



تعیین شرایط فشار- دما و تحول سیال گرمابی - ماگمایی در کانسار مس - مولیبدن سنج، البرز مرکزی: شواهد میان‌بارهای سیال

ابراهیم طالع فاضل^{۱*}، بهزاد مهرابی^۲، حسن زمانیان^۳ و معصومه حیات الغیبی^۳

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(۲) گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

(۳) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۱۱، پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۰۸

چکیده

کانی‌سازی مس-مولیبدن سنج با ژئومتری استوکورک و انتشاری در محل همبری توده نفوذی سنج و سنگ میزبان توف تا آندزیت پورفیری تشکیل شده است. کانه‌زایی کوارتز-سولفیدی استوکورک همراه دگرسانی پتاسیک-فلیک شامل رگه‌های کوارتز-بیوتیت-کالکوپیریت (QBC)، کوارتز-مولیبدنیت (QM) و کوارتز-پیریت (QP) است. طبق شواهد، میان‌بارهای اشباع از نمک اولیه در رگه‌های QBC با دمای بالا ($>450^{\circ}\text{C}$) و شوری بیش از ۴۰ wt% NaCl eq. از یک سیال نخستین قبل از رخداد جوشش، تحت شرایط لیتواستاتیک (۸۰۰ تا ۱۱۰۰ بار) سرچشمه گرفته است. پس از آن، هم‌زمان با رخداد جوشش و کاهش تدریجی فشار (بین ۲۵۰ تا ۵۰۰ بار) ناشی از ورود به شرایط هیدرواستاتیک، رگه‌های کوارتز استوکورک QM و QP با دمای کمتر از 300°C و شوری تقریبی ۳۰ wt% NaCl eq. شکل گرفته‌اند. در مراحل پایانی کانی‌سازی، رخداد میان‌بارهای غنی از مایع با دما و شوری پایین نشان‌دهنده رقیق‌شدگی نسبی سیال در نتیجه اختلاط سیالات گرمابی-ماگمایی با آبهای جوی است.

واژه‌های کلیدی: کانی‌سازی مس-مولیبدن، میان‌بارهای سیال، تحول سیال کانه‌ساز، کانسار سنج، البرز مرکزی

مقدمه

منطقه سنج نخستین بار در سال ۱۳۶۶ توسط شرکت خدمات و توسعه معادن ایران با هدف دستیابی به مولیبدن مورد اکتشاف چکشی قرار گرفت. این منطقه در گزارش شرکت تحقیقات و کاربرد مواد معدنی ایران (IMPASCO, 2009)، به‌عنوان منطقه‌ای نویدبخش برای ردیابی عناصر چندفلزی مولیبدن، مس، طلا، نقره و عناصر نادر خاکی معرفی شده است. بر اساس این گزارشها، کانسار سنج دارای ذخیره کمتر از ۱ میلیون تن و عیار متوسط ۱ درصد مس و ۰/۱ درصد مولیبدن است. زمین‌شناسی، کانه‌زایی و پترولوژی این منطقه توسط سازمانها و پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است که از جمله آنها می‌توان به بررسیهای (Norollahi, 2004؛ Valizade, 1987؛ Pichab؛ Hayatolgheibi, 2009؛ Farahkhan, 2009؛ Kavosh, 2007؛ 2011)، اشاره کرد. فعالیتهای معدن‌کاری نیز به‌منظور استخراج مولیبدن نخستین بار در سال ۱۳۴۷ با استفاده از حفر ۶ تونل (شامل ۲ تونل ریل‌گذاری شده)، چندین ترانشه و گزنگ انجام

بررسی میان‌بارهای سیال در کانسارهای اپی‌ژنتیک-گرمابی، روشی کارآمد در دستیابی به ویژگیهای فیزیکوشیمیایی سیال و تعیین شرایط فشار-دما-ترکیب سیال کانه‌ساز است. سیال انحلال‌یافته از توده‌های سیلیکاته متبلور، نقش مهمی در جابه‌جایی عناصر کانه‌ساز و رخداد کانی‌سازی در سیستم‌های گرمابی دارد که این فرآیند به‌ویژه توسط سیالات گرمابی فوق اشباع از نمک^۲ با دمای بالا انجام می‌شود. منشأ سیال، نحوه مهاجرت، تبادلات سیال-سنگ، ویژگیهای فیزیکوشیمیایی سیال و نهشت فلزات در سامانه‌های گرمابی-ماگمایی مورد توجه پژوهشگران مختلفی بوده است (Heinrich et al., 1999؛ Redmond et al., 2004؛ Ulrich and Heinrich, 2001؛ Rusk et al., 2005؛ Harris et al., 2005؛ Liu and McPhail, 2005؛ Allan et al., 2011؛ al., 2008).

گسترده‌ترین واحدهای سنگی رخنمون یافته در منطقه سنج متعلق به سنگهای آذرآواری سازند کرج و سازندهای معادل آن به سن ائوسن است که از دیدگاه سنگ‌شناسی شامل توفریولیتی، توفیت، آگلومرا، شیل، کنگلومرا، گدازه‌های آندزیت- داسیت و مارن است. بر اساس پژوهش ددوال (Dedual, 1967)، سازند کرج با مقطع تیپ ۳۳۰۰ متر، متشکل از پنج عضو به ترتیب از پایین به بالا شامل، (۱) عضو شیل زیرین (۱۰۰۰ متر) متشکل از شیل‌های سیلیسی تیره با درون لایه‌های نازک توف خرده‌سنگی، (۲) عضو توف میانی (۱۱۲۰ متر) متشکل از توف‌های ضخیم لایه زیتونی با درون لایه‌های توف بلورین، (۳) عضو شیل آسارا (۱۷۰ متر) متشکل از شیل‌های آهکی رس‌دار تیره بیتومن‌دار با آثار گیاهی، (۴) عضو توف بالایی (۹۰۰ متر) متشکل از آندزیت توف پورفیری، توف پورفیری و توف‌سنگی ریزدانه و (۵) عضو شیل سنگ آهک کندوان (۸۵۰ متر) که هم‌ارز سازند قرمز پایینی و قم بوده و بالاترین عضو سازند کرج در منطقه است. در کانسار سنج عضو توف بالایی متشکل از واحدهای توف تا آندزیت پورفیری به‌عنوان میزبان کانی‌سازی در منطقه هستند (شکل ۱- A).

توده‌های نفوذی پراکنده در البرز مرکزی با سن ائوسن پسین- لیگوسن (۲۳ تا ۳۷ میلیون سال پیش) دارای گستره‌ای از سمنان تا قزوین هستند که با ابعاد بزرگ تا کوچک و شکل‌های مختلف سیل، باتولیت، استوک و پلاگ در میزبان سنگهای آذرآواری سازند کرج و سازندهای معادل آن جای‌گزین شده‌اند (Valizade et al., 2008). از مهمترین این توده‌ها می‌توان گابروی مبارک‌آباد، گرانودیوریت قصر فیروزه، سیل (لوپولیت) نفوذی کرج، مونزوگرانیت علم‌کوه، مونزونیت‌های شمال و جنوب طالقان و توده‌های گرانیتوئیدی طارم سفلی را نام برد. گسلها و چین‌خوردگیهای ناحیه‌ای در محدوده البرز دارای راستای غرب- شمال‌غرب و شرق- شمال‌شرق است که تا حدودی منطبق با رخنمون توده‌های نفوذی در این بخش است (شکل ۱- A). سیل یا به‌عبارتی لوپولیت نفوذی کرج به‌عنوان یکی از بزرگترین توده‌های نفوذی منطقه و عامل احتمالی محرک کانی‌سازی در منطقه سنج شناخته می‌شود که به موازات ناودیس آدران با راستای غرب- شمال‌غرب در میان واحدهای سنگی آذرآواری سازند کرج جای‌گزین شده است (شکل ۱- B).

بر اساس پژوهش ولی‌زاده (Valizade, 1987)، ترکیب سنگ‌شناسی سیل نفوذی کرج از حاشیه به سمت مرکز دارای چهار بخش شامل: (۱) حاشیه انجماد سریع (گابرو پورفیری)، (۲)

شده است که به‌عنوان قدیمی‌ترین معدن منطقه به شمار می‌رود (Momenzade and Rachidnejad-Omran, 1985). بررسیهای میان‌بارهای سیال در کانسار مس- مولیبدن (\pm نقره- طلا) سنج واقع در کمان ماگمایی البرز، گویای حضور هم‌زمان میان‌بارهای آبگین حاوی فاز جامد هالیت و میان‌بارهای دو فازی مایع+بخار با درجه پرشدگی متفاوت در رگه‌های کوارتز- سولفیدی استوکورک بخشهای عمیق ذخیره است. این سیالات نقش مهمی در جابه‌جایی، تحرک و تمرکز فلزات و لیگاندهای همراه در مراحل مختلف شکل‌گیری ذخیره داشته‌اند. میان‌بارهای فوق اشباع از نمک با چگالی بالا به همراه میان‌بارهای کم‌چگال غنی از گاز جزو رایجترین پدیده‌های مشاهده شده در کانسار سنج است که منشأ مستقیم سیال سازنده آنها از ماگمای سیلیکاته یا رخ داد آن در نتیجه عدم امتزاج سیال^۱ به درستی مشخص نیست. علاوه بر این، نقش فرآیندهایی از قبیل رخداد جوشش^۲، انتقال فلز توسط سیال غنی از گاز، کاهش تدریجی یا ناگهانی فشار، عملکرد آبهای جوی و نقش پدیده اختلاط در شکل‌گیری کانی‌سازی و دگرسانی همراه مورد ابهام است.

در این پژوهش سعی شده است بر اساس شواهد دگرسانی، کانه‌زایی و روابط متقاطع رگه‌ها در کنار شواهد پتروگرافی، میکروترمومتری و توزیع میان‌بارهای سیال در بخشهای مختلف کانسنگ به بازسازی شرایط شکل‌گیری ذخیره، تعیین ویژگیهای فیزیکوشیمیایی سیال و تخمین شرایط دما- فشار کانی‌سازی پی‌برد. لازم به ذکر است که این مفاهیم در زمینه‌ای از تحولات PTX رخ‌داده در یک سیستم ماگمایی- گرمایی انجام شده است که این نتایج نقش مهمی در دستیابی به تاریخچه شکل‌گیری ذخیره، تکامل فیزیکوشیمیایی سیال در رخداد کانی‌سازی کوارتز- سولفیدی استوکورک، دگرسانی سنگ دیواره و نهشت فلزات در منطقه مورد بررسی دارد.

زمین‌شناسی

کانسار چندفلزی سنج به وسعت تقریبی ۳۰ کیلومتر مربع در ارتفاعات شمال کرج (شمال‌غرب تهران) و کوههای برغان با مختصات جغرافیایی $51^{\circ}00'$ تا $51^{\circ}07'$ طول شرقی و $36^{\circ}01'$ تا $36^{\circ}04'$ عرض شمالی واقع است. منطقه مورد بررسی در برکه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تهران و کرج قرار می‌گیرد که بررسیهای زمین‌شناسی منطقه به‌ترتیب توسط امینی (Amini, 1993) و مهدی‌زاده (Mahdizadeh, 1995) انجام شده است.

XRF، نمونه‌ها به روش قرص ذوب مورد آماده‌سازی قرار گرفتند و مقادیر LOI نیز با استفاده از کوره حرارتی Nobertherm در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران به دست آمد. علاوه بر این، تعداد ۶۵۰ نمونه توسط شرکت پیچاب کاوش (Pichab Kavosh, 2007) از بخش‌های مختلف کانسار و مغزه‌های حفاری با استفاده از روش دستگاهی ICP-MS در آزمایشگاه SGS مورد تجزیه قرار گرفت که از این داده‌ها نیز برای رسم نیمرخ زمین‌شناسی استفاده شده است. حد حساسیت دستگاه ICP-MS بین ۰/۱ تا ۰/۱ گرم در تن (ppm) بوده و برای اطمینان از ذوب کامل عناصر قلیایی از روش آماده‌سازی ذوب قلیایی شامل مخلوط کمک ذوب‌های متابورات لیتیوم (LiM-LiBO_2) و تتراپورات لیتیوم ($\text{LiT-Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) استفاده شده است. همچنین برای کنترل نتایج داده‌ها، تعدادی از نمونه‌ها به صورت تصادفی به روش طیف‌سنج جذب اتمی (با حد حساسیت ۰/۱ گرم در تن) در آزمایشگاه SGS مورد تجزیه قرار گرفتند. جزئیات انجام این روشها در سایت www.sgs.com آمده است. همچنین تعداد ۱۰ نمونه پودر تهیه شده از سنگ کل از دگرسانی‌های مختلف منطقه توسط تجزیه دستگاهی پراش پرتو ایکس در بخش کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران (IMPRC) مورد تجزیه قرار گرفتند.

مطالعات میان‌بارهای سیال

بررسی‌های پتروگرافی و میکروترمومتری میان‌بارهای سیال توسط نمونه‌برداری از تعداد ۴ گمانه حفاری با شماره‌های BH-1، BH-2، BH-3 و BH-4 از عمق‌های مختلف انجام شده است. موقعیت برداشت و عمق این نمونه‌ها در شکل ۱ و جدول ۱ آورده شده است. تعداد ۵۰ نمونه سنگی به این منظور انتخاب شدند که از این میان تعداد ۹ مقطع دوبر صیقل با ضخامت تقریبی ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرون (متوسط ۱۵۰ میکرون) از رگه- رگه‌های کوارتز با در نظر گرفتن نسل‌های مختلف و موقعیت آنها در توالی پاراژنتیک کانسار، در دانشگاه خوارزمی تهران تهیه شد. بیش از ۳۰۰ میان‌بار مورد آزمایش میکروترمومتری قرار گرفت که اندازه آنها اغلب بین ۱ تا ۵۰ میکرون بوده و در این میان میان‌بارهای با ابعاد ۵ تا ۲۰ میکرون مورد بررسی میکروترمومتری قرار گرفتند. بررسی‌های میان‌بارهای سیال با استفاده از میکروسکپ پلاریزان زایس مدل Axioplan2 و سیستم سردایش- گرمایش

بخش گابرویی (هیالومیکرولیتیک پورفیری)، ۳) بخش دیوریتی (گرانولار) و ۴) بخش مونزونیتی (گرانولار تا افیتیک) است (شکل ۱- A). سن این توده در حد الیگوسن و مرتبط با فاز کوه‌زایی پیرنه بوده (Valizade et al., 2008) که از لحاظ کانی‌شناسی شامل کانی‌های پلاژیوکلاز (لابرادور)، ارتوزکلاز، اوژیت و تا حدودی آمفیبول است. از لحاظ ساختاری گسل‌هایی با راستای عمومی شرقی- غربی و شمالی- جنوبی روندهای اصلی در منطقه سنج هستند که گسل‌های شرقی- غربی در امتداد محل تماس شمالی سیل نفوذی و در فاصله چند متری بلافصل توده دیده می‌شود. گسل‌های شمالی- جنوبی نیز از میان توده نفوذی شروع شده و تا نزدیکی منطقه سنج- دوران واقع در شمال ناحیه امتداد دارند (شکل ۱- A).

روش مطالعه

بررسی‌های صحرایی و تهیه نقشه

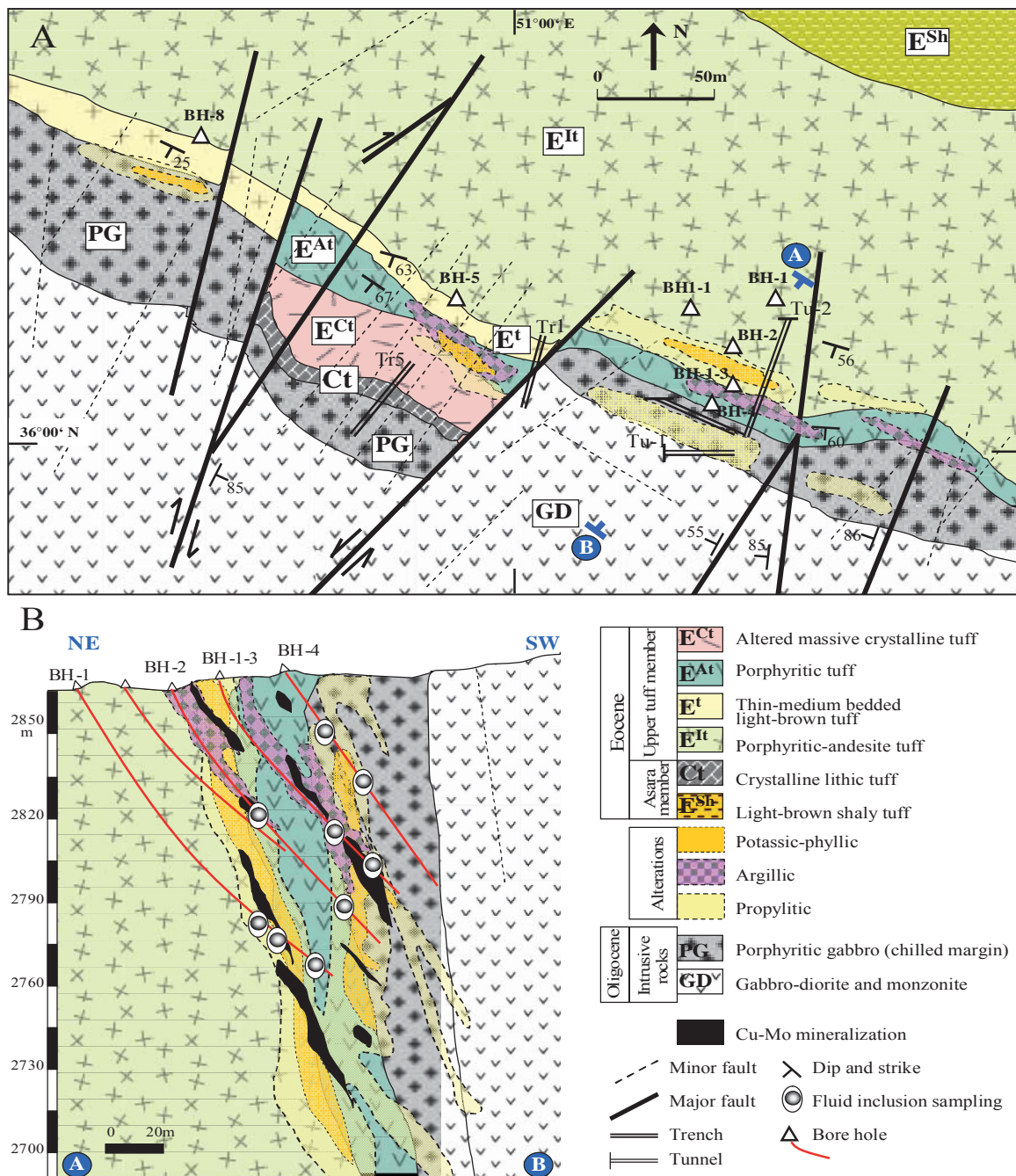
برنامه‌ریزی اکتشافی و عملیات پی‌جویی در منطقه سنج در سال ۱۳۸۸ با کارفرمایی شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران و مشاوره شرکت مهندسین مشاور پیچاب کاوش انجام شده است. در این منطقه بیش از ۱۰۰۰ متر حفاری مغزه‌گیری در مقیاس ۱/۱۰۰۰، توسط شرکت‌های یادشده، انجام شد که پس از نمونه‌برداری متریک به منظور انجام تجزیه‌های شیمیایی مرتبط، نمونه‌ها به آزمایشگاه ارسال شده است. نمونه‌برداریها با در نظر گرفتن عمق برداشت، شماره و محل گمانه برای بررسی‌های دگرسانی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی و مطالعات میان‌بارهای سیال انجام شده است. بیشترین تمرکز محل حفر گمانه‌ها بین سیل مونزونیتی کرج و سنگ‌های آذرآواری منطقه انجام شده که اغلب منطبق با تمرکز کانی‌سازی در منطقه است (شکل ۱- B). عمق گمانه‌ها اغلب بین ۸۰ تا ۱۰۰ متر در تغییر بوده و حفر گمانه‌ها بین عمق‌های ۲۸۶۰ تا ۲۷۶۰ متر از سطح دریا انجام شده است (شکل ۱- B).

