chlorite, Bi= biotite) (Rusk and Reed, 2008).

جدول 1. توالی پاراژنتیکی کانه‌زایی در کانسار دالی.

Table 1. Paragenetic sequence of mineralization in the Dalli deposit.

Minerals	Alterations			
	Potassic	Phyllic	Argillic	Propylitic
Plagioclase	—————			
Hornblende	—————			
Quartz	—————			
Biotite	—————			
K-feldspar	—————			
Sericite	—————			
Chlorite	—————			
Epidote	—————			
Chalcopyrite	—————			
Pyrite	—————			
Bornite	—————			
Chalcocite	—————			
Magnetite	—————			
Geothite	—————			
Hematite	—————			
Covellite	—————			

(زونینگ، تخمین عمق/فرسایش) نیازمند پتروگرافی دقیق مجموعه‌ی سیالات درگیر می‌باشد (Bodnar, 2003). سیالات درگیر کانسار دالی از نظر تعداد فاز، نسبت جامدات، مایعات، بخار و فراوانی به هفت گروه تقسیم می‌شوند: سیال درگیر تک‌فازی غنی از مایع (IA)، سیال درگیر تک‌فازی غنی از بخار (IB)، سیال درگیر دوفازی غنی از مایع (IIA)، سیال درگیر دوفازی غنی از بخار (IIB)، سیال درگیر شور حاوی کانی اپک (IIIB)، سیال درگیر شور ساده (IIIA) و سیال درگیر چندفازی (IIIAB) می‌باشند. بیشتر میان‌بارهای چندفازی ترکیبی از فاز گازی، نمک، سیلویت، مگنتیت، هماتیت، پیریت و کالکوپیریت می‌باشند و در تعداد کمی از نمونه‌ها اریتروسیدریت هم وجود دارد. کانیهای اپک به شکلهای کروی، کوبیک، تیغه‌ای و نامنظم می‌باشند. بلورهای حالت دارای شکل کوبیک بوده و گاهی تقریباً نیمه گرد شده هستند و نسبت به بقیه فازها بزرگترند. اغلب فاز جامدی که همراه

متداول‌ترین شکل سیالات درگیر در نمونه‌ها پس از شکل بی‌نظم و کروی، اشکال بیضوی، کشیده و مستطیلی می‌باشد. اشکال بلوری منفی هگزگونال کوارتز در بعضی از نمونه‌ها مشاهده شده است. سیالات درگیر با شکل نامنظم و بی‌قاعده تمایل زیادی دارند که در طول زمان به شکلهای منظم‌تری تغییر یابند. این تعادل مجدد موجب تقسیم‌شدن سیال درگیر به تعدادی سیال درگیر منظم‌تر خواهد شد که این پدیده را دم‌بردگی گویند (Rusk and Reed, 2008). برخلاف ته‌نشست، تغییر در دما، فشار و شوری سیالات، عواقب و پیچیدگیهای پاراژنتیکی که در زمان به‌دام افتادن هالیت و دیگر کانیها در طی تشکیل سیالات درگیر به وجود می‌آید، باعث تغییرات بعد از ته‌نشینی سیالات درگیر توسط پدیده‌های دم‌بردگی، کشیده‌شدن و نشت‌کردن سیال درگیر می‌شود. از این‌رو کاربرد مناسب و صحیح سیالات درگیر در بررسیهای ژنتیکی و در اکتشاف ذخایر مس پورفیری

شکل‌های نامنظم، کرووی و بیضی می‌باشند. چگالی آنها از $0/9$ تا $0/7$ g/cm^3 متغیر است (شکل 6-D).

سیالات درگیر شور ساده (III A): این سیالات از فراوانی کمتری نسبت به سیالات شور حاوی کانی اپیک برخوردارند و به شکل‌های کرووی، کشیده تا نامنظم دیده می‌شوند. عمدتاً در رگه‌های گروه III دیده می‌شوند و بیشترین فراوانی را در زون دگرسانی پتاسیک و کوارتز - سرسیت - پیریت دارند. این میان‌بارها طبیعت اولیه دارند. در این میان‌بارها فاز هالیت در کنار فاز بخار و مایع وجود دارد. اندازه آنها از 7 تا 18 میکرون در تغییر است و چگالی آنها از $1/3$ تا $1/1$ g/cm^3 متغیر است. در این گروه از سیالات درگیر هالیت بیشتر شکل کوبیک دارد (شکل 6-E).

سیالات درگیر شور حاوی کانی اپیک (III B): این سیالات به شکل‌های بلوری منفی کوارتز، کرووی، کشیده تا نامنظم دیده می‌شوند. عمدتاً در رگه‌های گروه III دیده می‌شوند و بیشترین فراوانی را در زون دگرسانی پتاسیک و کوارتز - سرسیت - پیریت دارند. در این میان‌بارها معمولاً هالیت و هماتیت همیشه حضور دارند و کانیهای اپیک (پیریت و کالکوپیریت) هم در کنار فاز بخار و مایع وجود دارند. اندازه آنها از 9 تا 30 میکرون در تغییر است و چگالی آنها از $1/4$ تا $1/1$ متغیر است. این میان‌بارها بیشتر طبیعت اولیه دارند (شکل 6-F).

سیالات درگیر چندفازی (III AB): عمدتاً در رگه‌های نسل اول (گروه I و III) دیده می‌شوند و بیشترین فراوانی را در زون دگرسانی پتاسیک دارند. در این گروه از سیالات درگیر در کنار فازهای گازی، نمک، مگنتیت، هماتیت و فازهای اپیک (پیریت و کالکوپیریت) و در بعضی موارد اریتروسیدریت هم دیده می‌شود. این میان‌بارها طبیعت اولیه دارند. اندازه آنها از 10 تا 44 میکرون در تغییر است و چگالی آنها از $1/4$ تا 1 متغیر است. شکل آنها نامنظم تا کرووی و کشیده می‌باشد (شکل 6-G).

ریزدماسنجی

روش دماسنجی بر اساس مشاهده دقیق و تشخیص تغییرات فازی معمولاً (مایع، بخار و نمکها) در داخل سیالات درگیر حین گرمایش و سرمایش می‌باشد. با اندازه‌گیری دقیق درجه حرارتی که این تغییرات در آن رخ می‌دهند، می‌توان به

هالیت دیده می‌شود، هماتیت است که به رنگ قرمز متمایل به قهوه‌ای تا قهوه‌ای دیده می‌شود و به شکل کرووی تا نامنظم و از هالیت کوچک‌تر است. سیلویت که نسبت به اریتروسیدریت دارای گردشگی بیشتری است و اریتروسیدریت کشیدگی بیشتری دارد. کانیهای اپیک مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت نیز با اندازه کوچک‌تر در میان‌بارها دیده می‌شوند. حضور بلورهای نوزاد با شوری بالا مانند هالیت (معمولی‌ترین فاز نوزاد) و وجود سیلویت می‌تواند حاکی از حضور محلولهای گرمایی غنی از کمپلکس‌های کلریدی باشد که این کمپلکس‌ها باعث انتقال فلزات پایه می‌شوند (Alfons et al., 2001).

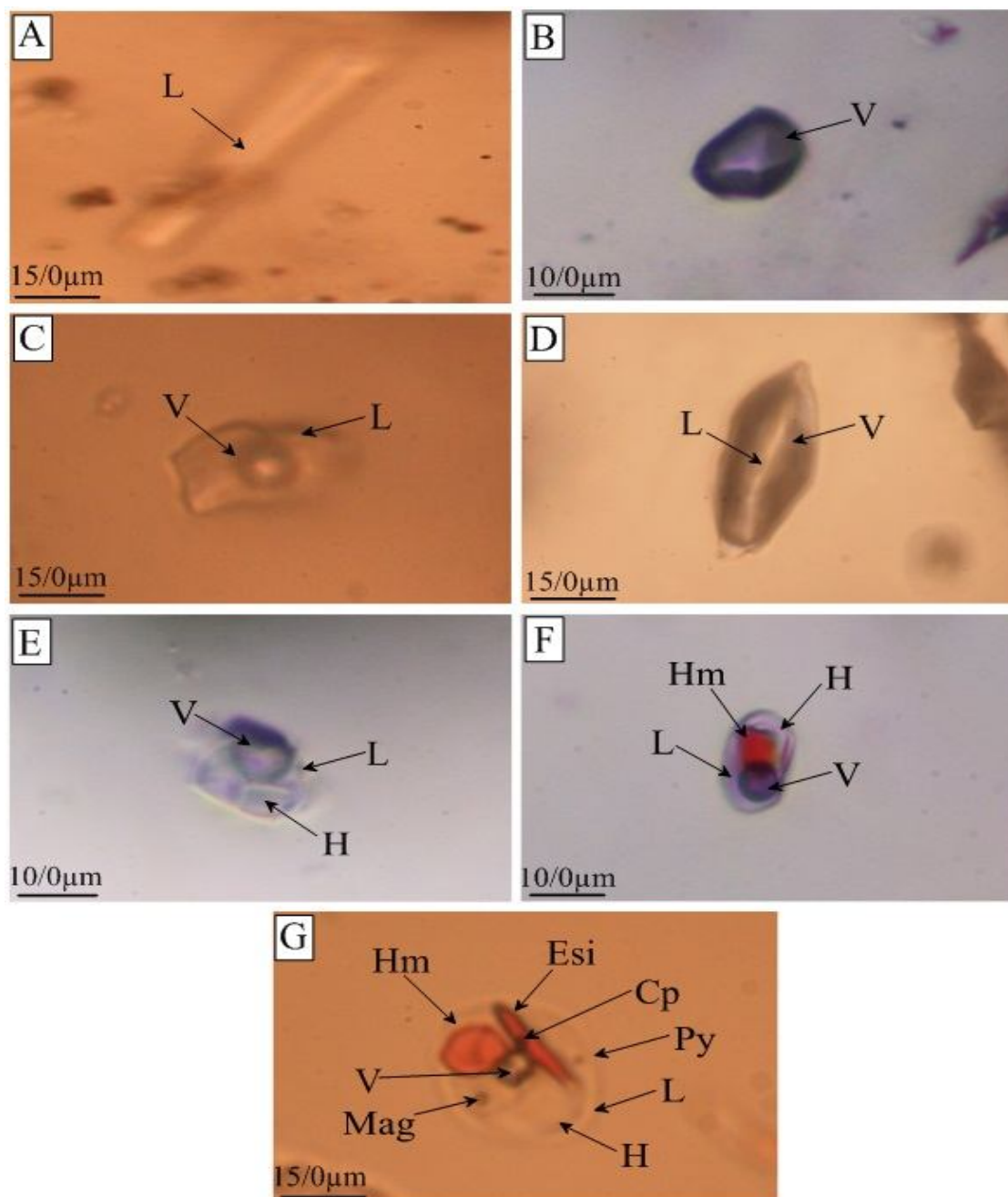
سیالات درگیر تک‌فازی غنی از مایع (IA): 80 تا 90 درصد سیالات تک‌فازی از نوع غنی از مایع هستند. بیشتر در رگه‌های نسل آخر (گروه V) دیده می‌شوند و بیشترین فراوانی را در زون دگرسانی پروپلیتیک دارند. سیالات درگیر غنی از مایع به شکل‌های نامنظم، کشیده و کرووی دیده می‌شوند و اندازه آنها از 3 تا 15 میکرون در تغییر است (شکل 6-A).

سیالات درگیر تک‌فازی غنی از بخار (IB): 10 تا 15 درصد سیالات تک‌فازی از نوع غنی از بخار می‌باشند. بیشتر در رگه‌های کانه‌دار (گروه III و IV رگه‌ها) دیده می‌شوند و بیشترین فراوانی را در زون دگرسانی پتاسیک دارند. دارای شکل‌های نامنظم و کرووی می‌باشند و اندازه آنها از 5 تا 15 میکرون در تغییر است (شکل 6-B).

سیالات درگیر دوفازی غنی از مایع (IIA): بیشترین حجم میان‌بارها را این گروه به خود اختصاص داده‌اند و تقریباً 50 تا 60 درصد میان‌بارها را شامل می‌شوند. عمدتاً در رگه‌های نسل آخر (گروه V رگه‌ها) دیده می‌شوند و بیشترین فراوانی را در زون دگرسانی پروپلیتیک دارند. طبیعت آنها بیشتر حالت اولیه دارد. اندازه آنها از 5 تا 34 میکرون در تغییر است و دارای شکل‌های نامنظم، کرووی، کشیده و بیضی هستند. چگالی آنها از $1/02$ تا $0/608$ متغیر است (شکل 6-C).

سیالات درگیر دوفازی غنی از بخار (IIB): 10 تا 12 درصد میان‌بارها را شامل می‌شوند. عمدتاً در رگه‌های نسل دوم (گروه II و IV) دیده می‌شوند و بیشترین فراوانی را در زون دگرسانی کوارتز - سرسیت - پیریت و پتاسیک - کوارتز - سرسیت - پیریت دارا هستند. طبیعت این میان‌بارها اولیه است. اندازه آنها 6 تا 13 میکرون در تغییر است و دارای

وضعیت PTVX (فشار: P، دما: T، حجم: V و ترکیب شیمیایی: X) سیالات در زمان به‌دام افتادن پی برد.



شکل 6. تصاویر میکروسکوپی سیالات درگیر در کانسار دالی، A: تک‌فازی غنی از مایع (IA)، B: تک‌فازی غنی از بخار (IB)، C: دوفازی غنی از مایع (IIA)، D: دوفازی غنی از بخار (IIB)، E: سیالات درگیر شور ساده (IIIA)، F: سیالات درگیر شور حاوی کانی اپیک (IIIB)، G: سیالات درگیر چندفازی (IIIAB). (L= فاز مایع، V= فاز بخار، H= هالیت، Hm= هماتیت، Esi= اریتروسیدریت، Mag= مگنتیت، Py= پیریت، Cp= کالکوپیریت) (Zarasvandi et al., 2013).

