



ژئوشیمی، سیالات درگیر و ایزوتوپ‌های گوگرد در کانی‌سازی طلای نوع برش هیدروترمالی، منطقه خونیک، استان خراسان جنوبی

سمیه سمیعی^{۱*}، مجید قادری^۳ و صدیقه زیرجانی‌زاده^۲

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
 (۲) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران
 (۳) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۱۶، پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۸

چکیده

منطقه اکتشافی خونیک در ۱۰۶ کیلومتری جنوب شهرستان بیرجند در استان خراسان جنوبی واقع شده است. کانی‌سازی خونیک از نوع طلای مرتبط با برش هیدروترمالی است. این کانی‌سازی در ارتباط با توده‌های نیمه‌عمیق گرانیتوئیدی به سن ۳۸/۴ میلیون سال است. زون‌های دگرسانی رخنمون‌یافته در این منطقه در ارتباط با توده‌های نیمه‌عمیق هستند و شامل دگرسانی‌های پروپلیتیک، آرژیلیک، برش هیدروترمال و کربناته است. کانی‌سازی در بخش مرکزی منطقه و به صورت پراکنده، رگچه‌ای و برش هیدروترمالی رخنمون دارد و در ارتباط با توده‌های نیمه‌عمیق ائوسن است. بخش مهمی از کانی‌سازی در زون برش هیدروترمالی قرار دارد. بر اساس داده‌های ژئوشیمی برداشت شده از گمانه‌های حفاری، میزان عنصر طلا از ۳۰۰ تا ۴۲۸۰ میلی‌گرم بر تن تغییر می‌کند و بیشترین میزان پراکندگی آن با توده‌های نیمه‌عمیق به شدت دگرسان شده با کوارتز+سریسیت+پیریت±تورمالین و زون برش هیدروترمالی انطباق دارد. برش هیدروترمالی به‌طور کلی از نوع موزائیکی تا رابل است. بر اساس کانی‌شناسی سیمان نیز دو نوع برش با سیمان کربناتی و سیمان کربنات-کوارتز مشاهده شد. دماسنجی بر روی سیالات درگیر اولیه دوفازی (L+V) موجود در سیمان زون برشی بیانگر تشکیل این نوع کانی‌سازی در دمای حدود ۳۰۰ تا ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد از سیالی با شوری متوسط (۲ تا ۱۲ درصد وزنی معادل نمک طعام) است. مقدار متوسط $\delta^{34}\text{S}$ برای قطعات و سیمان برش هیدروترمالی به ترتیب ۲/۴- و ۰/۹% است که نشان‌دهنده منشائی ماگمایی برای گوگرد در مرحله قبل و بعد از برشی شدن است.

واژه‌های کلیدی: کانی‌سازی، سیالات درگیر، برش هیدروترمال، خونیک، بلوک لوت

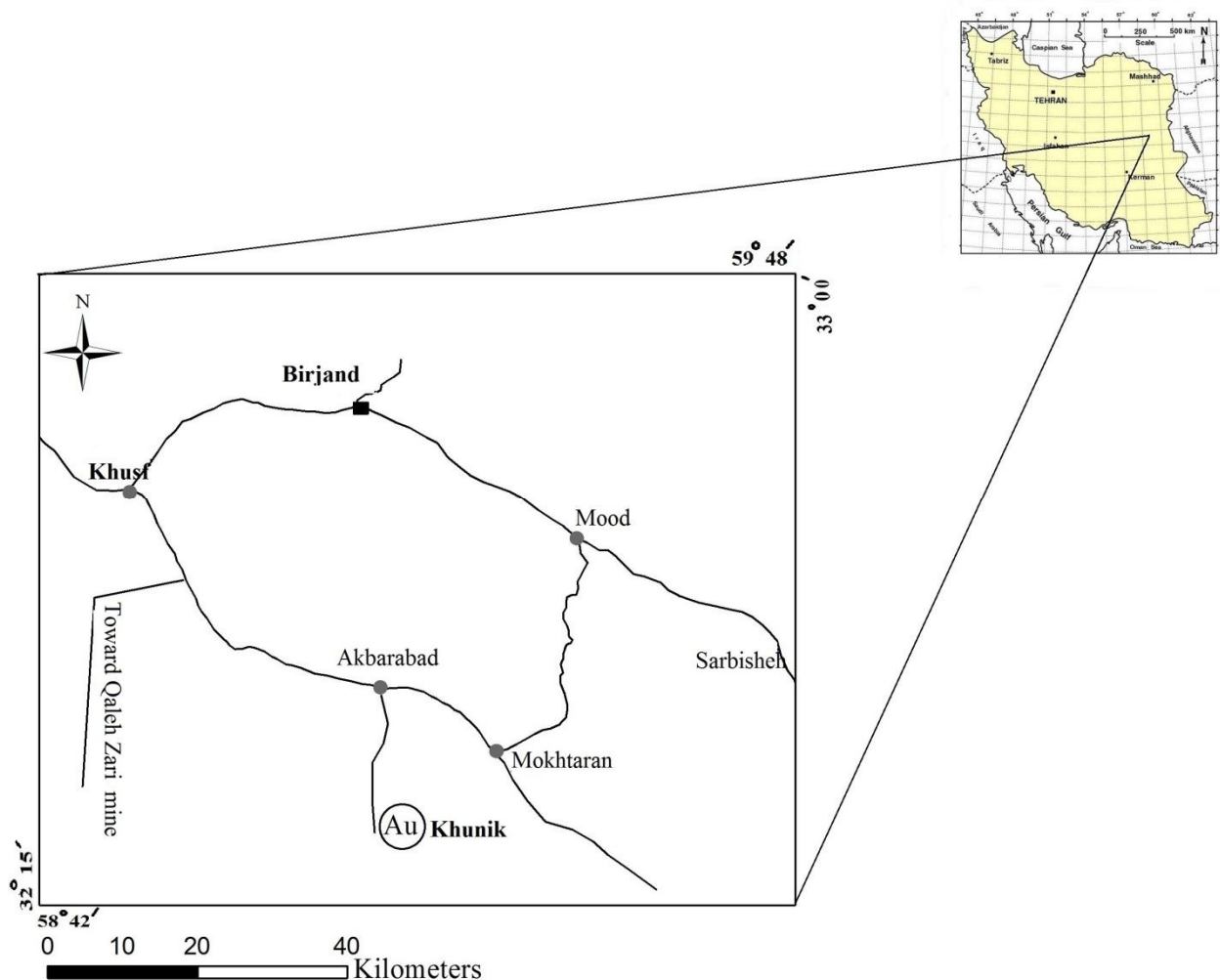
مقدمه

مختاران در استان خراسان جنوبی واقع شده است. نزدیک‌ترین

شهر به آن خوسف در فاصله ۷۵ کیلومتری است. این منطقه از

منطقه اکتشافی خونیک در ۲۱ کیلومتری جنوب غربی روستای

نظر مختصات جغرافیایی بین طول‌های جغرافیایی $59^{\circ}08'55''$ تا $59^{\circ}12'37''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $32^{\circ}22'14''$ تا $32^{\circ}25'7''$ شمالی واقع است (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه خونیک

Fig. 1. Location and access routes to the Khunik area

این منطقه از شرق کشور برای انواع کانی‌سازی‌های مختلف است. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده توسط کریم‌پور و همکاران (Karimpour et al., 2012) بازه زمانی ۳۳ تا ۴۲ میلیون سال قبل (ائوسن میانی-الیگوسن زیرین) به‌عنوان دوره متالوژنی بلوک لوت معرفی شده است. انواع کانی‌سازی‌های مس، طلا، قلع و تنگستن در این منطقه گزارش شده‌اند

این محدوده در شمال‌غربی نقشه مختاران با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ مساحت قرار دارد. (Movahed Aval and Emami, 1978) این محدوده ۲۷/۵ کیلومتر مربع است. این منطقه در مجموعه ماگماتیسیم ترشیری در بلوک لوت قرار دارد. حجم عظیم فعالیت‌های ماگمایی و موقعیت‌های متنوع زمین‌ساختی که در زمان‌های مختلف در بلوک لوت رخ داده، بیانگر توانایی بالای

بررسی کانی‌سازی در عمق و ارتباط آن با واحدهای زمین‌شناسی و دگرسانی، تعداد ۱۲ گمانه اکتشافی به طول ۱۸۱۴/۴ متر بررسی شد. گمانه‌ها در محل انبار سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات شرق کشور در مشهد نگهداری می‌شوند. نمونه برداری ژئوشیمیایی از گمانه‌های حفاری توسط شرکت مهندسین مشاور پارس کانه کیش و به روش نصفه مغزه با فاصله‌های یک متری برای آنالیز جذب اتمی ۹ عنصری و ICP ۴۱ عنصری بوده و آنالیز عنصر طلا به روش Fire assay برای ۹۵۶ نمونه انجام شده است (Borna et al., 2013). برای تکمیل بررسی‌های ژئوشیمیایی و بررسی تغییرات عیاری، تعداد ۸ نمونه از محل کانی‌سازی برش هیدروترمال برداشت و برای تجزیه به آزمایشگاه ACME کانادا ارسال شد. روش انجام این آنالیز با کد AQ200 برای آنالیز ۳۶ عنصری به روش ICP-ES/MS بوده است. پس از بررسی جامع زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی و تعیین توالی پاراژنتیکی در منطقه خونیک، نمونه‌هایی که بهترین معرف برای شرایط تشکیل کانی‌سازی برش هیدروترمالی بودند، انتخاب شدند. بدین منظور تعداد ۷ نمونه دوبرصیقل برای بررسی‌های میکروترموتری در دانشگاه فردوسی مشهد تهیه شد. بررسی‌های میکروترموتری در آزمایشگاه سیالات درگیر دانشگاه فردوسی مشهد به وسیله دستگاه Linkam مدل THMS 600 با کنترل‌کننده حرارتی TP 94 و سردکننده LNP که بر روی میکروسکوپ زایس با دامنه حرارتی ۱۹۰- تا ۶۰۰+ نصب شده است، انجام شد. دقت کار دستگاه در مرحله سرد و گرم کردن $\pm 1^\circ C$ است. مقدار شوری بر اساس بودنار (Bodnar, 1993) در سیستم $H_2O-NaCl$ و مقدار دانسیته نیز بر پایه داده‌های دماسنجی طبق معادله براون و لمپ (Brown and Lamb, 1989) و با استفاده از نرم‌افزار FLINCOR محاسبه شده است.

برای تعیین منشأ و شرایط تشکیل کانی‌سازی در منطقه خونیک تعداد ۴ نمونه از پیریت‌های مرتبط با کانی‌سازی طلا انتخاب شد. برای خالص‌سازی و جدایش کانی پیریت، ابتدا نمونه‌ها را

(Karimpour et al., 2007). از جمله این کانسارها می‌توان به معدن مس-طلا-تقره غنی از اسپیکولاریت قلعه‌زری (Karimpour et al., 2005; Richards et al., 2012)، کانسار مس پورفیری ماهرآباد و خویک (Malekzadeh, 2015; shafaroudi et al., 2010)، کانسار طلای اپی‌ترمال سولفید بالای مرتبط با مس پورفیری چاه شلغمی (Arjmandzadeh, 2011; Arjmandzadeh et al., 2011) و کوه‌شاه (Abdi et al., 2010; Abdi and Karimpour, 2012)، کانسار طلای مرتبط با توده نفوذی هیرد (Karimpour et al., 2007) و منطقه اکتشافی مرتبط با سیستم پورفیری شاه سلطان علی (Nadermezerji et al., 2017) اشاره کرد. این محدوده در سال ۱۳۷۹ توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و بر اساس طرح اکتشاف مواد معدنی در جنوب خراسان مورد بررسی قرار گرفت و از طریق بررسی‌های ژئوشیمیایی آبراه‌های و کانی سنگین به‌عنوان اولویت دوم اکتشافی برای عناصر طلا، شلیت و سینابر معرفی شده و پس از آن بررسی‌های سیستماتیک در منطقه انجام شده است (Sillitoe, 2005; Borna et al., 2013). در پژوهش‌های قبلی تفکیک جزئی واحدها از نظر زمین‌شناسی، دگرسانی، زون‌های کانی‌سازی و ژئوشیمی به‌ویژه در بخش کانی‌سازی برش هیدروترمالی انجام نشده است هدف از این پژوهش، بررسی سطحی و عمقی دگرسانی، کانی‌سازی و ژئوشیمی زون برش هیدروترمالی به‌عنوان بهترین و بیشترین رخداد کانی‌زایی در منطقه خونیک است.