تجزیه شیمیایی نمونه‌ها

جهت بررسی ژئوشیمیایی و تعیین ماهیت سیل نفوذی در منطقه، پس از تهیه تعداد ۵۰ مقطع نازک و انتخاب تعداد ۲۰ نمونه سنگی غیرهوازده، تجزیه شیمیایی تعداد ۱۴ نمونه با روش‌های دستگاهی طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی^۱ و فلورسانس پرتو ایکس^۲ در آزمایشگاه SGS Mineral Services تورتو، انجام شد. برای افزایش دقت و درستی آزمایش

اندازه‌گیری طی فرآیند سرمایش در حدود $\pm 0.1^\circ\text{C}$ و طی عملیات گرمایش $\pm 2^\circ\text{C}$ است. میزان عملیات سرد کردن و گرم کردن نیز به‌طور تقریبی بین ۲ تا 8°C در دقیقه متغیر بوده است.

لینکام مدل THM600 با کنترل‌کننده حرارتی TMS94 و سردکننده LNP، در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شد. گستره تغییرات دمایی در این دستگاه بین -190°C تا $+600^\circ\text{C}$ بوده که ترموکوپل دستگاه توسط میان‌بارهای سنتزی در دماهای $-56/6^\circ\text{C}$ ، صفر و $+374/1^\circ\text{C}$ کالیبره شده است. دقت



شکل ۱. A: نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده کانسار مس-مولیبدن سنج با مقیاس ۱/۱۰۰۰. با تغییرات از پیچاب کاوه (Pichab Kavosh, 2007) و B: نیم‌رخ زمین‌شناسی در راستای شمال شرق-جنوب غرب (A-B) که محل نمونه‌برداری میان‌بارهای سیال در آن نشان داده شده است.

Fig. 1. A: Simplified geological map of Cu-Mo Senj deposit with scale of 1/1000 (modified from Pichab Kavosh, 2007), and B: NE-SW geological cross-section map (A-B) with location of fluid inclusion sampling.

روشهای مورد استفاده در مطالعات میان بارهای سیال

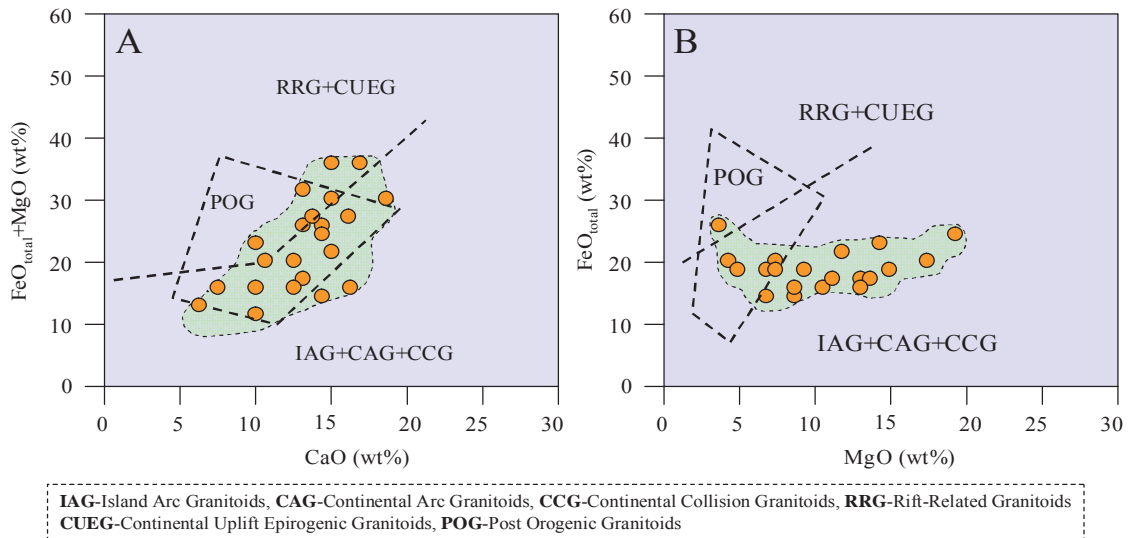
در میان بارهای آبگین (Aqueous) دو فازی و سه فازی همراه با فاز جامد، دمای یوتکتیک (T_e)، دمای همگن شدن نهایی (T_{total}) و فاز بخار (Th_{l-v})، دمای انحلال هالیت (T_{mNaCl})، دمای انحلال سیلویت (T_{mKCl}) و دمای ذوب نهایی یخ (T_{mice}) مورد اندازه گیری قرار گرفت. تعبیر و تفسیر داده های میکروترموتری شامل ترکیب میان بار، چگالی کل و فشار با استفاده از نرم افزارهای FLINCOR نسخه (Brown, 1989) و FLUIDS (Bakker, 2003) مورد اندازه گیری قرار گرفت. محاسبه شوری در سیالات آبگین دو فازی مایع+بخار بدون فاز جامد در سیستم $H_2O-NaCl$ با دمای یوتکتیک بیشتر از $21/2^\circ C$ - با استفاده از دمای نهایی ذوب یخ (T_{mice}) و بهره گیری از معادله هال و همکاران (Hall et al., 1988) و مقایسه با روش استرنر و همکاران (Stern et al., 1988) انجام شد. محاسبه شوری در سیالات حاوی فاز جامد هالیت+سیلویت نیز با استفاده از دمای ذوب هالیت (T_{mNaCl}) و بهره گیری از نرم افزار SALTY (Bodnar et al., 1989) و مقایسه با روش بیکر و همکاران (Bakker et al., 2012) انجام شد. لازم به ذکر است به دلیل سهم ناچیز فاز مایع در میان بارهای غنی از فاز بخار (با درجه پرتیگی کمتر از ۳۰ درصد حجمی)، اندازه گیری میکروترموتری در این گروه به سختی انجام شد.

ژئوشیمی سیل نفوذی سنج

بر اساس پژوهش ولی زاده و همکاران (Valizade et al., 2008)، ماهیت اغلب توده های نفوذی پراکنده در البرز مرکزی از نوع مگنتیتی متعلق به دسته I بوده که از لحاظ ژئوشیمیایی جزو دسته های ماگمایی کلسیمی- قلیایی تا قلیایی هستند. همچنین این توده ها از لحاظ پتروژنز در جایگاه گرانیتوئیدهای کمان قاره ای (CAG) مرتبط با پهنه های فرورانش قرار می گیرند که شامل طیفی از ماگمای مرتبط با جزایر قوسی (IAG) تا محیط های برخورد قاره ای (CCG) هستند (شکل ۲-A و B)، رخداد نفوذیه های متنوع در این منطقه را می توان حاصل تفریق یک ماگمای بازالتی کلسیمی- قلیایی منشأ گرفته از گوشته بالایی غنی از سیال به شمار آورد که رخداد کانی تیتان- اورژیت در اغلب این توده ها نشانهای از یک ماگمای بازالتی قلیایی است (Richards, 2011). ذخایر فلزی و غیرفلزی متعددی با ماهیت رگه ای، افشان، جانیشینی، توده ای و عدسی شکل از انواع اسکارن،

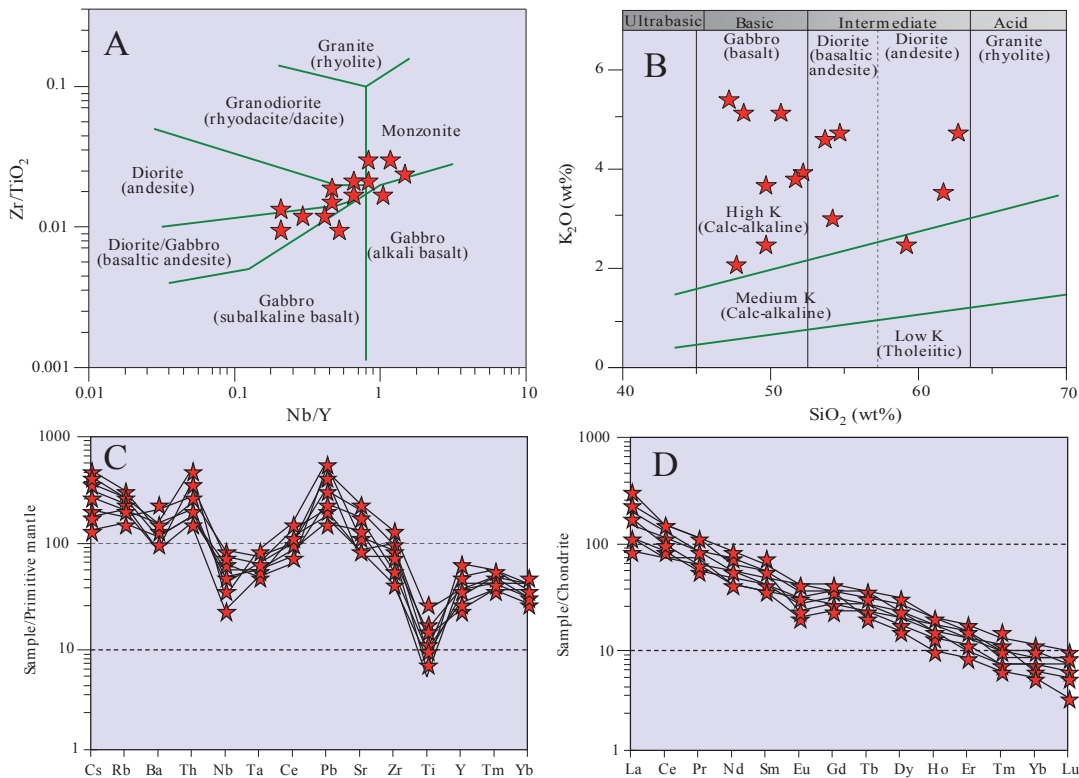
یورفیری، اپی ترمال، مرتبط با توده های نفوذی و ذخایر اکسید آهن حاوی مس و طلا (IOCG) دارای قابلیت تشکیل و ارتباط زمانی- مکانی با این محیط های تکتونو- ماگمایی هستند (Richards, 2011; Williams et al., 2010).

با استفاده از عناصر کمیاب Nb, Y, Zr, Ti و به کارگیری آنها در نمودار دوتایی Nb/Y در مقابل Zr/Ti₂ (Winchester and Floyd, 1977)، سیل نفوذی منطقه سنج در طیفی از سنگ های مونزونیت، گرانودیویت، دیوریت و گابرو قرار می گیرد (شکل ۳-A). همچنین اغلب نمونه ها در نمودار دوتایی K₂O در مقابل SiO₂ (Le Maitre et al., 1989)، با محتوای پتاسیم بالا و ماهیت پتاسیمی- قلیایی مشخص می شوند (شکل ۳-B). نمونه های برداشت شده از سیل نفوذی نسبت به داده های به دست آمده از ترکیب گوشته اولیه و کندریت (Sun and McDonough, 1989) نرمال سازی شده و روند آنها در شکل ۳-C و D نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، غنی شدگی عناصر ناسازگار لیتوفیل با شعاع یونی بزرگ^۱ از قبیل Ba, Th, Pb و Rb در مقابل تهی شدگی عناصر ناسازگار با شدت میدان بالا^۲ شامل Ti, Nb, Ta (شکل ۳-C) بیانگر آرایش ماگمای بازالتی اولیه توسط سنگ های پوسته قاره ای زیرین است که اغلب در محیط های مرتبط با فرورانش پوسته اقیانوسی به زیر پوسته قاره ای همراه با حجم بالای سیال غنی از OH-Cl تشکیل می شود (Pearce and Cann, 1973). غنی شدگی عناصر با شعاع یونی بزرگ به دلیل رخداد متاسوماتیزم و سیالات آزاد شده از پوسته اقیانوسی فرورو و تهی شدگی عناصر با شدت میدان بالا به دلیل میزان بالای ذوب پوسته است (Pearce and Cann, 1973). الگوی نرمال شده عناصر نادر خاکی نسبت به کندریت، گویای یک شیب نسبتاً تند در روند تفریق عناصر نادر خاکی سبک و سنگین است که در محل عنصر Eu نیز تا حدودی یک ناهنجاری منفی ضعیف نشان می دهد (شکل ۳-D). این نمودار نشان دهنده غنی شدگی نسبی عناصر نادر خاکی سبک (La-Eu) نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین (Gd-Lu) است (شکل ۳-D). از آنجایی که عناصر نادر خاکی سنگین طی فرآیند تفریق ماگما تمایل به باقی ماندن در مذاب باقی مانده در ماگما دارد؛ در نمودار به هنجار شده با کندریت تهی شدگی نشان می دهد. علاوه بر این، وجود حجم بالای سیال غنی از OH و رخداد دگرسانیه های ناشی از آن، موجب افزایش نسبت LREE/HREE در نمودارهای عنکبوتی خواهد شد.



شکل ۲. نمودارهای دوتایی تعیین پتروژنز توده‌های نفوذی البرز مرکزی شامل، A: نمودار CaO در مقابل $FeO_t + MgO$ و B: نمودار MgO در مقابل FeO_t . داده‌ها از ولی‌زاده و همکاران (Valizade et al., 2008)

Fig. 2. Petrogenesis of central Alborz intrusive bodies with binary diagram, A: CaO versus $FeO_t + MgO$, and B: MgO versus FeO_t (data from Valizade et al., 2008)



شکل ۳. نمودارهای پتروژنی و پتروژنی توده‌نفوذی منطقه شامل، A: نام‌گذاری سنگهای منطقه در نمودار دوتایی Nb/Y در مقابل Zr/TiO_2 (Winchester and Floyd, 1977)، B: ماهیت پتاسیمی-قلیایی و غنی از پتاسیم سیل نفوذی سنج در نمودار دوتایی SiO_2 در مقابل K_2O (Le Maitre et al., 1989)، C: الگوی به‌هنجارشده عناصر کمیاب و نادر خاکی نسبت به گوشته اولیه و D: الگوی به‌هنجارشده همان عناصر نسبت به کندریت (et al., 1989)

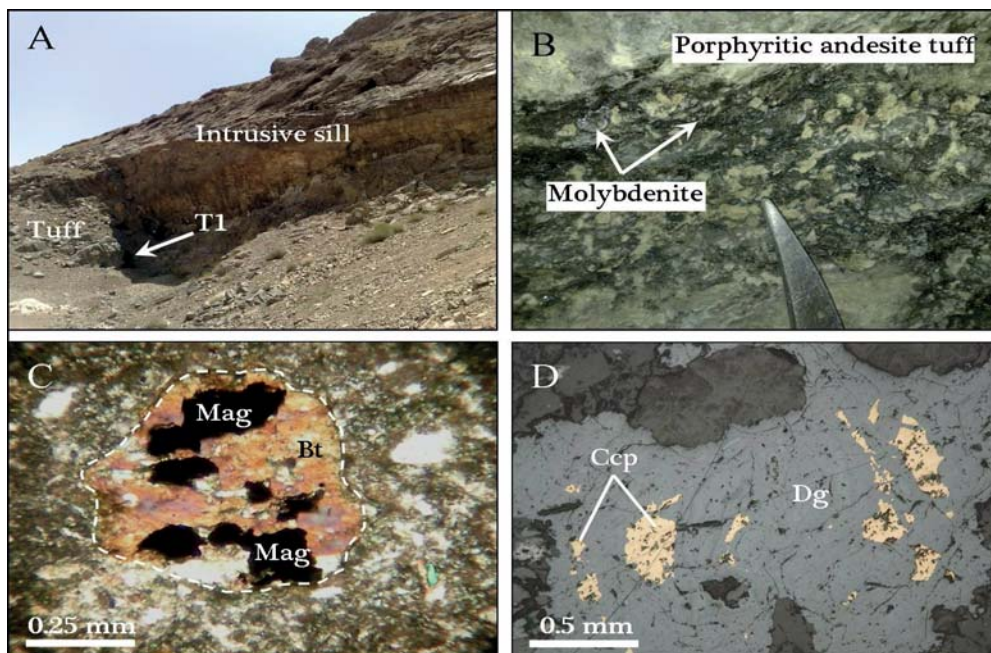
Fig. 3. Petrological and petrogenesis diagram of igneous rocks, A: nomenclature of the rocks at binary diagram of Nb/Y versus Zr/TiO_2 (Winchester and Floyd, 1977), B: calc-alkaline high K nature of the Senj intrusive sill on SiO_2 versus K_2O diagram (Le Maitre et al., 1989), C: normalize geochemistry diagram of trace and rare earth elements relative to primary mantle, and D: normalize geochemistry diagram of those elements relative to chondrite