Fig. 6. Photomicrographs of fluid inclusions in the Dalli deposit, A: liquid-rich mono-phase (IA), B: vapor-rich mono-phase (IB), C: liquid-rich two-phase (IIA), D: vapor-rich two-phase (IIB), E: high saline simple fluid inclusions (IIIA), F: high saline opaque mineral-bearing fluid inclusions (IIIB), G: multi-phase fluid inclusions (IIIAB). (L= liquid, V= vapor, H= halite, Hm= hematite, Esi= eritrosiderite, Mag= Magnetite, Py= pyrite, Cp= chalcopyrite) (Zarasvandi et al., 2013).

سیالات درگیر شور ساده و سیالات چندفازی دارند و دمای همگن‌شدگی نهایی برای سیالات درگیر شور حاوی کانی اپیک از 620°C تا 340°C در تغییر است. در اصل بیشترین فراوانی همگن‌شدگی مربوط به گستره 580°C تا 420°C است. دمای ذوب یا انحلال‌هالیت در این میان‌بارها 600°C تا 280°C و بیشترین فراوانی آن مربوط به محدوده دمایی 520°C تا 480°C است. محدوده شوری این سیالات $75\text{ Wt.}\% \text{NaCl}$ تا $35\text{ Wt.}\%$ می‌باشد (شکل 8- A، B و C).

سیالات درگیر شور ساده (III A)

این سیالات با تعداد مساوی هم با ذوب‌هالیت و هم با ناپدیدشدن حباب بخار همگن می‌شوند (شکل 7- C). این گروه از سیالات درگیر در دمای 540°C تا 300°C همگن می‌شوند. بیشترین فراوانی دمای همگن‌شدگی مربوط به گستره دمایی 500°C تا 380°C است که از این نظر دمای همگن‌شدگی کمتری را نسبت به سیالات درگیر چندفازی و سیالات درگیر شور حاوی کانی اپیک نشان می‌دهند. دمای انحلال‌هالیت در این میان‌بارها 600°C تا 264°C است و بیشترین فراوانی مربوط به گستره دمایی 480°C تا 440°C می‌باشد. این گروه بیشترین گستره فراوانی را از لحاظ شوری به خود اختصاص داده‌اند و به‌طور میانگین این سیالات شوری کمتری نسبت به سیالات شور حاوی کانی اپیک نشان می‌دهند. محدوده شوری این سیالات $75\text{ Wt.}\% \text{NaCl}$ تا $30\text{ Wt.}\%$ است (شکل 8- A، B و C).

سیالات درگیر دوفازی غنی از مایع (II A)

این سیالات بیشترین حجم میان‌بارها را به خود اختصاص داده‌اند و محدوده دمای همگن‌شدگی آنها از 460°C تا 140°C در تغییر است ولی در محدوده دمایی 340°C تا 220°C بیشترین فراوانی را دارند و قله فراوانی آنها در دمای بین 300°C تا 260°C می‌باشد. این میان‌بارها با ذوب یخ به مایع همگن می‌شوند و دمای ذوب یخ در این میان‌بارها از 22°C تا $(-2)^{\circ}\text{C}$ در تغییر است و بیشترین فراوانی مربوط به گستره دمایی 14°C تا $(-12)^{\circ}\text{C}$ و 10°C تا $(-8)^{\circ}\text{C}$ می‌باشد. در این گروه دمای یوتکتیک و دمای ذوب یخ برابر با شوری NaCl است. محدوده دمای یوتکتیک برای این سیالات درگیر از 60°C تا $(-25)^{\circ}\text{C}$ در تغییر است، ولی بیشترین فراوانی دمای یوتکتیک مربوط به گستره دمایی 45°C تا $(-40)^{\circ}\text{C}$ می‌باشد.

ریزدماسنجی امکان تعیین کمی دمای کمینه به‌دام افتادن یک سیال درگیر (که در برخی موارد دمای ته‌نشست کانی میزبان گرمایی است)، تعیین شوری و تعیین و تشخیص برخی مواد فرار و گازها همانند دی‌اکسید کربن را ممکن می‌کند (John et al., 2010). بر اساس اندازه‌گیریها، دما و شوری سیالات درگیر از زون پتاسیک به سمت زون کوارتز-سرسیت-پیریت کاهش پیدا می‌کند تا نهایتاً در زون پروپلیتیک بیشتر سیالات درگیر، دوفازی غنی از مایع با دما و شوری پایین می‌باشند. همچنین سیالات مربوط به رگه‌های نسل اول (گروه I و III) دارای دما و شوری بالاتری نسبت به رگه‌های نسل دوم و سوم می‌باشند. در سیالات درگیری که فاقد فاز هالیت بوده‌اند از دمای ذوب یخ برای تعیین شوری استفاده شده است و در سیالات درگیر حاوی فاز هالیت از دمای انحلال بلور هالیت برای تعیین شوری استفاده می‌شود. که در زیر نتایج حاصل از دماسنجی به تفصیل برای هر گروه از سیالات درگیر بیان شده است (جدول 2).

سیالات درگیر چندفازی (III AB)

این گروه از سیالات بیشتر با ذوب‌هالیت همگن می‌شوند (شکل 7- A). دمای همگن‌شدگی برای سیالات درگیر چندفازی از 620°C تا 340°C متغیر است و بیشترین فراوانی مربوط به گستره 620°C تا 420°C است. سیالات درگیر چندفازی هم با ناپدید شدن حباب بخار و هم با ذوب‌هالیت همگن می‌شوند، اما بیشتر با ذوب‌هالیت همگن می‌شوند. سیالات درگیری که با ذوب‌هالیت همگن می‌شوند، نشان‌دهنده به‌دام افتادن سیال اشباع از هالیت در فشار بالا، به‌دام افتادن پسین، از دست رفتن یا افت حجمی آب می‌باشند (Ulrich et al., 2002). دمای ذوب‌هالیت از 600°C تا 327°C متغیر است. سیلویت که به‌صورت تقریباً گردشده وجود دارد در دمای بین 265°C تا 142°C و همیشه قبل از هالیت ذوب می‌شود. بیشترین فراوانی محدوده دمایی ذوب‌هالیت 600°C تا 560°C می‌باشد. حضور سیلویت نشان‌دهنده این است که سیالات به‌جز NaCl ، حاوی KCl نیز بوده‌اند. محدوده شوری این سیالات $75\text{ Wt.}\% \text{NaCl}$ تا $40\text{ Wt.}\%$ می‌باشد (شکل 8- A، B، C و E).

سیالات درگیر شور حاوی کانی اپیک (III B)

این سیالات معمولاً با ناپدیدشدن حباب بخار همگن می‌شوند (شکل 7- B) و فراوانی بیشتری از لحاظ شوری نسبت به

بیشترین فراوانی شوری برای این سیالات در محدوده NaCl 20 Wt.% تا 10 می‌باشد (شکل 8- A, B, D و F).

جدول 2. محدوده آنالیز ریزدماسنجی و محاسبه شوری برای سیالات درگیر در کانسار دالی. (N= تعداد سیالات درگیر، Th= دمای همگن‌شدگی، Tm ice= دمای ذوب یخ، Tm KCl= دمای ذوب سیلویت، Tm NaCl= دمای ذوب هالیت، Tfm= دمای انجماد، Te= دمای ذوب اولیه (بوتکتیک)، liquid=L (فاز مایع)، vapor =V (فاز بخار)، solid =S (فاز جامد)، halite =H، primary =P (سیالات درگیر اولیه)، pseudo=Ps secondary (سیالات درگیر شبه ثانویه).

Table 2. Range of microthermometric analysis and calculated salinity for fluid inclusions in the Dalli deposit. (N= number of fluid inclusions, Th= homogenization temperature, Tm ice= melting temperature of ice, Tm KCl= melting temperature of sylvite, Tm NaCl= melting temperature of halite, Tfm= freezing temperature, Te= first melting temperature (eutectic), L= liquid (liquid phase), V= vapor (vapor phase), S= solid (solid phase), H= halite, P= primary (primary fluid inclusions), Ps= pseudo-secondary (pseudo-secondary fluid inclusions).

Sample	Inclusion type	Phase	Vein type	Host mineral
DH1-MAGF5	IIA, IIB, IIIA, IIIB, IIIAB	(L+V), (V+L), (L+V+S)	V	Quartz
DH1-GMFS4	IIA, IIB, IIIA, IIIB, IIIAB	(L+V), (V+L), (L+V+S)	II, V	Quartz
DH2-AF5	IIA, IIB, IIIA, IIIB, IIIAB	(L+V), (V+L), (L+V+S)	II	Quartz
DH2-MFS8	IIA, IIB, IIIA, IIIB, IIIAB	(L+V), (V+L), (L+V+S)	I, IV	Quartz
DH4-GA3	IIA, IIB, IIIA, IIIB, IIIAB	(L+V), (V+L), (L+V+S)	II, V	Quartz
DH6-MA4	IIA, IIB, IIIA, IIIB, IIIAB	(L+V), (V+L), (L+V+S)	II, IV	Quartz
DH6-MA5	IIA, IIB, IIIA, IIIB, IIIAB	(L+V), (V+L), (L+V+S)	II, III	Quartz
DH7-AMF3	IIA, IIB, IIIA, IIIB, IIIAB	(L+V), (V+L), (L+V+S)	I, III	Quartz
S-11	IIA, IIB, IIIA, IIIB, IIIAB	(L+V), (V+L), (L+V+S)	IV	Quartz
S-16	IIA, IIB, IIIA, IIIB, IIIAB	(L+V), (V+L), (L+V+S)	I	Quartz
S-15	IIA, IIB, IIIA, IIIB, IIIAB	(L+V), (V+L)	II	Quartz
Sample	Alteration	Depth (m)	Te (°C)	
DH1-MAGF5	Potassic-Phyllic	177.5	(-40) - (-56)	
DH1-GMFS4	Potassic-Phyllic	56	(-41) - (-59)	
DH2-AF5	Potassic-Phyllic	90	(-39) - (-51)	
DH2-MFS8	Potassic-Phyllic	189	(-39) - (-57)	
DH4-GA3	Propylitic	330	(-38) - (-46)	
DH6-MA4	Potassic-Phyllic	224	(-46) - (-58)	
DH6-MA5	Potassic-Phyllic	267	(-44) - (-57)	
DH7-AMF3	Potassic	199	(-44) - (-54)	
S-11	Limonite-Jarosite	0	(-40) - (-46)	
S-16	Phyllic	0	(-24) - (-32)	
S-15	Oxide	0	(-30) - (-37)	

ادامه جدول 2. محدوده آنالیز ریزدماسنجی و محاسبه شوری برای سیالات درگیر در کانسار دالی. (N=تعداد سیالات درگیر، Th=دمای همگن‌شدگی، Tm ice=دمای ذوب یخ، Tm KCl=دمای ذوب سیلویت، Tm NaCl=دمای ذوب هالیت، Tfm=دمای انجماد، Te=دمای ذوب اولیه (یوتکتیک)، L=liquid (فاز مایع)، V=vapor (فاز بخار)، S=solid (فاز جامد)، H=halite، P=primary (سیالات درگیر اولیه)، Ps=pseudo-secondary (سیالات درگیر شبه ثانویه).

Continue of table 2. Range of microthermometric analysis and calculated salinity for fluid inclusions in the Dalli deposit. (N= number of fluid inclusions, Th= homogenization temperature, Tm ice= melting temperature of ice, Tm KCl= melting temperature of sylvite, Tm NaCl= melting temperature of halite, Tfm= freezing temperature, Te= first melting temperature (eutectic), L= liquid (liquid phase), V= vapor (vapor phase), S= solid (solid phase), H= halite, P= primary (primary fluid inclusions), Ps= pseudo-secondary (pseudo-secondary fluid inclusions).

Inclusion type	Nature	N	Size (um)	Density (g/cm ³)	Th (°C)	Tm ice (°C)
IIA	P, Ps	70	5-34 um	0.602-1.02	140-460	(-2) - (-22)
IIB	P	13	6-13 um	0.7-0.9	180-300	0 - (-22)
IIIA	P	35	7-18 um	1.1-1.3	300-540	-
IIIB	P, Ps	25	9-30 um	1.1-1.4	340-620	-
IIAB	P	30	10-44um	1.1-1.4	340-620	-

Inclusion type	Tm KCl (°C)	Tm NaCl (°C)	Salinity (wt% NaCl)	Homo-BY	Tfm (°C)
IIA	-	-	0-25	L	(-39) - (-79)
IIB	-	-	0-25	V	(-50) - (-61)
IIIA	-	240-600	30-75	H	-
IIIB	-	280-600	35-75	V	-
IIAB	140-280	320-600	40-75	H, V	-

ویژگیهای شیمیایی سیال کانهدار (شوری)

به منظور پی بردن به ویژگیهای شیمیایی سیالات درگیر موجود در سیستم‌های کانهدار از دمای همگن‌شدگی و شوری که معادل نمک طعام است، استفاده می‌کنند. این درحالی است که ویژگیهای سیالات درگیر به طور مستقیم تابع دمای سیال و شوری سیال نیست و با حضور و تنوع طبیعی این دو پارامتر در سیستم‌های گرمایی رابطه دارد و از آنها برای اهداف مقایسه‌ای استفاده می‌شود (Wilkinson, 2001). از موقعیتی که میان بارها تحت شرایط انجماد دارند برای تعیین نقطه ذوب نخست (Te) و نهایی (Tm_(ice)) سیالات درگیر نوع II همراه با تبدیل داده‌ها به شوری معادل استفاده می‌شود (Bodnar, 1993) و در سیالات درگیر IIIA, IIIB و IIAB که در

سیالات درگیر دوفازی غنی از بخار (IIB)

این سیالات در مقایسه با سیالات دوفازی غنی از مایع، سیالات چندفازی، سیالات شور ساده و سیالات شور حاوی کانی اپیک از فراوانی کمتری برخوردارند. محدوده دمای همگن‌شدگی در این میان‌بارها از 300°C تا 180°C در تغییر است و بیشترین فراوانی دمای همگن‌شدگی مربوط به گستره دمایی 300°C تا 260°C است. این میان‌بارها با ذوب یخ به بخار همگن می‌شوند و محدوده دمایی ذوب یخ در این میان‌بارها از 0°C تا (-22)°C است و بیشترین فراوانی آن مربوط به محدوده 0°C تا (-18)°C می‌باشد. برای این سیالات سیالات محدوده شوری از 25 Wt.% NaCl تا 0 در تغییر است (شکل 8- A, B و D).