روش مطالعه

پس از بررسی‌های صحرائی برای بررسی دقیق کانی‌زایی، حدود ۲۰۰ نمونه از محل کانی‌سازی‌های سطحی برداشت شد و تعداد ۱۵۰ مقطع صیقلی و نازک-صیقلی در محل دانشگاه فردوسی مشهد تهیه و برای شناسایی کانه‌های فلزی، بافت و روابط پاراژنتیکی بررسی شد و در نهایت نتایج بررسی‌ها به صورت نقشه کانی‌سازی سطحی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ ارائه شده است. برای

مختاران (Movahed Aval and Emami, 1978) قرار گرفته است. واحدهای زمین‌شناسی این منطقه شامل کنگلومرا، سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های نیمه‌عمیق است. قدیمی‌ترین واحد در این منطقه، گنگلومرای مربوط به پالئوسن-ائوسن است که در جنوب منطقه رخنمون دارد. در این منطقه، توده‌های گرانیتوئیدی نیمه‌عمیق به صورت استوک و دایک دیده می‌شوند که واحدهای آتشفشانی با ترکیب آندزیت، آگلومرا، توف آندزیتی تا توف تراکی آندزیتی را قطع می‌کنند. سن جای‌گیری این واحدها به روش روبیدیم-استرانسیم حدود 58 ± 11 میلیون سال تعیین شده است (Samiee, 2016; Samiee et al., 2017). توده‌های نیمه‌عمیق دارای ترکیب دیوریت، مونزونیت، کوآرتز مونزونیت، مونزودیوریت و کوآرتز مونزودیوریت هستند. سن این توده‌ها $38/4$ میلیون سال تعیین شده است (Samiee, 2016; Samiee et al., 2016). علاوه بر توده‌های نیمه‌عمیق که در منطقه مورد بررسی رخنمون دارند، یک واحد برش هیدروترمالی نیز وجود دارد (شکل ۲).

دگرسانی در این منطقه مرتبط با توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق متعددی است که سبب تنوع و تداخل زون‌های دگرسانی بر روی یکدیگر شده‌اند؛ ولی عمده دگرسانی در توده‌های نیمه‌عمیق رخ داده است و گسترش دگرسانی رابطه‌ای مستقیم با گسترش توده‌های نیمه‌عمیق دارد (Samiee et al., 2013). زون‌های دگرسانی رخنمون یافته در سطح، کربناته، پروپیلیتیک، آرژیلیک و برش هیدروترمال هستند. دگرسانی کربناته بیشترین گسترش را در بین دگرسانی‌های سطحی در منطقه خونیک دارد. در این نوع دگرسانی بلورهای فلدسپات به‌طور کامل یا بخشی به کلسیت تبدیل شده‌اند و بر اساس فراوانی کانی‌های کربناتی و بود یا نبود کانی دگرسانی دیگر به صورت دگرسانی کربناتی و کربنات-آرژیلیک در نقشه آورده شده است. دومین دگرسانی از نظر وسعت در سطح منطقه خونیک، دگرسانی پروپیلیتیک است. کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده این دگرسانی شامل اپیدوت، کربنات و به مقدار کمتر کلریت و مگنتیت است. این

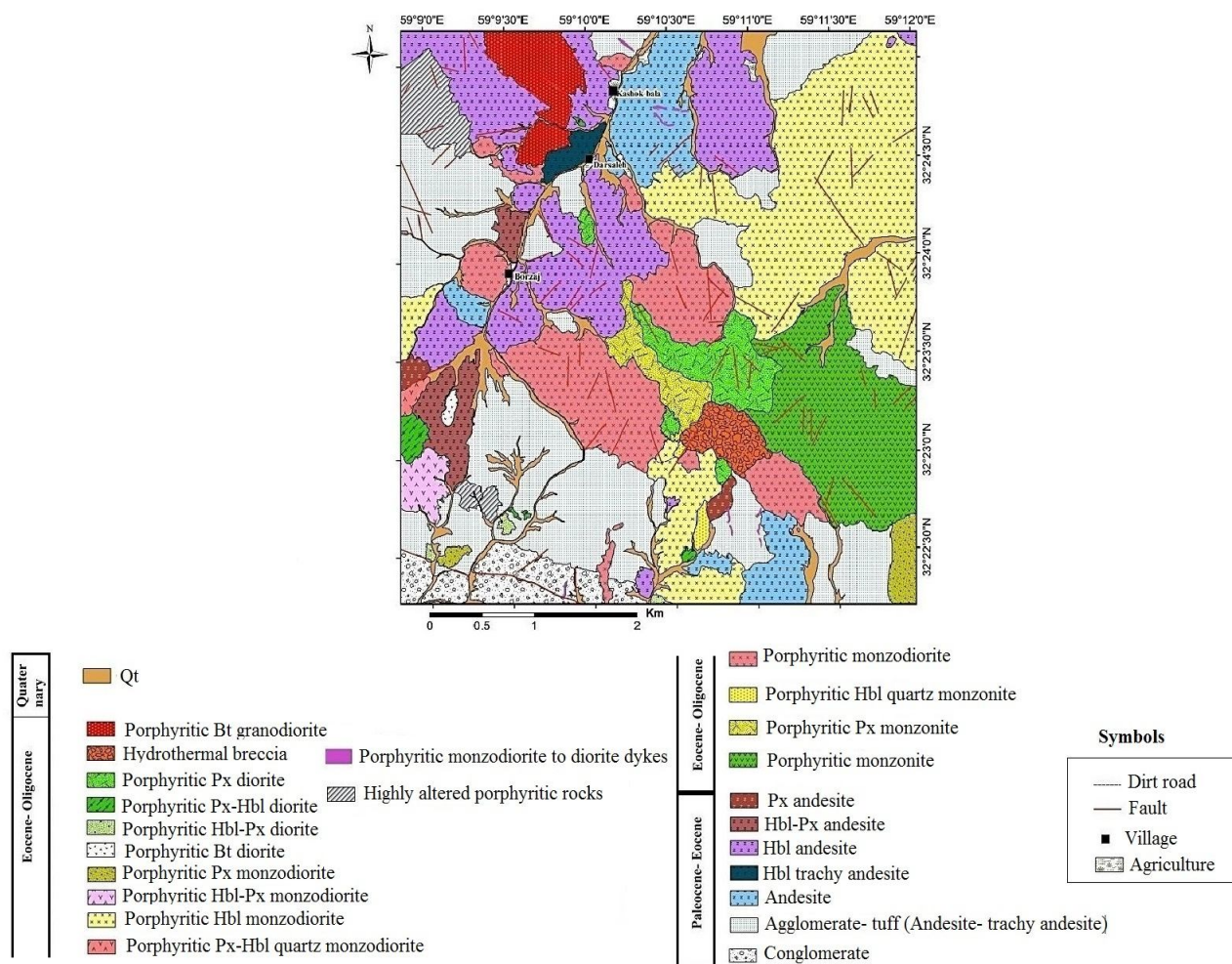
خرد کرده و با روش دست‌چینی و در زیر میکروسکوپ بیناکولار نمونه‌های خالص جدا شدند. درصد خالص‌سازی نمونه‌ها با این روش بیش از ۹۸ درصد بوده است. از هر نمونه مقدار ۱ گرم پیریت خالص جدا شده و برای آنالیز به آزمایشگاه Iso Analytical Cheshire در انگلستان ارسال شد. در همه نمونه‌های انتخابی، بررسی‌های میکروترموتری انجام شده است و نتایج در جدول ۲ آمده است. آنالیز نمونه‌ها توسط دستگاه EA-IRMS انجام شد. نمونه‌های سولفیدی به همراه پنتاکسید وانادیم درون کپسول قلع مخلوط شدند. این مخلوط به نوبت به درون کوره‌ای با دمای 1800 درجه سانتی‌گراد چکانده و در حضور اکسیژن سوزانده شدند. موتور احتراق کپسول‌های قلع، دما را در بخشی از نمونه تا 1700 درجه سانتی‌گراد افزایش می‌دهند. سپس گازهای آزاد شده حاصل از احتراق از درون جریانی از هلیوم در طول کاتالیزورهای احتراق (اکسید زیرکیم/تنگستن) و در طی مرحله احیا از سیم‌های مسی با خلوص بالا عبور داده می‌شوند تا SO_2 , N_2 , CO_2 و آب تولید کنند. آب به وسیله غشای NafionTM حذف می‌شود. SO_2 هم از CO_2 و N_2 در یک ستون GC فشرده در دمای 45 درجه سانتی‌گراد جدا می‌شود. SO_2 خالص شده به درون منبع یونی IRMS وارد می‌شود و در آنجا یونیزه شده و شتاب می‌گیرد. گونه‌های گازی با جرم‌های مختلف در یک میدان مغناطیسی از هم جدا می‌شوند و به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری می‌شوند. آنالیزها بر اساس نظارت جرم/حجم 48 ، 49 و 50 از محصول SO_2 حاصل از SO_2 در منبع یونی بوده است. مقادیر ایزوتوپی نمونه‌ها نسبت به استاندارد ایزوتوپی تروپلیت کانیون دیابلو CDT یا فاز سولفیدی تروپلیت شهاب‌سنگ آهنی کانیون دیابلو آریزونا اندازه‌گیری شده است.

زمین‌شناسی و دگرسانی

گستره پی‌جویی خونیک از نظر زمین‌شناسی ناحیه‌ای در جنوب برگه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ بیرجند (Eftekhar-Nezhad and Stocklin, 1992) و در شمال‌غربی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰

ریزبلورهای رس همراه است. از دیگر کانی‌های این زون می‌توان مقدار اندکی سیلیس، ژاروسیت، سولفید و اکسیدهای آهن آبدار چون لیمونیت و گوتیت را نام برد. این دگرسانی به صورت دگرسانی آرژلیک پیشرفته و آرژلیک-کربناتی در نقشه قابل مشاهده است (شکل ۳).

دگرسانی بر اساس نوع و فراوانی کانی‌های تشکیل شده به دو صورت پروپلیتیک و پروپلیتیک-آرژلیک در نقشه ارائه شده است (شکل ۳). دگرسانی آرژلیک در مقایسه با دگرسانی پروپلیتیک وسعت کمتری داشته و در بخش کوچکی در غرب و جنوب شرقی منطقه مورد بررسی رخنمون دارد (شکل ۳). این دگرسانی با تخریب بافتی کانی‌های گروه فلدسپارها و تشکیل



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه خونیک. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. Bt: بیوتیت، Px: پیروکسن، Hbl: هورنبلند)

Fig. 2. Geological map of the Khunik area. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Bt: biotite, Px: pyroxene, Hbl: hornblend).

