Journal of Economic Geology Vol. 8, No. 2 (2016-2017) ISSN 2008-7306



مجله زمین شناسی اقتصادی جلد ۸، شماره ۲ (سال ۱۳۹۵) صفحات ۴۳۱ تا ۴۵۵

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

ابراهيم طالع فاضل"ً، بهزاد مهرابي'، حسن زمانيان" و معصومه حيات الغيبي"

۱) گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران ۲) گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران ۳) گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۰۸، پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۰۸

چکیدہ

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- فیلیک 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 (2°۴۵۰<) و شوری بیش از .e Macl eq است. طبق شواهد، میانبارهای اشاع از نمک اولیه در رگههای 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 MQ و QP با دمای کمتر از ک°۳۰۰ و شوری تقریبی Macl eq. ۱۰، شکل گرفتهاند. در مراحل پایانی کانیسازی، رخداد میانبارهای غنی از مایع با دما و شوری پایین نشاندهنده رقیق دگی 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

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 می شود. منشأ سیال، نحوه مهاجرت، تبادلات سیال - سنگ، ویژگیهای فیزیکوشیمیایی سیال و نهشت فلزات در سامانههای گرمابی - ماگمایی مورد توجه بروهشگران مختلفی بوده است (Ulrich and Heinrich, 2001 Rusk et al., 2004 بالانجام می در الا ایمان بالات گرمابی در موده این در سامانههای گرمابی - ماگمایی مورد توجه بروهشگران مختلفی بوده است (Ulrich and Heinrich, 2001 Rusk et al., 2005 بالن and McPhail, 2005

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 ۱/۰ درصد مولیبدن است. زمین شناسی، کانهزایی و پترولوژی این منطقه توسط سازمانها و پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است که از جمله آنها میتوان به Pichab ،Norollahi, 2004، Valizade, 1987، بررسیهای (Norollahi, 2007) Hayatolgheibi, اشاره کرد. فعالیتهای معدن کاری نیز بهمنظور استخراج 2011)، اشاره کرد. فعالیتهای معدن کاری نیز بهمنظور استخراج مولیبدن نخستین بار در سال ۱۳۴۷ با استفاده از حفر ۶ تونل (شامل ۲ تونل ریل گذاری شده)، چندین ترانشه و گزنگ انجام

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

كاربرد مواد معدني ايران (IMPASCO, 2009)، بهعنوان

^{1.} PTX

^{2.} Hypersaline

477

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 یایین 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 زيتوني با درون لايههاي توف بلورين، ٣) عضو شـيل آسـارا (١٧٠ 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 و سنگ آهک کندوان (۸۵۰ متر) که همارز سازند قرمز پایینی و قـم بوده و بالاترین عضو سازند کرج در منطقه است. در کانسار سنج عضو توف بالایی متشکل از واحدهای توف تا آندزیت پورفیری بهعنوان میزبان کانی سازی در منطقه هستند (شکل ۱- A). تودههای نفوذی پراکنده در البرز مرکزی با سـن ائوسـن پسـین-الیگوسن (۲۳ تـ ۳۷ میلیون سال پیش) دارای گسترهای از سمنان تا قزوین هستند که با ابعاد بزرگ تـا کوچـک و شـکلهای 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 می توان گابروی مبارکآباد، گرانودیوریت قصر فیروزه، سیل (لوپولیت) نفوذی کرج، مونزوگرانیت علم کوه، مونزونیتهای شمال و جنوب طالقان و تودههای گرانیتوئیدی طارم سفلی را نام برد. گسلها و چین خورد گیهای ناحیه ای در محدوده البرز دارای راستای غرب-شمالغرب و شرق- شمال شرق 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 کانی سازی در منطقه سنج شناخته می شود که به موازات ناودیس آدران با راستای غرب- شمالغرب در میان واحدهای سنگی آذرآواری سازند کرج جای گزین شده است (شکل B-۱). بر اساس پژوهش ولييزاده (Valizade, 1987)، تركيب سنگشناسی سیل نفوذی کرج از حاشیه به سمت مرکز دارای چهار بخش شامل: ۱) حاشیه انجماد سریع (گابرو پورفیری)، ۲)

شده است که بهعنوان قدیمی ترین معدن منطقه به شمار می رود .(Momenzade and Rachidnejad-Omran, 1985) بررسیهای میانبارهای سیال در کانسار مس- مولیبدن (± نقـره-طلا) سنج واقع در كمان 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 شکل گیری 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 امتـزاج سـیال ٔ بـه درسـتی مشخص نیست. علاوه بر ایـن، نقـش فرآینـدهایی از قبیـل رخداد جوشش، انتقال فلز توسط سیال غنی از گاز، کاهش تـدریجی یا ناگهانی فشار، عملکرد آبهای جوی و نقش پدیده اختلاط در شکل گیری 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 پیبرد. لازم به ذکر است که این مفاهیم در زمینهای از تحولات که این نتایج نقش مهمی در دستیابی به تاریخچه شکلگیری که این نتایج نقش مهمی در دستیابی به تاریخچه شکلگیری سولفیدی استوکورک، دگرسانی سنگ دیواره و نهشت فلزات در منطقه مورد بررسی دارد.

زمينشناسى

کانسار چندفلزی سنج به وسعت تقریبی ۳۰ کیلومتر مربع در ارتفاعات شمال کرج (شمالغرب تهران) و کوههای برغان با مختصات جغرافیایی '۵۰°۵۱ تا '۵۱°۲۷ طول شرقی و '۵۱°۳۶ تا '۶۰°۳۶ عرض شمالی واقع است. منطقه مورد بررسی در برگههای زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تهران و کرج قرار می گیرد که بررسیهای زمین شناسی منطقه بهتر تیب توسط امینی (Amini, بررسیهای زمین شناسی منطقه بهتر تیب توسط امینی (Mahdizadeh, 1995)

^{1.} Fluid Immiscibility

^{2.} Boiling

جلد ۸، شماره ۲ (سال ۱۳۹۵) تعیین شرایط فشار – دما و تحول سیال گرمایی – ماگمایی در کانسار مس – مولیبدن سنج ...

بخش گابرویی (هیالومیکرولیتیک پورفیری)، ۳) بخش دیوریتی (گرانولار) و ۴) بخش مونزونیتی (گرانولار تا افیتیک) است (شکل (A-۱). 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 محدودی 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 ممالی 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- Δ).

روش مطالعه

بررسیهای صحرایی و تهیه نقشه

برنامه ریزی 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 مغزه گیری در مقیاس ناز ۱۰۰۰، توسط شرکتهای یادشده، انجام شد که پس از نمونه برداری متریک به منظور انجام تجزیه های شیمیایی مرتبط، نمونه ها به آزمایشگاه ارسال شده است. نمونه برداریها با در نظر گرفتن عمق برداشت، شماره و محل گمانه برای بررسیهای دگرسانی، کانی شناسی و ژئوشیمی و مطالعات میان بارهای سیال مونزونیتی کرج و سنگهای آذرآواری منطقه انجام شده که اغلب منطبق با تمرکز کانی سازی در منطقه است (شکل ۱–B). عمق منطبق با تمرکز کانی سازی در منطقه است (شکل ۱–B). عمق منطبق اغلب بین ۸۰ تا ۱۰۰ متر در تغییر بوده و حفر گمانه ها (شکل ۱–B).