ذوب نخست یخ برای میان‌بارهای نوع IIA در محدوده دمایی 60°C تا 25°C رخ داده است، که بیانگر سیالات آبدار با میزان بالای NaCl و KCl است (Spencer et al., 1990). تعیین شوری سیال از Tm ice در خلال انجماد از 22°C تا 0 می‌باشد. بر اساس شکل 10 در بین سیالات درگیر کانسار دالی، سیالی که شوری آن متوسط باشد وجود ندارد. در میان‌بارهای IIIA, IIIB و IIIAB با افزایش دما، شوری نیز افزایش پیدا می‌کند و در این میان شوری سیالات درگیر IIIAB از همه بیشتر می‌باشد. همان‌طور که در شکل 10 دیده می‌شود تمامی میان‌بارهای IIIA, IIIB و IIIAB در زیر خط منحنی اشباع هالیت قرار گرفته‌اند و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در این میان‌بارها $\text{Tm}_{\text{NaCl}} > \text{Th}_{(L-V)}$ می‌باشد. همچنین ترکیب متغیر میان‌بارهای سیال در تمام نمونه‌ها و هم‌زیستی سیالات با مقادیر متفاوت بخار، هم برای آنهایی که به فاز بخار همگن می‌شوند و هم برای آنهایی که به فاز مایع همگن می‌شوند، به‌عنوان شاهدهی برای محدوده وسیع عوامل فیزیکی و شیمیایی است که در طول سردشدن سیال تشکیل‌دهنده کانسار عمل کرده‌اند (Zarasvandi et al., 2013).

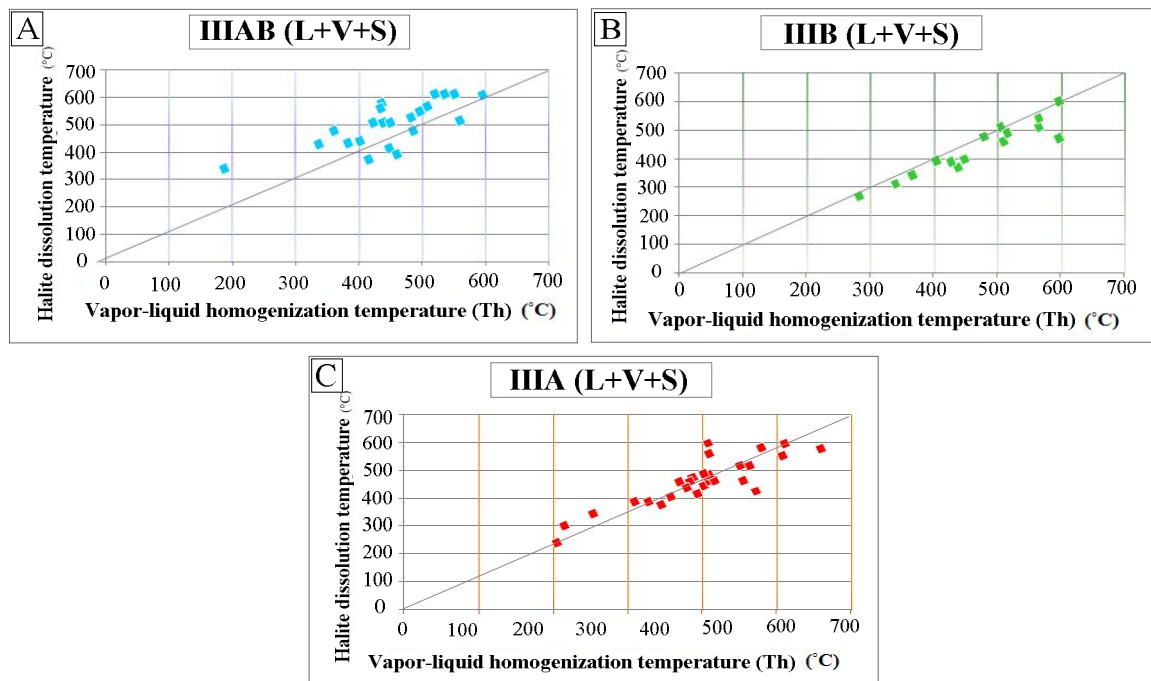
تخمین فشار و عمق سیال کانه‌دار

فشار شامل اجزای لیتوستاتیک و هیدروستاتیک می‌باشد، به طوری که تشکیل بسیاری از سیستم‌ها محدوده دمایی شکل‌پذیر - شکننده را در برمی‌گیرد. جایی که سنگهای پوسته‌ای در هم برابر شکستن و هم جریان سیال مقاومت می‌کنند (حالت شکل‌پذیر) و یا می‌شکنند و جریان سیال در آنها رخ می‌دهد (حالت شکننده). تخمین فشار به عمق تشکیل سیال کانه‌دار یک ویژگی مناسب برای اهداف اکتشافی است (John et al., 2010). فشار و عمق سیال گرمایی دو عاملی هستند که ما را در درک شرایط تشکیل‌دهنده کانسار و همچنین تکامل سیال گرمایی یاری می‌کنند. همان‌طور که در شکل 11 دیده می‌شود، محدوده فشار و عمق برای سیالات درگیر دوفازی غنی از مایع 500 bar تا 100 و 2 km تا 0/4 و در سیالات درگیر شور ساده 470 bar تا 200 و 1/8 km تا 0/8 است. بیشترین فشار 620 bar مربوط به سیالات درگیر شور حاوی کانی اپک است که تا فشار 220 bar هم ادامه دارد که این فشار با عمق 3 km تا 1 برابر است و سیالات درگیر

دمای اتاق اشباع از هالیت بوده‌اند از روش $\text{Tm}_{(\text{NaCl})}$ استفاده می‌شود (Sterner et al., 1988)، که بیانگر این مطلب است که نمک تنها فاز نوزاد است و کمترین حجم شوری را به ما می‌دهد. محدوده شوری برای انواع سیالات درگیر در شکل 8-B و شکل 9 نشان داده شده است. این محدوده برای سیالات درگیر دوفازی غنی از مایع (IIA)، از 25 Wt.% NaCl تا 1 در تغییر است ولی بیشترین فراوانی شوری محدوده 20 Wt.% NaCl تا 10 می‌باشد (شکل 9-A). برای سیالات درگیر دوفازی غنی از بخار (IIIB)، از 25 Wt.% NaCl تا 0 در تغییر است ولی بیشترین فراوانی شوری محدوده 5 Wt.% NaCl تا 0 می‌باشد (شکل 9-B). برای سیالات درگیر شور ساده (IIIA)، 75 Wt.% NaCl تا 30 است و بیشترین فراوانی شوری مربوط به گستره 55 Wt.% NaCl تا 45 می‌باشد (شکل 9-C). برای سیالات درگیر شور حاوی کانی اپک (IIIB)، 75 Wt.% NaCl تا 35 می‌باشد و بیشترین فراوانی شوری مربوط به گستره 65 Wt.% NaCl تا 55 است (شکل 9-D) و برای سیالات درگیر چندفازی (IIIB)، از 75 Wt.% NaCl تا 40 در تغییر و بیشترین فراوانی آن مربوط به گستره 75 Wt.% NaCl تا 50 است (شکل 9-E). بیشترین گستره شوری مربوط به سیالات درگیر شور ساده می‌باشد و سیالات درگیر چندفازی در بین سیالات درگیر دیگر شوری بالاتری دارند. بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته و با توجه به شکل 10 سیالات درگیر در دو محدوده شوری قرار می‌گیرند. سیالات درگیر IIA و IIIB (Stage 2)، با محدوده شوری 25 Wt.% NaCl تا 0 جزو سیالات شوری پایین به حساب می‌آیند و سیالات درگیر نوع IIIA با محدوده شوری 75 Wt.% NaCl تا 30، سیالات درگیر نوع IIIB با محدوده شوری 75 Wt.% NaCl تا 35 و سیالات درگیر نوع IIIAB با محدوده شوری 75 Wt.% NaCl تا 75 جزو سیالات درگیر شوری بالا هستند (Stage 1). اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی اندکی بر روی میان‌بارهای نوع IIB که اندازه‌های کمتر از 8 میکرون را داشتند، صورت گرفته است. نظر به این‌که به‌علت کوچکی و کمیاب بودن سیالات نوع II و خصوصاً نوع IIB، اندازه‌گیری ریزدماسنجی بر روی آنها سخت بود، نقطه ذوب نخست یخ (Te) که بیانگر پدیده یوتکتیک می‌باشد، در طول گرمایش دوباره به‌طور صحیح محاسبه نشده است. اما نتایج محاسبات نشان داده که احتمالاً

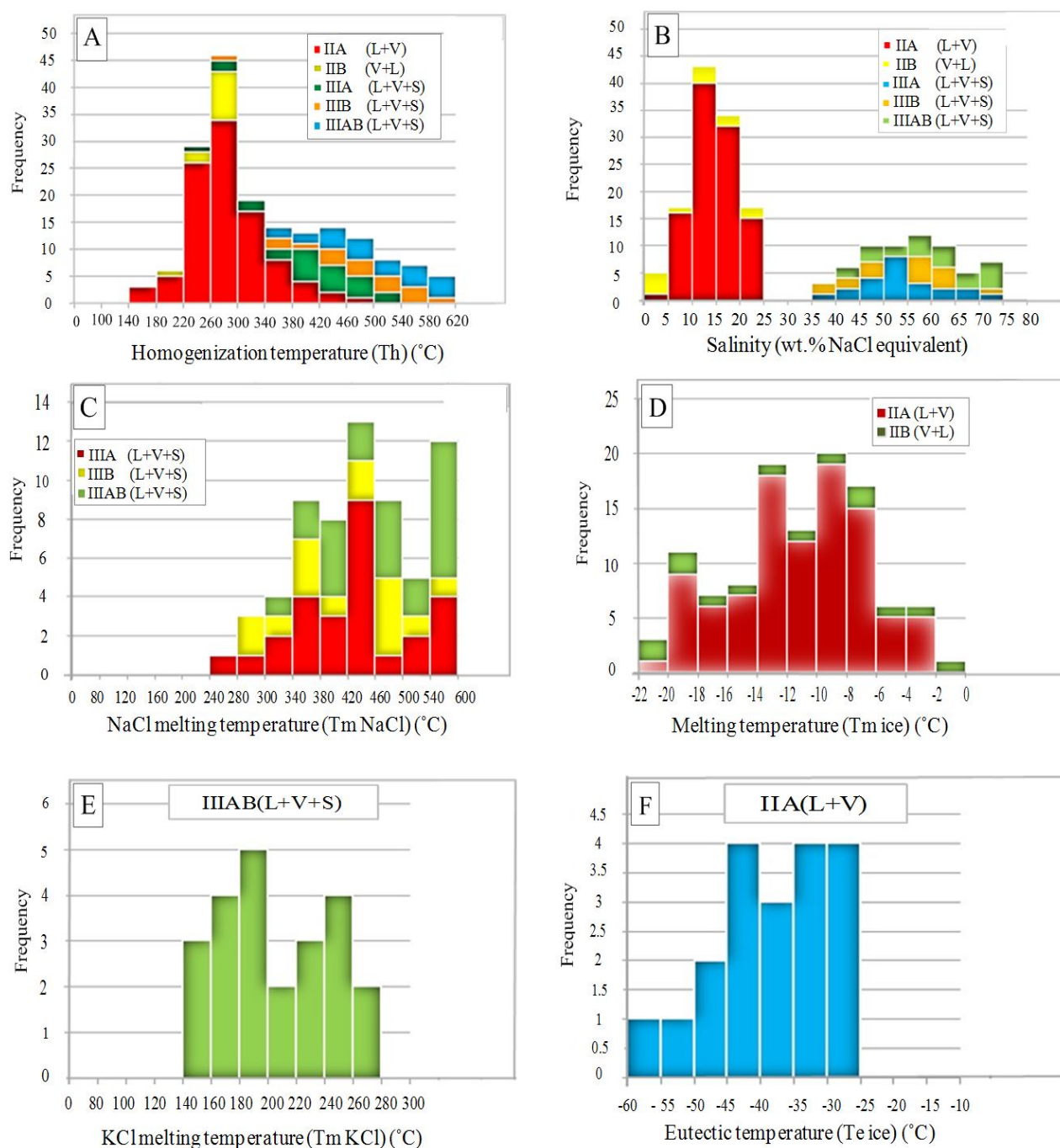
سیالات نوع (III A) در منطقه محدوده دمایی از 600°C تا 264 را پوشش می‌دهند. حضور سیالات درگیر گازی به همراه سیالات دیگر با شوریهای متفاوت از شواهد رخداد جوشش در سیالات گرمابی است (Drummond and Ohmoto, 1985). دمای همگن شدن ($\text{Th}_{(L-V)}$) سیالات درگیر شواهد جوشش را نشان می‌دهد که می‌تواند به عنوان دمای به دام افتادن در نظر گرفته شود. این سیالات درگیر غالباً در دمای بین 600°C تا 400 همگن شدند. بر پایه این دمای همگنی و شوری $75 \text{ Wt.}\% \text{ NaCl}$ تا 70 ، حداقل فشار 200 bar تخمین زده می‌شود. این تخمین با عمق کانه‌زایی بین $2/5 \text{ km}$ تا $1/8$ (فشار هیدروستاتیک) و $1/5 \text{ km}$ تا $0/8$ (فشار لیتوسفری) در منطقه سازگار است. عمق محاسبه شده به طور همزمان می‌تواند برای تعیین عمق کانسارهای پورفیری در جهان به کار برده شود (Pirajno, 2009). این محدوده فشار با فشار تخمین زده شده برای ذخایر مس پورفیری به خوبی مقایسه شده و با سطح در نظر گرفته شده برای جای گیری استوک-های کم عمق سازگار است (Burnham, 1985).