کانی‌سازی

کانی‌سازی مس-مولیبدن در کانسار سنج با ژئومتری عدسی‌شکل تا رگه‌ای و انتشاری (افشان) در محل همبری سیل مونزونیتی سنج موازی با سنگهای آذرآواری و در میزبان واحدهای سنگی توف تا آندزیت-توف پورفیری و حداکثر عمق ۱۲۰ متری رخ داده است (Hayatolghеibi, 2011) (شکل ۴-A). ساخت و بافت کانی‌سازی به‌صورت رگه-رگه‌چهای (استوک‌ورک)، انتشاری و جانشینی همراه با عناصر اصلی مس-مولیبدن و مجموعه عناصر فرعی نقره، طلا، سرب، کبالت و نیکل مشخص می‌شود (شکل ۴-B). کانیهای سولفیدی (کالکوپیریت، بورنیت، مولیبدنیت، پیریت، کالکوسیت، کوولین و دیژنیت)، اکسیدی (مگنتیت و هماتیت) همراه با کانیهای ثانویه کربناته (مالاکیت و آزوریت) و هیدروکسیدی (گوتیت و لپیدوکروسیت) مهمترین کانیهای مشاهده شده در منطقه هستند (شکل ۴-C و ۴-D). گسلهایی با درازای تقریبی ۲۰۰ تا ۵۰۰ متر، راستای N20-40E و شیب ۵۰ تا ۸۰ درجه به‌سمت جنوب‌شرق و شمال‌غرب، مهمترین عناصر ساختاری منطقه هستند که عمدتاً پس از

تشکیل سیل مونزونیتی، بخشهای زیادی از واحدهای سنگی را به‌صورت ساختار مشابه هورست و گرابن جابه‌جا کرده است (شکل ۱). هم‌زمان با جای‌گیری سیل نفوذی در سنگهای میزبان، گسلها و درزه‌های فرعی با راستای شرقی-غربی و شمال‌غرب-جنوب‌شرق ناشی از نیروهای جانبی حاصل از جای‌گیری تشکیل شده‌اند که به‌عنوان کنترل‌کننده‌های کانی‌سازی محسوب می‌شوند.

کانی‌سازی در منطقه سنج به سه صورت (۱) کانی‌سازی کوارتز-سولفیدی استوک‌ورک (متشکل از سه رگه اصلی) به‌عنوان غنی‌ترین بخش کانسنگ با متوسط عیارهای ۲/۵ درصد مس و ۰/۲ درصد مولیبدن همراه با دگرسانی پتاسیک-فیلیک، (۲) کانی‌سازی انتشاری کالکوپیریت و مولیبدنیت با متوسط عیارهای مس ۱/۲ درصد و مولیبدن ۰/۰۸ درصد همراه با دگرسانی آرژیلیک-فیلیک (۳) کانی‌سازی جانشینی برون‌زاد با حداکثر عمق ۵۰ متر و متوسط عیار مس ۱ درصد، رخ داده است.



شکل ۴. A: نمایی از همبری سیل نفوذی سنج و سنگهای آذرآواری پورفیری که در محل همبری آنها تونل ۱ (T1) حفر شده است، B: ساخت و بافت انتشاری مولیبدنیت در میزبان آندزیت-توف پورفیری در فراز تونل ۱، C: ذرات پراکنده مگنتیت در میزبان بیوتیت و D: جانشینی کالکوپیریت توسط دیژنیت. علائم اختصاری کانیها از ویتنی و اونز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است: Mag= مگنتیت، Bt= بیوتیت، Ccp= کالکوپیریت، Dg= دیژنیت

Fig. 4. A: The contact of Senj intrusive sill and volcanoclastic porphyritic tuff accompanied with tunnel 1 (T1), B: disseminated molybdenite mineralization with host of porphyritic andesitic-tuff at tunnel 1, C: magnetite grain in the biotite minerals, and D: replacement of chalcopyrite by digenite. Abbreviation of minerals from (Whitney and Evans, 2010): (Mag= magnetite, Bt= biotite, Ccp= chalcopyrite, Dg= Digenite)

توالی پاراژنتیک

دگرسانی گرمایی و کانی‌سازی در منطقه سنج، با در نظر گرفتن سنگ میزبان کانی‌سازی، شامل پنج مرحله به شرح زیر است:

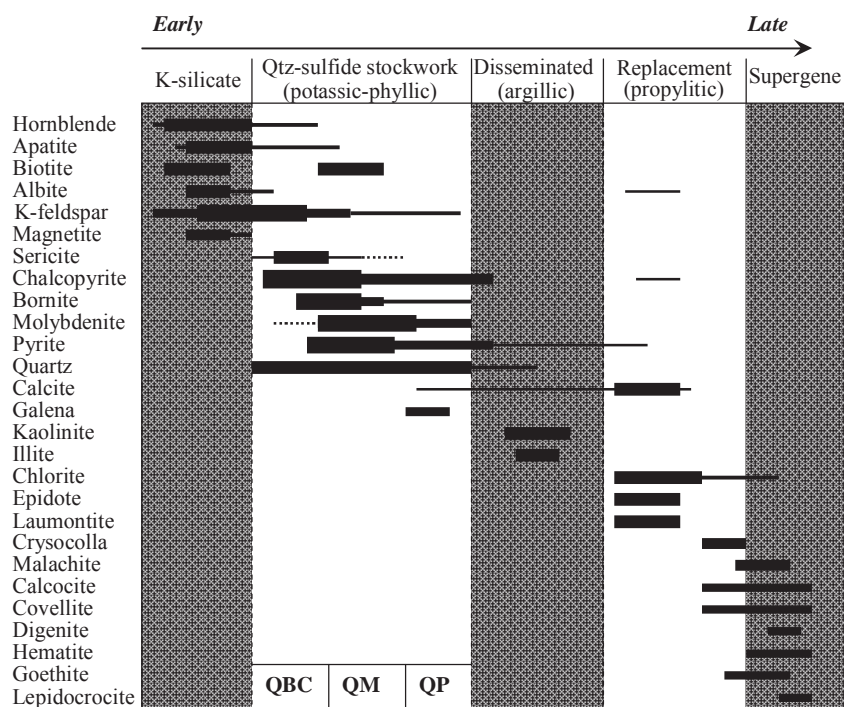
۱) دگرسانی مگنتیت-بیوتیت (سیلیکات پتاسیم): هم‌زمان با نفوذ سیل مونزودیوریتی-دیوریتی در دمای بالا، دگرسانی مگنتیت-بیوتیت در میزبان سیل مونزونیتی و در همبری آن (سنگ میزبان توف پورفیری) تا فاصله ۵۰ متری رخ داده است. اثر رخداد این دگرسانی و واکنش‌های انجام شده، مگنتیت به صورت پراکنده در میزبان بیوتیت جانشین شده است (شکل ۴-C).

۲) کانی‌سازی کوارتز-سولفیدی استوک‌ورک همراه با دگرسانی پتاسیک-فیلیک: با حضور رگه و رگه‌چه‌های کوارتز-سولفیدی (مولیبدنیت، کالکوپیریت و پیریت) اغلب در میزبان واحد سنگی توف پورفیری و به میزان کمتر در واحد آندزیت-توف پورفیری تشکیل شده است.

۳) کانی‌سازی انتشاری مس-مولیبدن: به صورت کانی‌سازی کالکوپیریت و مولیبدنیت در میزبان آندزیت توف پورفیری همراه با دگرسانی آرژلیک (مجموعه کائولینیت-ایلیت±کوارتز±کلسیت) قابل تشخیص است.

۴) کانی‌سازی جانشینی اولیه: با حضور مقادیر ناچیز کالکوپیریت در حاشیه درشت‌بلورهای فلدسپارپتاسیم و آلبیت در سنگ میزبان توف پورفیری و همراه با دگرسانی پروپلیتیک (مجموعه اپیدوت-کلریت-لامونتیت-کلسیت±پیریت) تشکیل شده است.

۵) کانی‌سازی جانشینی ثانویه: به‌عنوان آخرین مرحله کانی‌سازی در منطقه و حضور کانیهای جانشینی مس (نظیر کوولیت، کالکوسیت و دیژنیت)، طی رخداد غنی‌سازی برون‌زاد تا حداکثر عمق ۵۰ متر تشکیل شده است (شکل ۴-D). مراحل زمانی رخداد کانی‌سازیها در منطقه سنج در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. مراحل زمانی رخداد کانی‌سازی در کانسار سنج بر مبنای شواهد میکروسکوپی، بافت و ساخت کانیها

Fig. 5. Time stages of mineralization occurrence at Senj deposit based on microscopic and textural evidences of minerals

ژئومتری رگه‌ها و دگرسانی گرمایی همراه

پتروگرافی و گسترش زمانی-مکانی رگه‌ها در منطقه به همراه زون‌های دگرسانی همراه به‌طور خلاصه در شکل ۶ و جدول ۱ آورده شده است. بر اساس روابط متقاطع میان رگه‌ها در بخش

کانه‌زایی استوک‌ورک، دست‌کم ۳ نوع رگه در منطقه تشخیص داده شده که از قدیم به جدید شامل رگه کوارتز-بیوتیت-کالکوپیریت (QBC)، رگه کوارتز-مولیبدنیت (QM) و رگه کوارتز-پیریت (QP) است. برای جلوگیری از طولانی شدن مقاله،

بلورهای سربیسیت با رنگ زرد نخودی و اندازه تقریبی ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر که اغلب از جانشینی فلدسپارپتاسیم تشکیل شده است، در زمینه سنگ دیده می‌شود (شکل ۶-B).

رگه QP: نسل سوم رگه و رگه‌های کوارتز استوک‌ورک در منطقه سنج با حضور رگه‌های QP مشخص می‌شود که دیگر رگه‌های QBC و QM را قطع کرده است. رگه‌های QP با ضخامت تقریبی ۰/۵ میلی‌متر تا ۲ سانتی‌متر قابل تشخیص است (شکل ۶-E). کانیه‌های فرعی سربیسیت، کالکوپیریت، بورنیت، گوتیت، کوولین و هماتیت با فراوانی کمتر از ۱۰ درصد در رگه‌های کوارتز- پیریت نسل سوم تشکیل شده است. ادخالهای بسیار ریز گالن و هماتیت با ابعاد کمتر از ۰/۲ میلی‌متر در ساختمان پیریت‌ها تشخیص داده شد. رگه کوارتز- پیریت اغلب در سنگ میزبان آندزیت- توف پورفیری همراه با مجموعه دگرسانی پتاسیک- فیلیک رخ داده است. ویژگی‌های عمومی رگه‌ها شامل: کانی‌شناسی، دگرسانی‌های همراه، روابط متقاطع و عمق نسبی آنها در جدول ۱ آورده شده است.

میان‌بارهای سیال

پتروگرافی و توزیع میان‌بارها

بررسی میان‌بارهای سیال در کانسارهای گرمایی که طی چند مرحله رخداد کانی‌سازی شکل گرفته‌اند، اغلب با پیچیدگی‌هایی همراه است. این تحولات ناشی از رخداد چند مرحله شکستگی، تزریق‌های دورهای سیال به درون شکستگی‌ها، تشکیل رگه‌ها و روابط متقاطع آنها، تغییرات ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سیال، تجمع میان‌بارهایی با ترکیب و شکل مختلف و منشأ و تحولات سیال گرمایی طی زمان و مکان است. با توجه به این مطلب یکی از راه‌های مناسب برای تفکیک این وقایع و دست‌یابی به روند تحول سیال و رخدادهای مختلف کانه‌زایی، تقسیم‌بندی، توصیف دقیق، پتروگرافی میان‌بارها و بررسی نحوه توزیع آنها در بخش‌های مختلف کانسنگ و به‌ویژه در رگه و رگه‌های مختلف است. بررسی میان‌بارهای سیال تنها بر روی بلورهای کوارتز مناسب انجام شد.

طبق معیارهای تعیین شده توسط رودر (Roedder, 1984)، انواع میان‌بارهای سیال دیده شده در نمونه‌های مورد بررسی، از دیدگاه ترکیب، شکل، اندازه، درجه پرشدگی (نسبت مایع به گاز) و نحوه قرارگرفتن میان‌بار نسبت به مرز بلور مورد بررسی و رده‌بندی قرار گرفتند.

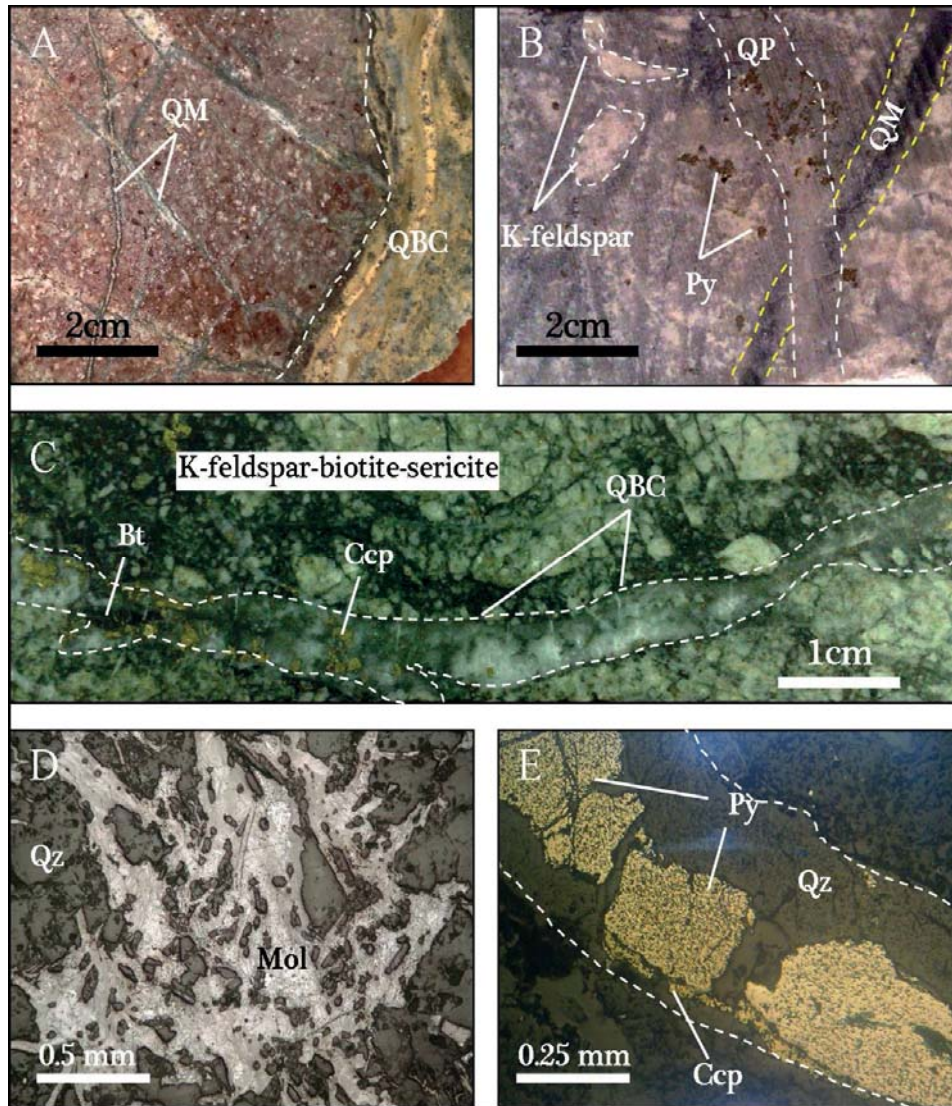
از حروف اختصاری این رگه‌ها در متن استفاده شده است. رگه‌های بالا، در دو مجموعه دگرسانی شامل مجموعه فلدسپارپتاسیم- بیوتیت± مگنتیت (دگرسانی پتاسیک) و مجموعه کوارتز- سربیسیت- پیریت (دگرسانی فیلیک) تشکیل شده‌اند که مجموعه کانیه‌های این دو دگرسانی همراه هم دیده می‌شود. در حدود ۸۰ درصد کانی‌سازی مس متعلق به کانی‌سازی رگه‌های مرحله QBC و بین ۵ تا ۱۵ درصد دیگر در رگه‌های QM و QP تشکیل شده است. همچنین بیش از ۷۰ درصد کانی‌سازی مولیبدنیت در رگه QM رخ داده است. در ادامه به شرح پتروگرافی رگه‌ها پرداخته می‌شود.

رگه QBC: این دسته از رگه‌ها با ضخامت کمتر از ۰/۵ تا حداکثر ۳ میلی‌متر، حاوی ۵ تا ۱۰ درصد کانیه‌های کالکوپیریت و بورنیت جزو فراوانترین رگه‌های حاوی مس در منطقه سنج است (شکل ۶-A). کانیه‌های سولفیدی درون‌زاد پیریت و گالن، به همراه کانیه‌های برون‌زاد کالکوسیت، دیژنیت و کوولین (به صورت جانشینی در حاشیه کانیه‌های درون‌زاد) از کانیه‌های فرعی رگه QBC هستند که کمتر از ۳ درصد حجم رگه را تشکیل می‌دهند. کوارتز و بیوتیت از کانیه‌های دگرسانی اصلی تشکیل‌دهنده رگه هستند که بیش از ۶۰ درصد حجم رگه را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۶-C). بافت انحلال جامد با حضور تیغه‌های برون‌رستی^۱ کالکوپیریت در میزبان بورنیت در این رگه قابل تشخیص است (نمونه برداشت‌شده از گمانه BH-04 در عمق ۷۶ متری). رگه QBC به شکل‌های نامنظم، پیوسته و متقاطع در سنگ میزبان توف پورفیری و همراه با دگرسانی پتاسیک- فیلیک (مجموعه فلدسپارپتاسیم- بیوتیت- سربیسیت- کوارتز) رخ داده است.