تجزيه شيميايي 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 تورنتو، انجام شد. برای افزایش دقت و درستی آزمایش

XRF، نمونهها بهروش قرص ذوب مورد آمادهسازی قرار گرفتند و مقادیر LOI نیےز با استفادہ از کورہ حرارتی Nobertherm در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران بهدست 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 تجزیے قرار گرفت کے از این دادہ ان نیز برای رسم نیمرخ زمین شناسی استفاده شده است. حد حساسیت دستگاه -ICP MS بین ۰/۰۱ تا ۰/۱ گرم در تن (ppm) بوده و برای اطمینان از ذوب کامل عناصر قلیایی از روش آمادهسازی ذوب قلیایی شامل مخلوط كمك ذوبهاى متابورات ليتيوم (LiM-LiBO2) و تترابورات ليتيوم (LiT-Li₂B4O7) استفاده شده است. همچنين برای کنترل نتایج دادهها، تعدادی از نمونهها به صورت تصادفی بهروش 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 تعـداد ۱۰ نمونه پودر تهیه شده از سنگ کل از دگرسانیهای مختلف منطقه توسط تجزیه دستگاهی پراش پرتو ایکس در بخش کانی شناسی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران (IMPRC) مورد تجزیه قرار گرفتند.

مطالعات میانبارهای سیال

بررسیهای پترو گرافی و میکروترمومتری میانبارهای سیال توسط نمونهبرداری از تعداد ۴ گمانه حفاری با شمارههای IBH-1 ها-BH 2. 2-BH1 و BH4 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 شده است. تعداد ۹ مقطع دوبر صیقل با ضخامت تقریبی ۱۰۰ تا از این میان تعداد ۹ مقطع دوبر صیقل با ضخامت تقریبی ۲۰۰ تا با در نظر گرفتن نسلهای مختلف و موقعیت آنها در توالی پاراژنتیک کانسار، در دانشگاه خوارزمی تهران تهیه شد. بیش از 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 مانبارهای سیال با استفاده از میکروسکپ پلاریزان زایس مدل Axioplan و سیستم سردایش – گرمایش

^{1.} ICP-MS

^{2.} XRF

است.

مجله زمينشناسي اقتصادى

اندازه گیری طے فرآیند سرمایش در حدود °۰/۱۰± و طے

عملیات گرمایش C°t± است. میزان عملیات سرد کردن و گرم

کردن نیز بهطور تقریبی بین ۲ تا ۲°۸ در دقیقه متغیر بوده

لینکام مدل THM600 با کنترل کننده حرارتی TMS94 و سردکننده LNP، در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شد. گستره تغییرات دمایی در این دستگاه بین ۱۹۰- تا ۲۰°۲۰+ بوده که ترموکوپل دستگاه توسط میانبارهای سنتزی در دماهای ۲°۵۶/۶۵-، صفر و ۲۵۲/۴/۱۲ 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 شمالشرق- جنوبغرب (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.

جلد ۸، شماره ۲ (سال ۱۳۹۵)

روشهای مورد استفاده در مطالعات میانبارهای سیال در میانبارهای آبگین (Aquoeus) دو فازی و سه فازی همراه با فاز جامد، دمای یوتکتیک (Te)، دمای همگن شدن نهایی (Th_{total}) و فاز بخار (Th_{I-v})، دمای انحال هالیت (Tm_{NaCl})، دمای انحلال سیلویت (Tm_{KCl}) و دمای ذوب نهایی بخ (Tm_{ice}) م ورد اندازه گیری قرار گرفت. تعبیر و تفسیر داده های میکروترمومتری شامل ترکیب میانبار، چگالی کل و فشار با استفاده از نرمافزارهای FLINCOR نسخه (Brown, 1989) و Bakker, 2003) FLUIDS) مورد اندازه گیری قرار گرفت. محاسبه شوری در سیالات آبگین دو فازی مایع+بخار بدون فاز جامد در سیستم H₂O-NaCl با دمای یوتکتیک بیشتر از ۲۱/۲°C - با استفاده از دمای نهایی ذوب یخ (Tm_{ice}) و بهره گیری از معادله هال و همکاران (Hall et al., 1988) و مقایسه با روش استرنر و همکاران (Sterner et al., 1988) انجام شد. محاسبه شوری در سیالات حاوی فاز جامد هالیت±سیلویت نیز با استفاده از دمای ذوب هالیت (Tm_{NaCl}) و بهره گیری از نرمافزار Bodnar et al., 1989) SALTY) و مقایسه با روش بیکر و همکاران (Bakker et al., 2012)، انجام شد. لازم به ذکر است بهدلیل سهم ناچیز فاز مایع در میانبارهای غنی از فاز بخار (با درجه پرشدگی کمتر از ۳۰ درصد حجمی)، اندازه گیری میکروترمومتری در این گروه به سختی انجام شد.

ژئوشیمی سیل نفوذی سنج

بر اساس پژوهش ولیزاده و همکاران (Valizade et al., 2008)، ماهیت اغلب تودههای نفوذی پراکنده در البرز مرکزی از نوع مگنتیتی متعلق به دسته I بوده که از لحاظ ژئوشیمیایی جزو دستههای ماگمایی کلسیمی- قلیایی تا قلیایی هستند. همچنین این تودهها از لحاظ پتروژنز در جایگاه گرانیتوئیدهای کمانقارهای (CAG) مرتبط با پهنههای فرورانش قرار می گیرند که شامل طیفی از ماگمای مرتبط با جزایر قوسی (IAG) تا محیطهای برخورد قرارهای (CCG) هستند (شکل ۲-A و B). رخداد نفوذیهای متنوع در این منطقه را میتوان حاصل تفریق یک ماگمای بازالتی کلسیمی- قلیایی منشأ گرفته از گوشته بالایی غنی از سیال بهشمار آورد که رخداد کانی تیتان-اوژیت در اغلب این تودهها نشانهای از یک ماگمای بازالتی قلیایی است این اودهان (Richards, 2011). ذخایر فلزی و غیرفلزی متعددی با ماهیت (رگهای، افشان، جانشینی، تودهای و عدسیشکل از انواع اسکارن،