چندفازی با بیشترین فراوانی دمای همگن شدگی در گستره 620°C تا 420 و بیشترین فراوانی شوری در گستره $75 \text{ Wt.}\% \text{ NaCl}$ تا 70 و فشار بین 480 bar تا 280 و عمق بین $2/2 \text{ km}$ تا $1/1$ اولین سیالات تشکیل دهنده کانسار دالی می‌باشند و در این دما یک مسیر جوشش مشخص است و تنوع شوری را در فشار بالا نشان می‌دهند که نشان دهنده از دست رفتن مقداری از آب شوراب اولیه برای فاز بخار می‌باشد. سیالات درگیر دوفازی غنی از بخار نوع IIB که در اثر همگن شدن به بخار تبدیل می‌شوند و از این رو با شیب آرامی خنک می‌شوند، تخمین بسیار خوبی از فشار به دام افتادن را فراهم می‌کنند (Roedder and Bodnar, 1980) و با بیشترین فراوانی دمای همگن شدگی در گستره 300°C تا 260 و بیشترین فراوانی شوری در گستره $5 \text{ Wt.}\% \text{ NaCl}$ تا 0 و فشار بین 300 bar تا 100 و عمق معادل $1/1 \text{ km}$ تا $0/6$ نشان دهنده آخرین گردش سیال گرمابی می‌باشند. فشار به دام افتادن می‌تواند با استفاده از سیالات درگیری که همگنی همزمان را برای فازهای هالیت و بخار ($\text{Th}_{(\text{NaCl})} = \text{Th}_{(L-V)}$) نشان می‌دهند، به دست آید (Wilson et al., 1980).



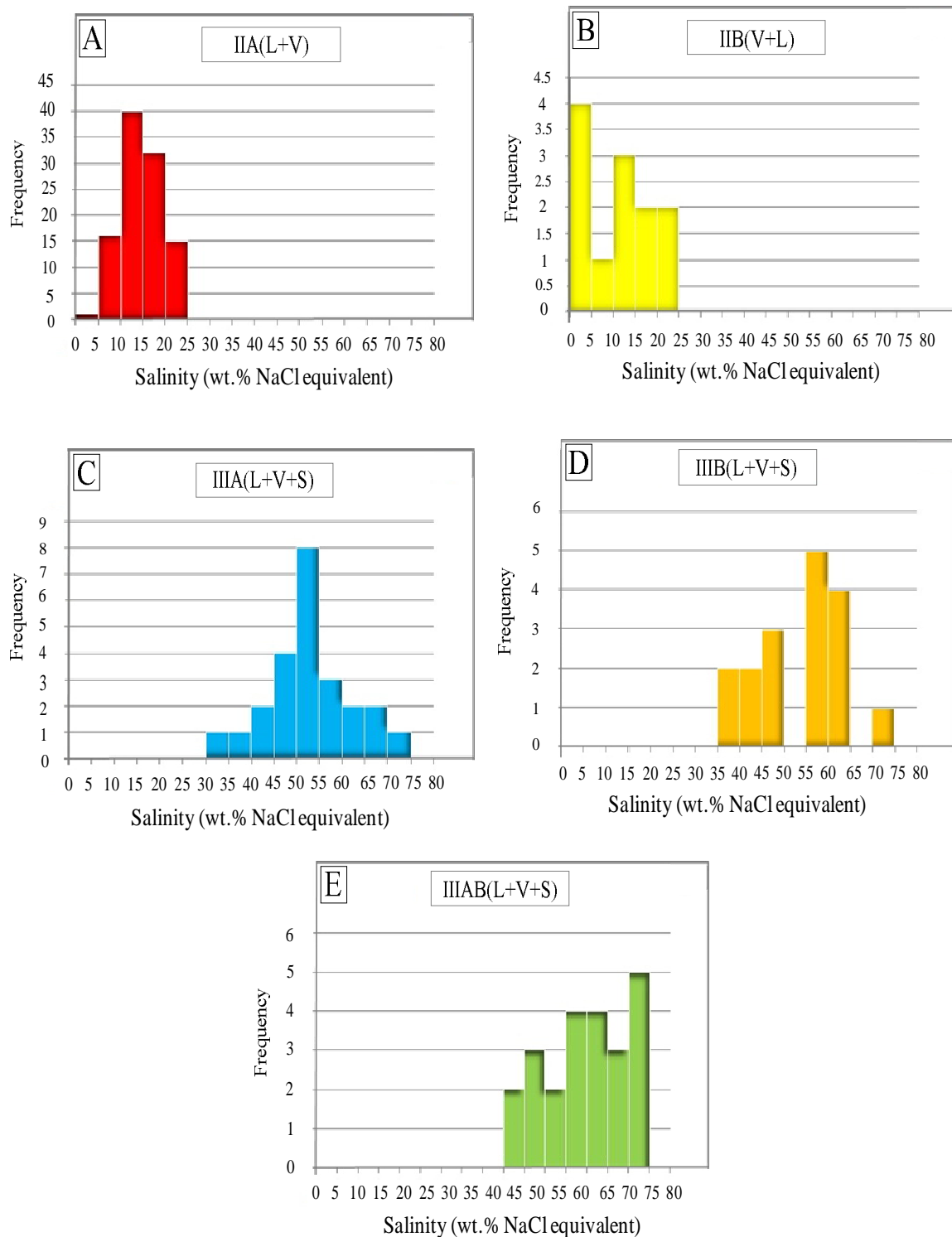
شکل 7. نمودار دمای همگن شدگی به انحلال هالیت برای سیالات درگیر (III A، III B، III AB) در کانسار دالی. A: سیالات درگیر چندفازی، B: سیالات درگیر شور حاوی کانی اپک، C: سیالات درگیر شور ساده.

Fig. 7. Histogram of homogenization temperature to halite dissolution for fluid inclusions (III A, III B, III AB) in the Dalli deposit. A: multi-phase fluid inclusions, B: high saline opaque mineral-bearing fluid inclusions, C: high saline simple fluid inclusions.



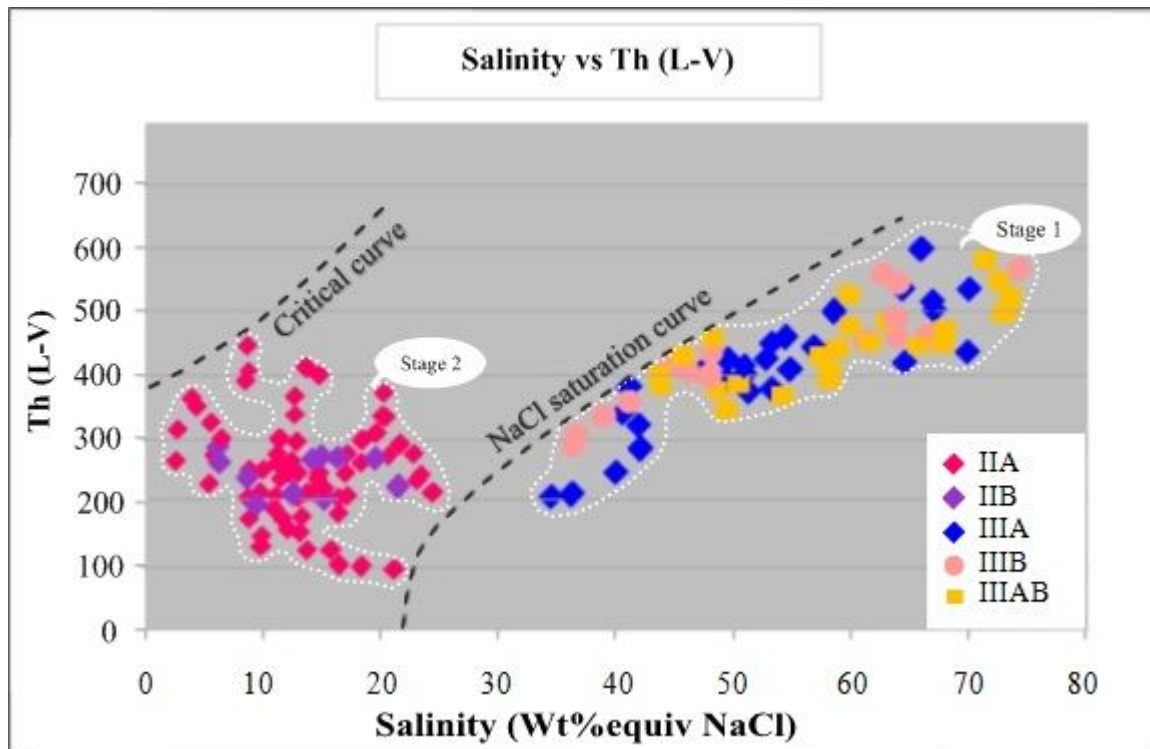
شکل 8. نمودار ریزدماسنجی برای سیالات درگیر (IIA, IIB, IIIA, IIIB, IIIAB) در کانسار دالی. A: نمودار دمای همگن‌شدگی سیالات درگیر، B: نمودار شوری انواع سیالات درگیر، C: نمودار دمای ذوب هالیت برای سیالات درگیر چندفازی، سیالات شور ساده و سیالات شور حاوی کانی اپک، D: نمودار دمای ذوب یخ برای سیالات درگیر دوفازی غنی از مایع و غنی از بخار، E: نمودار دمای ذوب سیلویت برای سیالات درگیر چندفازی، F: نمودار دمای ذوب اولیه (بوتکتیک) برای سیالات درگیر دوفازی غنی از مایع

Fig. 8. Histogram of microthermometric for fluid inclusions (IIA, IIB, IIIA, IIIB, IIIAB) in the Dalli deposit. A: histogram of homogenization temperature of fluid inclusions, B: histogram of salinity of fluid inclusions, C: histogram of melting temperature of halite for multi-phase fluid inclusions, high saline simple fluids and high saline opaque mineral-bearing fluids, D: histogram of melting temperature of ice for liquid-rich two-phase and vapor-rich two-phase of fluid inclusions, E: histogram of melting temperature of sylvite for multi-phase fluid inclusions, F: histogram of first melting temperature (eutectic) for liquid-rich two-phase of fluid inclusions



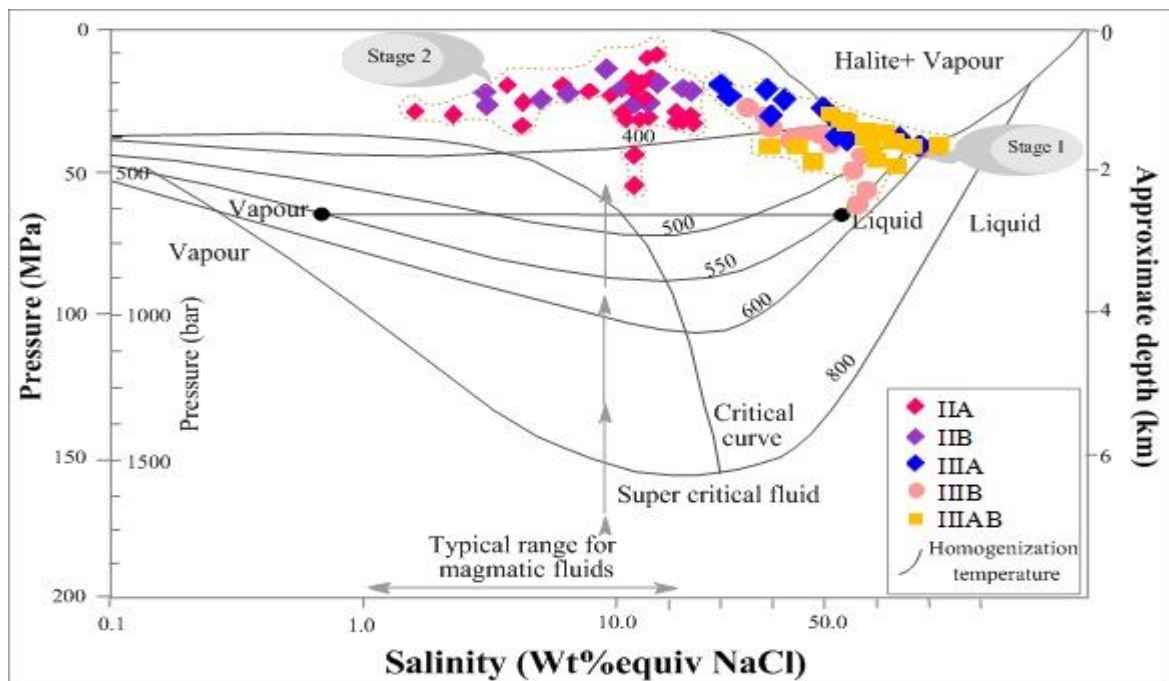
شکل 9. نمودار شوری برای سیالات درگیر در کانسار دالی. A: سیالات درگیر دوفازی غنی از مایع، B: سیالات درگیر دوفازی غنی از بخار، C: سیالات درگیر شور ساده، D: سیالات درگیر شور حاوی کانی اپک، E: سیالات درگیر چندفازی.