رگه QM: این دسته از رگه‌ها اغلب با ضخامت بین ۰/۲ تا ۲ میلی‌متر دارای کانیه‌های اصلی کوارتز و مولیبدنیت است که بیش از ۸۰ درصد حجم رگه را به خود اختصاص داده‌اند. رگه QM با رخداد در شکستگی‌ها به صورت نامنظم و پیوسته توسط رگه‌های کوارتز- پیریت (QP) نسل سوم قطع شده است (شکل ۶-B). همچنین این رگه دارای کانیه‌های فرعی پیریت، کلسیت، گوتیت و روتیل با فراوانی تقریبی ۲۰ درصد است. با استفاده از تجزیه طیف‌سنج جذب اتمی به‌طور متوسط ۰/۱۵ درصد وزنی رنیوم در ساختمان مولیبدنیت‌های منطقه تشخیص داده شد (شکل ۶-D). رگه QM در سنگ میزبان آندزیت- توف پورفیری همراه با دگرسانی کوارتز- سربیسیت- پیریت تشکیل شده است که در آن

هستند. در این میان، سه دسته نخست به‌عنوان میان‌بارهای اولیه و دو دسته دیگر، به ترتیب به‌عنوان میان‌بارهای ثانویه کاذب و ثانویه محسوب می‌شوند.

بر اساس توزیع فضایی میان‌بارها در بلورهای کوارتز مشاهده شده، تعداد پنج موقعیت میان‌باری تشخیص داده شد که شامل منفرد^۱، مجتمع^۲، مرزبلور^۳، نرسیده به مرزبلور^۴ و قطع‌کننده مرزبلور^۵



شکل ۶. تصویرهای نمونه دستی و میکروسکوپی از بخش کانی‌سازی کوارتز-سولفیدی استوک‌ورک منطقه شامل، A: قطع شدن رگه QBC توسط رگه‌های میلی‌متری QM در میزبان توف پورفیری، B: ساخت استوک‌ورک در میزبان آندزیت-توف پورفیری با حضور دگرسانی پتاسیک-فیلیک با حضور رگه QM که توسط رگه QP قطع شده است، به‌همراه دانه‌های پراکنده پیریت و فلدسپار پتاسیم در زمینه، C: رگه QBC متشکل از کوارتز، کالکوپیریت و ذرات پراکنده بیوتیت در میزبان مجموعه فلدسپار پتاسیم-بیوتیت-سرسیت، D: کانی‌سازی مولیبدنیت در میزبان کوارتز از رگه QM و E: تصویر میکروسکوپی نور بازتابی از رگه QP با حضور پیریت و کوارتز و مقادیر ناچیز کالکوپیریت. علائم اختصاری کانیها از ویتنی و اونز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است: (Ccp= کالکوپیریت، Mol= مولیبدنیت، Qz= کوارتز، Bt= بیوتیت، Py= پیریت)

Fig. 6. Handspacemen and microscopic photographs showing quartz-sulfide stockwork, A: QBC veins crosscutting by QM milimetric veinlets with porphyritic tuff host, B: stockwork texture with host of porphyric andesitic-tuff and potassic-phyllitic alteration and QM veins that crosscutting by QP veins accompanied with pyrite and K-feldspar grains, C: QBC vein consist of quartz, chalcopyrite and biotite dispersive grains with K-feldspar-biotite-sericite host, D: molybdenite mineralization in host of QM veins, and E: reflected microphotographs from QP vein with pyrite, quartz and minor chalcopyrite. Abbreviation of minerals from (Whitney and Evans, 2010): (Ccp= chalcopyrite, Mol= molybdenite, Qz= quartz, Bt= biotite, Py= pyrite)

1. Isolate
2. Cluster
3. Inter-grains
4. Intra-grains
5. Trans-grains

جدول ۱. ویژگیهای کانی‌شناسی، دگرسانیهای همراه و عمق برداشت نمونه از بخش کانی‌سازی کوارتز- سولفیدی استوکورک در مغزه‌های مختلف

Table 1. Mineralogy, alterations and sampling depth of quartz-sulfide stockwork mineralization in various drill cores

| Bore hole no. | Sample no. | Depth (m) | Vein type | Minor and major minerals | Alterations minerals | Alteration zone |
|---------------|------------|-----------|-----------------------------------|---|------------------------------------|--------------------|
| BH-1 | BH-1A | 77 | Quartz-biotite-chalcopyrite (QBC) | Quartz, biotite, chalcopyrite, bornite, pyrite, galena, chalcocite, digenite, covellite | K-feldspar-biotite-sericite-quartz | Potassic-phyllitic |
| BH-1 | BH-1B | 85 | | | | |
| BH1-3 | BH-3W | 55 | | | | |
| BH-2 | BH-2S | 45 | | | | |
| BH-1 | BH-1C | 90 | Quartz-molybdenite (QM) | Quartz, molybdenite, pyrite, calcite, goethite, rutile | Quartz-sericite-K-feldspar-pyrite | Phyllic |
| BH-2 | BH-2F | 78 | | | | |
| BH-4 | BH-4K | 44 | | | | |
| BH1-3 | BH-3Z | 67 | Quartz-pyrite (QP) | Quartz, sericite, pyrite, chalcopyrite, bornite, goethite, covellite, hematite | K-feldspar-biotite-sericite-quartz | Potassic-phyllitic |
| BH-4 | BH-4L | 35 | | | | |

انواع میان‌بارهای سیال

این گروه، میان‌بارهای اولیه به‌صورت منفرد و مجتمع و میان‌بارهای ثانویه کاذب با موقعیت درون‌بلوری به‌صورت ردیفی در مرکز بلور کوارتز دیده شدند (شکل ۸). همچنین میان‌بارهای غنی از مایع نوع LV نیز به‌صورت ثانویه با موقعیت قطع‌کننده مرزبلور تشخیص داده شد.

میان‌بارهای دو فاز نوع V

میان‌بارهای آبگین دو فاز بخار و مایع، با درجه پرشدگی کمتر از ۲۰ درصد (حجم بخار بالای ۷۰ درصد) و فراوانی تقریبی ۳۰ درصد مشاهده شد (شکل BV و C). شکل ظاهری این میان‌بارها اغلب به‌صورت کشیده و بلورمنفی بوده است که طی میکروترمومتری تمامی آنها به فاز گاز همگن‌شده ($Th_{(VL \rightarrow V)}$) و در کمتر از ۱۰ درصد در شرایط دمایی فوق بحرانی ($Th_{critical}$) قرار گرفتند. ابعاد این میان‌بارها بین ۵ تا ۳۰ میکرون بوده و به‌طور ناچیز شامل کانیهای جامد ناشناخته است که احتمالاً بعد از رخداد میان‌بار به دام افتاده‌اند (شکل D-V). میان‌بارهای نوع V اغلب به‌صورت متمرکز همراه با میان‌بارهای نوع S1 به‌صورت اولیه با موقعیتهای مجتمع و درون‌بلوری در یک راستا دیده شدند (شکل‌های E-V و ۸).

میان‌بارهای سه فاز نوع S

میان‌بارهای آبگین حاوی فاز جامد هالیت متشکل از فازهای مایع + بخار + هالیت \pm سیلیت \pm کانیهای تیره، پس از میان‌بارهای

بر اساس بررسیهای صورت گرفته بر روی میان‌بارهای سیال در دمای اتاق ($25^{\circ}C$)، تعداد سه نوع میان‌بار آبگین تشخیص داده شد. این میان‌بارها به‌ترتیب فراوانی شامل میان‌بارهای دو فاز غنی از مایع با حجم حباب گاز کمتر از ۳۰ درصد (LV-type)، میان‌بارهای دو فاز غنی از بخار با حجم حباب گاز بیش از ۷۰ درصد (V-type) و میان‌بارهای سه فاز حاوی فاز جامد هالیت (S-type)، هستند. علاوه بر این، میان‌بارهای تک فاز مایع و گاز نیز در نمونه‌ها تشخیص داده شد که مورد بررسی میکروترمومتری قرار نگرفتند. برای جلوگیری از طولانی‌شدن پژوهش، از حروف اختصاری این میان‌بارها در متن استفاده شده است. تمرکز سه نوع میان‌بار یادشده در کانی‌سازیهای کوارتز-سولفیدی استوکورک (رگه‌های QBC، QM و QP) با یکدیگر متفاوت بوده که توزیع آنها در جدول ۲ آورده شده است.

میان‌بارهای دو فاز نوع LV

میان‌بارهای آبگین غنی از فاز مایع با درجه پرشدگی بین ۷۰ تا ۸۰ درصد در کانی‌سازی کوارتز-سولفیدی استوکورک تشخیص داده شد که فراوانی آنها در مقایسه با سایر میان‌بارها در حدود ۴۰ درصد است. حجم فاز بخار در این میان‌بارها بین ۲۰ تا ۳۰ درصد است و به شکل‌های بلورمنفی، بیضوی و بی‌شکل با اندازه بین ۱۰ تا ۴۰ میکرون مشاهده شدند (شکل A-V). طی میکروترمومتری تمامی این میان‌بارها به فاز مایع همگن شدند ($Th_{(LV \rightarrow L)}$). در

بر اساس روابط متقاطع بین میان‌بارها در یک بلور تا حدودی قابل تشخیص است.

بر این اساس، در کانسار مس-مولیبدن سنج، چنین به نظر می‌رسد که میان‌بارهای نوع S2، نخستین میان‌بارهای تشکیل شده در رگه‌های کوارتز مورد بررسی هستند (شکل G-7) که پس از آن میان‌بارهای نوع LV و V تشکیل شده‌اند. میان‌بارهای ثانویه با موقعیت قطع‌کننده مرز بلور که در یک امتداد رشد کرده‌اند نیز اغلب میان‌بارهای نوع LV و V را قطع کرده‌اند (شکل‌های ۷ H- و ۸). ارتباط فضایی-زمانی میان‌بارهای سیال در منطقه مورد بررسی به صورت شماتیک در شکل ۸ نشان داده شده است.

میکروترمومتری

بررسی‌های میکروترمومتری یا ریزدماسنجی با استفاده از تعداد ۹ مقطع دوبرصیقل کوارتز از رگه‌های QBC (تعداد ۴ مقطع و ۹۰ نقطه اندازه‌گیری)، QM (تعداد ۳ مقطع و ۱۰۰ نقطه اندازه‌گیری) و QP (تعداد ۲ مقطع و ۷۰ نقطه اندازه‌گیری) انجام شد. موقعیت نمونه‌های برداشت شده در جدول ۱ آورده شده است. دماهای اندازه‌گیری شده محدود به حد بالایی ۵۳۰ تا ۵۷۰°C هستند. دمای همگن‌شدن نهایی (T_{Htotal}) در اغلب میان‌بارها پس از بین رفتن حباب گاز (T_{H-V}) یا انحلال فاز جامد هالیت (T_{mNaCl}) ثبت شد. تعداد محدودی از میان‌بارها نیز طی فرآیند گرمایش به‌طور ناگهانی از بین رفته ($T_{decrepitate}$) که اغلب بالاتر از دمای ۳۷۰°C این پدیده اتفاق افتاد. نتایج میکروترمومتری میان‌بارها در سه رگه کانی‌سازی QBC، QM و QP به شرح زیر است:

رگه QBC: در رگه‌های کوارتز-بیوتیت-کالکوپیریت (QBC) سه نوع میان‌بار اصلی LV، V و S به ترتیب فراوانی تشخیص داده شد. مقدار T_e ثبت شده در میان‌بارهای LV این رگه‌ها بین ۲۹- تا ۳۲/۶°C در تغییر است. این محدوده دمایی گویای رخداد این میان‌بارها در سیستم $H_2O-NaCl \pm KCl$ (۲۲/۹°C-) و حضور ترکیبات اصلی NaCl و KCl به همراه ترکیبات فرعی $CaCl_2$ ، $FeCl_2$ و یا $MgCl_2$ است (Van Den Kerkhof and Hein, 2001) (شکل ۹). همچنین مقدار T_{mice} در میان‌بارهای LV این رگه نیز بین ۱- تا ۷°C- برابر شوری ۱/۷ تا ۱۰/۵ درصد معادل نمک طعام در تغییر است. دمای همگن‌شدن نهایی (T_{H-V}) میان‌بارهای غنی از مایع LV در این رگه بین ۲۲۴ تا ۲۷۶°C

و V با فراوانی تقریبی ۲۰ درصد در رگه‌های کوارتز منطقه مشاهده شدند (شکل E-7 و F). این میان‌بارها با حجم حباب گاز کمتر از ۳۰ درصد، طی میکروترمومتری از طریق انحلال فاز جامد هالیت (T_{mNaCl}) یا از بین رفتن فاز حباب‌گاز (T_{H-V}) همگی به فاز مایع همگن شدند. این میان‌بارها طی بررسی‌های پتروگرافی بر اساس فازهای جامد موجود به سه زیرگروه زیر تقسیم شدند:

زیرگروه S1، حاوی میان‌بارهای مایع+بخار+هالیت
زیرگروه S2، حاوی میان‌بارهای مایع+بخار+هالیت+سیلیت±
کانی تیره
زیرگروه S3، حاوی میان‌بارهای مایع+بخار+کانیهای شفاف
غیرقابل انحلال

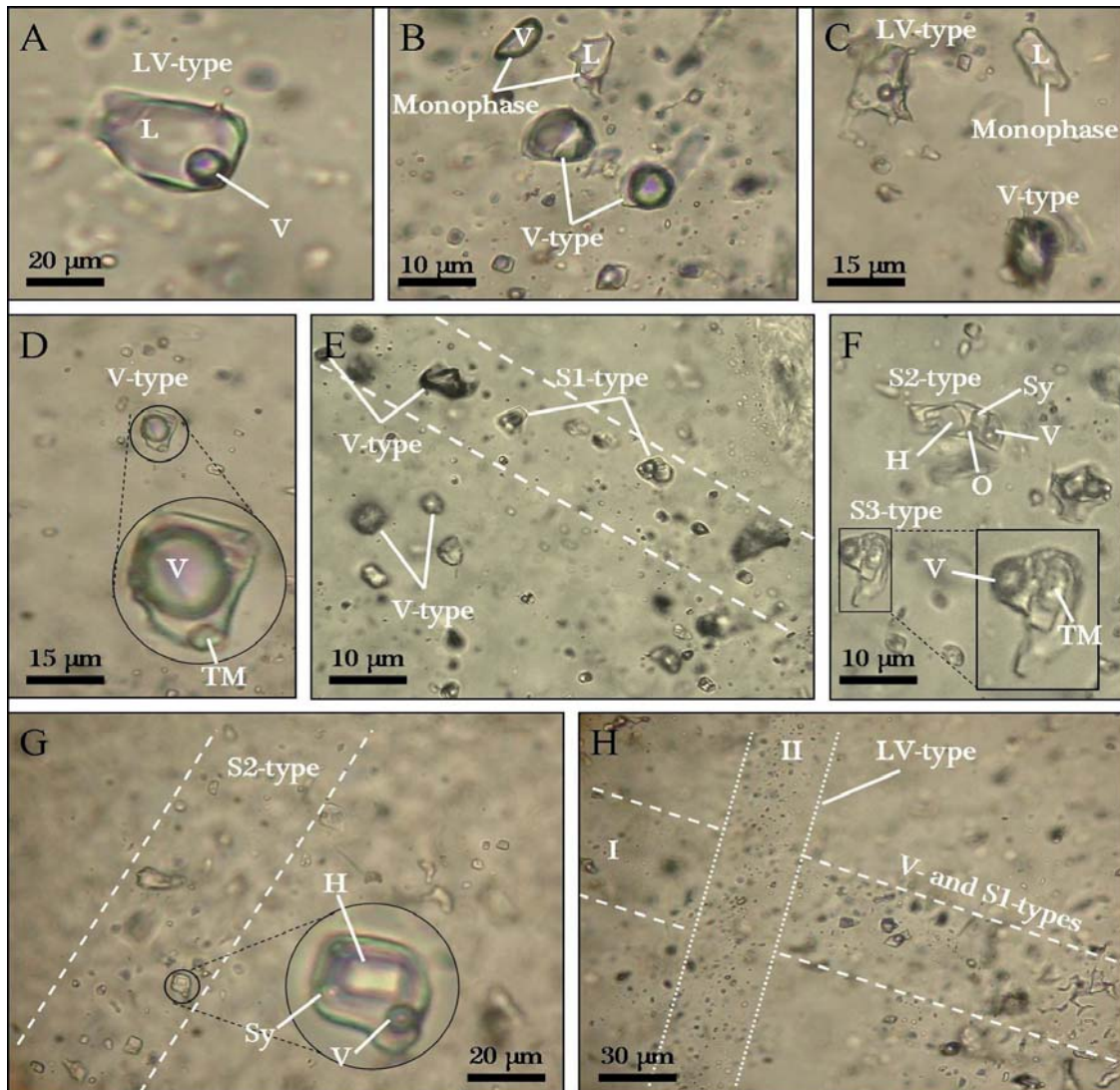
هالیت و سیلیت در این میان‌بارها توسط ساختمان مکعبی شکل و ایزوتروپی قابل تشخیص هستند. هالیت اغلب دارای بلورهای درشت‌تری بوده و سیلیت با گوشه‌های نسبتاً گردشده و ابعاد کوچکتر در دمای کمتری نسبت به هالیت ذوب شده است. علاوه بر حضور هالیت و سیلیت در میان‌بارهای نوع S2، کانیهای تیره از قبیل هماتیت و کالکوپیریت نیز تشخیص داده شد (شکل F-7). هماتیت با بلورهای قرمز رنگ و کالکوپیریت با ظاهر گوشه‌دار و رنگ تیره قابل تشخیص است. در میان‌بارهای نوع S3 کانیهای شفاف ناشناخته‌ای مشاهده شد که در دمای بیش از ۴۵۰°C دچار ذوب نشده است و به دلیل ظاهر کشیده و ویژگیهای ایزوتروپی، به‌عنوان کانیهای سولفات (مانند باریت) تشخیص داده شد (شکل F-7). میان‌بارهای نوع S در نمونه‌ها اغلب به صورت اولیه با موقعیتهای مجتمع و درون بلوری و به‌طور محدود به صورت قطع‌کننده مرز بلور با ماهیت ثانویه تشخیص داده شد (شکل ۸).