.(Williams et al., 2010 Richards, 2011) با استفاده از عناصر کمیاب Zr ،Y ،Nb و Ti و به کارگیری آنها در نمودار دوتايي Nb/Y در مقابل Zr/TiO₂) نمودار دوتايي Floyd, 1977)، سیل نفوذی منطقه سنج در طیفی از سنگهای مونزونیت، گرانودیویت، دیوریت و گابرو قرار می گیرد (شکل A-۳ SiO_2). همچنین اغلب نمونهها در نمودار دوتایی K_2O در مقابل)). (Le Maitre et al., 1989)، با محتوای پتاسیم بالا و ماهیت پتاسیمی- قلیایی مشخص می شوند (شکل B-۳). نمونه های برداشت شده از سیل نفوذی نسبت به دادههای بهدست آمده از تركيب گوشته اوليه و كندريت (, Sun and McDonough 1989) نرمالسازی شده و روند آنها در شکل ۳-C و D نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، غنی شدگی عناصر ناساز گار لیتوفیل با شعاع یونی بزرگ' از قبیل Ba ،Th ،Pb و Rb در مقابل تهیشدگی عناصر ناسازگار با شدت میدان بالا^۲ شامل Nb ،Ti و Ta (شكل C-۳) بيانگر آلايش ماگماى بازالتى اولیه توسط سنگهای پوسته قارهای زیرین است که اغلب در محیطهای مرتبط با فرورانش پوسته اقیانوسی به زیر پوسته قارهای همراه با حجم بالای سیال غنی از OH-Cl تشکیل میشود (Pearce and Cann, 1973). غنی شدگی عناصر با شعاع یونی بزرگ بهدلیل رخداد متاسوماتیزم و سیالات آزاد شده از پوسته اقیانوسی فرورو و تهیشدگی عناصر با شدت میدان بالا به دلیل میزان بالای ذوب یوسته 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 میدهد (شکل ۳-D). این نمودار نشاندهنده غنی شدگی نسبی عناصر نادر خاکی سبک (La-Eu) نسبت به عناصر نادرخاکی سنگین (Gd-Lu) است (شکل D-۳). از آنجایی که عناصر نادرخاکی سنگین طی فرآیند تفریق ماگما تمایل به باقی ماندن در مذاب باقیمانده در ماگما دارد؛ در نمودار بههنجار شده با کندریت تهی شدگی نشان می دهد. علاوه بر این، وجود حجم بالای سیال غنی از OH و رخداد دگرسانیهای ناشی از آن، موجـب افـزایش نسـبت LREE/HREE در نمودارهـای عنكبوتي خواهد شد.

پورفیری، اپیترمال، مرتبط با توده های نفوذی و ذخایر اکسید

آهن حاوی مس و طلا (IOCG) دارای قابلیت تشکیل و ارتباط

زمانی- مکانی با این محیطهای تکتونو- ماگمایی هستند

^{1.} LILE 2. HFSE



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)



شـكل ۳. نمودارهـاى پترولـوژى و پتروژنـز تودەنفـوذى منطقـه شـامل، A: نام *گـ*ذارى سـنگهاى منطقـه در نمـودار دوتـايى Nb/Y در مقابـل Zr/TiO₂ (Winchester and Floyd, 1977)، B: ماهيت پتاسيمى- قليايى و غنى از پتاسيم سيل نفوذى سنج در نمودار دوتايى SiO₂ در مقابل K₂O (Le Maitre ب (et al., 1989)، C: الگوى بههنجارشده عناصر كمياب و نادر خاكى نسبت به گوشته اوليه و D: الگوى بههنجارشده همان عناصر نسبت به كندريت

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 SiO₂ versus K₂O 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

كانىسازى

کانیسازی مـس- مولیبدن در کانسار سنج با ژئومتری عدسی،شکل تا رگهای و انتشاری (افشان) در محل همبری سیل مـونزونیتی سـنج مـوازی بـا سـنگهای آذرآورای و در میزبـان واحدهای سنگی توف تا آندزیت- توف پورفیری و حداکثر عمق ۱۲۰ متری رخ داده است (Hayatolgheibi, 2011) (شکل A-۴). ساخت و بافت کانی سازی به صورت رگه- رگهچهای (استوكورك)، انتشارى و جانشينى همراه با عناصر اصلى مـس-مولیبدن و مجموعه عناصر فرعی نقره، طلا، سرب، کبالت و نیکل مشخص می شود (شکل B-۴). کانیهای سولفیدی (کالکوپیریت، بورنيت، موليبدنيت، پيريت، كالكوسيت، كوولين و ديژنيت)، 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-Cو D). گسلهایی با درازای تقریبی ۲۰۰ تا ۵۰۰ متر، راستای -N20 40E و شیب ۵۰ تا ۸۰ درجه به سمت جنوب شرق و شمال غرب، مهمترین عناصر ساختاری منطقه هستند که عمدتاً یس از

تشکیل سیل مونزونیتی، بخشهای زیادی از واحدهای سنگی را به صورت ساختار مشابه هورست و گرابن جابه جا کرده است (شکل ۱). همزمان با جای گیری سیل نفوذی در سنگهای میزبان، گسلها و درزههای فرعی با راستای شرقی- غربی و شمال غرب-جنوب شرق ناشی از نیروهای جانبی حاصل از جای گیری تشکیل شدهاند که به عنوان کنترل کننده های کانی سازی محسوب می شوند.

کانی سازی در منطقه سنج به سه صورت ۱) کانی سازی کوار تز-سولفیدی استوکورک (متشکل از سه رگه اصلی) به عنوان غنی ترین بخش کانسنگ با متوسط عیارهای ۲/۵ درصد مس و ۲/۰ درصد مولیبدن همراه با دگرسانی پتاسیک فیلیک، ۲) کانی سازی انتشاری کالکوپیریت و مولیبدنیت با متوسط عیارهای مس ۲/۱ درصد و مولیبدن ۲۰/۰ درصد همراه با دگرسانی آرژیلیک فیلیک و ۳) کانی سازی جانشینی برون زاد 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 آذرآوری 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. علایم 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 porphyrytic tuff accompanied with tunnel 1 (T1), B: disseminated molybdenite minerlization 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)

مجله زمینشناسی اقتصادی

توالى پاراژنتيک

دگرسانی گرمابی 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 رخداده است. در اثر رخداد این دگرسانی و واکنشهای انجام شده، مگنتیت به صورت پراکنده در میزبان بیوتیت جانشین شده است (شکل -۲). کانهزایی سولفیدی در این مرحله دیده نشد.

۲) کانیسازی کوار تز – سولفیدی استوکورک همراه با دگرسانی پتاسیک – فیلیک: با حضور رگه و رگهچههای کوار تز – 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 آرژیلیک (مجموعه کائولینیت – ایلیت ± کوار تز ± 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 پروپیلیتیک (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 میکروسکپی، بافت و ساخت کانیها Fig. 5. Time stages of mineralization occurrence at Senj deposit based on microscopic and textural evidences of minerals

کانهزایی استو کورک، دست کم ۳ نوع رگ ه در منطق ه تشخیص داده شده که از قدیم به جدید شامل رگ ه کوار تز- بیو تیت-کالکوپیریت (QBC)، رگ ه کوار تز- مولیبدنیت (QM) و رگ ه کوار تز- پیریت (QP) است. برای جلو گیری از طولانی شدن مقاله،

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

جلد ۸، شماره ۲ (سال ۱۳۹۵) تعیین شرایط فشار – دما و تحول سیال گرمایی – ماگمایی در کانسار مس – مولیبدن سنج ...