Fig. 9. Histogram of salinity for fluid inclusions in the Dalli deposit. A: liquid-rich two-phase of fluid inclusions, B: vapor-rich two-phase of fluid inclusions, C: high saline simple fluid inclusions, D: high saline opaque mineral-bearing fluid inclusions, E: multi-phase fluid inclusions.



شکل 10. نمودار دمای همگن‌شدگی به شوری برای انواع مختلف داده سیالات درگیر از کانسار دالی نسبت به منحنی اشباع هالیت و منحنی بحرانی (Ahmad and Rose, 1980).

Fig. 10. Diagram of homogenization temperature to salinity for different types of fluid inclusions data from Dalli deposit relative to the NaCl saturation curve and critical curve (Ahmad and Rose, 1980).



شکل 11. نمودار فشار- شوری برای سیالات درگیر در کانسار دالی (ساده شده از Wilkinson, 2001).

Fig. 11. Diagram of pressure-salinity for fluid inclusions in the Dalli deposit (modified after Wilkinson, 2001).

بحث

شرایط فیزیکوشیمیایی سیال تشکیل دهنده ماده معدنی

بیشتر دانش و آگاهی ما از محیط و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی تشکیل ذخایر مس پورفیری، بر پایه مطالعات سیالات درگیر به دام افتاده در کانه‌های معدنی و کانیهای باطله می‌باشد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیالات درگیر در ذخایر مس پورفیری تغییرات منظمی را در زمان و مکان نشان می‌دهد و این مشخصات ممکن است در اکتشاف در سیستم‌های ماگمایی - گرمایی در سراسر جهان همراه با دیگر روشهای اکتشافی به کار گرفته شود. در ترکیب با ترتیب و حالت کلی مدل‌سازی شده برای مجموعه‌های کانیایی (زون‌های ماده معدنی و دگرسانی) نسبت به نفوذیها، مجموعه‌های سیالات درگیر ممکن است جهت‌ها و خط سیری را به سمت کانه‌زایی مس نشان دهند (John et al., 2010; Nuo et al., 2012). در حالت کلی سیالات درگیر حاوی نمک (هالیت)، به‌ویژه آنهایی که حاوی فازهای نوزاد کالکوپیریت هستند و یا آنهایی که با سیالات درگیر غنی در بخار هم‌زیست هستند، مشخص‌کننده سطوح مرکزی و کم‌عمق یک سیستم مس پورفیری می‌باشند. سیالات درگیر دوفازی، با شوری بین 25 تا 15 wt.% NaCl که غنی در مایع هستند، ممکن است در بخشهای عمیق‌تر سیستم‌های مس پورفیری یافت شوند، جایی که فشار به اندازه کافی برای ممانعت از جدایش فازی بالاست و پدیده جوشش رخ می‌دهد (Rusk and Reed, 2008). سیالات درگیر با یک نسبت بسیار متغیر بخار به مایع که در منطقه فراوان است بیانگر به‌دام افتادن ناهمگن مایع و بخار هستند. علاوه بر این محدوده وسیع شوری و دمای همگنی سیالات درگیر با چگالی متنوع و فراوانی نسبی میان‌بارهای غنی در بخار نوع (I و IIB) بیانگر این است که فاز بخار در سیالات ماده معدنی مسؤول تشکیل کانسار بوده است. بر اساس مشاهدات میکروسکوپی مشخص شد در جایی که دو نوع سیال درگیر در بلوری مشابه یا در بلورهای بسیار نزدیک هم‌زیست بودند، فازهای غنی در مایع و غنی در بخار در برخی نمونه‌ها هم‌دمای بودند. از این رو غیر ممکن است که این سیالات درگیر از به‌دام افتادن سیال همگن در این چنین مسافت کوچکی ناشی شده باشد. ترکیب متغیر میان‌بارهای سیال در تمام نمونه‌ها و هم‌زیستی سیالات با مقادیر متفاوت میزان بخار، هم برای

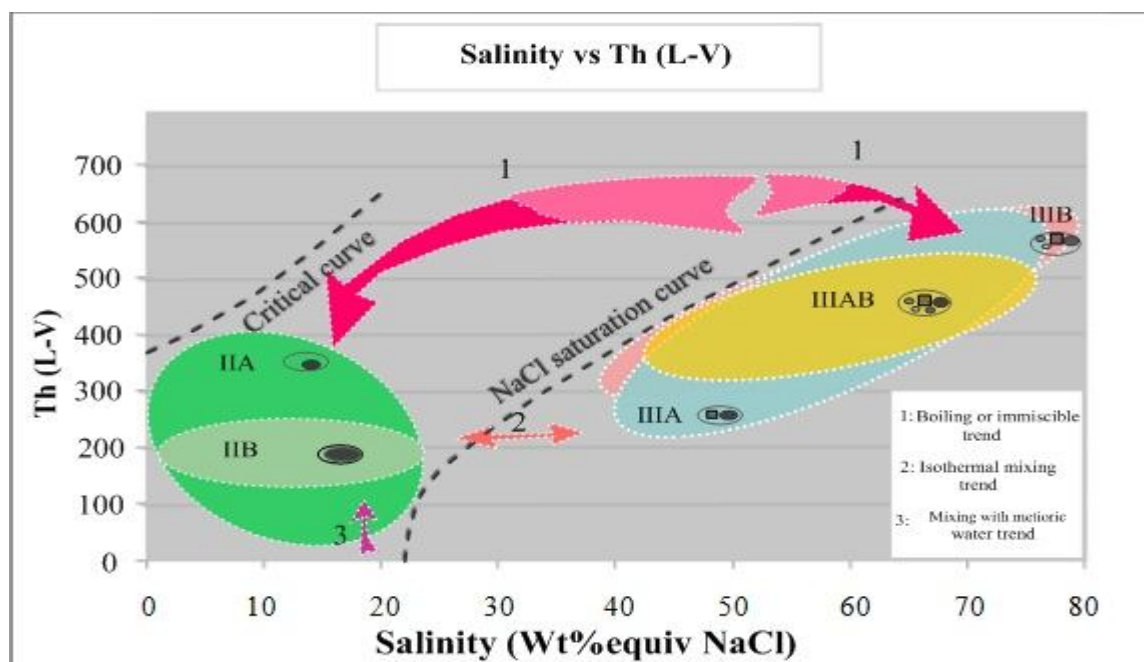
آنهایی که به فاز بخار همگن شدند و هم برای آنهایی که به فاز مایع همگن شدند، به‌عنوان شاهدهی برای محدوده وسیع عوامل فیزیکی و شیمیایی است که در طول سردشدن سیال تشکیل‌دهنده کانسار عمل کرده‌اند. هم‌جواری سیالات درگیر چندفازه با سیالات درگیر غنی از بخار، بیانگر حبس‌شدن سیالات در نقطه جوشش است، یعنی در حالتی که بخار با مایع به حالت تعادل بوده است. در نتیجه این جوشش، قسمتی از مس موجود در محلول می‌تواند اغلب به‌صورت کالکوپیریت نهشته شود (Afshooni et al., 2013). مقایسه دمای همگن‌شدگی برای همه میان‌بارها و ترکیبات دما پایین و دما بالا با شوریهای مختلف، روابط بین انواع میان‌بارها را نشان می‌دهد. طبق شکل 12 گروههای اصلی تشکیل‌دهنده کانسار کانه‌دار در محدوده دما و شوری حاوی سیالاتی هستند که بین خط منحنی اشباع هالیت و خط بحرانی که فقیر از نمک طعام است، قرار دارند (Wilkinson, 2001). بر اساس نتایج دماسنجی، همان‌طور که در شکل می‌بینیم سیالات درگیر از لحاظ دما و شوری محدوده وسیعی را به خود اختصاص داده‌اند که این امر خود حاکی از عملکرد پدیده جوشش در منطقه است. رابطه‌ای که بین دما و شوری وجود دارد، تنوع شوری و هم‌زمانی میان‌بارهای دوفازی و سه‌فازی با هم، یک سیر تکاملی را برای رگه‌های کوارتز نشان می‌دهد (Asadi et al., 2012) و روند مثبت شوری و دما در منطقه نشانگر رخداد فرآیند جوشش و عدم اختلاط سیالات دوفازی و سه‌فازی می‌باشد و همچنین کاهش شوری در میان‌بارهای دوفازی به‌علت اختلاط آب‌های ماگمایی با آبهای جوی است که رقیق‌ترند. شرایط جدید فیزیکوشیمیایی و تغییر در درجه حرارت در گذر از شرایط لیتوستاتیک به هیدروستاتیک، که همراه مرحله جوشش اتفاق افتاده (Cunningham, 1978)، به احتمال زیاد سبب ترسیب کوارتز و انواع سولفیدها می‌شود. حضور فراوان استوکورکها و رگه‌های سیلیسی در منطقه و همراهی رگه‌های مگنتیت، کوارتز و آثاری از پیریت و کالکوپیریت به‌صورت پراکنده یا رگه‌های مثال بارز این فرآیندهاست.

تحولات سیال

در شکل 12 تغییرات شماتیک همین سیالات نشان داده شده است. در بخش شوری بالا سه گروه اصلی از میان‌بارهای

است. این روند ممکن است با آنومالی برگشت میان‌بارهای شوری بالای نوع III وقتی که دمای همگن‌شدگی بیشتر از 360°C باشد، گسترش پیدا کند. اگر به نظر برسد که سیالات شوری بالا نوع III و شوری پایین نوع II همزمانند، حضور همزمان میان‌بارهای شور غنی در مایع و غنی در بخار بیانگر این است که این سیالات درگیر نوع (IIIAB, IIIB, IIIA و IIIA) یا ناشی از به‌دام افتادن سیالات در حال جوشش هستند، یا بیانگر حضور دو سیال غیر مخلوط‌شدنی‌اند که مستقیماً از ماگما ناشی شده‌اند (Bodnar, Cline and 1994). فرآیند جوشش نیز توسط فراوانی سیالات درگیری که به صورت ناهمگن به‌دام افتاده‌اند همراه با نسبت‌های متغیر مایع به بخار به ثبت رسیده است (Ahmad and Rose, 1980). سیالات ماگمایی دمای همگن‌شدگی و شوری بالایی دارند، اما شکستگیها باعث اختلاط سیالات ماگمایی و جوی و تشکیل میان‌بارهای IIIB با دما و شوری پایین‌تر سیال ماگمایی می‌گردند، که احتمالاً به‌علت اختلاط سیالات ماگمایی و جوی است (Ahmad and Rose, 1980; Shelton, 1983)، یا ناشی از به‌دام افتادن از یک سیال ناهمگن است که غیر مخلوط‌شدنی می‌باشد.

(IIIAB و IIIA, IIIB) و در بخش شوری پایین دو گروه میان‌بار (IIIB و IIIA) تشخیص داده شده‌اند. روندهای مثبت تغییرات دما و شوری برای هر سه نوع سیال درگیر IIIA, IIIB و IIIAB بیانگر این است که با توجه به میزان نمکهای غیرمحلول، دمای تبخیر محلول افزایش می‌یابد و از آن برای تشخیص محدوده همگنی این سیالات درگیر استفاده می‌شود. با توجه به این مطلب که آمیختگی ایزوترمال بین سیالات شوری بالا و شوری پایین دیده نمی‌شود، طبق نظر کلاین و بودنار (Cline and Bodnar, 1994) سیالی که به نمک همگن می‌شود، نمی‌تواند همزمان با میان‌بارهایی با شوری پایین وجود داشته باشد. اگر این سیالات با هم در منطقه رخ داده باشند، نشان‌دهنده غیراختلاط بودن سیالات و یا ناشی از تغییرات فشار می‌باشند که اجازه جوشش سیستم باز سیالات شور اولیه، تولید سیالات با شوری بالا و غنی در بخار را همراه با به‌دام افتادن ناهمگن هر دو سیال فراهم می‌کنند. یک روند مثبت برای تمام میان‌بارهای نوع III منعکس‌کننده معیاری است که انحلال نمک در دمای تبخیر افزایش پیدا کرده که از آن برای تعیین محدوده خصوصیات همگن‌شدگی این میان‌بارها استفاده می‌شود. یک تطابق مشابه در میان‌بارهای IIIA با افزایش دما دیده می‌شود، که روند آنها شوری بالاتر



شکل 12. نمودار روندها و نقش فرآیندهای مختلف روی تکامل سیالات درگیر در کانسار دالی (Ahmad and Rose, 1980).

Fig. 12. Diagram of trends and role of various processes on evolution of fluid inclusion in the Dalli deposit (Ahmad and Rose, 1980).