ارتباط زمانی میان‌بارها

به دلیل توزیع تصادفی و روی هم قرار گرفتن تعداد زیادی از میان‌بارها در هنگام تشکیل بر روی یکدیگر، تعیین ارتباط زمانی دقیق و رابطه تقدم و تأخر میان‌بارها اغلب به راحتی امکان‌پذیر نیست. با این وجود، میان‌بارهای ثانویه که در یک راستا در شکستگیهای ثانویه یک بلور قرار گرفته‌اند، اغلب به وسیله ماهیت ثانویه و شاخصهای تعیین‌شده توسط رودر (Roedder, 1984) نسبت به میان‌بارهای اولیه قابل تشخیص هستند. بر اساس بررسی‌های اولریچ و همکاران (Ulrich et al., 2001)، توالی زمانی به دام افتادن اجتماعی از میان‌بارها در رگه‌های کانی‌سازی

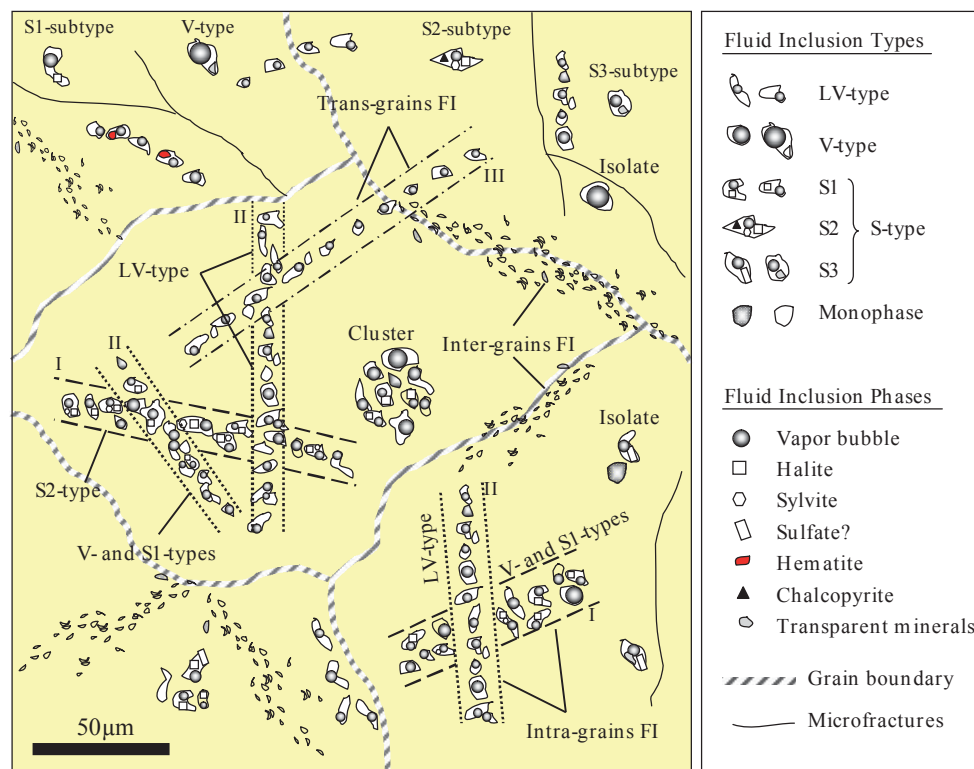
دمای همگن شدن برای آنها ثبت نشد. چگالی این میان‌بارها بین ۰/۸۲ تا ۰/۸۶ g/cm³ است.

ثبت شد (شکل ۱۰-A). علاوه بر این، تعداد ۷ میان‌بار در دمای تقریبی ۲۰۰ تا ۳۲۰°C دچار پدیده نشت یا leakage شده و



شکل ۷. تصویرهای پتروگرافی میان‌بارهای سیال از رگه‌های QBC، QM و QP منطقه سنج شامل، A: میان‌بار نوع LV با درجه پرشدگی بیش از ۶۰ درصد همراه با فاز حباب گاز، B: میان‌بارهای نوع V با درجه پرشدگی کمتر از ۲۰ درصد همراه با فاز حباب گاز بزرگ و میان‌بارهای تک فاز مایع و گاز، C: همراهی میان‌بارهای نوع LV و V با درجه پرشدگی مختلف همراه با میان‌بار تک فاز مایع، D: وجود کانیه‌های شفاف ناشناخته همراه با میان‌بارهای نوع V با حباب گاز بزرگ، E: همراهی ردیفی از میان‌بارهای غنی از گاز نوع V و S1، F: همراهی میان‌بارهای حاوی فاز جامد نوع S2 و S3، G: ردیفی از میان‌بارهای حاوی فاز جامد هالیت و سیلویت نوع S2 و H: اجتماعی از میان‌بارهای غنی از گاز نوع V و S1 که توسط میان‌بارهای ثانویه نوع LV قطع شده است. (O= کانی کدر، H= هالیت، Sy= سیلویت، TM= کانی شفاف، L= فاز مایع، V= فاز گاز، S= فاز جامد)

Fig. 7. Microphotographs of typical fluid inclusions in QBC, QM and QP veins of the Senj deposit, A: LV-type fluid inclusion with more than 60 percent filling degree and vapor phase, B: V-type fluid inclusions with less than 20 percent filling degree and big vapor phase accompanied with liquid and vapor monophases inclusions, C: LV and V-type fluid inclusions with various filling degree and liquid monophase, D: presence of unidentified transparent minerals with big vapor V-type fluid inclusions, E: trials of vapor-rich V-type and S1 fluid inclusions, F: solid-bearing S2- and S3-type fluid inclusions, G: trials of halite and sylvite-bearing S2-type fluid inclusions, H: vapor-rich V-type and S1 fluid inclusions assemblage is crosscutted by LV-type secondary fluid inclusions. (O= opaque mineral, H= halite, Sy= sylvite, TM= transparent mineral, L= liquid phase, V= vapor phase, S= solid phase)



شکل ۸. تصویر شبیه‌سازی شده از نحوه توزیع میان‌بارهای سیال در نمونه شماره BH-1A که در آن موقعیت سه میان‌بار اصلی شامل LV، V و S نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میان‌بارهای نوع S2 نخستین گروه میان‌باری هستند که اغلب توسط دو گروه میان‌بار LV و V قطع شده‌اند. میان‌بارهای ثانویه با موقعیت قطع‌کننده بلوری در مراحل پایانی کلیه میان‌بارهای اولیه و ثانویه را قطع کرده است.

Fig. 8. Schematic figure of fluid inclusion distribution in BH-1A sample with situation of LV, V, and S type inclusion. Evidences shows S2-type inclusion as the primary inclusion which cutted by both LV- and V-type inclusions. Furthermore, the trans-grain secondary inclusions in final stages cutted whole primary and secondary fluid inclusions.

آمد. دمای همگن‌شدن فاز حباب گاز (Th_{1-V}) در میان‌بارهای نوع S1 بین 320°C تا 415°C ثبت شد. علاوه بر این در میان‌بارهای نوع S2 تغییرات دمای انحلال هالیت (Tm_{NaCl}) و سیلویت (Tm_{KCl}) به ترتیب بین 187°C تا 367°C و 136°C تا 243°C در رگه‌های QBC ثبت شد که بر مبنای تغییرات Tm_{NaCl} شوری این میان‌بارها بین $31/2$ تا $44/0$ درصد معادل نمک طعام به دست آمد. همچنین دمای همگن‌شدن فاز حباب گاز (Th_{1-V}) در میان‌بارهای نوع S2 بین 244°C تا 300°C ثبت شد (شکل A-10). چگالی میان‌بارهای حاوی فاز جامد هالیت نوع S1 و S2 بین $1/0$ تا $1/2 \text{ g/cm}^3$ به دست آمد.

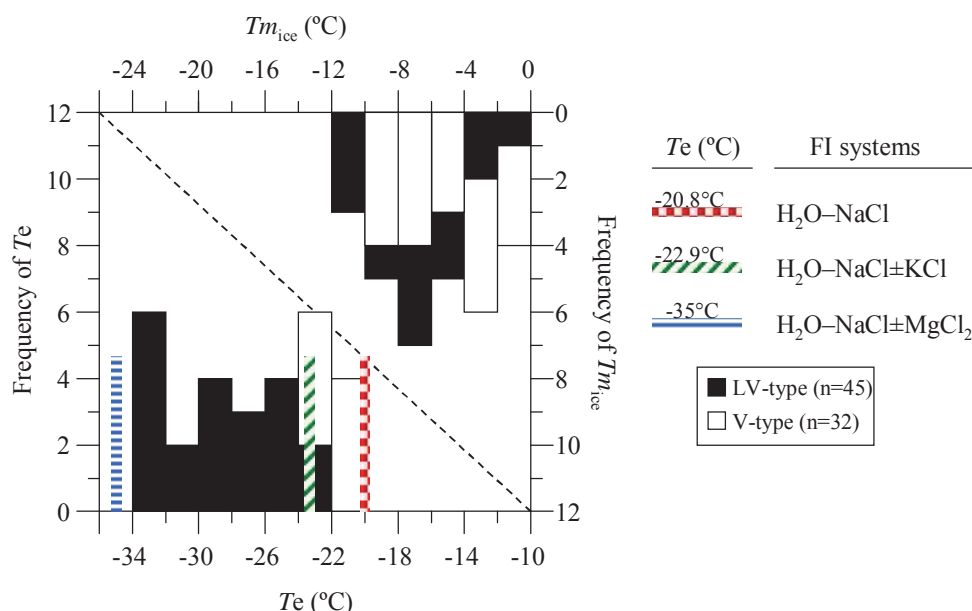
جهت مقایسه روند انحلال فازهای جامد هالیت و سیلویت در رگه QBC، از نمودار سه‌تایی $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$ (Bodnar and Beane, 1980) استفاده شده که در شکل A-11 نشان داده شده است. طبق بررسیهای میکروترمومتری، همگن‌شدن نهایی (Th_{total}) در میان‌بارهای نوع S1 در بیش از ۵۰ درصد

مقدار T_e ثبت شده در میان‌بارهای نوع V این رگه نیز بین $22-$ تا 24°C در تغییر است. مقدار Tm_{ice} نیز در این میان‌بارها بین $3/6-$ تا $6/8^{\circ}\text{C}$ برابر شوری $5/7$ تا $10/2$ درصد معادل نمک طعام به دست آمد. دمای همگن‌شدن نهایی میان‌بارهای غنی از گاز V در رگه‌های QBC بین 347°C تا 425°C ثبت شد (شکل A-10). همچنین تعداد تقریبی ۱۰ میان‌بار طی گرمایش در دمای بیش از 400°C به‌طور ناگهانی از بین رفتند که دمای T_d برای آنها در نظر گرفته شد. چگالی میان‌بارهای نوع V بین $0/58$ تا $0/68 \text{ g/cm}^3$ در تغییر است.

طبق بررسیهای پتروگرافی، در رگه‌های QBC هر سه نوع میان‌بار حاوی فاز جامد S1، S2 و S3 دیده شدند (شکل ۸)، که از این بین، میان‌بارهای نوع S1 و S2 مورد آزمون داماسنجی قرار گرفتند. تغییرات دمای انحلال هالیت (Tm_{NaCl}) در میان‌بارهای نوع S1 بین 250°C تا 355°C ثبت شد که شوری محاسبه شده بر مبنای آن بین $34/6$ تا $42/8$ درصد معادل نمک طعام به دست

همگن شدن فاز جامد هالییت ($T_{m_{NaCl}}$) ثبت شده است در $T_{m_{NaCl}} > Th_{l-v}$. این مطلب در نمودار دوتایی $T_{m_{NaCl}}$ در مقابل Th_{l-v} قابل مشاهده است (شکل B-۱۱).

اندازه گیریها با از بین رفتن فاز حباب گاز (Th_{l-v}) انجام شده $(Th_{l-v} > T_{m_{NaCl}})$ ؛ در حالی که در میان بارهای نوع S2 در بیش از ۷۰ درصد مواقع همگن شدن نهایی میان بار توسط دمای



شکل ۹. نمودار ستونی فراوانی دماهای T_e و $T_{m_{ice}}$ در میان بارهای نوع LV و V به همراه سیستم میان بارها از (Van Den Kerkhof and Hein, 2001). (n- تعداد نقاط اندازه گیری)

Fig. 9. Frequency histograms of T_e and $T_{m_{ice}}$ in LV and V-type fluid inclusions with systems (after Van Den Kerkhof and Hein, 2001). (n= number of FI analysed)

تا ۴۳۵°C ثبت شد (شکل B-۱۰). همچنین چگالی میان بارهای نوع V در این رگه نیز بین $۰/۵۰$ تا $۰/۷۱ \text{ g/cm}^3$ به دست آمد. بر اساس پژوهشها، بین میان بارهای حاوی فاز جامد تنها میان بارهای نوع S1 در رگه های QM مشاهده شدند که مورد آزمایش دماسنجی قرار گرفتند. تغییرات $T_{m_{NaCl}}$ در این میان بارها بین ۲۵۸ تا ۳۲۰°C به دست آمده که این مقدار برابر میزان شوری $۳۵/۲$ تا $۳۹/۷$ درصد معادل نمک طعام است. همچنین دمای همگن شدن نهایی (Th_{total}) در این میان بارها اغلب توسط از بین رفتن فاز حباب گاز (Th_{l-v}) صورت گرفته است که بین ۳۳۰ تا ۴۶۰°C ثبت شد (شکل B-۱۰). چگالی میان بارهای نوع S1 در این رگه اغلب بین $۱/۰$ تا $۱/۱ \text{ g/cm}^3$ متغیر است.

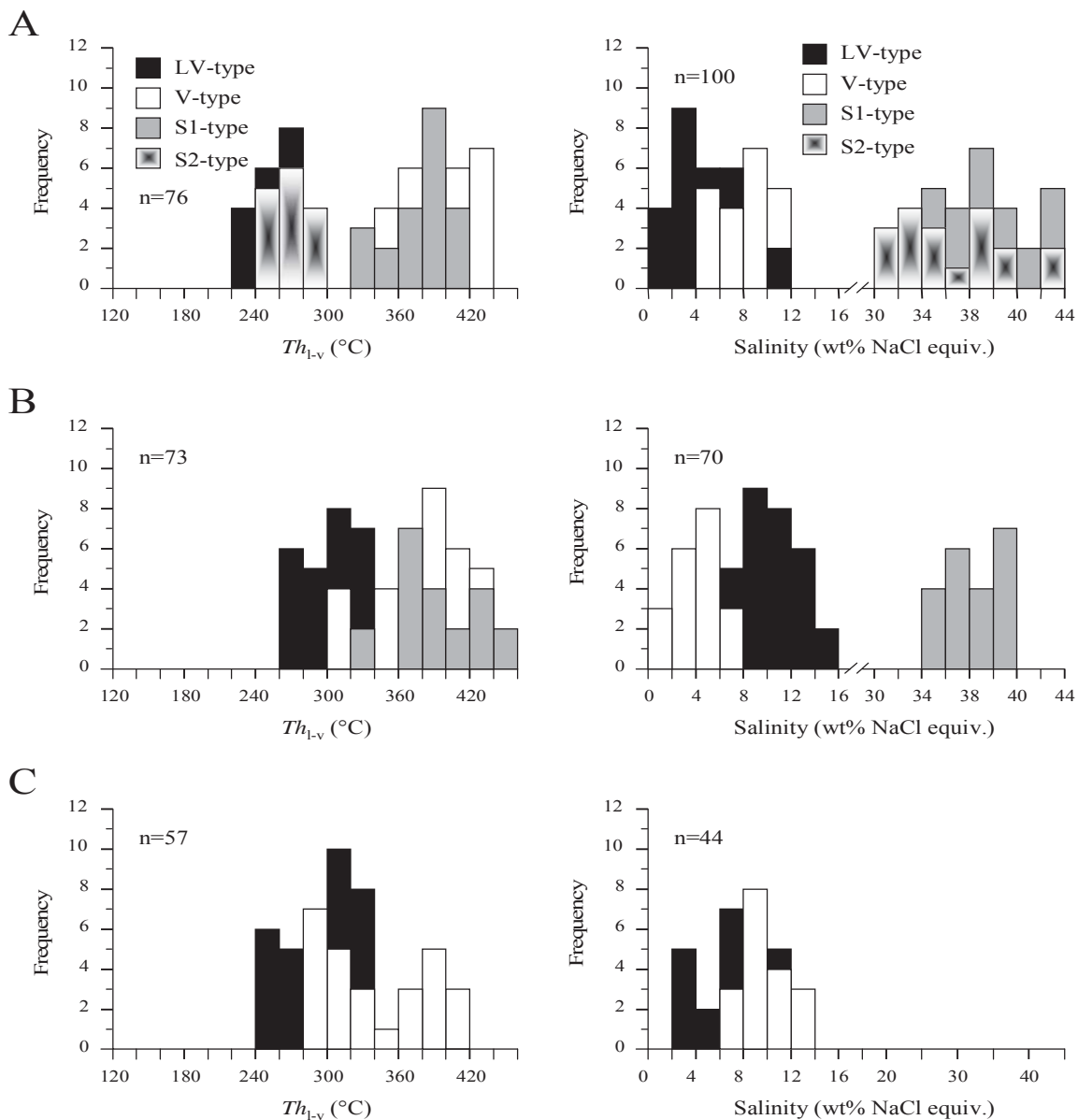
رگه QP: رگه های کوارتز-پیریت (QP) در منطقه به ترتیب فراوانی حاوی میان بارهای اصلی LV و V هستند و میان بارهای نوع S در آنها دیده نشد. مقدار T_e در میان بارهای LV این رگه

رگه QM: رگه های کوارتز-مولیبدنیت (QM) در منطقه سنج، به ترتیب فراوانی حاوی سه میان بار اصلی LV، V و S هستند. مقدار T_e در میان بارهای LV بین -۲۷ تا $-۳۰/۵^{\circ}\text{C}$ در تغییر است که گویای رخداد کاتیون های اصلی سدیم و پتاسیم و مقادیر ناچیز کاتیون های دو ظرفیتی (از قبیل Ca^{2+}) در این میان بارهاست (Van Den Kerkhof and Hein, 2001). تغییرات $T_{m_{ice}}$ در این میان بارها بین -۴ تا -۱۲°C برابر شوری $۶/۴$ تا $۱۶/۰$ درصد معادل نمک طعام است. دمای همگن شدن نهایی میان بارهای LV در این رگه ها بین ۲۶۵ تا ۳۲۸°C در تغییر است. چگالی این میان بارها بین $۰/۸۳$ تا $۰/۸۶ \text{ g/cm}^3$ متغیر است.