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- سریسیت- پیریت (دگرسانی فیلیک) تشکیل شدهاند که مجموعه کانیهای این دو دگرسانی همراه هم دیده می شود. در حدود ۸۰ درصد کانیسازی مس متعلق به کانیسازی رگهای مرحله QBC و بین ۵ تا ۱۵ درصد دیگر در رگههای MD و QP تشکیل شده است. همچنین بیش از ۷۰ درصد کانیسازی مولیبدنیت در رگه QM رخداده است. در ادامه به شرح پتروگرافی رگهها پرداخته می شود.

رگه QBC: این دسته از رگهها با ضخامت کمتر از ۰/۵ تا حداکثر ۳ میلیمتر، حاوی ۵ تا ۱۰ درصد کانیهای کالکوپیریت و بورنیت جزو فراوانترین رگههای حاوی مس در منطقه سنج است (شکل A-۶). کانیهای سولفیدی درونزاد پیریت و گالن، بههمراه کانیهای برونزاد کالکوسیت، دیژنیت و کوولین (بهصورت جانشینی در حاشیه کانیهای درونزاد) از کانیهای فرعی رگه QBC هستند که کمتر از ۳ درصد حجم رگه را تشکیل میدهند. کوارتز و بیوتیت از کانیهای دگرسانی اصلی تشکیلدهنده رگه هستند که بیش از ۶۰ درصد حجم رگه را بهخود اختصاص دادهاند (شکل C-۶). بافت انحلال جامد با حضور تیغههای برونرستی 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 يتاسيك- فيليك (مجموعه فلدسياريتاسيم- بيوتيت- سريسيت-کوارتز) رخداده است.

رگه QM: این دسته از رگهها اغلب با ضخامت بین ۲/۲ تا ۲ میلیمتر دارای کانیهای اصلی کوارتز و مولیبدنیت است که بیش از ۸۰ درصد حجم رگه را بهخود اختصاص دادهاند. رگه QM با رخداد در شکستگیها بهصورت نامنظم و پیوسته توسط رگههای کوارتز- پیریت (QP) نسل سوم قطع شده است (شکل ۶-8). همچنین این رگه دارای کانیهای فرعی پیریت، کلسیت، گوتیت و روتیل با فراوانی تقریبی ۲۰ درصد است. با استفاده از تجزیه طیفسنج جذب اتمی بهطور متوسط ۱۵/۵ درصد وزنی رنیوم در ساختمان مولیبدنیتهای منطقه تشخیص داده شد (شکل ۶-9). رگه QM در سنگ میزبان آندزیت- توف پورفیری همراه با دگرسانی کوارتز- سریسیت- پیریت تشکیل شده است که در آن

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

رگه QP: نسل سوم رگه و رگهچههای کوارتز استوکورک در منطقه سنج با حضور رگههای QP مشخص می شود که دیگر رگههای QBC و QM را قطع کرده است. رگههای QP با ضخامت تقریبی ۵/۰ میلیمتر تا ۲ سانتیمتر قابل تشخیص است (شکل ۶-۶). کانیهای فرعی سریسیت، کالکوپیریت، بورنیت، گوتیت، کولین 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 ۲/۰ میلیمتر در ساختمان پیریتها تشخیص داده شد. رگه کوارتز-پیریت اغلب در سنگ میزبان آندزیت- توف پورفیری همراه با مجموعه در سنگ میزبان آندزیت- توف پورفیری همراه با مجموعه 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 میانیارهای 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 رگها 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، تقسیم بندی، توصیف دقیق، پتروگرافی میانبارها و بررسی نحوه توزیع آنها در بخشهای مختلف کانسنگ و به ویژه در رگه و رگچههای مختلف است. بررسی میانیارهای 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 قرار گرفتن میانیار نسبت به مرز بلور مورد بررسی و ردهبندی قرار گرفتند.

^{1.} Exsollution

بر اساس توزیع فضایی میانبارها در بلورهای کوارتز مشاهده شده، تعداد پنج موقعیت میانباری تشخیص داده شد که شامل منفرد'، مجتمع ، مرزبلور ، نرسیده به مرزبلور و قطع کننده مرزبلور ،

هستند. در این میان، سه دسته نخست بهعنوان میانبارهای اولیـه و دو دسته دیگر، به ترتیب بهعنوان میان بارهای ثانویه کاذب و ثانویه محسوب می شوند.



شکل ۶. تصویرهای نمونه دستی و میکروسکیی از بخـش کانیسازی کـوارتز- سولفیدی اسـتوکورک منطقـه شـامل، A: قطعشـدن رگـه QBC توسـط رگهچههای 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: رگ ه QBC متشکل از کوارتز، کالکوپیریت و ذرات پراکنده بیوتیت در میزبان مجموعه فلدسپار پتاسیم- بیوتیت- سریسیت، D: کانیسازی مولیبدنیت در میزبان کوارتز از رگ M و E: تصویر میکروسکیی نور بازتابی از رگه QP با حضور پیریت و کوارتز و مقادیر ناچیز کالکوپیریت. علایم اختصاری کانیها از ویتنی و اونز (Whitney and) Evans, 2010) اقتباس شده است: (Ccp= كالكويبريت، Mol=موليبدنيت، gz= كوارتز، Bt+ بيوتيت، Py= يبريت)

Fig. 6. Handspacemen and microscopic photographs showing quartz-sulfide stockwork, A: QBC veins crosscutting by QM milimetric veinlets with porphyritc tuff host, B: stockwork texture with host of porphyric andesitic-tuff and potassic-phyllic 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-feldsapr-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 4. Intra-grains 5. Trans-grains

^{2.} Cluster

^{3.} Inter-grains

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

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

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

انواع میانبارهای سیال

بر اساس بررسیهای صورت گرفته بر روی میانبارهای سیال در دمای اتاق (۲۵[°]C)، تعداد سه نوع میانبار آبگین تشخیص داده شد. این میانبارها بهترتیب فراوانی شامل میانبارهای دو فازی غنی از مایع با حجم حباب گاز کمتر از ۳۰ درصد (LV-type)، میانبارهای دو فازی غنی از بخار با حجم حباب گاز بیش از ۲۰ درصد (V-type) و میانبارهای سه فازی حاوی فاز جامد هالیت (S-type)، هستند. علاوه بر این، میانبارهای تک فازی مایع و گاز نیر در نمونهها تشخیص داده شد که مورد بررسی میکروترمومتری قرار نگرفتند. برای جلوگیری از طولانی شدن پژوهش، از حروف اختصاری این میانبارها در متن استفاده شده است. تمرکز سه نوع میانبار یادشده در کانیسازیهای کوارتز-سولفیدی استوکورک (رگههای QBC، QBC و QP) با یکدیگر متفاوت بوده که توزیع آنها در جدول ۲ آورده شده است.

میانبارهای دو فازی نوع LV

میانبارهای آبگین غنی از فاز مایع با درجه پرشدگی بین ۷۰ تا ۸۰ درصد در کانی سازی 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 بی شکل با اندازه بین ۱۰ تا ۴۰ میکرون مشاهده شدند (شکل ۷ – ۸). طی میکروترمومتری تمامی این میانبارها به فاز مایع همگن شدند ((Th_{(LV-L}). در

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 قطع کننده مرزبلور تشخیص داده شد.