و کانه‌زایی که با سنگهای منطقه تجمع پیدا کرده، می‌توان حدس زد که سیستم‌های گسله و شکستگیها در منطقه مسیرهای عبور جریان برای صعود ماگمای گرانیتوئیدی کمان و پلوم‌های گرمایی است که با آنها تجمع پیدا کرده است (Zarasvandi et al., 2013). وجود کالکوپیریت، پیریت و مگنتیت در رگه‌ها و حضور کالکوپیریت و پیریت در تعدادی از سیالات درگیر چندفازی گویای این است که سیالات اولیه مسؤول ته‌نشست مس، آهن و گوگرد بوده‌اند. نوسانی که بین وضعیت فشار لیتوستاتیک و هیدروستاتیک وجود دارد عامل مهمی است که باعث ته‌نشست مس در رگه‌ها می‌شود (Zarasvandi et al., 2013). توزیع رگه‌ها، انواع دگرسانیها و توزیع سیالات درگیر در رگه‌ها نقش مهمی در تکامل ترکیبی سیال گرمایی دارد (Rusk and Reed, 2008). رگه‌چه‌های کوارتز اولیه \pm سولفید نیز با زون پتاسیک مرتبطند و رفتار آنها نشان‌دهنده تشکیل آنها تحت فشار لیتوستاتیک می‌باشد، اما در زون‌های دگرسانی فلیک و آرژیلیک که رژیمهای هیدروستاتیک غالب است، بیشتر فضاهای خالی را پر می‌کنند (Siahcheshm et al., 2014). رگه‌ها، رگه‌چه‌ها و توزیع کالکوسیت و کوولیت اساساً در بخش بالایی زون غنی شده ثانویه این ذخایر وجود دارند (Zarasvandi et al., 2005)، که در مورد کانسار دالی نیز رگه‌هایی با این نوع کانه‌زایی آثار غنی‌سازی برون‌زاد را نشان می‌دهند. همان‌طور که جوشش ادامه پیدا می‌کند فاز سیال شورتر می‌شود (شکل‌های 10 و 12) و ادامه جوشش سبب تشکیل شکستگیهای هیدرولیکی می‌شود که با کوارتز و سولفید پر می‌شوند. با بسته‌شدن کانال‌های سیالات، نفوذپذیری کاهش یافته و باعث می‌شود که سیالات دوباره فشار لیتوستاتیک را تحمل کنند. با افزایش فشار داخلی دوباره سیال آزاد شده و در دما و شوری کمتر، فشار هم کاهش می‌یابد. علت این امر هم این است که در طی تشکیل یک کانسار مس پورفیری، شوری با تغییر دما و فشار در یک سیستم سیال، مایع، گاز + هالیت کنترل می‌شود (Ulrich et al., 2002).

رخداد جوشش و عدم مخلوط شدن

در بسیاری از موارد سیالات درگیر با شوری بالا (با حباب کوچک) با میان‌بارهای نوع I و IIA که شوری پایینی داشتند، دیده شدند که بیانگر به‌دام افتادن سیالی است که یا تحت

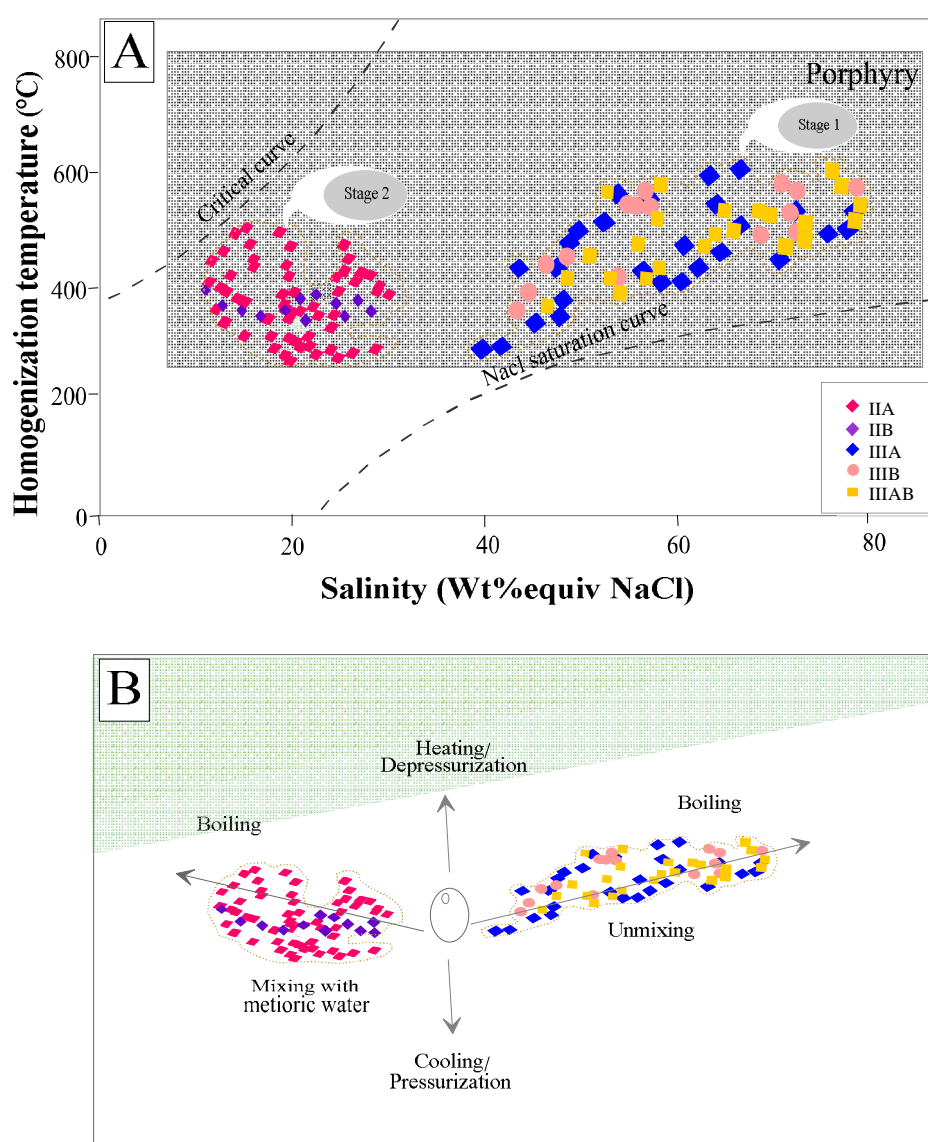
طبق شکل A-13 گروه‌های اصلی تشکیل‌دهنده کانسار کانه‌دار در محدوده دما - شوری حاوی سیالاتی هستند که بین خط منحنی اشباع هالیت و خط بحرانی که فقیر از نمک طعام است، قرار دارند (Wilkinson, 2001). بر اساس نتایج دماسنجی، همان‌طور که در شکل A-13 می‌بینیم سیالات درگیر از لحاظ دما و شوری محدوده وسیعی را به خود اختصاص داده‌اند که این امر خود حاکی از عملکرد پدیده جوشش در منطقه است. سیالات دوفازی IIA و IIB در زیر موقعیت بحرانی قرار گرفته‌اند. رابطه‌ای که بین دما و شوری وجود دارد، تنوع شوری، همزمانی میان‌بارهای دوفازی و سه-فازی با هم، یک سیر تکاملی را برای رگه‌چه‌های کوارتز نشان می‌دهد (Asadi et al., 2012) و روند مثبت شوری و دما در منطقه نشانگر رخداد فرآیند جوشش و عدم اختلاط سیالات دوفازی و سه‌فازی می‌باشد و همچنین شکل B-13 روند عدم اختلاط یا جوشش را برای میان‌بارهای (IIA, IIIA, IIIB و IIIAB) و همچنین کاهش شوری و دما را در میان‌بارهای IIA و IIB نشان می‌دهد، که به‌علت اختلاط آب‌های ماگمایی با آبهای جوی است که رقیق‌شدگی بیشتری دارند. بنابراین روندهای دما - شوری گویای این مطلب است که جوشش پیش‌رونده با کاهش پیش‌رونده دما به‌واسطه نوسانهای بزرگ فشار در خلال شکستگیهای آبی و افزایش غلظت سیال به چشم می‌خورد و ورود آبهای جوی مهم در سیستم پورفیری دالی در قسمتهایی از کانسار در خلال کانی‌سازی به چشم می‌خورد.

ملاحظات ژنتیکی

نمونه‌ها مربوط به رگه‌های سولفیدی - کوارتزی درون سنگ میزبان و همراه با سرسیت، پیریت و کالکوپیریت می‌باشد. شکستگیهای درون سنگ میزبان بیانگر چرخش سیالات با شوری بالا هستند، که به‌طور متناوب در سیستم‌های رگه‌ای حاوی ماده معدنی به‌علت نوسان بین فشار لیتوستاتیک و هیدروستاتیک که احتمالاً عامل ایجاد شکستگی و شوری است، به‌وجود آمده‌اند (Morales et al., 2002). این حجم از کانه‌زایی کانه شامل رگه‌های کوارتز در سنگهای گرانیتوئیدی است که در نتیجه کاهش فشار در ریزش‌شکستگیها دیده می‌شوند (Morales et al., 2002; Zarasvandi et al., 2005). با استفاده از مشاهدات صحرایی، دگرسانی وسیع

پیشنهاد می‌کنیم. تناوب بین فشار لیتوستاتیک و هیدروستاتیک شاید مهمترین سازوکار ته‌نشست مس در رگه‌های کوارتز در منطقه بوده باشد. در خلال جوشش با افزایش دما، سیالات IB و IIB که غنی از بخارند و زیر موقعیت بحرانی هستند از یک سیال ماگمایی فوق بحرانی جدا می‌شوند، یکی از این سیالات نوع (I و IIB) می‌باشد که دارای شوری پایین هستند و غنی از بخار و دیگری سیالات نوع IIIA هستند که بسیار شورند و فقیر از بخار.

جدایش فازی بوده (جوشش فوق بحرانی در ماگمای آبدار طی سرد شدن یعنی بعد از اشباع شدن ماگما از بخار) (Richards, 2003; Shafiei and Shahabpour, 2008) یا توسط جدایش همزمان شواریه و بخار غیرمخلوط از ماگمایی که در حال سرد شدن است (موقعیت فوق بحرانی اشباع از بخار)، در یک شرایط با فشار هیدروستاتیک نسبتاً پایین (Cline and Bodnar, 1994) تشکیل شده است، که در مورد کانسار دالی جدایش همزمان شواریه و بخار غیرمخلوط از ماگمایی را که در حال سرد شدن می‌باشد



شکل 13. A: نمودار دمای همگن‌شدگی - شوری برای انواع سیالات درگیر در کانسار دالی (Wilkinson, 2001). B: نمودار انواع روندها در کانسار دالی (Wilkinson, 2001).

Fig 13. A: diagram of homogenization temperature–salinity for fluid inclusions in the Dalli deposit (Wilkinson, 2001), B: diagram of type of trends in the Dalli deposit (Wilkinson, 2001).

حوادث اختلاط

دمای همگنی و شوری بالای برخی از سیالات درگیر نشانگر وجود اولیه شورابه‌های متراکم با منشأ ماگمایی است. سیالات با شوری پایین ممکن است در اثر آمیختگی سیالات شورتر با آبهای جوی که شوری کمتری دارند، تشکیل شده باشند (Ahmad and Rose, 1980; Shelton, 1983). یا از ماگمایی که میزان بالایی سیالات شور را آزاد کرده و ماگمای باقی‌مانده از کلریت تهی شده باشد (Cline and Bodnar, 1991). حاصل شده باشند. با وجود این شوری سیالات درگیر نوع IIA و IIB به‌طور کلی پایین است و از این رو با فرآیند آمیختگی با سیالات جوی که شوری کمی دارند و مربوط به سطح هستند، بسیار سازگار است.

کاربردهای اکتشافی

مطالعه سیالات درگیر بهترین وسیله تعیین دمای نهشته است. این مطالعات نقش مهمی را در تعیین منشأ سیالات و فلزات در سیستم‌های مس پورفیری بازی می‌کنند (Wilkinson, 2001). امروزه معمولاً پذیرفته شده است که سیالات و احتمالاً اغلب فلزات موردنیاز برای تشکیل کانسارهای پورفیری از یک میزبان نفوذی مشتق شده‌اند. با توجه به مطالعات سیالات درگیر در نمونه‌های مربوط به کانسار دالی، وجود حرارت بالا در پهنه پتاسیک، می‌توان چنین اظهار داشت که کانیه‌ها همراه با محلولهای کانه‌ساز توسط کمپلکس‌های کلریدی و شاید سولفیدی حمل شده‌اند و با تغییر شرایط فیزیکوشیمیایی محیط و محلول، از جمله کاهش دما، فشار و رخداد جوشش، کمپلکس‌های حاوی کانیه‌های سولفیدی ناپایدار شده و عناصر وارد این کانیه‌ها می‌شوند. مطالعه سیالات درگیر در نمونه‌های کوارتزی حاصل از سیال کانه‌ساز کانسار دالی، دمای بین 620°C تا 140 و شوری تا 75 Wt.% NaCl و کاهش دما و شوری سیالات از پهنه پتاسیک به سمت فیلیک را نشان می‌دهد. یکی از پدیده‌هایی که هنگام نفوذ محلولهای کانه‌ساز به درون سنگهای میزبان در منطقه باعث ناپایداری کمپلکس‌ها شده، پدیده جوشش است. شواهدی همچون همسان‌شدن بعضی از سیالات درگیر به‌صورت فاز بخار و ترکیب برخی از سیالات درگیر در هنگام عمل گرمایش قبل از یکنواخت‌شدن، دلالت بر رخداد پدیده جوشش در اثر کاهش فشار در درون گسلها و پهنه‌های برشی

کانه‌زایی شده در کانسار دالی و یا غالب‌شدن فشار هیدروستاتیک بر لیتوستاتیک دارد. از طرفی کاهش دما و فشار می‌تواند از عوامل مهم برای کانه‌زایی در این نهشته باشد. نتایج مطالعات سیالات درگیر نشان می‌دهد که سیالات درگیر با شوری بالا در پهنه پتاسیک و در محدوده مرکزی کانسار به‌وجود می‌آیند، در حالی که سیالات درگیر با شوری و دمای همگن‌شدگی پایین در پهنه‌های فیلیک و آرژیلیک و یا حتی در حاشیه توده معدنی به‌وجود می‌آیند. در حقیقت حوزه فعالیت محلولهایی با منشأ ماگماتیک در هسته پهنه کانه‌زایی شده و حوزه فعالیت محلولهایی با منشأ جوی در حاشیه این پهنه است. اگر سیالات دمایی بالاتر از 450°C را دارا باشند، عدم سرد شدن سیستم باعث عدم ته‌نشست مس توسط کالکوپریت شده و کمپلکس‌های کلریدی مس را از محیط خارج می‌کنند (Hezarkhani, 2005). ولی در کانسار دالی به‌علت رخداد فرآیند جوشش، اختلاط سیالات ماگمایی با سیالات جوی و فرآیند سرد شدن باعث ته‌نشست مس توسط کمپلکس‌های سولفیدی و اکسیدی شده و فرآیند اختلاط باعث کاهش دما و شوری در قسمتهایی از سیستم شده و این کانسار را به یک کانسار اقتصادی تبدیل کرده است.