مقدار T_e در میان بارهای V موجود در رگه QM بین -۲۱ تا -۲۳°C در تغییر است (شکل ۹). مقدار $T_{m_{ice}}$ در این میان بارها بین $-۱/۱$ تا $-۴/۳^{\circ}\text{C}$ برابر شوری $۱/۸$ تا $۶/۸$ درصد معادل نمک طعام است. دمای همگن شدن نهایی میان بارهای V نیز بین ۳۰۰

مشابه رگه QM، مقدار T_e ثبت شده در میان‌بارهای V رگه QP نیز بین ۲۱- تا ۲۳°C در تغییر است (شکل ۹). مقدار $T_{m_{ice}}$ در این میان‌بارها بین ۴/۳- تا ۹/۸°C برابر شوری ۶/۸ تا ۱۳/۷ درصد معادل نمک طعام است. دمای همگن‌شدن نهایی میان‌بارهای V نیز بین ۲۹۵ تا ۴۰۵°C در رگه‌های کوارتز-پیریت ثبت شد (شکل ۱۰-C). چگالی میان‌بارهای نوع V بین ۰/۷۰ تا ۰/۸۰ g/cm^3 در تغییر است.

بین ۲۲- تا ۲۳°C در تغییر است که گویای رخداد این میان‌بارها در سیستم $H_2O-NaCl$ (۲۰/۸°C-) است (Van Den Kerkhof and Hein, 2001). تغییرات $T_{m_{ice}}$ در این میان‌بارها نیز اغلب بین ۲/۳- تا ۸/۲°C برابر شوری ۳/۷ تا ۱۲/۰ درصد معادل نمک طعام است. دمای همگن‌شدن نهایی نیز در این میان‌بارها بین ۲۵۴ تا ۳۳۵°C ثبت شد. چگالی میان‌بارهای نوع LV اغلب بین ۰/۷۰ تا ۰/۸۲ g/cm^3 متغیر است.



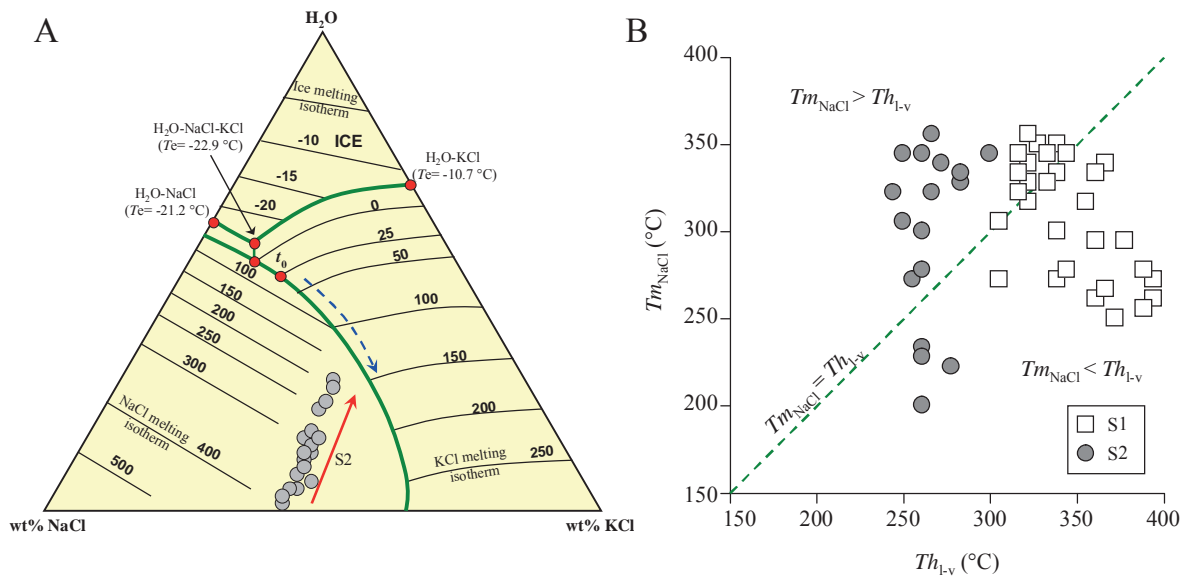
شکل ۱۰. نمودار ستونی فراوانی دمای همگن‌شدن حباب گاز (Th_{1-v}) و شوری بر حسب درصد معادل نمک طعام در انواع میان‌بارهای اصلی LV، V و S و توزیع آنها در رگه‌های A: QBC، B: QM و C: QP. (n- تعداد نقاط اندازه‌گیری)

Fig. 10. Frequency diagram of homogenization temperature (Th_{1-v}) and salinity (wt% NaCl equiv.) in the LV-, V-, and S-type fluid inclusions from A: QBC, B: QM, and C: QP veins. (n= number of FI analysed).

جدول ۲. خلاصه‌ای از داده‌های میکروترمومتری به‌دست آمده از رگه‌های کوارتز- سولفیدی کانسار سنج. (n- تعداد نقاط اندازه‌گیری)

Table 2. Microthermometric data of quartz-sulfide veins in Senj deposit. (n= number of FI analysed)

| Vein-type mineralization stage | Fluid inclusion type | n | T_e | $T_{m_{ice}}$ | $T_{m_{NaCl}}$ ($T_{m_{KCl}}$) | Th_{l-v} | Salinity (wt% NaCl eq.) | Bulk density (g/cm^3) |
|-----------------------------------|----------------------|----|--------------|---------------|----------------------------------|------------|-------------------------|---------------------------|
| Quartz-biotite-chalcopyrite (QBC) | LV-type | 18 | -32.6 to -29 | -7 to -1 | ----- | 224-276 | 1.7-10.5 | 0.82-0.86 |
| | V-type | 30 | -24 to -22 | -6.8 to -3.6 | ----- | 347-425 | 5.7-10.2 | 0.58-0.68 |
| | S1-type | 22 | ----- | ----- | 250-355 | 320-415 | 34.6-42.8 | 1.0-1.1 |
| | S2-type | 20 | ----- | ----- | 187-367 (136-243) | 244-300 | 31.2-44.0 | 1.1-1.2 |
| Quartz-molybdenite (QM) | LV-type | 30 | -30.5 to -27 | -12 to -4 | ----- | 265-328 | 6.4-16.0 | 0.83-0.86 |
| | V-type | 33 | -23 to -21 | -4.3 to -1.1 | ----- | 300-435 | 1.8-6.8 | 0.50-0.71 |
| | S1-type | 21 | ----- | ----- | 258-320 | 330-460 | 35.2-39.7 | 1.0-1.1 |
| Quartz-pyrite (QP) | LV-type | 30 | -23 to -22 | -8.2 to -2.3 | ----- | 254-335 | 3.7-12.0 | 0.70-0.82 |
| | V-type | 27 | -23 to -21 | -9.8 to -4.3 | ----- | 295-405 | 6.8-13.7 | 0.70-0.80 |



شکل ۱۱. A: روند انحلال میان‌بارهای حاوی هالیت و سیلیت نوع S2 در نمودار سه‌تایی NaCl-KCl-H₂O (Bodnar and Beane, 1980) و B: همگن‌شدن نهایی (Th_{total}) اغلب میان‌بارهای نوع S1 توسط از بین رفتن فاز حباب‌گاز (Th_{l-v}) و برعکس آن در میان‌بارهای نوع S2

Fig. 11. A: dissolution trend of S2-type halite and sylvite-bearing fluid inclusions in NaCl-KCl-H₂O ternary diagram (Bodnar and Beane, 1980), and B: total homogenization temperature (Th_{total}) of S1-type fluid inclusion by disappear of vapor bubble (Th_{l-v}) and viceversa in S2-type fluid inclusions.

2012). وجود منطقه‌بندی فلزی و دگرسانی در ذخایر گرمایی- ماگمایی نوع رگه‌ای، اغلب از علایم عدم امتزاج سیال است که در نتیجه مهاجرت فلزات و یون‌ها در واکنش میان سیال غنی از گاز و فوق اشباع از نمک اتفاق می‌افتد (Heinrich et al., 1999; Aude'tat et al., 2000). اختلاف چگالی و ترکیب میان سیالات آبگین کم‌چگال و چگالی بالا موجب تغییر ویژگیهای

بحث

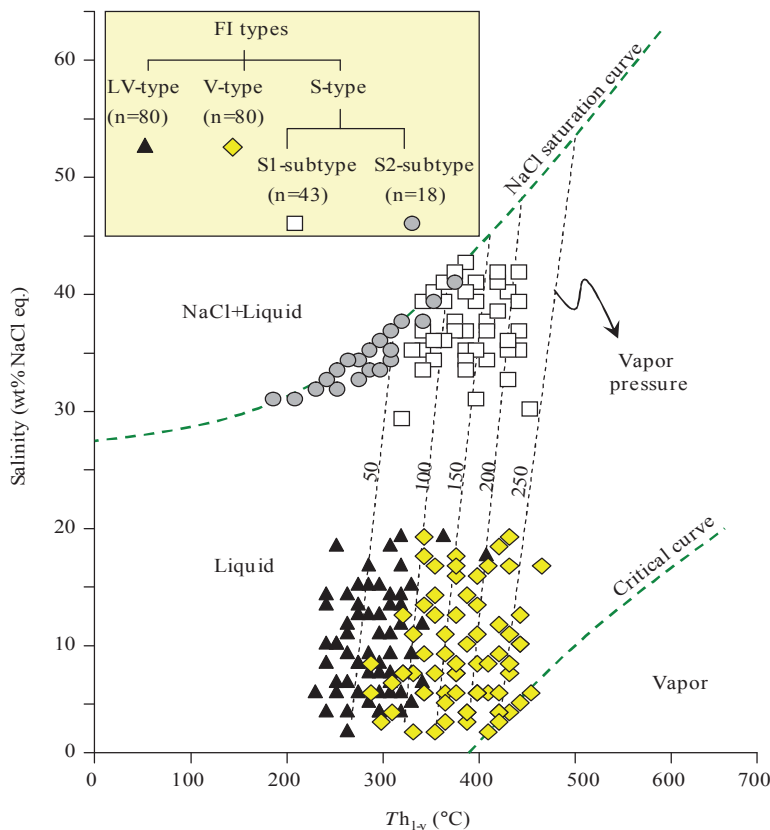
شواهد عدم امتزاج سیال

عدم امتزاج سیال در شرایط فوق بحرانی ناشی از حضور هم‌زمان یک سیال شور^۱ با چگالی بالا و سیال کم نمک غنی از گاز با چگالی پایین، در بسیاری از محیطهای زمین‌شناسی قابل شناسایی است (Cline and Bodnar, 1994; Cao et al.,

(QP) به‌ویژه بین میان‌بارهای V و S1 قابل دیدن است. مهمترین این شواهد عبارتند از:

- ۱) رخداد هم‌زمان میان‌بارهای آبگین فوق اشباع از نمک (نوع S1) و غنی از فاز بخار (نوع V) به‌صورت تجمعی همراه با یکدیگر
- ۲) اختلاف شوری بالا در اجتماعی از میان‌بارهای آبگین نوع V (بین ۲ تا ۱۰ درصد معادل نمک طعام) با نسبت مایع به بخار پایین (کمتر از ۳۰ درصد) در مقایسه با میان‌بارهای آبگین نوع S1 (بین ۳۵ تا ۴۳ درصد معادل نمک طعام) با نسبت مایع به بخار بالا (بیش از ۷۰ درصد) (شکل ۱۲)
- ۳) همگن‌شدن انتخابی میان‌بارهای آبگین غنی از گاز (نوع V) به فاز بخار و آبگین فقیر از گاز (نوع S1) به فاز مایع
- ۴) دمای همگن‌شدن نهایی (Th_{total}) مشابه در اجتماعی از میان‌بارهای هم‌زمان نوع V (بین ۳۰۰ تا ۴۳۵°C) و نوع S1 (بین ۳۲۰ تا ۴۶۰°C)

فیزیکوشیمی سیال در شکستگیها و متعاقباً ته‌نشست عناصر مختلف در سیستم می‌شود. برای دست‌یابی به شواهد وقوع پدیده عدم امتزاج سیال در یک ذخیره باید به بررسی اجتماعی از میان‌بارها که به‌صورت هم‌زمان از یک سیال گرمایی-ماگمایی اولیه به‌دام افتاده‌اند پرداخته شود. بر اساس رامبوز و همکاران (Ramboz et al., 1982)، مهمترین شاخصهای تعیین شده برای وقوع پدیده عدم امتزاج سیالات شامل: ۱) رخداد هم‌زمان میان‌بارها با ترکیب مختلف (آبگین، کربنیک و نظایر آن)، ۲) نسبت مایع به بخار و شوری متغیر در اجتماعی از میان‌بارها، ۳) همگن‌شدن انتخابی میان‌بارها (مثال، همگن‌شدن به فاز بخار در میان‌بارهای با نسبت بالای بخار به مایع و برعکس) و ۴) دمای همگن‌شدن مشابه در میان‌بارهای هم‌زمان، است. با توجه به موارد یادشده و شواهد پتروگرافی و میکروترمومتری میان‌بارها می‌توان گفت اغلب شواهد عدم امتزاج سیالات در بخش کانی‌سازی رگه‌ای کوارتز- بیوتیت- کالکوپیریت (QBC) و کوارتز- پیریت



شکل ۱۲. پراکندگی انواع میان‌بارهای LV، V، S1 و S2 در نمودار دمای همگن‌شدن (Th_{1-v}) در مقابل شوری (برحسب درصد معادل نمک طعام) نسبت به منحنیهای دمای بحرانی و اشباع از نمک

Fig. 12. Distribution of the LV, V, S1, and S2-types fluid inclusions in homogenization temperature diagram (Th_{1-v}) versus salinity (wt% NaCl eq.) relative to critical temperature and NaCl saturation curves

همراهی این میان‌بارها در نتیجه به‌دام افتادن هم‌زمان آنها در تجمعات میان‌باری اولیه و ثانویه کاذب در کانی‌سازی استوکورک کوارتز-سولفیدی گویای منشأ آنها از یک منبع گرمایی واحد به‌صورت یک فاز امتزاج‌ناپذیر است (Bodnar, 1995; Fournier, 1999). شناسایی ارتباط زمانی- مکانی رخداد میان‌بارهای غنی از گاز در رگه‌های استوکورک کوارتز-سولفیدی (رگه‌های QBC, QM و QP) با میان‌بارهای غنی از نمک به‌دلیل نسل‌های مختلف میان‌بارها کمی مشکل به‌نظر می‌رسد. با این وجود در رگه کانی‌سازی کوارتز- پیریت (QP) چنین به‌نظر می‌رسد که میان‌بارهای نوع LV و V در بلورهای کوارتزی به‌دام افتاده‌اند که بدون میان‌بارهای نوع S است. این پدیده گویای آن است که این میان‌بارها در دو محدوده زمانی مختلف تشکیل شده‌اند و یا احتمالاً در مراحل پایانی کانی‌سازی توسط سیالات جوی رقیق دچار اختلاط شده‌اند (Brathwaite et al., 2001). طبق بررسی‌های کلاین و بودنار (Cline and Bodnar, 1994)، میان‌بارهای اشباع از نمک که توسط انحلال فاز جامد هالیت همگن می‌شوند (مانند میان‌بارهای S2)، اغلب در یک محیط گرمایی پایدار مایع بدون حضور فاز بخار به‌دام می‌افتند که زیر فشارهای لیتواستاتیک رخ داده است و شرایط قبل از جوشش^۱ را نمایش می‌دهند. در مقابل، هم‌زمانی اجتماعی از میان‌بارهای غنی از گاز که به فاز بخار همگن می‌شوند، در کنار میان‌بارهای حاوی فاز جامد هالیت که از طریق ناپدیدشدن فاز حباب بخار همگن می‌شوند (مانند اجتماع میان‌بارهای S1 و V) نشان‌دهنده گذار کانسار به شرایط کم فشار هیدرواستاتیک و هم‌زمان ظهور پدیده جوشش است.