میانبارهای دو فازی نوع V

میانبارهای آبگین دو فازی بخار و مایع، با درجه پرشدگی کمتر از ۲۰ درصد (حجم بخار بالای ۲۰ درصد) و فراوانی تقریبی ۳۰ درصد مشاهده شد (شکل B۷ و C). شکل ظاهری این میانبارها اغلب بهصورت کشیده و بلورمنفی بوده است که طی میکروترمومتری تمامی آنها به فاز گاز همگنشده ($(v_{L} - v_{I})$) و در کمتر از ۱۰ درصد در شرایط دمای فوق بحرانی (Th_{(VL}) و 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 ۷-C). میانبارهای نوع ۷ اغلب بهصورت متمرکز همراه با میانبارهای نوع S1 بهصورت اولیه با موقعیتهای مجتمع و درونبلوری در یک راستا دیده شدند (شکلهای ۷-E و ۸).

میانبارهای سه فازی نوع S

میانیارهای آبگین حاوی فاز جامد هالیت متشکل از فازهای مایع+ بخار+ هالیت±سیلویت±کانیهای تیره، پس از میانیارهای

LV و V با فراوانی تقریبی ۲۰ درصد در رگههای کوارتز منطقه مشاهده شدند (شکل ۲-E و F). این میانبارها با حجم حباب گاز کمتر از ۳۰ درصد، طی میکروترمومتری از طریق انحلال فاز جامد هالیت (Tm_{NaCl}) یا از بین رفتن فاز حبابگاز (۲h_L) همگی به فاز مایع همگن شدند. این میانبارها طی بررسیهای پتروگرافی بر اساس فازهای جامد موجود به سه زیرگروه زیر تقسیم شدند:

زیر گروه S1)، حاوی میانبارهای مایع+ بخار+ هالیت

زیرگروه S2)، حاوی میانبارهای مایع+ بخار+ هالیت+ سیلویت± کانی تیره

زیرگروه S3)، حاوی میانبارهای مایع+ بخار+ کانیهای شفاف غیرقابل انحلال

هالیت و سیلویت در این میانبارها توسط ساختمان مکعبی شکل و ایزوتروپی قابل تشخیص هستند. هالیت اغلب دارای بلورهای درشتتری بوده و سیلویت با گوشههای نسبتاً گردشده و ابعاد کوچکتر در دمای کمتری نسبت به هالیت ذوب شده است. علاوه بر حضور هالیت و سیلویت در میانبارهای نوع 22، کانیهای تیره از قبیل هماتیت و کالکوپیریت نیز تشخیص داده شد (شکل ۷-۲). هماتیت با بلورهای قرمزرنگ و کالکوپیریت با ظاهر گوشهدار و رنگ تیره قابل تشخیص است. در میانبارهای نوع 23 کانیهای شفاف ناشناختهای مشاهده شد که در دمای بیش از ^O ۴۵۰ نیزوتروپی، بهعنوان کانیهای سولفاته (مانند باریت) تشخیص داده شد (شکل ۴۷). میانبارهای نوع S در نمونهها اغلب بهصورت شد (شکل ۲۷). میانبارهای نوع S در نمونهها اغلب بهصورت قطعکننده مرزبلور با ماهیت ثانویه تشخیص داده شد (شکل ۸).

ارتباط زمانی میانبارها

بهدلیل توزیع تصادفی و روی هم قرار گرفتن تعداد زیادی از میانیارها در هنگام تشکیل بر روی یکدیگر، تعیین ارتباط زمانی دقیق و رابطه تقدم و تأخر میانبارها اغلب بهراحتی امکانپذیر نیست. با این وجود، میانبارهای ثانویه که در یک راستا در شکستگیهای ثانویه یک بلور قرار گرفتهاند، اغلب بهوسیله 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

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

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

ميكروترمومترى

۹ بررسیهای میکروترمومتری یا ریزدماسنجی با استفاده از تعداد ۹ مقطع دوبرصیقل کوارتز از رگههای QBC (تعداد ۴ مقطع و ۹۰ نقطه اندازه گیری)، QM (تعداد ۳ مقطع و ۱۰۰ نقطه اندازه گیری) و QP (تعداد ۲ مقطع و ۷۰ نقطه اندازه گیری) انجام شد. موقعیت نمونههای برداشت شده در جدول ۱ آورده شده است. دماهای اندازه گیری شده محدود به حد بالایی ۵۳۰ تا است. دماهای اندازه گیری شده محدود به حد بالایی ۵۳۰ تا میانبارها پس از بین رفتن حباب گاز (Th_{total}) یا انحلال فاز جامد میانبارها پس از بین رفتن حباب گاز (Th_{total}) یا انحلال فاز جامد هالیت (Tm_{Nacl}) ثبت شد. تعداد محدودی از میانبارها نیز طی فرآیند گرمایش به طور ناگهانی از بین رفته (Th_{total}) که اغلب بالاتر از دمای $2^\circ 7^\circ$ این پدیده اتفاق افتاد. نتایج میکروترمومتری میانبارها در سه رگه کانیسازی QBC، QD و QP به شرح زیر است:

(QBC) در رگەهای کوارتز- بیوتیت- کالکوپیریت (QBC) سه نوع میان بار اصلی V LV و S بهتر تیب فراوانی تشخیص داده شد. مقدار T° ثبت شده در میان بارهای LV این رگەها بین -79 شد. مقدار T° ثبت شده در میان بارهای VL این رگەها بین -79 شد. مقدار T° ثبت شده در میان بارهای LV این رگەها بین -79 شد. مقدار T° ثبت شده در میان بارهای LV این رگەها بین -79 شد. مقدار T° ثبت شده در میان بارهای LV این رگەها بین -79 شد. مقدار T° ثبت شده در میان بارهای LV این رگەها بین -79 میان بارها در سیستم -79 این محدوده دمایی گویای رخداد این میان بارها در سیستم -79 (-70) و حضور تا کین بارها در سیستم -70 (-70) و حضور -70 (-70) و حضور -70 (-70) میان بارها در سیستم -70 (-70) میان بارها در سیستم -70 (-70) میان بارها در سیستم -70 (-70) معاد -70 (-70) معان بارها در میان بارهای -70 (-70) معاد -70 (-70) (-70) معاد -70) معاد -70 (-70)

ثبت شد (شکل ۱۰-A). علاوه بر این، تعـداد ۲ میانبـار در دمـای تقریبی ۲۰۰ تا ۳۲۰°۲۲ دچار یدیده نشت یا leakage شده و

دمای همگنشدن برای آنها ثبت نشد. چگالی این میانبارهـا بـین ۰/۸۲ تا ۶/۸۴ g/cm³ است.