کانسار دالی در مقایسه با کانسارهای ایران

بخش نئوژن - پلیستوسن کمربند آتشفشانی ایران مرکزی که از آن با نام کمان ماگمایی ارومیه - دختر یاد می‌کنند، یکی از زنجیره‌های استراتوولکانیکی و نفوذیهای گرانیتوئیدی (ظاهراً با کنترل گسلی) است که مهمترین ذخایر مس پورفیری ایران را در خود جای داده است (Richards, 2003; Cooke et al., 2005; Shahabpour, 2005; Zarasvandi et al., 2005). بررسیهای زیادی که در ارتباط با ماگماتیسم ارومیه - دختر صورت گرفته (Shahabpour, 2007; Ghorbani and Bezenjani, 2011; Verdel et al., 2011). محیطهای فرورانشی، حاشیه فعال قاره‌ای، ریفت و محیط پس از برخورد را برای رخدادهای ماگمایی این کمان معرفی کرده‌اند. اما ماگماتیسم نوع کمان ماگمایی مرتبط با فرورانش ناشی از برخورد بین صفحات ایران و عربی در اثر بسته‌شدن نئوتتیس در طی کرتاسه - ترشیاری بیشتر مورد قبول است. فعالیت ماگمایی و کانه‌زایی مس در امتداد این کمان به سه دوره اصلی تقسیم می‌شود. (1) ائوسن - الیگوسن

مجموعه کانه‌زایی، ویژگی‌های سیالات درگیر و محلول‌های گرمابی تشکیل‌دهنده این کانسار، می‌توان نتیجه گرفت که فعالیت گرمابی مس پورفیری در کانسار دالی یک سیستم ماگمایی-جوی است که مشابه کانسارهای پورفیری دیگر در این کمربند مانند سونگون، سرچشمه و میدوک می‌باشد، همچنین به کانسار دره‌زرشک و علی‌آباد نیز از لحاظ محدوده شوری و دما شباهت دارد.

(Ahmadian et al., 2009)، (2) الیگوسن میانی - پایانی، (3) میوسن میانی - پایانی. همان‌طور که در جدول 3 مشاهده می‌شود کانسار دالی از لحاظ محدوده دمای همگن‌شدگی و شوری، بیشترین شباهت را به کانسار دره‌زرشک و علی‌آباد (Zarasvandi et al., 2013)، کانسار مس سونگون (Calagari, 2004)، کانسار مس-مولیبدن سرچشمه (Hezarkhani, 2006) و کانسار مس میدوک (Asadi et al., 2013) دارد. با توجه به شواهد دگرسانی،

جدول 3. مقایسه محدوده دمای همگن‌شدگی و شوری در کانسار دالی با تعدادی از کانسارهای پورفیری در ایران، Th = دمای همگن‌شدگی

Table 3. Comparison of range of homogenization temperature and salinity of Dalli deposit with some of porphyry deposits in Iran, Th= homogenization temperature.

Porphyry deposits	Th (°C)	Salinity (wt% NaCl)	Reference
Darreh-Zerreshk and Ali-Abad porphyry copper	100-620 °C	1-78 Wt.%NaCl	(Zarasvandi et al., 2013)
Sungun porphyry copper	150-600 °C	1-70 Wt.%NaCl	(Calagari, 2004)
Sar-Cheshmeh porphyry Cu-Mo	240-600 °C	1-61 Wt.%NaCl	(Hezarkhani, 2006)
Meiduk porphyry copper	214-530 °C	2.2- Wt.%NaCl 43	(Asadi et al., 2013)
Dalli porphyry Cu-Au	140-620 °C	1-75 Wt.%NaCl	This paper

نتیجه‌گیری

دوفازی غنی از مایع، سیال درگیر دوفازی غنی از بخار، سیال درگیر شور حاوی کانی اپک، سیال درگیر شور ساده و سیال درگیر چندفازی می‌شود.

3- دماسنجی سیالات درگیر کانسار دالی حاکی از عملکرد محلول‌های گرمابی تشکیل‌دهنده کانسار در دمای حدود 600°C تا 172 و شوری حدود 59 Wt.%NaCl تا 1 می‌باشد و شوری مشاهده شده را می‌توان به رخداد پدیده جوشش نسبت داد.

4- شواهدی همچون همسان‌شدن بعضی از سیالات درگیر به‌صورت فاز بخار و ترکیب‌دهی 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

1- بر اساس مشاهدات پتروگرافی مقاطع نازک و صیقلی، پنج گروه اصلی از رگه‌ها با سه نسل کانه‌زایی در منطقه وجود دارد. رگه‌های گروه I: رگه‌های کوارتز دانه‌درشت تا دانه‌ریزند. رگه‌های گروه II: شامل کوارتز + پیریت + کالکوپیریت ± بورنیت ± کولیت ± کالکوسیت‌اند. رگه‌های گروه III: شامل کوارتز + مگنتیت ± کالکوپیریت‌اند. رگه‌های گروه IV: شامل فلدسپات پتاسیم + کوارتز ± کالکوپیریت‌اند. رگه‌های گروه V: شامل رگه‌های کلریت و بیوتیت‌اند.

2- مطالعه پتروگرافی سیالات درگیر کانسار دالی نشان‌دهنده تشکیل هفت گروه سیال درگیر شامل: سیال درگیر تک‌فازی غنی از مایع، سیال درگیر تک‌فازی غنی از بخار، سیال درگیر

6- بیشترین فشار 620 bar مربوط به سیالات درگیر شور حاوی کانی اپک IIIB است که تا فشار 220 bar هم ادامه دارد که این فشار با عمق 3 km تا 1 برابر است.

7- محدوده شوری و دمای همگن‌شدگی سیالات درگیر کانسار دالی نشان‌دهنده این است که کانه‌زایی در کانسار دالی در ارتباط با سیالاتی با منشأ ماگمایی - جوی است و فرآیندهای جوشش، سردشدن و اختلاط آبهای ماگمایی با آبهای جوی باعث کاهش دما و شوری شده و شرایط را برای تهنشست مس توسط کمپلکس‌های سولفیدی و اکسیدی فراهم کرده است.

برشی کانه‌زایی شده نهشته مورد مطالعه و یا غالب شدن فشار هیدروستاتیک بر لیتوستاتیک دارد.

5- سیالات درگیر چندفازی با بیشترین فراوانی دمای همگن‌شدگی در گستره 620°C تا 420 و بیشترین فراوانی شوری در گستره 75 Wt.% NaCl تا 70 نشان‌دهنده اولین سیالاتی هستند که سبب تشکیل کانسار دالی شده‌اند. بالاتر بودن دمای همگن‌شدگی این سیالات در رگه‌های حاوی کانه‌زایی مگنتیت و حضور کالکوپیریت و پیریت در بعضی از سیالات درگیر چندفازی نشان می‌دهد که سیالات اولیه مسؤول حمل و تهنشست مس، آهن و گوگرد بوده‌اند.

References

- Afshooni, S.Z., Mirnejad, H., Esmaeily, D. and Asadi, H.H., 2013. Mineral chemistry of hydrothermal biotite from the Kahang porphyry copper deposit (NE Isfahan), Central Province of Iran. *Ore Geology Reviews*, 54(1): 214-232.
- Ahmad, S.N. and Rose, A.W., 1980. Fluid inclusions in porphyry and skarn ore at Santa Rita, New Mexico. *Economic Geology*, 75(3): 229-250.
- Ahmadian, J., Haschke, M., McDonald, I., Regelous, M., Ghorbani, M., Emami, R. and Murata, M., 2009. High magmatic flux during Alpine-Himalayan collision: Constraints from the Kal-e-Kafi complex, central Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 121(5-6): 857-868.
- Alfons, M., Kerkhof, V. and Ulrich, F.H., 2001. Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 55(1-4): 27-47.
- Alizadeh, S.B. and Hezarkhani, A., 2014. Hydrothermal evolution of Darrehzar porphyry copper deposit, Iran: evidence from fluid inclusions. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(4): 1463-1477.
- Asadi, S., Moore, F. and Fattahi, N., 2012. Fluid inclusion and stable isotope constraints on the genesis of the Jian copper deposit, Sanandaj-Sirjan metamorphic zone, Iran. *Geofluids*, 13(1): 66-81.
- Asadi, S., Moore, F., Zarasvandi, A. and Khosrojerdi, M., 2013. First report on the occurrence of CO₂-bearing fluid inclusions in the Meiduk porphyry copper deposit, Iran: implications for mineralization processes in a continental collision setting. *Geologos*, 19(4): 301-320.
- Asadi Haroni, H., 2008. First Stage Drilling Report on (Dalli Porphyry Cu-Au Prospect, Central Province of Iran). Technical of Iran, Isfahan, Report 1, 24 pp.
- Asadi Haroni, H., Fathianpour, N., Tabatabai, H. and Heydari, E., 2009. Final report of exploratory processing in (Dalli Cu-Au deposit). Industry and Mines Organization of Markazi province, Arak, Report 4, 157 pp.
- Ayati, F., Yavuz, F., Asadi, H.H., Jeremy, P. and Jourdan, R., 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.
- Ayati, F., Yavuz, F., Noghreyan, M., Asadi, H.H. and Yavuz, R., 2008. Chemical characteristics and composition of hydrothermal biotite from the Dalli porphyry copper prospect, Arak, central province of Iran. *Mineralogy and Petrology*, 194(1-2): 107-122.
- Bodnar, R.J., 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochimistry*, 57(3): 683-684.
- Bodnar, R.J., 2003. Reequilibration of fluid inclusions, in Samson. *Geological Association of Canada short course series*, 32(3-4): 213-231.
- Burnham, C.W., 1985. Energy release in subvolcanic environments: implications for

- breccia formation. *Economic Geology*, 80(6): 515–522.
- Calagari, A.A., 2004. Fluid inclusion studies in quartz veinlets in porphyry copper deposit at Sungun, East – Azarbaijan, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(2): 179-189.
- Cline, J.S. and Bodnar, R.J., 1991. Can economic porphyry copper mineralization be generated by a typical calc-alkaline melt. *Geophysics*, 96(5): 8113–8126.
- Cline, J.S. and Bodnar, R.J., 1994. Experimental determination of the PVTX properties of 30 wt% NaCl-H₂O using synthetic fluid inclusions. *Geophysics*, 57(5): 4230–4236.
- Cooke, D.R., Hollings, P. and Walshe, J.L., 2005. Giant Porphyry Deposits: Characteristics, Distribution, and Tectonic Control. *Economic Geology*, 100(5): 801-818.
- 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(6): 745-754.
- Daneshjou, M., 2014. Investigation of Geology, Geochemistry and genetic 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)
- Darabi, G.F., Ghavami, R.R. and Asadi, H.H., 2013a. Alteration, zoning model, and mineralogical structure considering lithochemical investigation in Northern Dalli Cu–Au porphyry. *Geosciences*, 6(12): 4821-4831.
- Darabi, G.F., Ghavami, R.R., Khalo, K.R., Asadi, H.H. and Seyedrahimi, N.M., 2013b. Interpretation of lithochemical and geophysical data to identify the buried mineralized area in Cu-Au porphyry of Dalli-Northern Hill. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(11): 4499-4509.
- Drummond, S.E. and Ohmoto, H., 1985. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Economic Geology*, 80(1): 126-147.
- Emami, M.H., 1991. Explanatory text of the Qom, Geological Quadrangle Map, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.
- Forster, H., 1978. Mesozoic- Cenozoic Metallogenesis in Iran. *Geological Society*, 135(4): 443-455.
- Ghorbani, M.R. and Bezenjani, R.N., 2011. Slab partial melts from the metasomatizing agent to adakite, Tafresh Eocene volcanic rocks, Iran, Island Arc. *Economic Geology*, 20(2): 188-202.
- Gustafson, L.B. and Hunt, J.P., 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, 70(2): 857–912.
- Hezarkhani, A., 2005. Mineralogy and fluid inclusion investigations in the Reagan Porphyry System, Iran, the path to an uneconomic porphyry copper deposit. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(5): 1–15.
- 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.
- Hezarkhani, A., 2009. Hydrothermal fluid geochemistry at the Chah-Firuzeh porphyry Copper deposit, Iran: Evidence from fluid inclusions. *Journal of Geochemical Exploration*, 101(3): 254-264.
- John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D., Blakely, R.J., Bodnar, R.J., Dilles, J.H., Gray, F., Graybeal, F.T., Mars, J.C., McPhee, D.K., Seal, R.R., Taylor, R.D. and Vikre, P.G., 2010. Porphyry Copper Deposit Model. Scientific Investigations Report, USGS, 169 pp.
- Liu, J., Wu, G., Li, Y., Zhu, M. and Zhong, W., 2012. Re–Os sulfide (chalcopyrite, pyrite and molybdenite) systematics and fluid inclusion study of the Duobaoshan porphyry Cu (Mo) deposit, Heilongjiang Province, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49(3): 300–312.
- Masterman, G.J., Cooke, D.R., Berry, R.F., Walshe, J.L., Lee, A.W. and Clark, A.H., 2005. Fluid chemistry, structural setting, and emplacement history of the Rosario Cu-Mo porphyry and Cu-Ag-Au epithermal veins, Collahuasi district, northern Chile. *Economic Geology*, 100(2): 835–862.
- Mohajjel, M. and Proohan, N., 2005. Geometry and kinematics of the Qom-Zefreh fault system and its significance in transpression tectonics. *Geosciences*, 12(56): 72-83.
- Morales, S.R., Both, R.A. and Golding, S.D., 2002. A fluid inclusion and stable isotope study of the Moonta copper–gold deposits, South Australia: evidence for fluid immiscibility in a magmatic hydrothermal system. *Geology*, 192(3-4): 211–226.
- Nateghi, A. and Hezarkhani, A., 2013. Fluid inclusion evidence for hydrothermal fluid