تحول سیال گرمایی و کانی‌سازی مس- مولیبدن

نتایجی که در این بخش ذکر شده است بر مبنای بررسی‌های میان‌بارهای سیال انجام شده است و ممکن است با گردآوری داده‌های بیشتر تغییر کند. به عبارت دیگر با استفاده از تغییرات دمای همگن‌شدن و انحلال فازهای مختلف در میان‌بارهای سیال، امکان این‌که بتوان یک تجزیه و تحلیل دقیق از تحولات سیال در سیستم استوکورک کانسار مورد مطالعه به‌دست آورد، میسر نیست. با این وجود، شبیه‌سازی یک مدل احتمالی با در نظر گرفتن روابط فازی در یک سیستم H₂O-NaCl-KCl (Bodnar et al., 1985; Hedenquist et al., 1998) برای منطقه مورد بررسی ارائه شده که در شکل ۱۴ نشان داده شده است. تعبیر و تفسیر تحول سیال نشان داده شده در شکل ۱۴

تخمین عمق دیرینه کانسار

بررسی میان‌بارهای سیال، روشی مناسب برای دستیابی به فشار (P_h) و دمای (T_h) همگن‌شدن و تخمین عمق دیرینه کانسار است. تقدم یا تأخر دمای از بین رفتن فاز حباب گاز (Th_v) نسبت به فاز جامد هالیت (Tm_{NaCl}) در میان‌بارهای آبگین اشباع از نمک، یکی از شواهد مناسب برای تخمین فشار به‌دام افتادن میان‌بارهای سیال در رگه- رگه‌های استوکورک کوارتز مرتبط با دگرسانی پتاسیک- فلیک است. بر این اساس، میان‌بارهای دارای فاز جامدی که همگن‌شدن نهایی آنها اغلب از طریق انحلال فاز جامد هالیت انجام می‌شود، معیاری مناسب برای تخمین فشار و عمق دیرینه ذخیره در اختیار می‌گذارند (Rusk

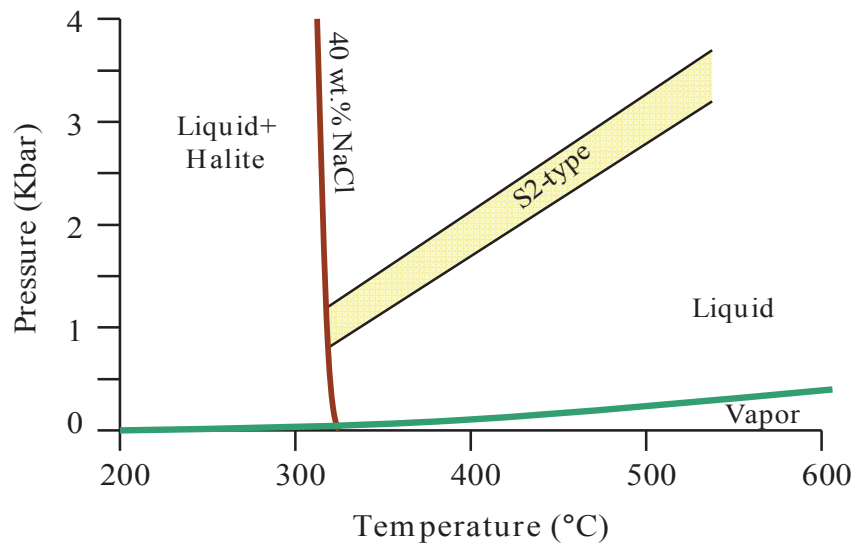
۱) میان‌بارهای اشباع از نمک نوع S2 نسبت به سایر میان‌بارها از تقدم بیشتری برخوردارند و نیز در مواردی حاوی فازهای جامد نظیر کالکوپیریت و هماتیت بوده که گویای به‌دام افتادن آنها طی مراحل اولیه است.

۲) روند انحلال میان‌بارهای نوع S2 در نمودار سه‌تایی $H_2O-NaCl-KCl$ به سمت گوشه‌هالیت بوده (شکل A-۱۱) که این مطلب گویای اشباع سیال اولیه از هالیت و رقیق شدن تدریجی آن پس از به‌دام افتادن میان‌بار است (Cloke and Kesler, 1979; Hezarkhani and Williams-Jones, 1998).

۳) همگن‌شدن نهایی بیش از ۷۰ درصد میان‌بارهای نوع S2 توسط انحلال فاز هالیت بوده ($T_{mNaCl} > T_{H_2O}$) که در دمای بالا (بیش از $350^\circ C$) و کمینه فشار بیش از ۸۰۰ بار انجام شده است.

می‌تواند یک سناریو بر اساس دما و فشار به‌دام افتادن و شوری ثبت شده در میان‌بارها باشد.

بر خلاف ذخایر مس پورفیری تشکیل شده در مناطق فرورانش که در آن سیال ارتوماگمایی اولیه با دمای بالا (بیش از $700^\circ C$) و غنی از نمک (۵۲ تا ۵۸ درصد معادل نمک طعام) (Ulrich et al., 2001; Harris et al., 2005)، هم‌زمان با نفوذ و تبلور توده آذرین نیمه‌نفوذی تشکیل می‌شود، این ویژگی در میان‌بارهای سیال کانسار سنج مورد مشاهده قرار نگرفت. در کانسار سنج چنین به‌نظر می‌رسد که میان‌بارهای اشباع از نمک نوع S2 در رگه کوارتز-بیوتیت-کالکوپیریت (QBC) مرحله نخست، شاهد وجود یک سیال نخستین قبل از رخداد جوشش بوده که از یک ماگمای کلسیمی-قلیایی تا قلیایی غنی از پتاسیم حاوی $Cl-OH$ منشأ گرفته است. این موضوع بر مبنای سه شاهد زیر شکل گرفته است:



شکل ۱۳. ایزوکور تخمین فشار برای رگه‌های QBC حاوی میان‌بارهای نوع S2 که دمای همگن‌شدن نهایی در آنها توسط انحلال فاز جامد هالیت انجام شده است. شیب ایزوکورها به‌طور تجربی توسط بودنار (Bodnar, 1994) به‌دست آمده و توسط نرم‌افزارهای BULK و ISOC (Bakker, 2003) رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با قطع ایزوکورهای میان‌بارهای S2 توسط ایزوکور ۴۰ درصد، حداقل فشار بین ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ بار برای این میان‌بارها به‌دست آمد.

Fig. 13. Pressure estimation isochors for S2-type fluid inclusion in QBC veins, which homogenization temperatures occurred with dissolution of halite minerals. Slope of these isochores are experimentally derived from Bodnar (1994) and plotted by BULK and ISOC (Bakker, 2003) softwares. As seen in figure with cutting of S2-type inclusions by isochore slopes and 40 wt percent NaCl-H₂O, minimum pressure for these inclusions is between 800 to 1100 bar.

شرایط کم‌چگال (متوسط 0.6 g/cm^3) و چگالی بالا (متوسط 1 g/cm^3) هستند. بر این اساس، میان‌بارهای نوع S1 در بیش از ۵۰ درصد مواقع توسط از بین رفتن حباب گاز همگن‌شده (Th_{IV})

چنان‌که اشاره شد، شواهد میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد که میان‌بارهای نوع V و S1 در رگه‌های متقاطع کوارتز-سولفیدی استوکورک منطقه، احتمالاً محصول رخداد جوشش به ترتیب در

پیوسته است. کلیه این تغییرات انعکاس دهنده سرد شدن تدریجی سیال آبگین انحلال یافته از توده نفوذی سنج است.

مقایسه با ذخایر مس- مولیبدن پورفیری و سیستم‌های پورفیری نابالغ

همراهی میان‌بارهای حاوی فاز جامد هالیت یا فوق اشباع از نمک (نوع S1) به همراه میان‌بارهای غنی از گاز (نوع V) با درجه پرشدگی پایین شاخص کانسارهای مس پورفیری با عمق‌های پایین (کمتر از ۳ کیلومتر) است (Bodnar, 1995; Beane, 1983). با این وجود کانی‌سازی مس- مولیبدن (نقره) کانسار سنج دارای تفاوت‌های شاخصی با ذخایر کلاسیک پورفیری معرفی شده توسط سیلیتو و هدنکویست و لاونستر (Hedenquist, 1994 and Lowenstern, 2010) است، که مهمترین آنها به شرح زیر است:

(۱) توده پورفیری محرک کانی‌سازی^۱ تاکنون در منطقه تشخیص داده نشده است،

(۲) کانی‌سازی صفحه‌ای زیر کنترل گسلهایی با راستای شمال شرق- جنوب غرب در محدوده‌ای به طول تقریبی ۱/۵ کیلومتر و ضخامت ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر در مجاورت توده نفوذی و سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی دربرگیرنده تشکیل شده است،

(۳) دمای همگن‌شدن نسبتاً پایین میان‌بارها در رگه‌های کانی‌سازی QP و QM،

(۴) پایین بودن تناژ و عیار کانسنگ (کمتر از ۱۰ میلیون تن با عیار ۰/۲ تا ۰/۳۳ درصد مس) نسبت به سیستم‌های پورفیری بارور (۰/۵ درصد مس و تناژ ۱۰۰ میلیون تن) (Cox and Singer, 1986)،

(۵) در منطقه مورد بررسی در مقیاس ناحیه‌ای تاکنون ذخیره پورفیری شاخصی گزارش نشده است، و

(۶) توزیع دگرسانیهایی به صورت جانبی و عمودی انطباق چندانی با ذخایر پورفیری کلاسیک در دنیا ندارد.

دمای همگن‌شدن نسبتاً پایین در میان‌بارهای سیال موجود در رگه‌های QP و QM به‌ویژه در میان‌بارهای نوع LV، ممکن است ناشی از حضور میان‌بارهای ثانویه باشد. تشخیص دقیق میان‌بارهای اولیه و اندازه‌گیری آنها به دلیل پیچیده بودن وقایع رگه- رگه‌ها و دگرسانیهایی مختلف تشکیل شده در آنها یکی از مسائل مهم در کانسارهای گرمایی چندمرحله ای است.

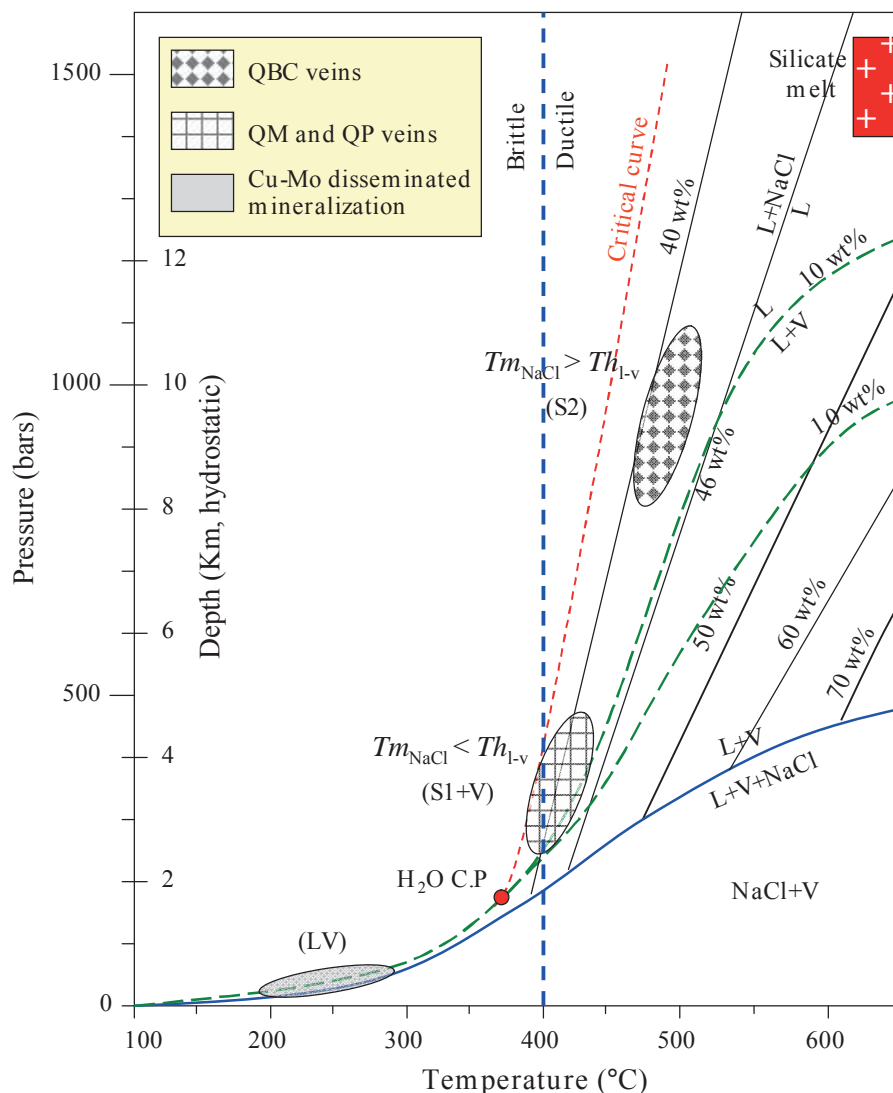
و دارای ارتباط زمانی با میان‌بارهای نوع V هستند. بررسی‌های میکروترمومتری نشان‌دهنده آن است که میان‌بارهای نوع V اغلب در دمای نسبتاً بالای 430°C همگن‌شده است؛ اما به دلیل وجود مقادیر پایین فاز مایع، تشخیص تغییر و تحولات فازی به‌منظور تعیین دمای همگن‌شدن سیال به سختی انجام گرفته و ممکن است دارای خطایی بالا نسبت به مقادیر واقعی باشد (Bodnar, 1995). رخداد میان‌بارهای LV با دمای تقریبی بین 220°C تا 340°C و دامنه شوری نسبتاً وسیع ۲ تا ۱۶ درصد معادل نمک طعام که پس از میان‌بارهای اشباع از نمک نوع S نیز به دام افتاده‌اند، بیانگر آن است که در مراحل پایانی محلول‌های گرمایی- ماگمایی نقش کمتری داشته و تأثیر آب‌های جوی در این شرایط بیشتر بوده است (شکل‌های ۱۲ و ۱۴).

ثبت وقایع تحولات سیال توسط میان‌بارهای سیال که در بالا به آنها اشاره شد، نشان از رخداد یک روند تدریجی از کاهش فشار و شوری با تغییرات نسبتاً پیچیده دمایی طی گذر زمان برای سیال مسوول کانه‌ساز سولفیدی در منطقه سنج دارد. بر این اساس، سیال آبگین انحلال یافته از ماگما در فشار بالا (بیش از ۸۰۰ بار) دارای یک دمای بالا (بیش از 350°C) و شوری بالا (تقریباً ۴۰ درصد معادل نمک طعام) است که میان‌بارهای نوع S2 با فاز نهایی همگن‌شدن هالیت ($\text{Th}_{\text{I-V}} > \text{Tm}_{\text{NaCl}}$) محصول آن است. این نوع سیالات در شرایط دینامیکی اولیه دما بالا در یک فضای شکل‌پذیر- شکننا تشکیل شده که در نتیجه آن ریزشکستگی‌های ناشی از فشار بخار در شرایط نزدیک به فشار لیتواستاتیک (عمق تقریبی ۳ تا ۴ کیلومتر) در بخش‌های بالایی توده نفوذی تشکیل شده است. پس از آن به تدریج با کاهش فشار و انتقال شرایط لیتواستاتیک به هیدرواستاتیک (عمق ۱ تا ۲ کیلومتر) شکستگی‌های تشکیل شده ناشی از آزادشدن فشار توسط رگه- رگه‌چه‌های سولفیدی QM و QP بر روی رگه‌های QBC مرحله نخست شکل گرفته است. در شرایط فشار کمتر از ۳۰۰ بار (عمق کمتر از ۱ کیلومتر) همراه با کاهش ناگهانی فشار، هم‌زمان با رخداد جوشش دمای سیال نیز به تدریج کاهش یافته و سیستم کانی‌سازی انتشاری مس- مولیبدن همراه با مجموعه کوارتز- کائولینیت (الییت) در منطقه رخ داده است. دمای همگن‌شدن سیال از بیش از 350°C در میان‌بارهای نوع S2 در رگه‌های QBC تا دمای تقریبی ۲۲۰ تا 340°C در رگه‌های استوک‌ورک QM و QP و متعاقباً کانی‌سازی انتشاری مس- مولیبدن (ناشی از رخداد جوشش و فرار بخش زیادی از گازها از سیستم) به وقوع

گرمایی چندمرحله‌ای؛ ۳) رخداد بخش عمده کانی‌سازی مس-مولیبدن همراه با مجموعه دگرسانی پتاسیک-فیلیک؛ ۴) رخداد کانی‌سازی همراه با توده نفوذی کلسیمی-قلیایی تا غنی از پتاسیم و ۵) عمق کم تا متوسط کانی‌سازی (کمتر از ۳ کیلومتر) و نظایر آن از جمله شواهدی است که دارای تشابه با سیستم‌های مس-مولیبدن پورفیری کلسیمی-قلیایی است.

همان‌طور که در بالا به آن اشاره شد، کاهش ناگهانی دما و شوری سیال در سیستم گرمایی سنج، به دلیل اختلاط با آبهای جوی است. کاهش ناگهانی دما و شوری موجب رخداد دگرسانی فیلیک همراه با کانی‌سازی مس-مولیبدن شده و رگه‌های کوارتز استوکورک QBC طی مراحل اول احتمالاً مرتبط با یک سیستم پورفیری نابالغ است.

علاوه بر این، برخی از ویژگیهای مشاهده شده در کانسار سنج شامل: ۱) کنترل‌کننده‌های ساختاری کانی‌سازی؛ ۲) رخدادهای



شکل ۱۴. نمودار دما-فشار در سیستم $H_2O-NaCl$ به منظور تعیین سازوکار کانی‌سازی در منطقه سنج با استفاده از میکروترمومتری میان‌بارهای نوع LV، S و V. منحنیهای سیال با استفاده از بررسیهای بودنار، کلاین و بودنار (Bodnar, 1994; Cline and Bodnar, 1994) رسم شده است. برای توضیحات بیشتر به متن مراجعه شود.

Fig. 14. Pressure-temperature diagram for the system $NaCl-H_2O$ showing the proposed mechanism of mineralization at Senj deposit for the formation of the LV-, V-, and S-type inclusions. Liquidus curves modified after Bodnar (1994) and Cline and Bodnar (1994) (see text).