نیمه عمیق اطراف آن به شدت و ناگهانی است. قطعات تشکیل دهنده این زون شامل توده نفوذی به شدت دگرسان شده

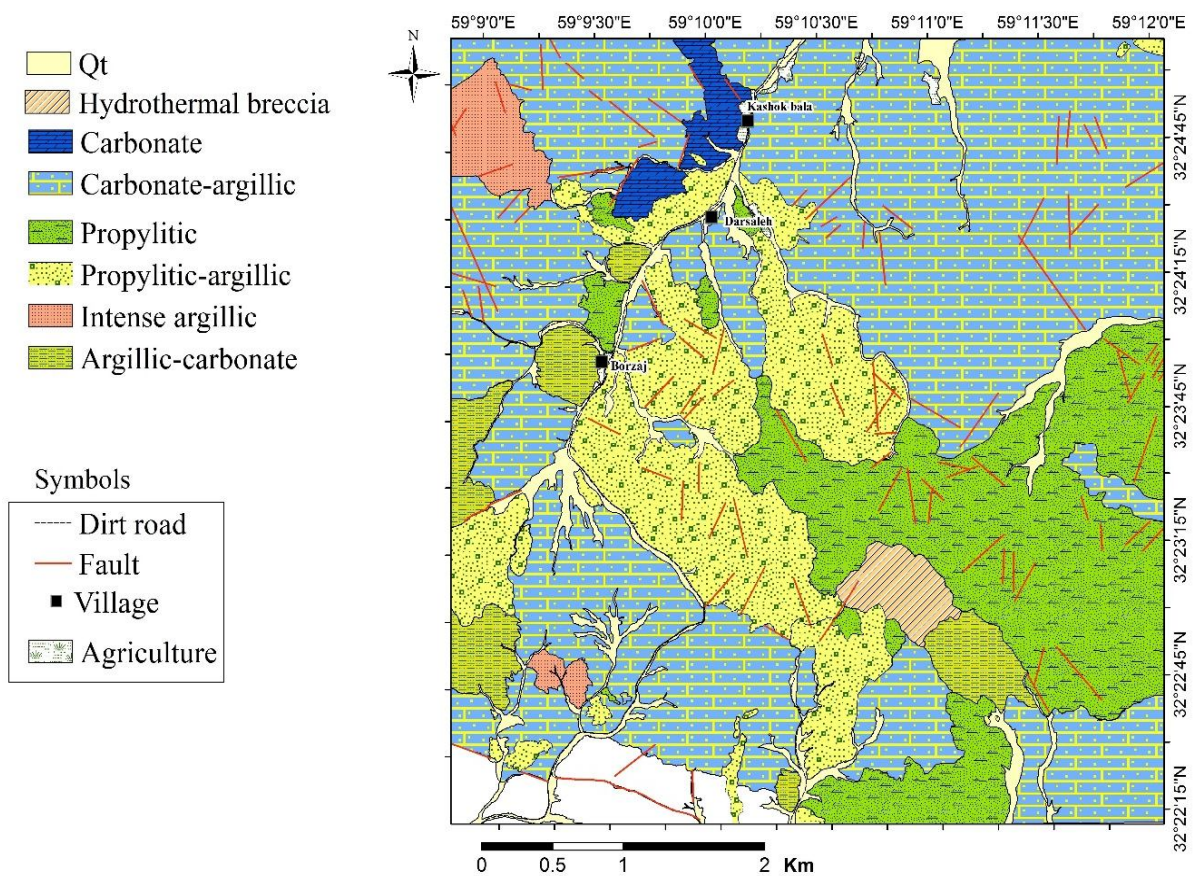
زون برش هیدروترمالی نیز در مرکز منطقه گسترش دارد (شکل ۳). در رخنمون‌های سطحی، برخورد (مرز) برش و توده‌های

شدت این دگرسانی به بیش از ۷۰ درصد می‌رسد. هم در سنگ‌های نیمه‌عمیق که به مونزودیوریت پورفیری نسبت داده می‌شوند و هم در قطعات برش هیدروترمالی دیده می‌شود (Samiee, 2016). سرسیت اصلی‌ترین کانی این دگرسانی است و به‌همراه آن کوارتز و پیریت نیز حضور دارند. در دگرسانی کوارتز-تورمالین شدت دگرسانی به‌حدی است که هیچ اثری از سنگ اولیه قابل‌شناسایی نیست. در این زون به‌همراه کوارتز و تورمالین پیریت نیز به‌صورت پراکنده حضور دارد (Samiee, 2016).

به‌طور کلی دگرسانی، زون‌بندی نشان می‌دهد به‌طوری‌که زون کوارتز-سرسیت-پیریت در مرکز به دگرسانی آرژیلیک و پروپیلیتیک در حاشیه ختم می‌شود (شکل ۳).

است. قطعات برش در سطح به رنگ سفید، صورتی و قرمز دیده می‌شوند. رنگ قرمز و صورتی به‌علت حضور اکسیدهای آهن ثانویه در نتیجه اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی قطعات و رنگ سفید به‌دلیل دگرسانی آرژیلیک شدید و آلونیتی و سرسیتی شدن قطعات است. در اعماق دگرسانی قطعات برش هیدروترمالی بیشتر از نوع کوارتز-سرسیت-پیریت و کربناتی است.

دگرسانی مشاهده شده در گمانه‌های حفاری دگرسانی به‌همراه کوارتز-تورمالین، دگرسانی کربناتی و به میزان کم آرژیلیک است. دگرسانی‌های کربناتی و آرژیلیک از لحاظ ویژگی‌های پتروگرافی کاملاً شبیه دگرسانی‌های مشابه خود در سطح هستند. دگرسانی کوارتز-سرسیت-پیریت مهم‌ترین و اصلی‌ترین دگرسانی گرمایی مرتبط با کانی‌سازی رخ داده در منطقه است.



شکل ۳. نقشه دگرسانی سطحی در منطقه خونیک

Fig. 3. Alteration map of the Khunik area

کانی‌سازی

در حدود 750×730 متر گسترش دارد و در دامنه جنوبی کوه خونیک با ترکیب دیوریتی قرار گرفته است (شکل ۵). این زون دارای مرز ناگهانی با توده‌های مجاور است و از اطراف به سرعت به پروپلیتیک تغییر می‌یابد. علاوه بر این، در اغلب گمانه‌ها نیز رخنمون دارد. شکل ۶-A تصویری از برش هیدروترمالی را در عمق نشان می‌دهد. با توجه به اینکه زون برش هیدروترمالی، مهم‌ترین بخش کانی‌سازی در این منطقه است، در این پژوهش به بررسی کامل این نوع کانی‌سازی در منطقه خونیک پرداخته شده است.

انواع برش هیدروترمالی در منطقه خونیک

برش‌ها بر اساس ترکیب قطعه (مونومیکت یا پلی میکت)، نوع و اندازه قطعات طبقه‌بندی می‌شوند (Jébrak, 1997). برش‌های هیدروترمالی منطقه خونیک به‌طور کلی دو دسته و به شرح زیر هستند:

۱) برش غنی از ماتریکس^۱

این نوع از برش دارای رخنمون بسیار محدودی در گمانه‌های حفاری است. در این زون، قطعات با دگرسانی شدید کوارتز-سریسیت-پیریت در ماتریکسی با فراوانی ۷۷۰ تا ۷۵ درصد از جنس سیلیس و قطعات پودر شده قرار گرفته است (شکل‌های ۶-B و C). کانی‌سازی هم در قطعات و هم در ماتریکس حضور دارد.

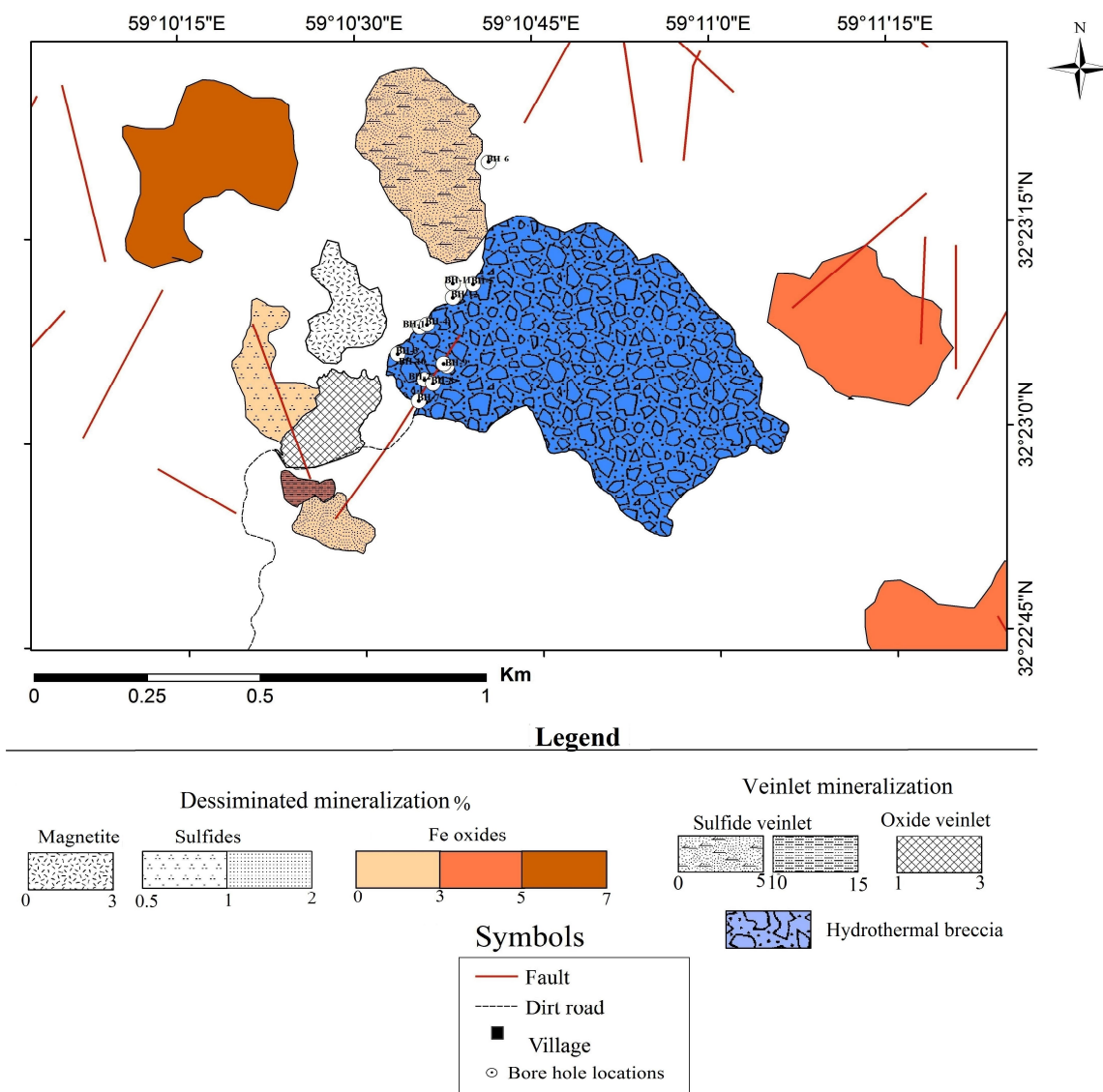
۲) برش غنی از قطعه^۲

فراوان‌ترین نوع برش در منطقه خونیک از نوع برش هیدروترمالی غنی از قطعه است. این نوع برش، غنی از قطعاتی است که توسط سیمان به هم متصل شده‌اند (شکل ۶-D). از نظر نوع قطعه تشکیل‌دهنده از نوع مونومیکتیک هستند؛ یعنی از قطعات با لیتولوژی و دگرسانی مشابه تشکیل شده‌اند. این قطعات معمولاً از سنگ‌های پورفیری به شدت دگرسان شده به کوارتز-سریسیت-پیریت هستند و گاهی رگچه‌های سولفیدی نیز در آنها وجود دارد. اندازه قطعات از چند سانتی‌متر تا ۳۰ سانتی‌متر تغییر