شکل ۷. تصویرهای پتروگرافی میانبارهای سیال از رگههای QBC، QBC و QP منطقه سنج شامل، A: میانبار نـوع LV بـا درجـه پرشـدگی بـیش 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 کانیهای شفاف ناشناخته همراه با میانبارهای نوع V با حباب گاز بزرگ، E: همراهی ردیفی از میانباره ای غنبی از گاز نوع V و S1 ،F همراهبی میانباره ای 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 inclision 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 undentified 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 crosscuted by LVtype 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 نمونـه شـماره BH-1A کـه در آن موقعیـت سـه میانبـار اصـلی شـامل LV و S نشانداده شده است. همانطور که مشاهده میشود میانبارهای نوع S2 نخستین گروه میانباری هستند که اغلـب توسـط دوگـروه میانبـار LV و V قطـع شدهاند. میانبارهای ثانویه با موقعیت قطعکننده بلوری در مراحل پایانی کلیه میانبارهای اولیه و ثانویه را قطع کرده است.

Fig. 8. Shematic 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_{I-v}) در میان بارهای نوع S1 بین ۳۲۰ تا ۳۵°۴۱۹ ثبت شد. علاوه براین در میان بارهای نوع S2 تغییرات دمای انحلال هالیت (Tm_{NaCl}) و سیلویت (Tm_{Kcl}) بهترتیب بین ۱۸۷ تا ۳۵°۳۶ و ۳۶۴ تا ۳۵°۲۴ در رگههای QBC ثبت شد که بر مبنای تغییرات Tm_{NaCl}، شوری رگههای QBC ثبت شد که بر مبنای تغییرات ۲۳_{NaCl}، شوری این میان بارها بین ۲۱/۳ تا ۲۴٬۱۰ درصد معادل نمک طعام بددست آمد. همچنین دمای همگن شدن فاز حباب گاز (Th_l) در میان بارهای نوع S2 بین ۲۴۴ تا ۲۰۰۰ ثبت شد (شکل در میان بارهای میان بارهای حاوی فاز جامد هالیت نوع S1 و S2 بین ۱/۰ تا ۲۶/۳۵ بهدست آمد.

جهت مقایسه روند انحلال فازهای جامد هالیت و سیلویت در رگه Bodnar and) NaCl-KCl-H₂O (NaCl-KCl-H₂O) از نمودار سهتایی (Beane, 1980) (Beane, 1980) استفاده شده که در شکل ۸-۱۱ نشان داده شده است. طبق بررسیهای میکروترمومتری، همگنشدن نهایی (Th_{total}) در میانبارهای نصوع S1 در بسیش از ۵۰ درصد مقدار T ثبت شده در میانبارهای نوع V این رگه نیز بین ۲۲-تا ۲۰°۲ - در تغییر است. مقدار Tmice نیز در این میانبارها بین ۲۶/۶ - تا ۲۰۸۵ - برابر شوری ۵/۷ تا ۲۰/۲ درصد معادل نمک طعام بهدست آمد. دمای همگنشدن نهایی میانبارهای غنی از گاز V در رگههای QBC بین ۳۴۷ تا ۲۰۵۵ ثبت شد (شکل ۱۰۰ - ۸). همچنین تعداد تقریبی ۱۰ میانبار طی گرمایش در دمای بیش از ۲۰°۴۰ به طور ناگهانی از بین رفتند که دمای Ta برای آنها در نظر گرفته شد. چگالی میانبارهای نوع V بین ۸/۵۸ تا ۱۰۵ - ۲۵ میانبارهای نوع V بین ۱۰۸

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 دماسنجی قرار گرفتند. تغییرات دمای انحلال هالیت (Tm_{NaCl}) در میانبارهای نوع S1 بین ۲۵۰ تا ۵۲۵۵ ثبت شد که شوری محاسبه شده برمبنای آن بین ۳۴/۶ تا ۴۲/۸ درصد معادل نمک طعام بهدست

اندازه گیریها با از بین رفتن فاز حباب گاز (Th_{Lv}) انجام شده (Th_{L-v}>Tm_{NaCl})؛ در حالی که در میان بارهای نوع S2 در بیش از ۲۰ درصد مواقع همگن شدن نهایی میان بار توسط دمای

همگنشدن فاز جامد هالیت (Tm_{NaCl}) ثبت شده است (Tm_{NaCl}>Th_{Lv}). این مطلب در نمودار دوتایی Tm_{NaCl} در مقابل Th_{Lv} قابل مشاهده است (شکل B-۱۱).



شکل ۹. نمودار ستونی فراوانی دماهای T_e و T_{mice} در میانبارهای نوع LV و V بههمراه سیستم میانبارها از (Van Den Kerkhof and Hein,) 2001). (n- تعداد نقاط اندازه گیری)

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

تا 2°۴۳۵ ثبت شد (شکل ۱۰-B). همچنین چگالی میانبارهای نوع V در این رگه نیز بین ۵۰/۰ تا ۲۷۱ پادست آمد. بر اساس پژوهشها، بین میانبارهای حاوی فاز جامد تنها میانبارهای نوع S1 در رگههای QM مشاهده شدند که مورد آزمایش دماسنجی قرار گرفتند. تغییرات Tm_{NaCl} در این میانبارها بین ۲۵۸ تا ۲°۳۲ بادست آمده که این مقدار برابر میزان شوری ۲۵۸۲ تا ۳۰٬۳۷ درصد معادل نمک طعام است. همچنین دمای همگنشدن نهایی (Th_{total}) در این میانبارها اغلب توسط از بین رفتن فاز حباب گاز (Th_{total}) مورت گرفته است که بین ۳۳۰ تا ۲۰°۴۶ ثبت شد (شکل ۱۰-B). چگالی میانبارهای نوع S1 در این رگه اغلب بین ۱/۰ تا g/cm³.

رکه QP: رگمهای کوارتز- پیریت (QP) در منطقه بهترتیب فراوانی حاوی میانبارهای اصلی LV و V هستند و میانبارهای نوع S در آنها دیده نشد. مقدار Te در میانبارهای LV ایس رگه رگه QM: رگههای کوارتز - مولیبدنیت (QM) در منطقه سنج، بهترتیب فراوانی حاوی سه میان ار اصلی V.LV و S هستند. مقدار Te در میان بارهای LV بین ۲۷- تا ۲۰/۵°C - در تغییر است که گویای رخداد کاتیونهای اصلی سدیم و پتاسیم و مقادیر است که گویای رخداد کاتیونهای اصلی سدیم و پتاسیم و مقادیر ناچیز کاتیونهای دو ظرفیتی (از قبیل ⁴² Ca) در ایسن میان بارهاست (Ca²⁺ ما و مقادیس (از قبیل ⁴² Ca)) در ایسن میان بارهاست (Ca¹⁺ ما Hein, 2001) در ایسن میان بارهاست (Van Den Kerkhof and Hein, 2001). تغییرات Thice راین میان بارها بین ۴ - تا ۲°۲۵ - برابر شوری ۲۶۴ تا ۱۶/۰ درصد معادل نمک طعام است. دمای همگن شدن نهایی میان بارهای LV در ایس رگه ها بین ۲۶۵ تا ۲۰٬۸۳ در نهایی میان بارهای LV در ایس رگه ها بین ۲۶۵ تا ۲۰٬۸۳ در تغییر است. چگالی ایس میان بارها بین ۲۶۸ تا ۲۰٬۸۳ در مقدار ۲۰٫۵ در میان بارهای V موجود در رگه MP بین ۲۰ - تا مقدار Tmice میان بارها مقدار ۲۰٫۵ در تغییر است (شکل ۹). مقدار میا Tmice در ایس میان بارها طعام است. دمای همگن شدن نهایی میان بارهای V نیز بین ۲۰۰