- evolution in the Darreh-Zar porphyry copper deposit, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 73(2-3): 240–251.
- Nuo, Li., Ulrich, T., Chen, Y.J., Thomsen, T.B., Pease, V. and Pirajno, F., 2012. Fluid evolution of the Yuchiling porphyry Mo deposit, East Qinling, China. *Ore Geology Reviews*, 48(4): 442–459.
- Pirajno, F., 2009. Hydrothermal processes and mineral systems. Geological Survey of Western Australia. Springer, 1250 pp.
- Pollard, P.J. and Taylor, R.G., 2002. Paragenesis of the Grasberg Cu-Au deposit, Irian Jaya, Indonesia: Results from logging section 13. *Mineralium Deposita*, 37(1): 117–136.
- Richards, J.P., 2003. Tectono-Magmatic Precursors for Porphyry Cu-(Mo-Au) Deposit Formation. *Economic Geology*, 98(8): 1515–1533.
- Roedder, E. and Bodnar R.J., 1980. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies, *Annu. Review Earth Planet*, 8(6): 263–301.
- Rusk, B.G., Reed, M.H., 2008. Fluid Inclusion Evidence for Magmatic-Hydrothermal Fluid Evolution in the Porphyry Copper-Molybdenum Deposit at Butte, Montana. *Economic Geology*, 103(2): 307–334.
- Saremi, F., 2014. Hydrothermal alteration mapping using combination of the ASTER data and spectroscopic minerals in the Dalli porphyry Cu-Au deposit, Delijan, Markazi province. M.Sc. Thesis, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran, 142 pp. (in Persian with English abstract)
- Shafiei, B. and Shahabpour, J., 2008. Gold Distribution in Porphyry Copper Deposits of Kerman Region, Southeastern Iran. *Journal of Sciences*, 19(4): 247-260.
- Shahabpour, J., 1999. The role of deep structures in the distribution of some major ore deposits in Iran, NE of the Zagros thrust zone. *Journal of Geodynamics*, 28(3): 237-250.
- Shahabpour, J., 2005. Tectonic evolution of the orogenic belt in the region located between Kerman and Neyriz. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(4): 405-417.
- Shahabpour, J., 2007. Island-arc affinity of the central Iranian Volcanic Belt. *Journal of Asian earth sciences*, 30(5-6): 652-665.
- Shelton, K.L., 1983. Composition and origin of ore-forming fluids in a carbonate-hosted porphyry copper and skarn deposit, a fluid inclusion and stable isotope study of Mines Gaspé Quebec. *Economic Geology*, 78(8): 387–421.
- Shen, P., Shen, Y., Wang, J., Zhu, H., Wang, L. and Meng, L., 2010. Methane-rich fluid evolution of the Baogutu porphyry Cu–Mo–Au deposit, Xinjiang, NW China. *Chemical Geology*, 275(1-2): 78–98.
- Siahcheshm, K., Calagari, A.A. and Abedini, A., 2014. Hydrothermal evolution in the Maher-Abad porphyry Cu–Au deposit, SW Birjand, Eastern Iran: Evidence from fluid inclusions. *Ore Geology Reviews*, 58(5): 1–13.
- Sillitoe, R.H., 1979. Some Thoughts on Gold-Rich Porphyry Copper Deposits. *Mineralium Deposita*, 14(2): 161-174.
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(3): 3-41.
- Spencer, R.J., Moleller, N. and Weare, J.H., 1990. The prediction of mineral solubilities in natural waters: a chemical equilibrium model for the Na-K-Ca-Mg-Cl-SO₄-H₂O-system at temperatures below 25°C. *Geochimistry*, 54(5): 575–590.
- Sterner, S.M., Hall, D.L. and Bodnar, R.J., 1988. Synthetic fluid inclusions V, Solubility relations in the system NaCl-KCl-H₂O under vapor-saturated conditions. *Geochimistry*, 52(2-3): 989–1005.
- Stocklin, J. and Setudinia, A., 1972. Location map of the Dalli deposit, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Ulrich, T., Gunther, 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. *Economic Geology*, 96(4): 1743-1774.
- Verdel, C., Wernicke, B.P., Hassanzadeh, J. and Guest, B., 2011. A Paleogene extensional arc flare-up in Iran. *Tectonics*, 30(5): 421-454.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(3-4): 229-272.
- Wilson, J.W., Kesler, S.E., Cloke, P.L. and Kelley, W.C., 1980. Fluid inclusion geochemistry of the Granisle and Bell porphyry copper deposits, British Columbia. *Economic Geology*, 75(2): 45–61.
- Yong, F.Y., Li, N. and Chen, Y.J., 2012. Fluid inclusion study of the Nannihu giant porphyry Mo–W deposit, Henan Province, China: Implications for the nature of porphyry ore-

- fluid systems formed in a continental collision setting. *Ore Geology Reviews*, 46(3): 83–94.
- Zarasvandi, A., Liaghat, S., Lentz, D. and Hossaini, M., 2013. Characteristics of Mineralizing Fluids of the Darreh-Zerreshk and Ali-Abad Porphyry Copper Deposits, Central Iran, Determined by Fluid Inclusion Microthermometry. *Resource Geology*, 63(2): 188–209.
- Zarasvandi, A., Liaghat, S. and Zentilli, M., 2005. Porphyry Copper Deposits of the Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc, Iran, Super Porphyry Copper and Gold deposits. A global perspective PGC publishing Adelaide, 2(4): 441-452.
- Zarasvandi, A., Liaghat, S., Zentilli, M. and Reynolds, P.H., 2007. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of Alteration and Petrogenesis of Porphyry Copper-Related Granitoids in the Darreh-Zerreshk and Ali-Abad area, Central Iran. *Exploration and Mining Geology*, 16(2-3): 11–24.
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Sadeghi, M., Lentz, D., Adelpour, M. and Pourkaseb, H., 2015. Rare earth element signatures of economic and sub-economic porphyry copper systems in Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), Iran. *Ore Geology Reviews*, 70(3): 407-423.



Hydrothermal Fluid evolution in the Dalli porphyry Cu-Au Deposit: Fluid Inclusion microthermometry studies

Alireza Zarasvandi¹, Fateme Asadi*¹, Houshang Pourkaseb¹, Farhad Ahmadnejad² and Hasan Zamanian²

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

2) Department of Geology, Earth Sciences Faculty, Lorestan University, Khoramabad, Iran

Submitted: Aug. 18, 2014

Accepted: March 17, 2015

Keywords: magmatic arc, Dalli, hydrothermal, alteration, porphyry Cu-Au, fluid inclusion.

Introduction

A wide variety of world-class porphyry Cu deposits occur in the Urumieh-Dohktar magmatic arc (UDMA) of Iran. The arc is composed of calc-alkaline granitoid rocks, and the ore-hosting porphyry intrusions are dominantly granodiorite to quartz-monzonite (Zarasvandi et al., 2015). It is believed that faults played an important role in the emplacement of intrusions and subsequent porphyry-copper type mineralization (Shahabpour, 1999). Three main centers host the porphyry copper mineralization in the UDMA: (1) Ardestan-SarCheshmeh-Kharestan zone, (2) Saveh-Ardestan district; in the central parts of the UDMA, hosting the Dalli porphyry Cu-Au deposit, and (3) Takab-Mianeh-Qharahdagh-Sabalan zone. Mineralized porphyry copper systems in the UDMA are restricted to Oligocene to Miocene intrusions and show potassic, sericitic, argillic, propylitic and locally skarn alteration (Zarasvandi et al., 2005; Zarasvandi et al., 2015). In the Dalli porphyry deposit, four hydrothermal alteration zones, including potassic, sericitic, propylitic, and argillic types have been described in the two discrete mineralized areas, namely, northern and southern stocks. Hypogen mineralization includes chalcopryrite, pyrite, and magnetite, with minor occurrences of bornite. Supergene activity has produced gossan, oxidized minerals and enrichment zones. The supergene enrichment zone contains chalcocite and covellite with a 10-20 m thickness. Mineralization in the northern stock is mainly composed of pyrite and chalcopryrite. The aim of this study is the investigation and classification of hydrothermal veins and the constraining of physicochemical

compositions of ore-forming fluids using systematic investigation of fluid inclusions.

Materials and methods

Twenty samples were collected from drill holes. Thin and polished sections were prepared from hydrothermal veins of the potassic, sericitic and propylitic alteration zones. Samples used for fluid inclusion measurements were collected from drill cores DH01, DH02, DH06, and DH07, and outcrop samples. Microthermometric data were obtained by freezing and heating of fluid inclusions on a Linkam THMSG600 mounted on an Olympus microscope at Lorestan University.

Results

1) Five main vein types were identified, belonging to three stages of mineralization: type (I): barren quartz, type (II): quartz + pyrite + chalcopryrite ± bornite ± chalcocite ± covellite, type (III): quartz + magnetite ± chalcopryrite, type (IV): K-feldspar ± quartz ± chalcopryrite, type (V): chlorite + biotite.

2) Seven groups of fluid inclusions were observed: (IA) liquid-rich mono-phase, (IB) vapor-rich mono-phase, (IIA) liquid-rich two-phase (liquid + vapor), (IIB) vapor-rich two-phase (vapor + liquid), (IIIA) high salinity simple fluids (liquid + vapor + halite), (IIIB) high salinity opaque mineral-bearing fluids (liquid + vapor + halite + pyrite + chalcopryrite + hematite), (IIIB) multi-phase fluids (liquid + vapor + halite + sylvite + hematite + magnetite + pyrite + chalcopryrite ± erythrosiderite)

3) Multiphase fluid inclusions with predominant homogenization temperatures 420 to 620°C and predominant salinities 70 to 75 wt.% NaCl, are

*Corresponding authors Email: Fateme_asadi@ymail.com

thought to be the early fluids involved in mineralization.

4) The coexistence of high saline liquid and vapor rich fluid inclusions (IIIAB, IIIB, IIIA and IIA types) resulted either from fluid entrapment during the boiling process or the co-presence of two immiscible fluids generated from the magma.

5) Dalliporphyry Cu-Au deposit was formed in a magmatic-meteoritic system.

Discussion

Two conventional thermometric procedures, freezing and heating, were employed for the measurement of temperature of homogenization and approximate salinity. Freezing was conducted mainly for halite-under saturated inclusions (types IIA and IIB), to measure the initial melting temperature (T_e) and the last melting point ($T_{m_{ice}}$), whereas heating was carried out on the halite-bearing inclusions (types IIIA, IIIB and IIIAB). Based on the microthermometric results, the Dalli fluid inclusions can be divided into two distinct groups: (1) medium-high temperature, hypersaline (Types IIIA, IIIB and IIIAB) and (2) low-medium temperature, low salinity group (Types IIA and IIB). Type IIB inclusions, which homogenize to the vapor phase and have a relatively low cooling rate, provide a fairly good estimate of entrapment pressure (Roedder and Bodnar, 1980). Based on the pressure estimated for the Dalli deposit, mineralization likely occurred at depth of 0.6-1.1 km. The calculated depth is coincident with the estimated mineralization depths of the porphyry deposits in the world (Pirajno, 2009). Fluid inclusions with a wide range of vapor and liquid ratios are abundant in all of the Dalli samples. This represents heterogeneous trapping of liquid and vapor. The coexistence of inclusions with different volumes of vapor contents, which homogenize either to liquid (Th(L-V)) or vapor (Th(V-L)), are interpreted as an evidence for the prevailing wide

range of physico-chemical conditions during the cooling history of ore-forming fluid at the Dalliporphyry Cu-Au deposit. The boiling process is documented by the abundance of heterogeneously trapped fluid inclusions with extremely variable liquid to vapor ratios (Ahmad and Rose, 1980).

Acknowledgements

We thank of ShahidChamran University of Ahvaz for their support and moreover, Lorestan University for microthermometric studies.

References

- Ahmad, S.N. and Rose, A.W., 1980. Fluid inclusions in porphyry and skarn ore at Santa Rita, New Mexico. *Economic Geology*, 75(3): 229–250.
- Pirajno, F., 2009. Hydrothermal processes and mineral systems. Geological Survey of Western Australia. Springer, 1250 pp.
- Roedder, E. and Bodnar R.J., 1980. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies, *Annu. Review Earth Planet*, 8(6): 263–301.
- Shahabpour, J., 1999. The role of deep structures in the distribution of some major ore deposits in Iran, NE of the Zagros thrust zone. *Journal of Geodynamics*, 28(3): 237-250.
- Zarasvandi, A., Liaghat, S. and Zentilli, M., 2005. Porphyry Copper Deposits of the Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc, Iran, Super Porphyry Copper and Gold deposits. A global perspective PGC publishing Adelaide, 2(4): 441-452.
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Sadeghi, M., Lentz, D., Adelpour, M. and Pourkaseb, H., 2015. Rare earth element signatures of economic and sub-economic porphyry copper systems in Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), Iran. *Ore Geology Reviews*, 70(3): 407-423.