کانی‌سازی در منطقه خونیک درون توده‌های نیمه‌عمیق و برش هیدروترمالی رخنمون دارد و در ارتباط با توده‌های نیمه‌عمیق به سن ۳۸/۴ میلیون سال است (Samiee, 2016). کانی‌سازی سطحی در منطقه خونیک به صورت برش هیدروترمالی، پراکنده (افشان)، رگچه‌ای و رگه‌ای دیده می‌شود. تمرکز کانی‌سازی در بخش مرکزی منطقه خونیک و در اطراف زون برش هیدروترمالی رخ داده است (شکل ۴). در سایر نقاط، کانی‌سازی به صورت اکسید آهن ثانویه پراکنده و با فراوانی کم دیده می‌شود (شکل ۴). به‌طور کلی کانی‌سازی پراکنده در سطح شامل پیریت (۰/۵ تا ۲ درصد)، مگنتیت (۱ تا ۳ درصد) و کالکوپیریت (۰/۵ تا ۱ درصد) است (شکل ۴). پیریت به صورت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل و با ابعاد ۰/۱ تا ۰/۲ میلی‌متر درون دگرسانی پروپلیتیک-آرژلیک در بخش غرب و جنوب غربی برش هیدروترمالی مشاهده می‌شود. مگنتیت به صورت بی‌شکل با ابعاد ۰/۱ تا ۰/۴ میلی‌متر درون واحد دیوریتی با دگرسانی پروپلیتیک در بخش شمال‌غربی منطقه دیده می‌شود. کالکوپیریت به صورت پراکنده در ابعاد کمتر از ۰/۱ میلی‌متر درون واحد دیوریتی دیده می‌شود. به‌طور کلی کالکوپیریت‌ها گسترش بسیار کمی هم در سطح و هم در عمق دارند. اغلب کانی‌سازی‌های سولفیدی در سطح منطقه خونیک به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (لیمونیت و گوتیت) تبدیل شده‌اند و کمتر کانی سولفیدی سالم دیده می‌شود. میزان اکسیدهای سوپرژن در سطح بین ۰/۵ تا ۷ درصد متغیر است (شکل ۴). در منطقه خونیک کانی‌سازی رگچه‌ای در سطح گسترش چندانی ندارد. رگچه‌های مگنتیتی تنها در بخش محدودی از غرب منطقه رخنمون دارند (شکل ۴) ضخامت این رگچه‌ها به‌طور متوسط ۰/۵ میلی‌متر است. رگچه‌های سولفیدی بیشتر در بخش شمالی و جنوب‌غربی منطقه دیده می‌شوند (شکل ۴).

زون کانی‌سازی برش هیدروترمالی فراوان‌ترین و گسترده‌ترین نوع کانی‌سازی در کل منطقه خونیک است (شکل ۴). این زون

می‌کند. در رخنمون سطحی برش در مقایسه با عمق دارای
 سیمان برش‌ها معمولاً کربناتی - سیلیسی و یا کربناتی است و
 قطعات درشت‌تری (بزرگ‌تر از ۲۵ سانتی‌متر) است. جنس
 میزان فراوانی آن در برش‌های مختلف متغیر است.



شکل ۴. نقشه کانی‌سازی سطحی بخش مرکزی منطقه خونیک

Fig. 4. Surficial mineralization map of the central part of Khunik area

در منطقه خونیک قابل شناسایی است:

برش با بافت خرد شده^۱

در این نوع برش، هیچ‌گونه آثاری از جابه‌جایی قطعات برش

برش‌ها بر اساس بافت برش یعنی جدایش قطعات برشی از یکدیگر، مقدار چرخش و ساییدگی قطعات، به انواع مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند. با توجه به آنچه گفته شد انواع برش‌های زیر

1. Crackle breccia

قطعات و هم به صورت پراکنده در سیمان برش رخ داده است. علاوه بر این، رگچه‌هایی از جنس سیمان درون شکستگی‌های قطعات را پر کرده است. قطعات معمولاً زاویه‌دارند که نشان می‌دهد از محل منشأ خود فاصله زیادی نگرفته‌اند (Nadasan and Nadasan, 2005).

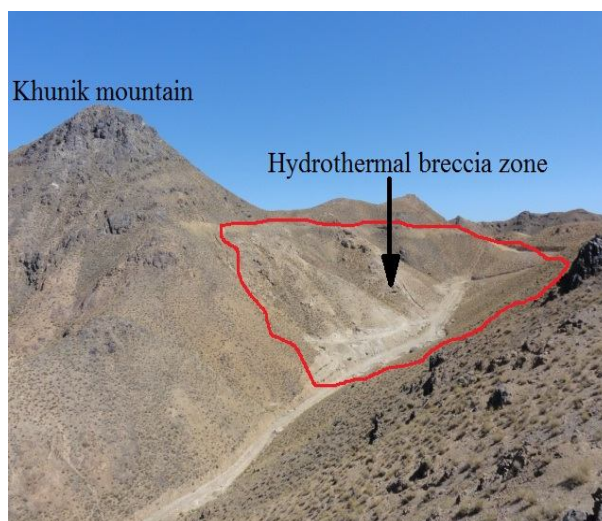
برش با بافت رابل^۲

در این نوع برش، علاوه بر افزایش فاصله بین قطعات، چرخش نیز در قطعات صورت گرفته است. فشار ناشی از سیالات گرمایی احتمالاً به قدری بوده که باعث چرخش قطعات نیز شده است (شکل ۷-B). کانی‌سازی در این نوع برش نیز مشابه برش موزائیکی است. قطعات تشکیل‌دهنده نیمه گرد شده تا زاویه‌دار هستند که نشانه طی مسافت بیشتر نسبت به محل منشأ است.

مشاهده نمی‌شود. تنها قطعات شکسته‌اند و در بین آنها سیمان سولفیدی (۳ تا ۵ درصد) با ضخامت کم جای‌گیری کرده است (شکل ۶-D). این نوع برش‌ها در مجاورت توده مونوزودیوریتی غیربرشی قرار دارند. در رخنمون‌های سطحی و در اعماق کم، این نوع برش‌ها در اثر اکسیداسیون پیریت به رنگ‌های قرمز تا قهوه‌ای دیده می‌شوند.

برش با بافت موزائیکی^۱

این بافت شایع‌ترین بافت درون برش‌های منطقه خونیک است. در این بافت، نسبت به بافت قبلی شکستگی‌ها، بازشدگی بیشتری پیدا کرده‌اند و فاصله بین قطعات افزایش یافته است و توسط سیمانی با فراوانی ۵ تا ۱۰ درصد پر شده‌اند (شکل ۷-A). اندازه قطعات در این نوع برش بین ۲ تا ۳۰ سانتی‌متر متغیر است. از کانی‌سازی در این نوع هم به صورت پراکنده و رگچه‌ای در



شکل ۵. رخنمون زون برش هیدروترمالی در دامنه جنوبی کوه خونیک (دید به سمت شمال شرق)

Fig. 5. Outcrop of hydrothermal breccia zone in southern slope of the Khunik mountain (looking NE)

برش با سیمان کربنات-کوارتز-سولفید

این برش، غنی از قطعات با دگرسانی شدید کوارتز-سریسیت-پیریت ± تورمالین در سیمانی از جنس کربنات (حدود ۷۵

انواع برش بر اساس نوع سیمان در منطقه خونیک

برش با بافت موزائیکی و رابل در منطقه خونیک بر اساس نوع سیمان به دو گروه قابل تفکیک است:

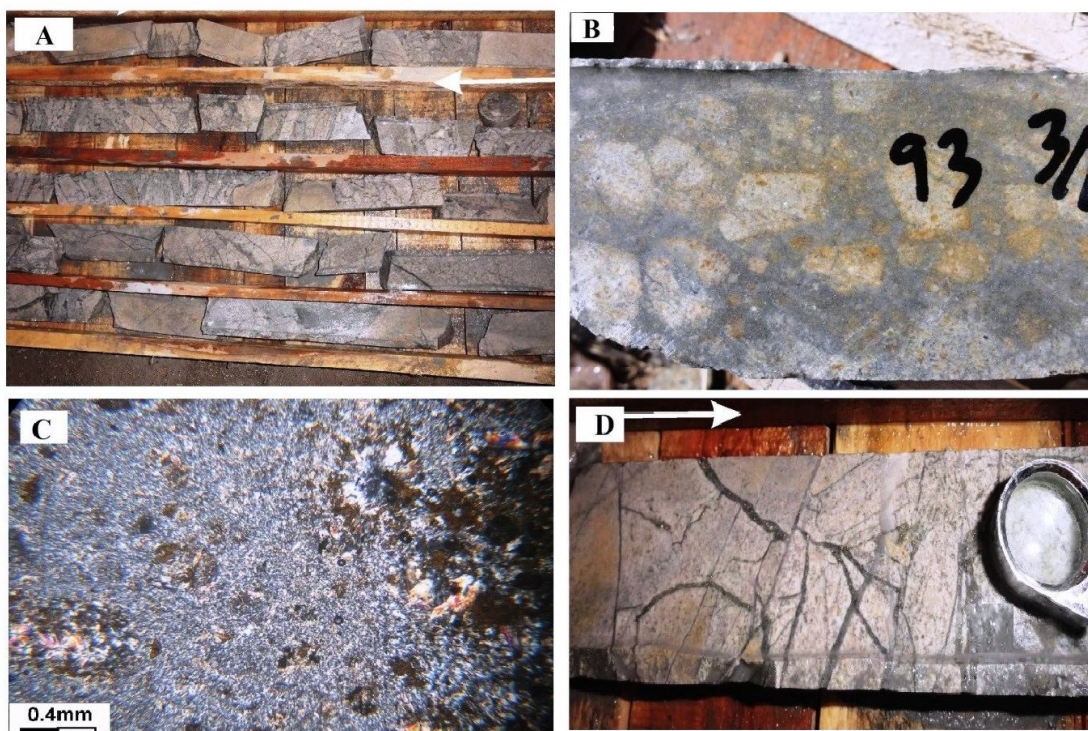
1. Mosaic breccia
2. Rubble breccia

بررسی شده، بلورهای بی شکل تا نیمه شکل دار کالکوپیریت در حاشیه بلورهای پیریت نسل سوم قرار گرفته‌اند که نشانه تشکیل کالکوپیریت بعد از پیریت است (شکل ۸-C).