نتیجه‌گیری

با توجه به مباحث گفته شده، چنین به نظر می‌رسد که دست‌کم سه مرحله تحول سیال کانه‌ساز در کانسار سنج موجب تشکیل کانی‌سازی مس-مولیبدن و دگرسانی‌های مرتبط بوده است که این مراحل به شرح زیر است:

(۱) **رخداد سیال ماگمایی-گرمایی**: سیال اولیه عامل کانی‌سازی طی این مرحله در میان‌بارهای نوع S2 به تشکیل رگه‌های QBC در میزبان دگرسانی پتاسیک-فیلیک منجر شده است. طی این مرحله سیال انحلال یافته‌ای که از ماگمای سیلیکاته منشأ گرفته است، تحت تأثیر فشارهای لیتواستاتیک در یک محیط شکل‌پذیر-شکنا در شکستگی‌های سنگهای اولیه به کانی‌سازی رگه‌ای کوارتز-بیوتیت-کالکوپیریت (QBC) منجر شده است.

(۲) **کاهش فشار و رخداد جوشش**: تحول سیال بعدی هم‌زمان با کاهش فشار (بین ۲۵۰ تا ۵۰۰ بار) و کاهش تدریجی دما (کمتر از ۳۰۰°C و شوری ۱۰ درصد) همراه با رخداد جوشش و سرد شدن سیال، به تغییر وضعیت از شرایط لیتواستاتیک به هیدرواستاتیک منجر شده است. طی این مرحله رگه‌های QM و

QP همراه با مجموعه کانی‌های دگرسان سریسیت-کوارتز-پیریت تشکیل شده است.

(۳) **اختلاط با آبهای جوی**: در فشار کمتر از ۱۰۰ بار و شوری کمتر از ۱۰ درصد، سیال گرمایی-ماگمایی توسط آبهای جوی دچار اختلاط شده و با توجه به نبود وجود فضای خالی و شکستگی‌های مناسب، کانی‌سازی انتشاری کالکوپیریت و مولیبدنیت همراه با مجموعه کانی‌های کائولینیت-ایلیت-کوارتز تشکیل شده است.

قدردانی

بدین‌وسیله از مدیریت محترم شرکت مهندسی مشاور پیچاب کاوش که اطلاعات حفاری و دسترسی به مغزه‌ها را فراهم کردند و نیز حمایت‌های زیادی در انجام این پژوهش برعهده داشتند، صمیمانه قدردانی می‌شود. همچنین نویسندگان این پژوهش، از داوران محترم مجله زمین‌شناسی اقتصادی نیز سپاس‌گزاری می‌نمایند.

References

- Allan, M.M., Morrison, G.W. and Yardley, B.W.D., 2011. Physicochemical Evolution of a Porphyry-Breccia System: A Laser Ablation ICP-MS Study of Fluid Inclusions in the Mount Leyshon Au Deposit, Queensland, Australia. *Economic Geology*, 106(3): 413-436.
- Amini, B., 1993. Geological map of Tehran scale 1:100,000. Geological survey of Iran.
- Audé'tat, A., Gunther, D. and Heinrich, C.A., 2000. Causes for large-scale metal zonation around mineralized plutons: fluid inclusion LA-ICP-MS evidence from the Mole Granite, Australia. *Economic Geology*, 95(8): 1563-1581.
- Bakker, R.J., 2003. Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modeling bulk fluid properties. *Chemical Geology*, 194(1-3): 3-23.
- Bakker, R.J., Baumgartner, M. and Doppler, G., 2012. Diffusion of water through quartz: a fluid inclusion study. Goldschmidt conference, Montréal Convection Center, Montréal, Canada.
- Beane, R.E., 1983. The magmatic-meteoritic transition. Geothermal Resources Council, California, Special Report 13, 381 pp.
- Bodnar, R.J., 1994. Synthetic fluid inclusions: XII: the system H₂O-NaCl. Experimental determination of the halite liquidus and isochores for a 40 wt.% NaCl solution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(3): 1053-1063.
- Bodnar, R.J., 1995. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683-684.
- Bodnar, R.J. and Beane, R.E., 1980. Temporal and spatial variations in hydrothermal fluid characteristics during vein filling in pre-ore cover overlying deeply buried porphyry copper-type mineralization at Red Mountain, Arizona. *Economic Geology*, 75(6): 876-893.
- Bodnar, R.J., Burnham, C.W. and Sterner, S.M., 1985. Synthetic fluid inclusions in natural quartz. III. Determination of phase equilibrium properties in the system H₂O-NaCl to 1000°C and 1500 bars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(9): 1861-1873.
- Bodnar, R.J., Sterner, S.M. and Hall, D.L., 1989. SALTY: a FORTRAN program to calculate compositions of fluid inclusions in the system NaCl-KCl-H₂O. *Computer Geoscience*, 15(1): 19-41.
- Brathwaite, R.L., Simpson, M.P., Faure, K. and Skinner, D.N.B., 2001. Telescoped porphyry Cu-Mo-Au mineralisation, advanced argillic al-

- teration and quartz-sulfide-gold-anhydrite veins in the Thames District, New Zealand. *Miner Deposita*, 36(7): 623–640.
- Brown, P.E., 1989. Flnacor: a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. *American Mineralogist*, 74(11-12): 1390–1393.
- Cao, Y., Du, Y., Gao, F., Hu, L., Xin, F. and Pang, Z. 2012. Origin and evolution of hydrothermal fluids in the Taochong iron deposit, Middle–Lower Yangtze Valley, Eastern China: Evidence from microthermometric and stable isotope analyses of fluid inclusions. *Ore Geology Reviews*, 48(4): 225–238.
- Cline, J. and Bodnar, R.J., 1994. Direct evolution of brine from a crystallizing silicic melt at the Questa, New Mexico, Molybdenum deposit. *Economic Geology*, 89(8): 1780–1802.
- Cloke, P.L. and Kesler, S.E., 1979. The halite trend in hydrothermal solutions. *Economic Geology*, 74(8): 1823–1831.
- Cox, D.P. and Singer, D.A., 1986. Mineral deposit models. United State Geological Survey, Bulletin 1693, 400 pp.
- Dedual, E., 1967. Zur Geologie des mittleren und Interen Karaj Tales zentral Elburz (Iran). M.Sc. Thesis Mitt Geolical institute, Eidgen Technology Hochsch University, Zurrich, 125 pp.
- Farahkhah, N., 2009. Petrology and geochemistry of igneous rocks in NE Baraghan with special view on molybdenum mineralization and application of GIS for geological unit enhancement. M.Sc. Thesis. Kharazmi university, Tehran, Iran, 173 pp.
- Fournier, R.O., 1999. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic–epithermal environment. *Economic Geology*, 94(8): 1193–1211.
- Haas, J.L., 1971. The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Economic Geology*, 66(6): 940-946.
- Hall, D.L., Sternert, S.M. and Bodnar, R.J., 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O. *Economic Geology*, 83(1): 197-202.
- Harris, A.C., Golding, S.D. and White, N.C, 2005. Bajo de la Alumbrera copper-gold deposit: Stable isotope evidence for a porphyry-related hydrothermal system dominated by magmatic aqueous fluids. *Economic Geology*, 100(5): 63–86.
- Hayatolgheibi, M., 2011. Mineralogy, geochemistry and fluid inclusion of Cu-Mo Senj deposit (north of Karaj). M.Sc. Thesis. Kharazmi university, Tehran, Iran, 170 pp.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. and Reynolds, T.J., 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, 93(4): 374–404.
- Hedenquist, J.W. and Lowenstern, J.B., 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370(6490): 519–527.
- Heinrich, C.A., Günther, D., Audétat, A., Ulrich, T. and Frischknecht, R., 1999. Metal fractionation between magmatic brine and vapor, determined by micro-analysis of fluid inclusions. *Geology*, 27(7): 755–758.
- Hezarkhani, A. and Williams-Jones, A., 1998. Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit, Iran: evidence from fluid inclusion and stable isotope. *Economic Geology*, 93(5): 651–670.
- Iran Minerals Production and Supply Corporation (IMPASCO), 2009. Report on drilling operation in Senj polymetallic deposit (Tehran province). Ministry of Mines and Metals, Republic Islamic of Iran (unpublished), 440 pp. (in Persian)
- Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre, J., Le Bas, M.J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Woolley, A.R. and Zanettin, B., 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 193 pp.
- Liu, W. and McPhail, D.C., 2005. Thermodynamic properties of copper chloride complexes and copper transport in magmatic-hydrothermal solutions. *Chemical Geology*, 221(1-2): 21–39.
- Mahdzade, S., 1995. Geological map of Karaj scale 1:100,000. Geological survey of Iran.
- Momenzade, M. and Rachidnejad-Omran, N., 1985. Brief report on Cu-Mo Senj abonden mine. Geological Survey of Iran, Tehran, Report 3, 55 pp.
- Norollahi, Z., 2004. Petrology and geochemistry of igneous rocks of the Karaj basement. M.Sc. Thesis. Tehran university, Tehran, Iran, 180 pp.
- Pearce, J.A. and Can, J.R., 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace elements analysis. *Earth and Planetary Science Letter*, 19(2): 290-300.
- Pichab Kavosh, 2007. Detail exploration report of Senj Mo mine. Ministry of Mines and Metals, Republic Islamic of Iran (unpublished), 201 pp. (in Persian)

- Ramboz, C., Pichavant, M. and Weisbrod, A., 1982. Fluid immiscibility in natural processes: use and misuse of fluid inclusion data. II. Interpretation of fluid inclusion data in terms of immiscibility. *Chemical Geology*, 37(6): 29–48.
- Redmond, P.B., Einaudi, M.T., Inan, E.E., Landtwing, M.R. and Heinrich, C.A., 2004. Copper deposition by fluid cooling in intrusion-centered systems: New insights from the Bingham porphyry ore deposit, Utah. *Geology*, 32(3): 217–220.
- Richards, J.P., 2011. Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins. *Ore Geology Reviews*, 40(1): 1–26.
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. Review in Mineralogy, Mineralogical Society of America, United State of America, 646 pp.
- Roedder, E. and Bodnar, R.J., 1980. Geological pressure determinations from fluid inclusion studies. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 8(1): 263–301.
- Rusk, B., Reed, M.H. and Dilles, J.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.
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41.
- 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. *Geochim Cosmochim Acta*, 52(2): 989–1005.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A.D. Saunders and M.J. Norrey (Editors), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, pp. 313–345.
- Ulrich, T., Günthür, D. and Heinrich, C.A., 2001. The evolution of a porphyry Cu–Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions: Bajo de la Alumbrera, Argentina. *Economic Geology*, 96(3): 1743–1774.
- Ulrich, T. and Heinrich, C.A., 2001. Geology and alteration geochemistry of the porphyry Cu–Au deposit at Bajo de la Alumbrera, Argentina. *Economic Geology*, 96(8): 1719–1742.
- Valizade, M., 1987. Petrological study of igneous rocks of the Karaj dam basement. *Basic science Journal of Tehran University*, 16(2): 5–28.
- Valizade, M. and Abdollahi, H.R., Sadeghian, M., 2008. Geological investigation of main intrusions of the central Alborz. *Journal of Geoscience*, 67(17): 182–197.
- Van Den Kerkhof, A.M. and Hein, U.F., 2001. Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 55(1–4): 27–47.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95: 185–187.
- Williams, P.J., Kendrick, M.A. and Xavier, R.P., 2010. Sources of ore fluid components in IOCG deposits. In: T.M. Porter (Editor), *Hydrothermal Iron Oxide Copper–Gold and Related Deposits: A Global Perspective*. Porter GeoConsultancy Publishing, Adelaide, Australia, pp. 107–116.
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20(5): 325–343.



Pressure-temperature condition and hydrothermal-magmatic fluid evolution of the Cu-Mo Senj deposit, Central Alborz: fluid inclusion evidence

Ebrahim Tale Fazel^{1*}, Behzad Mehrabi², Hassan Zamanian³ and Masoumeh Hayatalgheybi³

1) Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2) Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

3) Department of Geology, Faculty of Sciences, Lorestan University, Khorram abad, Iran

Submitted: July 02, 2014

Accepted: Sept. 30, 2015

Keywords: Cu-Mo mineralization, fluid inclusions, ore-forming fluid evolution, Senj deposit, Central Alborz

Introduction

The Senj deposit has significant potential for different types of mineralization, particularly porphyry-like Cu deposits, associated with subduction-related Eocene–Oligocene calc-alkaline porphyritic volcano-plutonic rocks. The study of fluid inclusions in hydrothermal ore deposits aims to identify and characterize the pressure, temperature, volume and fluid composition, (PTX) conditions of fluids under which they were trapped (Heinrich et al., 1999; Ulrich and Heinrich, 2001; Redmond et al., 2004). Different characteristics of the deposit such as porphyritic nature, alteration assemblage and the quartz-sulfide veins of the stockwork were poorly known. In this approach on the basis of alterations, vein cutting relationship and field distribution of fluid inclusions, the physical and chemical evolution of the hydrothermal system forming the porphyry Cu-Mo (\pm Au-Ag) deposit in Senj is reconstructed.

Materials and Methods

Over 1000 m of drill core was logged at a scale of 1:1000 by Pichab Kavosh Co. and samples containing various vein and alteration types from different depths were collected for laboratory analyses. A total of 14 samples collected from the altered and least altered igneous rocks in the Senj deposit were analyzed for their major oxide concentrations by X-ray fluorescence in the SGS Mineral Services (Toronto, Canada). The detection limit for major oxide analysis is 0.01%. Trace and rare earth elements (REE) were analyzed using inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS), in the commercial laboratory of SGS

Mineral Services. The analytical error for most elements is less than 2%. The detection limit for trace elements and REEs analysis is 0.01 to 0.1 ppm. Fluid inclusion microthermometry was conducted using a Linkam THMS600 heating–freezing stage (-190 °C to $+600$ °C) mounted on a ZEISS Axioplan2 microscope in the fluid inclusion laboratory of the Iranian Mineral Processing Research Center (Karaj, Iran).

Results

The Cu-Mo Senj deposit covering an area about 5 km² is located in the central part of the Alborz Magmatic Arc (AMA). The Nb/Y versus Zr/TiO₂ diagram (after Winchester and Floyd, 1977) illustrates a typical trend for the magmas in the Senj magmatic area—starting from basaltic and evolving to dacite/rhyodacitic compositions, with few data plotting in the alkali basalt field. Most of the igneous rocks plot within the medium- and high-K fields in the K₂O versus SiO₂ diagram. The igneous rocks from the Senj area define a typical high-K calc-alkaline on SiO₂ versus K₂O diagram (Le Maitre et al., 1989). All studied rocks show similar incompatible trace element patterns with an enrichment of large ion lithophile elements (LILE: K, Rb, Ba, Th) and depletion of high field strength elements (HFSE: Nb and Ti), which are typical features of magmas from convergent margin tectonic settings (Pearce and Can, 1973). At least three veining stages namely QBC, QM, and QP which are related to alteration and mineralization are distinguished at the Senj mineralized area. Three distinct alteration assemblages including K-feldspar-biotite-sericite-quartz, quartz-sericite-K-feldspar-

pyrite, and K-feldspar-biotite-sericite-quartz, are distinguishable with these veins. About 80 % of the copper at Senj is associated with the early QBC-stage veins, with another 5 to 15 % in the QM- and QP-stage veins. About 70 % of the molybdenite occur in QM veins.

Discussion

Fluid inclusion distribution, fluid chemistry, and homogenization behavior document that S2-type fluids are samples of magma-derived aqueous-saline fluids characterized by high salinity and temperature, and high Cu content. Such parental fluids scavenged Cu and Mo from the melt below and transported them to the hydrothermal system above. The increased abundance of S- and LV-types inclusion coinciding with the highest grade Cu mineralization (early QBC-stage veins) at the Senj deposit suggests that brine-vapor unmixing and phase separation plays an important role in Cu-ore precipitation and alteration zonation. In addition to unmixing, cooling and water-rock interaction also played important roles in chalcopyrite precipitation at the Senj deposit.

Compositions, deposit-scale distribution, and trapping conditions of fluid inclusions can be explained by the continued influx of a parental high salinity magmatic hydrothermal fluid, with no significant change in the bulk composition of the input fluid over the integrated lifetime of ore metal precipitation and vein formation. Fluid inclusion evidence and vein-cutting relationships indicate that molybdenum mineralization (QM vein) occurred at moderate temperatures coinciding with phyllic alteration, rather than from later, lower temperature fluids. Furthermore, early fluids decompressed rapidly relative to cooling, forming quartz-stockwork veins with K-silicate alteration at depth and QP veins at shallower levels in the Senj deposit. Later, as the hydrothermal system waned, the rate of

decompression relative to fluid cooling slowed, causing the fluid to remain above its solvus, forming barren quartz-dominated veins with quartz-kaolinite±illite alteration which overprint much of the deposit.

References

- Heinrich, C.A., Günther, D., Audétat, A., Ulrich, T. and Frischknecht, R., 1999. Metal fractionation between magmatic brine and vapor, determined by micro-analysis of fluid inclusions. *Geology*, 27(7): 755–758.
- Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre, J., Le Bas, M.J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Woolley, A.R. and Zanettin, B., 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 193 pp.
- Pearce, J.A. and Can, J.R., 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace elements analysis. *Earth and Planetary Science Letter*, 19(2): 290-300.
- Redmond, P.B., Einaudi, M.T., Inan, E.E., Landtwing, M.R. and Heinrich, C.A., 2004. Copper deposition by fluid cooling in intrusion-centered systems: New insights from the Bingham porphyry ore deposit, Utah. *Geology*, 32(3): 217–220.
- Ulrich, T. and Heinrich, C.A., 2001. Geology and alteration geochemistry of the porphyry Cu–Au deposit at Bajo de la Alumbrera, Argentina. *Economic Geology*, 96(8): 1719–1742.
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20(5): 325-343.