طالع فاضل و همکاران

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

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).

www.SID.ir

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

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

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



شکل ۱۱. A: روند انحلال میانبارهای حاوی هالیت و سیلویت نوع S2 در نمودار سـهتایی Bodnar and Beane, 1980) (NaCl-KCl-H₂O) و E: 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 گرمابی-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 2000; Aude tat et al 2000). اختلاف چگالی و ترکیب میان سیالات آبگین کمچگال و چگالی بالا موجب تغییر ویژگیهای

بحث

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) در

فیزیکوشیمی سیال در شکستگیها و متعاقباً تەنشست 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 گرمابی -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) میانبارها با ترکیب مختلف (آبگین، کربنیک و نظایر آن)، ۲) ممگنشدن 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 گفت اغلب شواهد پتروگرافی و میکروترمومتری میانبارها میتوان رگهای کوارتز- بیوتیت- کالکوییریت (QBC) و کوارتز- ییریت





شکل ۱۲. پراکندگی انواع میانبارهای SI ،V ،LV و S2 در نمودار دمای همگنشدن (Th_{l-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

جلد ۸، شماره ۲ (سال ۱۳۹۵)

همراهی این میانبارها در نتیجه بهدام افتادن همزمان آنها در تجمعات میانباری اولیه و ثانویه کاذب در کانی سازی استو کورک کوار تز-سولفیدی گویای منشأ آنها از یک منبع گرمابی واحد بهصورت یک فاز امتاز امتاز است (Bodnar, 1995؛ Fournier, 1999). شناسایی ارتباط زمانی- مکانی رخداد میانبارهای غنبی از گاز در رگههای استوکورک کیوارتز-سولفیدی (رگەھای QBC، QB و QP) با میانبارھای غنے از نمک بهدلیل نسلهای مختلف میانبارها کمی مشکل بهنظر میرسد. با این وجود در رگ کانیسازی کوارتز- پیریت (QP) چنین بهنظر میرسد که میانبارهای نوع LV و V در بلورهای کوار تزی بهدام افتادهاند که بدون میان بارهای نوع S است. این یدیده 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 اخ تلاط 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 می شوند (مانند میان بارهای S2)، اغلب در یک محیط گرمابی پایدار مایع بدون حضور فاز بخار بهدام میافتند که زیر فشارهای لیتواستاتیک رخداده است و شرایط قبل از جوشش ٔ را نمایش میدهند. در مقابل، همزمانی اجتمـاعی 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 می شوند (مانند اجتماع میان بارهای S1 و V) نشاندهنده گذار کانسار به شرایط کم فشار هیدرواستاتیک و همزمان ظهور يديده جوشش است.

تخمين عمق ديرينه كانسار

بررسی میانبارهای سیال، روشی مناسب برای دستیابی به فشار (Ph) و دمای (Th) همگنشدن و تخمین عمق دیرینه کانسار است. تقدم یا تأخر دمای از بین رفتن فاز حباب گاز (Th_{I-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- رگهچههای استوکورک کوارتز مرتبط با دگرسانی پتاسیک- فیلیک است. بر این اساس، میانبارهای دارای فاز جامدی که همگنشدن نهایی آنها اغلب از طریق انحلال فاز جامد هالیت انجام می شود، معیاری مناسب برای تخمین فشار و عمق دیرینه ذخیره در اختیار می گذارند (Rusk

Bodnar, 1994 et al., 2008). بدین منظور، در این پژوهش از میانبارهای نوع S2 با مقادیر Tm_{NaCl}>Th_L و شوری ۳۱ تـا ۴۴ درصد معادل نمک طعـام بـرای تخمـین عمـق دیرینـه رگـههای استوکورک QBC استفاده شده است.

در این روش، بر اساس محتوای شوری میانبارها، از ایزوکورهای مختلفی استفاده می شود که در آن برای میان بارهای با شوری ۴۰ درصد معادل نمک طعام از روش رودر و بودنار (Roedder and Bodnar, 1994) و استفاده از ایزوکور بودنار (Bodnar, 1994) و برای میانبارهای با شوری بین ۴۳ تـا ۴۷ درصـد معـادل نمـک طعام از ایزوکور پیشنهاد شده توسط کلاین و بودنار (Cline and Bodnar, 1994) استفاده می شود. برای رسم ایزو کورهای فشار-دما از نرمافزارهای BULK و ISOC از مجموعه BULK Bakker, 2003) FLUIDS1) استفاده شده است که دستیابی به این نرمافزارها از سایت http:/www.unileoben.ac.at امکان یذیر است. با استفاده از تغییرات دمای همگنشدن نهایی (Thtotal) در میانبارهای نوع S2 (بین ۱۸۷ تا ۳۶۷°C) و قطع آن با ایزوکور ۴۰ درصد معادل نمک طعام، فشار بین ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ بار معادل عمق ۲/۸ تـ ۴ کیلومتر برای رگههای QBC کانسار سنج بهدست آمد (شکل ۱۳). از آنجایی که تجمع میانبارهای S1 و V زیر شرایط جوشش، بهدام افتادهاند؛ بنابراین برای بهدست آوردن عمق تشکیل این میانبارها از نمودار هاس (Haas, 1971) استفاده شد که بر اساس آن فشار تقریبی ۲۵۰ تا ۵۰۰ بار معادل عمق ۱ تا ۲ کیلومتر برای این میانبارها بەدست آمد.

تحول سیال گرمابی 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 این که بتوان یک تجزیه و تحلیل دقیق از تحولات سیال در سیستم استوکورک کانسار مورد مطالعه بهدست آورد، میسر سیستم استوکورک کانسار مورد مطالعه بهدست آورد، میسر نیست. با این وجود، شبیهسازی یک مدل احتمالی با در نظر نیست. با این وجود، شبیهسازی یک مدل احتمالی با در نظر 420-NaCl-KCl میستم Hedenquist et al., 1988) برای منطقه مورد بررسی ارائه شده که در شکل ۱۴ نشان داده شده منطقه مورد بررسی ارائه شده که در شکل ۱۴ نشان داده شده

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 $^{\circ}$ ۷۰۰) و غنی از نمک (۵۲ تا ۵۸ درصد معادل نمک طعام) (Ulrich et و غنی از نمک (۵۲ تا ۵۸ درصد معادل نمک طعام) (Ulrich et تازین نیمهنفوذی تشکیل می شود، این ویژگی در میان بارهای سیال کانسار سنج مورد مشاهده قرار نگرفت. در کانسار سنج چنین بهنظر می رسد که میان بارهای اشباع از نمک نوع 22 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 ماگمای کلسیمی – قلیایی تا قلیایی غنی از پتاسیم داوی شکل گرفته است.