برش با سیمان کربنات-سولفید

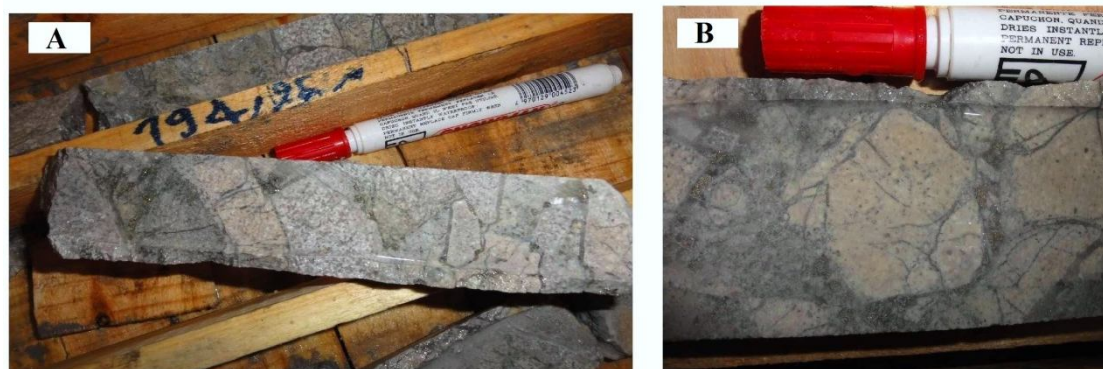
این نوع برش از نوع غنی از قطعه با دگرسانی کوارتز-سرسیت-پیریت و کربنات ± کوارتز است که در سیمان کربناتی قرار گرفته است. پیریت‌های خودشکل تا نیمه شکل دار با ابعاد ۱ تا ۲ میلی‌متر و فراوانی حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد درون سیمان کربناتی با فراوانی ۸۰ تا ۸۵ درصد پراکنده شده‌اند (شکل‌های ۸-D و ۸-E). این نوع برش تنها در گمانه BH-7 وجود دارد.

درصد) و به میزان کمتر کانی‌های سولفیدی (حدود ۱۵ درصد) و کوارتز (حدود ۱۰ درصد) تشکیل شده است. مقداری دگرسانی کربناتی تحت تأثیر سیمان برش بر روی دگرسانی اصلی قطعات رونقش شده است. اندازه قطعات این برش بین ۲ تا ۱۰ سانتی‌متر است (شکل ۸-A). بهترین نوع این برش در گمانه BH-1 دیده می‌شود. کوارتزهای موجود در این برش دو نسل هستند: نسل اول کوارتزهای دانه درشت با حاشیه دنداندار در کنار کربنات و پیریت و نسل دوم بلورهای بسیار ریز کوارتز که فضای خالی بین کربنات و پیریت را پر کرده است (شکل ۸-B). کانی‌های سولفیدی در این سیمان شامل پیریت (۱۰ درصد) به همراه کالکوپیریت (۳ تا ۴ درصد)، به ندرت تتراهدریت (کمتر از ۱ درصد) است (شکل ۸-C). در برخی نمونه‌های



شکل ۶. A: تصویری از رخنمون برش هیدروترمالی منطقه خونیک در گمانه BH-1 (مربوط به اعماق ۱۶۲ تا ۱۶۷)، B: برش غنی از ماتریکس در گمانه BH-12، C: تصویر میکروسکوپی از برش غنی از ماتریکس. قطعات کوچک با دگرسانی سرسیتیک-کوارتز-تورمالین در ماتریکس سیلیسی و قطعات خرد شده قرار گرفته است (XPL) و D: برش غنی از قطعه (گمانه BH-1 عمق ۱۷۰ متری). جهت فلش جهت گمانه حفاری به سمت عمق را نشان می‌دهد.

Fig. 6. A: Overall picture of hydrothermal breccia of Khunik area's outcrop in BH-1 borehole (depth: 162-167 m), B: Matrix supported breccia in BH-12 bore hole, C: Microscopic image of matrix supported breccia. Small fragment with sericitic- quartz-tourmaline alteration located at silicified matrix and crashed fragments (XPL), and D: Clast supported breccia (BH-1 borehole with 170m in depth). Arrow shows the direction toward depth.



شکل ۷. A: برش موزائیکی در گمانه BH-1 در عمق ۱۹۴ متری و B: برش رابل در گمانه BH-1 مربوط به عمق ۱۶۰ متری در منطقه خونیک
Fig. 7. A: Mosaic breccia at BH-1 bore hole with 194m depth, and B: Rubble breccia at BH-1 bore hole with 160 m in depth of Khunik area

دگرسان شده با کوارتز+سریسیت+پیریت±تورمالین و زون برش هیدروترمالی انطباق دارد. به عنوان مثال در گمانه Bh-4 میانگین تغییرات عیاری طلا $367/8$ میلی گرم بر تن است. بالاترین میزان طلا (4280 میلی گرم بر تن) درون واحد به شدت دگرسان با دگرسانی کوارتز-سریسیت-پیریت+تورمالین است (شکل ۹). کمترین میزان طلا ($2/6$ میلی گرم بر تن) است. در مجموع عیارهای بالای طلا در این گمانه مربوط به برش هیدروترمالی خرد شده و توده به شدت دگرسان همراه آن است.

بررسی تغییرات عیاری در برش‌ها

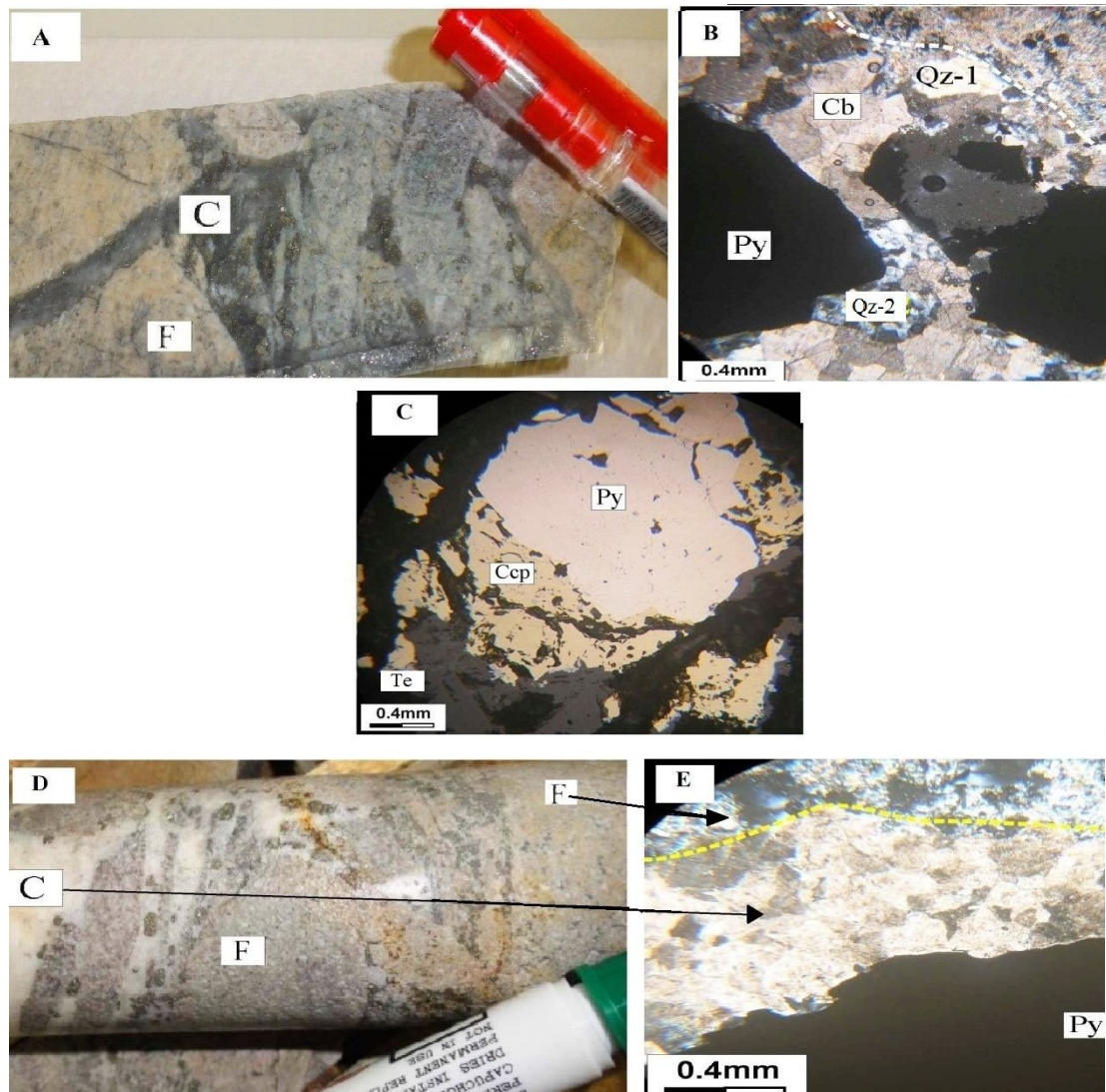
در این پژوهش با هدف تمرکز بیشتر بر روی زون برش هیدروترمالی و بررسی تأثیر برشی شدن بر روی عیار عناصر به ویژه طلا، تعداد ۸ نمونه از سیمان و قطعات برش مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. نتایج آنالیز در جدول ۱ آمده است. بر اساس نتایج حاصل، می توان دریافت که برشی شدن و به دنبال آن سیمان برش، باعث افزایش عیار طلا در قطعات شده است. میزان گردشگی قطعات و فراوانی سیمان نیز در افزایش عیار طلا مؤثر است؛ به طوری که در برش‌هایی با بافت موزائیکی تا رابل میزان عیار طلا بالاتر از نوع خرد شده است. بالاترین میزان طلا در برش‌های ماتریکس غالب است. در عین حال گاهی بالاترین عیارها مربوط به کانی‌سازی پراکنده درون قطعات برش هیدروترمالی است.

ژئوشیمی سطحی و زیر سطحی

داده‌های ژئوشیمیایی موجود در منطقه خونیک مربوط به گزارش سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (Omidvar, 2005) و گزارش شرکت مهندسین مشاور پارس کانه کیش (Borna et al., 2013) است. بر اساس نقشه‌های پراکنده‌گی ژئوشیمی سطحی عناصر در این منطقه، نمونه‌های بخش مرکزی گستره مورد نظر نسبت به مناطق دیگر تفاوت چشم‌گیری در میزان عناصر نشان می‌دهند (Samiee et al., 2013). این اختلاف، بین نمونه‌های برداشت شده در گستره خونیک به صورت زیر است:

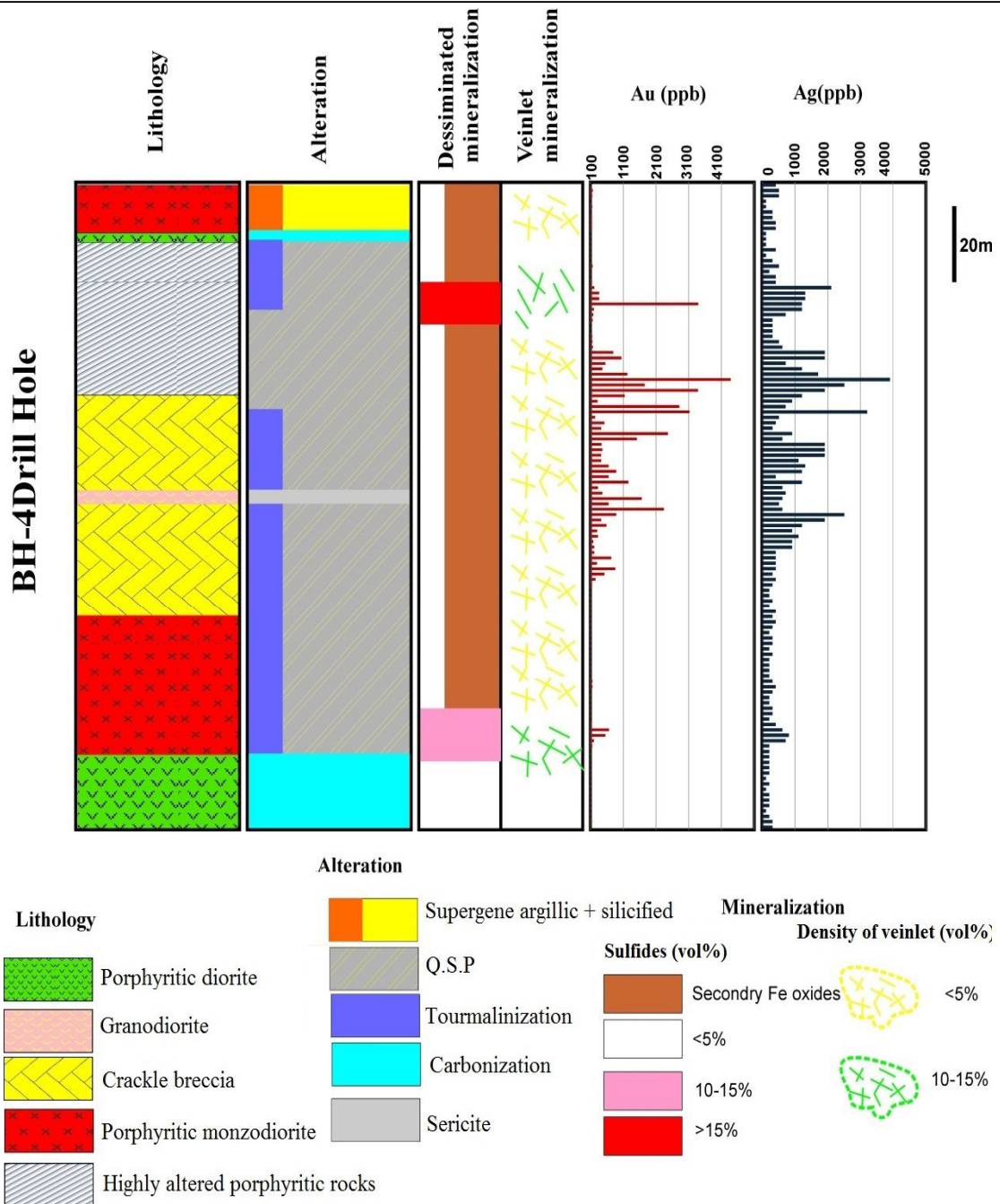
طلا ۲ تا 4600 میلی گرم بر تن، نقره 40 تا 9080 میلی گرم بر تن، آرسنیک $6/9$ تا $133/5$ گرم بر تن، آنتیموان $0/5$ تا 158 گرم بر تن، جیوه $0/2$ تا $4/95$ گرم بر تن، مس 21 تا 601 گرم بر تن، سرب $3/9$ تا 1485 گرم بر تن، روی 18 تا 1095 گرم بر تن. بیشترین پراکنده‌گی عناصر بالا به ویژه طلا در ارتباط با زون برش هیدروترمالی و توده‌های نیمه عمیق هم‌جوار با آن مشاهده می‌شود.

متأسفانه دسترسی به همه داده‌های ژئوشیمیایی زیر سطحی و تنها داده‌های مربوط به عناصر طلا و نقره تعدادی از گمانه‌ها در دسترس بوده است. بر اساس نتایج به دست آمده، بین عناصر طلا و نقره همبستگی مکانی بسیار نزدیکی وجود دارد و بیشترین میزان پراکنده‌گی عنصر طلا با توده‌های نیمه عمیق به شدت



شکل ۸. A: برش هیدروترمال غنی از قطعه با سیمان کربنات-کوارتز-سولفید از گمانه BH-1 و عمق ۱۶۸ متری در منطقه خونیک، B: تصویر میکروسکوپی نور عبوری از سیمان کربنات-کوارتز-سولفید. قطعه (F) و سیمان (C) با خطچین سفید از هم جدا شده‌اند (XPL). (گمانه BH-1 عمق ۱۸۸ متری). دو نسل کوارتز در این سیمان دیده می‌شود، نسل اول که هم‌زمان با کربنات و پیریت است و تحت‌عنوان QZ-1 مشخص شده و نسل دوم که جوان‌تر از کربنات و پیریت است و با عنوان QZ-2 مشخص شده است. C: تصویر میکروسکوپی از کانی‌های سولفیدی درون سیمان کربنات-کوارتز (نور انعکاسی XPL)، D: برش غنی از قطعه با سیمان کربنات-سولفید (گمانه BH-7 عمق ۹۳ متری و E: تصویر میکروسکوپی از قطعه (بالا) و سیمان کربنات-سولفید (پایین). (XPL). علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Qz: کوارتز، Cb: کربنات، Py: پیریت، Ccp: کالکوپیریت، Te: تتراهدریت)، علائم اختصاری F و C نیز به ترتیب عبارتند از قطعه برش و سیمان برش هیدروترمالی

Fig. 8. A: Clast supported breccia with carbonate- quartz- sulfide cement from BH-1 bore hole with 168 m at depth of Khunik area, B: Transmitted light crosspolarized micrograph of quartz- sulfide cement. Fragment (F) and cement (C) is separated with dash line (XPL) (BH-1 bore hole with 188 m in depth). Two generation of quartz are determined as QZ-1 that is simultaneous with carbonate and pyrite and QZ-2 that is younger than them (XPL), C: Microscopic image of sulfide minerals in carbonate- quartz cement (XPL), D: Clas supported breccia that is simultaneous with carbonate and pyrite (BH-7 bore hole with 93 m in depth), and E: Microscopic view of fragment (up) and carbonate- sulfide cement (down) (XPL). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Qz :quartz, Cb: carbonate, Py: pyrite, Ccp: chalcopyrite and Te: tetrahedrite). Abbreviations F and C are respectively fragment cement of breccia



شکل ۹. توزیع ژئوشیمیایی عناصر طلا و نقره در گمانه BH-4 در منطقه خونیک
Fig. 9. Au and Ag elements variation in BH-4 bore hole of Khunik area

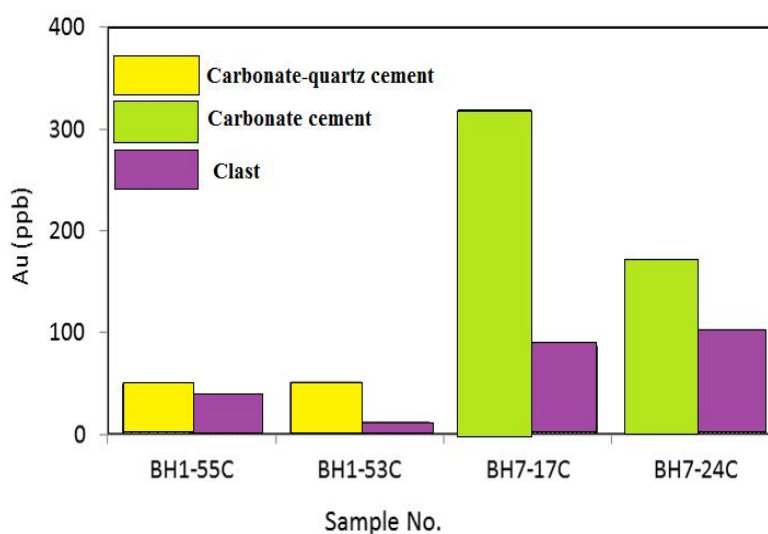
عبارت طلا بالاتر از گمانه BH-1 با سیمان کربناتی-سیلیسی است؛ به طوری که میانگین عباری عنصر طلا در گمانه BH-7 حدود ۱۵۲۳ ppb و در گمانه BH-1 در حدود ۱۵۲/۴ ppb است (Borna et al., 2013).

میزان عبار طلا در سیمان کربناتی به طور میانگین حدود ۲۳۶/۳ ppb است؛ در حالی که میانگین عبار طلا در سیمان کربناتی-سیلیسی حدود ۱۰۰ ppb است (شکل ۱۰). بنابراین در گمانه BH-7 که برش هیدروترمالی دارای سیمان کربناتی است، میزان

جدول ۱. نتایج حاصل از تجزیه تعدادی از عناصر در نمونه‌های برداشت‌شده از کانی‌سازی برش هیدروترمالی در گمانه‌های منطقه خونیک

Table 1. Analytical results for a number of samples from hydrothermal breccia mineralization in the bore holes of the Khunik area.

Sample No.	Type of mineralization	Au (ppb)	Ag (ppm)	As (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Pb (ppm)	Mo (ppm)	Hg (ppm)
BH1-55C	Silicified-carbonate cement	49.2	0.3	50.5	762.2	60	17.2	2.6	0.02
BH1-55F	Fragment of breccia with Q.S.P alteration	38.2	0.2	24.0	54.9	49	8.2	2.1	<0.01
BH1-53C	Silicified-carbonate cement	50.7	0.2	27.5	29.7	25	6.0	1.6	<0.01
BH1-53F	Fragment of breccia with Q.S.P alteration	10.9	0.1	57.1	116.3	64	3.6	1.5	<0.01
BH7-17C	Carbonate cement	315.9	0.9	71.6	182.5	38	4.0	0.9	0.30
BH7-17F	Fragment of breccia with Q.S.P alteration	86.0	0.2	28.9	19.5	14	7.0	1.8	0.03
BH7-24C	Sulfide cement of breccia in oxidation zone	156.7	0.1	20.7	7.6	329	5.5	12.0	0.54
BH7-24F	Fragment of breccia with Q.S.P alteration	102.1	0.1	18.3	7.6	161	3.8	8.1	0.97



شکل ۱۰. تغییرات میزان طلا در قطعات و سیمان برش هیدروترمالی در منطقه خونیک. ناهنجاری طلا در سیمان برش بالاتر از قطعات است.

Fig. 10. Variation of gold content in fragments and cement of hydrothermal breccia of Khunik area. Gold anomaly in the cement of breccia is higher than fragments.

بررسی سیالات درگیر

بررسی سیالات درگیر، یکی از مهم‌ترین ابزارها برای بررسی منشأ کانسارهای هیدروترمال است؛ زیرا آنها شواهد مستقیمی از ویژگی‌های محلول‌های کانه‌ساز صعودکننده بوده و در بیشتر موارد به‌عنوان ژئوبارومتر و ژئوترموتر دقیق در دسترس هستند (Wilkinson, 2001).

بررسی سیالات درگیر بر روی دو کانی کوارتز و کلسیت موجود در دو نوع سیمان کانی‌سازی برش هیدروترمالی انجام شد. اغلب سیالات درگیر بررسی‌شده اولیه بوده و تنها تعداد اندکی سیالات درگیر ثانویه مشاهده شدند. سیالات درگیر موجود از لحاظ شکل ظاهری، شکل هندسی خاصی ندارند و اغلب به‌صورت بادامی تا بیضوی شکل هستند. سیالات درگیر شناسایی‌شده در دمای اتاق دوفازی و از نوع فازهای مایع و بخار (L+V) هستند و به‌ندرت از نوع تک‌فازی (L) هستند. بیشتر حجم این سیالات را مایع تشکیل می‌دهد؛ به‌طوری‌که مقدار فاز مایع موجود در آنها ۶۰ تا ۸۰ درصد است. از طرفی فاز بخار موجود در این سیالات از نظر اندازه متغیر بوده و از لحاظ حجمی ۱۵ تا ۲۰ درصد حجم سیال را اشغال می‌کند. در بررسی‌ها هیچ‌گونه فاز جامد به‌دام افتاده یا فاز کانیایی دختر

مشاهده نشده است. اندازه‌گیری گرمایش و سرمایش بر روی سیالات درگیر اولیه دوفازی غنی از مایع انجام شد. در اینجا مشکل بررسی سیالات ریزبودن بلورهای کوارتز و کلسیت بود که یافتن سیال مناسب را با مشکل و صرف زمان بیشتر مواجه می‌کرد و دیگر کوچک‌بودن اندازه سیالات بود. این سیالات جدای از نوع کانی میزبان‌شان از لحاظ اندازه متغیر بوده و اندازه آنها بین ۲ تا ۱۱ میکرون است. غالب اندازه‌گیری‌های میکروترموتری بر روی ابعاد ۵ تا ۱۰ میکرون صورت گرفته است. به‌طور کلی، دمای همگن‌شدن و شوری ۵۹ سیال درگیر اندازه‌گیری شد. این سیالات درگیر در زمان دماسنجی به مایع هموژن شده و حباب بخار در نتیجه حرارت‌دادن ناپدید شد. نکته مشابه در همه سیالات آن است که در هیچ‌یک از سیالات، کانی نوزاد دیده نشد و نخستین دمای ذوب‌شدگی (T_{fm}) در این نمونه‌ها بین ۵۳- تا ۵۷/۸- است (جدول ۲). مقایسه نخستین دمای ذوب‌شدگی در سیستم‌های $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$ مختلف (Shepherd et al., 1985; Davis et al., 1990,) (Prokofiev et al., 2010) نشان می‌دهد که سیال هیدروترمالی شامل $\text{NaCl-H}_2\text{O} + \text{CaCl}_2 \pm \text{FeCl}_2 \pm \text{MgCl}_2$ و سایر نمک‌هاست.