 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 انعلال میانبارهای نوع S2 در نمودار سهتایی (A-۱۱ میلن المیان) (A-۱۱ به سمت گوشه هالیت بوده (شکل (A-۱۱ میلی مطلب گویای اشباع سیال اولیه از هالیت و رقیق دن Cloke and تدریجی آن پس از بهدام افتادن میان ار است (Hezarkhani and Williams-Jones, Kesler, 1979).

۳) همگنشدن نهایی بیش از ۷۰ درصد میانبارهای نوع S2 توسط انحلال فاز هالیت بوده (Tm_{NaCl}>Th_{I-v}) که در دمای بالا (بیش از °۳۵۰°) و کمینه فشار بیش از ۸۰۰ بار انجام شده است.



شکل ۱۳ ایزوکور تخمین فشار برای رگههای QBC حاوی میانباهای 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 نـرمافزارهای BULK و Bakker, 2003) رسم شده است. همانطور که مشاهده میشود با قطع ایزوکرهای میانبارهای S2 توسط ایزوکور ۴۰ درصد، حداقل فشار بین ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ بار بـرای ایـن 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 inclusionsby isochore slopes and 40 wt percent NaCl-H₂O, minimum pressure for these inclusions is between 800 to 1100 bar.

شرایط کمچگال (متوسط '9/cm³) و چگالی بالا (متوسط ایرایط کمچگال (متوسط ۱ g/cm³) و میانبارهای نوع S1 در بیش از Th_L) هستند. بر این اساس، میانبارهای نوع S1 در بیش ا

چنان که 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

جلد ۸، شماره ۲ (سال ۱۳۹۵)

۲m_{NaCl}») و دارای ارتباط زمانی با میانبارهای نوع V هستند. بررسیهای میکروترمومتری نشاندهنده آن است که میانبارهای نوع V اغلب در دمای نسبتاً بالای ℃ ۴۳۰ 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 میادل نمک طعام که پس از میانبارهای اشباع از نمک نوع S نیز به دام افتادهاند، بیانگر آن است که در مراحل پایانی محلولهای گرمابی-ماگمایی نقش کمتری داشته و تأثیر آبهای جوی در این شرایط بیشتر بوده است (شکلهای ۲۲ 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 مسؤول 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 °۳۵۰°) و شوری بالا (تقریباً ۴۰ درصد معادل نمک طعام) است که میانبارهای نوع S2 با فاز نهایی همگنشدن هالیت (Tm_{NaCl}>Th_{l-v}) محصول آن است. این نوع سیالات در شرایط دینامیکی اولیه دما بالا در یک فضای شکل یذیر - شکنا 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 كمتر از ۱ كيلومتر) همراه با كاهش ناگهاني فشار، همزمان با رخداد جوشش دمای سیال نیز بهتدریج کاهش یافته و سیستم کانیسازی انتشاری مس-مولیبدن همراه با مجموعه کوارتز-کائولینیت (ایلیت) در منطقه رخ داده است. دمای همگنشدن سیال از بیش از °۳۵۰ در میانبارهای نوع S2 در رگههای QBC تا دمای تقریبی ۲۲۰ تا ۳۴۰°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 وقع

پیوسته است. کلیه این تغییرات انعکاسدهنده سردشدن تـدریجی سیال آبگین انحلال یافته از توده نفوذی سنج است.

مقایسه با ذخـایر مـس– مولیبـدن پـورفیری و سیسـتمهـای 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 Beane, Bodnar, 1995؛ است (Bodnar, 1995؛ Beane) یایین (کمتر از ۳ کیلومتر) است (Bodnar, 1995؛ معهای (1983). با این وجود کانیسازی مس مولیبدن (نقره) کانسار سنج دارای تفاوتهای شاخصی با ذخایر کلاسیک پورفیری معرفی شده توسط سیلیتو و هدنکویست و لاونسترن (Sillitoe, 2010 and Lowenstern, 1994) 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 رگمهای کانیسازی QP و QM،

۴) پایین بودن تناژ و عیار کانسنگ (کمتر از ۱۰ میلیون تن با عیار ۲/۰ تا ۲۳/۲ درصد مس) نسبت به سیستمهای پورفیری بارور (۵/۰ درصد مس و تناژ ۱۰۰ میلیون تن (Singer, 1986)).

۵) در منطقه مورد بررسی در مقیاس ناحیهای تاکنون ذخیره پورفیری شاخصی گزارش نشده است. و ۴) توزیع دگرسانیهای بهصورت 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 اندازه گیری آنها بهدلیل پیچیده بودن وقایع رگه- رگهچهها و دگرسانیهای مختلف تشکیل شده در آنها یکی از مسائل مهم در کانسارهای گرمابی چندمرحله ای است.

همان طور که در بالا به آن اشاره شد، کاهش ناگهانی دما و شوری سیال در سیستم گرمابی 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^۱است.

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

گرمابی 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.



شکل ۱۴. نمودار دما- فشار در سیستم H₂O-NaCl بهمنظور تعیین سازوکار کانیسازی در منطقه سنج با استفاده از میکروترمومتری میانبارهای نـوع LV، V و S. منحنیهای سیال با استفاده از بررسیهای بودنار، کلاین و بودنار (Bodnar, 1994؛ Cline and Bodnar, 1994) رسم شده است. بـرای توضـیحات بیشتر به متن مراجعه شود.

Fig. 14. Pressure-temperature diagram for the system NaCl-H₂O showing the prposed 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).

^{1.} Immature

نتيجهگيرى

با توجه به مباحث گفته شده، چنین بهنظر میرسد که دست کم 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-گرمابی: 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 ک°۳۰۰) و شوری (۱۰ درصد) همراه با رخداد جوشش و سردشدن سیال، به تغییر وضعیت از شرایط لیتواستاتیک به هیدرواستاتیک منجر شده است. طی این مرحله رگههای QM و

tion 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-

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 گرمابی - 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 مهندسین 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 سپاس گزاری 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.
- Aude'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–meteoric transition. Geothermal Resources Council, California, Special Report 13, 381 pp.
- Bodnar, R.J., 1994. Synthetic fluid inclusions: XII: the system H₂O–NaCl. Experimental determina-

teration and quartz-sulfide-gold-anhydrite veins in the Thames District, New Zealand. Miner Deposita, 36(7): 623–640.

- Brown, P.E., 1989. Flincor: 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, Bulltein 1693, 400 pp.
- Dedual, E., 1967. Zur Geologie des mittleren und Interen Karaj Tales zental 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.
- Mahdizade, 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)

تعیین شرایط فشار- دما و تحول سیال گرمایی- ماگمایی در کانسار مس- مولیبدن سنج ...

- 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 intrusioncentered 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., Günthur, 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.

Journal of Economic Geology Vol. 8, No. 2 (2016-2017) ISSN 2008-7306



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

Department of Geology, Faculty of Basic Sceinces, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran
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 porphyrtic 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 (±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 spectrometery (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 K_2O versus SiO_2 diagram. The igneous rocks from the Senj area define a typical high-K calcalkaline 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-feldsparquartz-sericite-K-feldsparbiotite-sericite-quartz,

Journal of Economic Geology

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 bv 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 quartzstockwork 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 quartzkaolinite±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.