جدول ۲. خلاصه نتایج بررسی سیالات درگیر در منطقه خونیک**Table 2.** Summary of microthermometry data for fluid inclusions from Khunik area

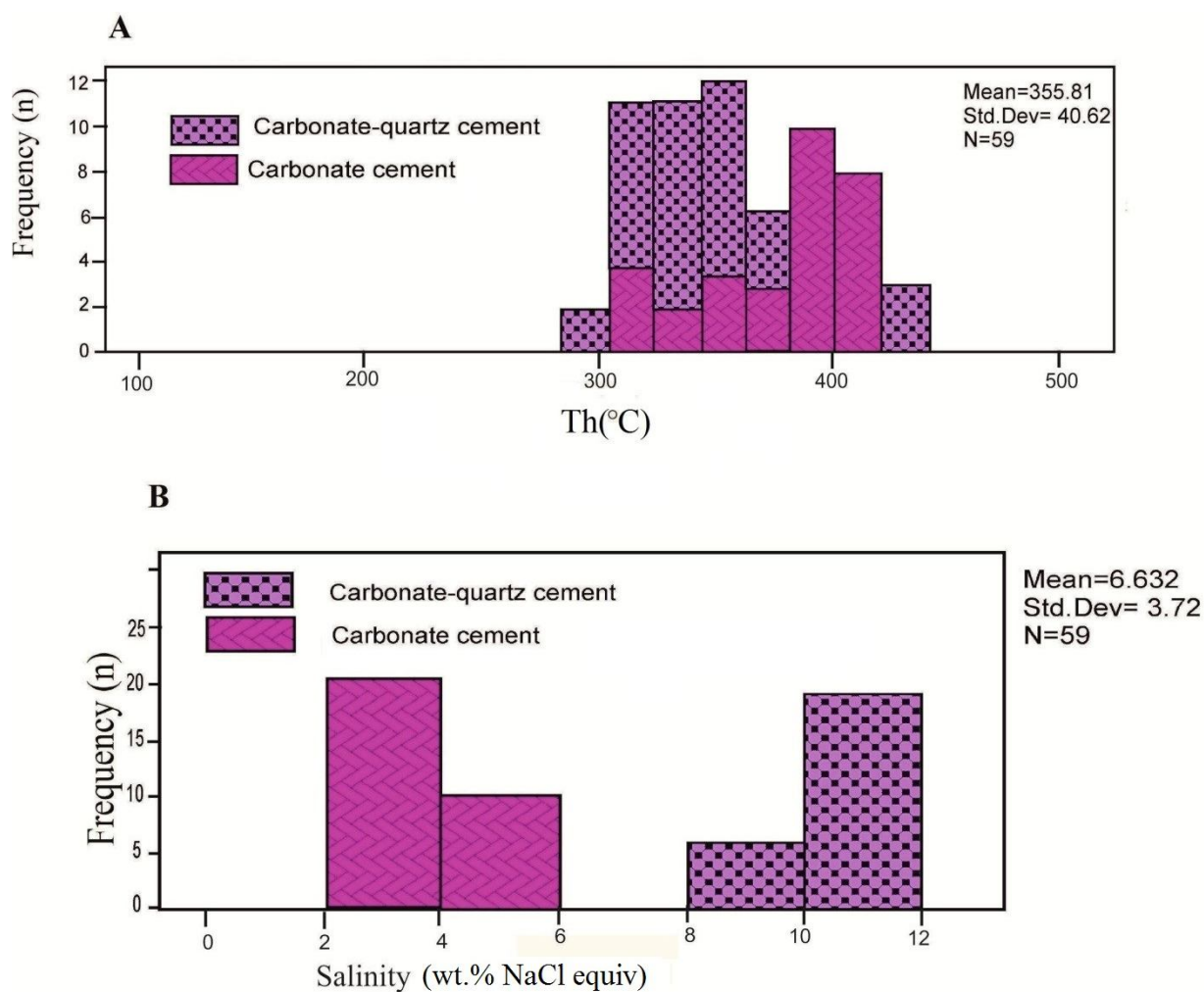
Sample No.	Mineral	Inclusion types	Size (μm)	Fluid sn	Th (C)	T_{fm} (C)	T_m (C)	Salinity (wt.%)
Bh7-17	Calcite	LV	2-8	17	300-387	-56 to -53.2	-1.3 to -1	2.1-5
Bh7-16	Calcite	LV	5-7	10	390-415	-57.8 to -54.3	-2.5 to -1.3	3-4.5
BH1-53	Quartz	LV	8-11	21	315-336	-55.8 to -54.3	-8.3 to -6.7	10-12
Bh1-60	Calcite	LV	2-9	11	290-433	-56.7 to -54.3	-7.4 to -6.4	9.7-10.8

کوارتز و کلسیت در این نوع سیمان، اندازه‌گیری‌ها هم بر روی کوارتز و هم کلسیت انجام شد. محدوده دمای همگن‌شدن برای

بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، اندازه سیالات در سیمان کربنات-سیلیسی بین ۲ تا ۱۵ میکروتر است. به‌دلیل هم‌زمانی

نمک طعام است (شکل ۱۱-A و B). نکته قابل توجه در این نوع سیمان، شوری بسیار پایین آن در مقایسه با سیمان سیلیسی-کربناتی است. بر اساس داده‌های ژئوشیمیایی در این نوع سیمان، عیار طلا بالاتر است.

این گروه بین ۲۹۰ تا ۴۳۳ درجه سانتی‌گراد بوده و شوری سیال از ۹/۷ تا ۱۲ درصد وزنی معادل نمک طعام متغیر است (شکل ۱۱-A و B)؛ درحالی‌که اندازه سیال در سیمان کربناتی بین ۵ تا ۱۱ میکرومتر است. دمای هموژنیزه شدن و شوری آن به ترتیب ۳۰۰ تا ۴۱۵ درجه سانتی‌گراد و ۲/۱ تا ۵ درصد وزنی معادل



شکل ۱۱. نمودار A: دمای همگن‌شدن و B: شوری برای سیالات درگیر موجود در سیمان برش هیدروترمالی در منطقه خونیک

Fig. 11. Frequency plot of A: homogenization temperatures and B: salinity (NaCl wt.% eq.) for fluid inclusions from cement of hydrothermal breccia in Khunik area.

می‌دهد. نبود شواهد دگرسانی از کانی‌هایی که در شرایط سولفیدی بالا تشکیل می‌شوند نیز تأییدکننده غالب بودن کمپلکس کلریدی و کم اهمیت بودن کمپلکس سولفیدی است. شکل ۱۳ نمودار دمای هموژنیزه شدن در برابر شوری برای

بحث و بررسی

تعیین عوامل فیزیکوشیمیایی مؤثر بر ته‌نشست فلزات

داده‌های شوری و دمای همگن‌شدن بر روی نمودار شکل ۱۲ غلبه کمپلکس کلریدی را در رخداد برش هیدروترمالی نشان

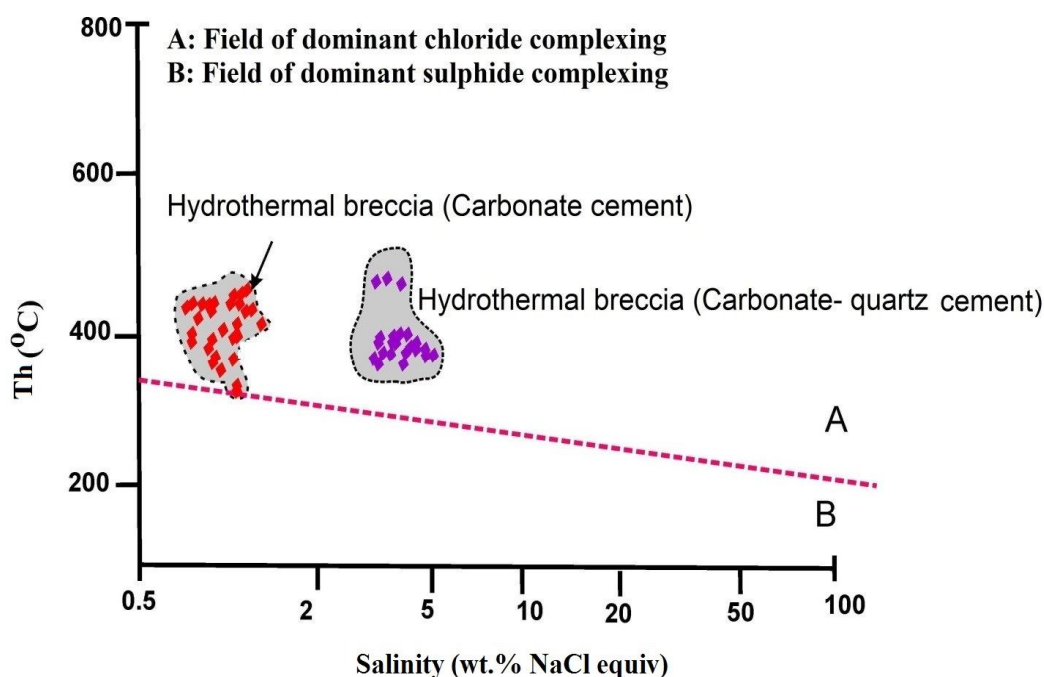
شورابه بیگانه به قسمت‌های کم‌عمق و ۲- فرایند جوشش که باعث گیرافتادن سیالی با شوری متغیر در یک سیال دیگر شود (Simmons and Brown, 1997; Scott and Watanabe, 1998) که در مورد برش‌های این منطقه فرایند دوم محتمل‌تر است. در سیالات مربوط به زون برش هیدروترمال، سیالات غنی از بخار و غنی از مایع در کنار هم یافت نشدند؛ بنابراین رخ‌دادن جوشش را با تردید مواجه می‌کند؛ در حالی که وجود رخنمون نسبتاً وسیع برش هیدروترمالی شاهدهی بر فرایند جوشش است. در نتیجه در این مرحله از کانی‌سازی، کاهش دمای سیال در نتیجه جوشش، باعث ناپایدار شدن کمپلکس کلریدی و ته‌نشینی کانه‌ها می‌شود (Thiersch et al., 1997). علاوه بر این، محدوده تغییرات شوری در برش نسبتاً گسترده است که در نتیجه اختلاط دو سیال هم می‌تواند ایجاد شود. به عقیده رز و همکاران (Ross et al., 2002)، تکامل سیال ماگمایی با فاصله‌گرفتن از منشأ نیز می‌تواند باعث تغییرات در دما و شوری انواع برش شود.

سیال‌های دوفازی در سیمان برش هیدروترمالی در منطقه خونیک را نشان می‌دهد. مطابق این شکل دو جمعیت متفاوت از سیالات در زون برش هیدروترمالی باعث کانی‌سازی شده‌اند که عبارتند از:

- سیالات با دمای بالا و شوری پایین که بیانگر سیمان کربناتی هستند و در محدوده سیالات ماگمایی-هیدروترمالی قرار می‌گیرند (شکل ۱۲). طیف دمایی به‌دست آمده از این مرحله، با سیستم‌های پورفیری قابل مقایسه است. در سیستم‌های پورفیری، طیف حرارتی از ۲۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و شوری بین ۰ تا ۷۰ درصد وزنی معادل نمک طعام در تغییر است (Wilkinson, 2001).

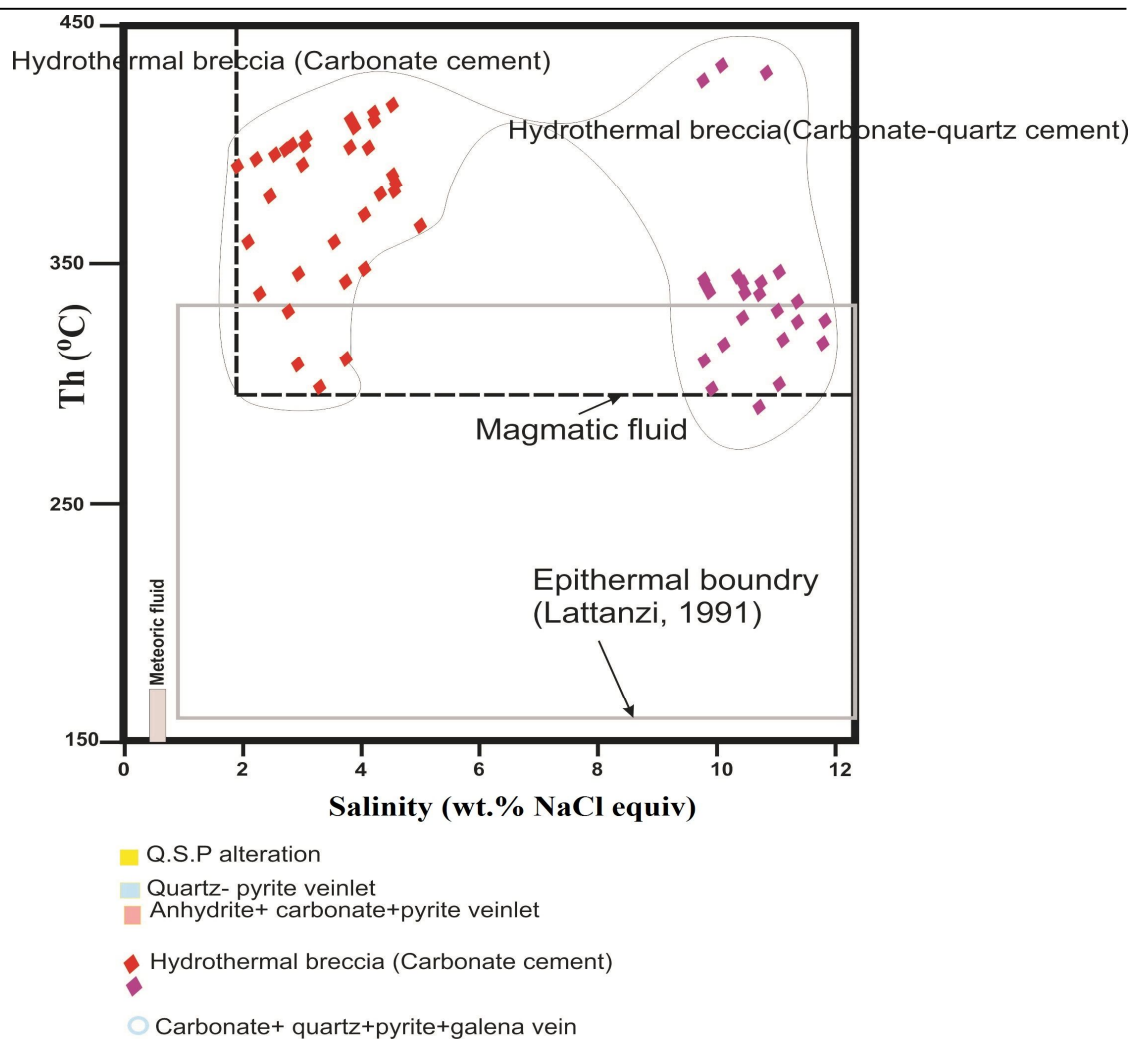
- سیالات با دمای بالا و شوری متوسط که سیمان کربناتی-سیلیسی در برش هیدروترمالی هستند. این سیالات از نظر دمایی مشابه سیالات گروه اول هستند؛ با این تفاوت که شوری آنها بالاتر است (شکل ۱۲).

در برش هیدروترمالی هم‌زمانی دو سیال با شوری متوسط و پایین را می‌توان در نتیجه یکی از این دو فرایند دانست: ۱- ورود



شکل ۱۲. نمایش محدوده پایداری کمپلکس‌های طلا به‌صورت کلریدی و بی‌سولفیدی در منطقه خونیک (Large et al., 1992)

Fig. 12. The stability domains of gold complexes as chloride and bisulfide in Khunik area (Large et al., 1992)



شکل ۱۳. نمودار دمای هموژنیزه‌شدن در برابر شوری برای سیالات کانی‌سازی برش هیدروترمالی در منطقه خونیک. ترکیب فرضی آب‌های ماگمایی و جوی بر اساس لاتانزی (Lattanzi, 1991)، هدنکوئیست و همکاران (Hedenquist et al., 1998) و نادن و همکاران (Naden et al., 2005) رسم شده است.

Fig. 13. Correlative plots for homogenization temperature (Th) against salinity for mineralized fluids in hydrothermal breccia in Khunik area. Composition of magmatic and meteoric water are plotted base on Lattanzi (1991), Hedenquist et al. (1998) and Naden et al. (2005).

است؛ برای آگاهی از منشأ گوگرد در زون برش هیدروترمالی، تعداد ۴ نمونه از پیریت‌های سالم و غیرهوازده مربوط به سیمان و قطعات برش از گمانه‌های حفاری انتخاب شدند. دلیل اهمیت انتخاب پیریت آن است که با توجه به اینکه طلا به صورت آزاد مشاهده نشد، احتمالاً کانی‌سازی طلا به صورت محلول جامد در شبکه سولفیدها و به ویژه پیریت شکل گرفته است و با یافتن منشأ سولفید، می‌توان به منشأ فلز طلا پی برد. ابتدا با بررسی مقاطع

تعیین منشأ سیال کانه‌دار به کمک ایزوتوپ گوگرد در منطقه خونیک

بررسی ایزوتوپ‌های پایدار بخشی مهم در بررسی کانسارهاست و نقش به‌سزایی در فهم ژنز کانسار دارد (Ohmoto, 1972; Ohmoto and Rye, 1979; Calagari, 2003; Hoefs, 2004; Rye, 2005).

از آنجا که پیریت فراوان‌ترین کانی سولفیدی در منطقه خونیک

کانی پیریت به صورت مقدار $\delta^{34}\text{S}$ گزارش شده است (جدول ۳). در تصحیحات دمایی برای محاسبه گوگرد موجود در سیال کانی‌ساز از فرمول اهموتو و ری (Ohmoto and Rye, 1979) استفاده شده است.

نازک-صیقلی این نمونه‌ها، ترکیب کانی‌شناسی و دگرسانی دربرگیرنده آنها مشخص شد و سپس ۲ نمونه از کانی‌سازی پراکنده پیریت در قطعات برشی و ۲ نمونه از پیریت‌های موجود در سیمان برش هیدروترمالی انتخاب شدند. نتایج آنالیز بر روی

جدول ۳. مقادیر ایزوتوپ‌های گوگرد حاصل از پیریت‌های موجود در سیمان و قطعات زون برش هیدروترمالی در منطقه خونیک
Table 3. Sulfur isotope values for pyrites of cement and fragment of hydrothermal breccia in Khunik area

Sample No.	Type of mineralization	$\delta^{34}\text{S py}$ ‰	T (°C)	Δ	Calculation	$\delta^{34}\text{S H}_2\text{S}$ ‰
BH7-17C	Carbonate cement	1.28	384	0.9	$\delta^{34}\text{S py} - \delta^{34}\text{S H}_2\text{S} = 0.9$	0.38
BH7-17F	Disseminated in fragments of breccia	-2.67	355	1	$\delta^{34}\text{S py} - \delta^{34}\text{S H}_2\text{S} = 1$	-3.67
BH1-53C	Carbonate-quartz cement	2.7	334	1.1	$\delta^{34}\text{S py} - \delta^{34}\text{S H}_2\text{S} = 1.1$	1.6
BH1-53F	Disseminated in fragments of breccia	-0.24	355	1	$\delta^{34}\text{S py} - \delta^{34}\text{S H}_2\text{S} = 1$	-1.24

(Yilmaz et al., 2010).

نتیجه‌گیری

منطقه خونیک، یک کانی‌سازی از نوع طلاست و در ارتباط با زون برش هیدروترمالی نسبتاً وسیعی در منطقه است. سن نسبی تشکیل آن در حدود ۳۸/۱ میلیون سال قبل و به دنبال نفوذ پورفیری‌های منطقه به درون واحدهای آتشفشانی است. مهم‌ترین کانی‌سازی در منطقه خونیک، کانی‌سازی برش هیدروترمالی است. برش با بافت موزائیکی شایع‌ترین نوع برش هیدروترمالی در منطقه خونیک است. بر اساس نوع سیمان نیز دو نوع برش با سیمان کربناتی-کوارتز-سولفید و برش با سیمان کربنات-سولفید شناسایی شدند. بر اساس سیالات درگیر، کانی‌سازی برش‌ها از نوع هیدروماگمایی (فریاتوماگمایی) است (Sillitoe, 1985). از آنجا که هم سیال، منشأ ماگمایی-هیدروترمالی دارد و هم موتور حرارتی ماگماست (Sillitoe, 2010).

با توجه به تصحیحات دمایی صورت گرفته بر روی کانی‌های پیریت مورد بررسی، مقدار $\delta^{34}\text{S}$ اندازه‌گیری شده در دو نمونه پیریت پراکنده در قطعات برش هیدروترمالی به ترتیب ۱/۲۴- و ۳/۶۷- ‰ و این مقدار برای سیمان کربناتی و سیمان کربنات-سیلیسی در برش هیدروترمالی به ترتیب ۰/۳۸ و ۱/۶ ‰ است. ترکیب ایزوتوپی به هم نزدیک بوده و دارای دامنه نزدیک به صفر هستند که نقش کنترل ماگمایی در وقایع کانی‌سازی را نشان می‌دهد (Ohmoto and Rye, 1979; Kouzmanov and Ramboz, 2003; Moritz et al., 2003; Andrew et al., 2008; Chen et al., 2009). ایزوتوپ گوگرد در کانسارهای ماگمایی بین ۳± در نوسان است (Chaussidon and Lorand, 1990). گوگرد ممکن است از یکی از دو منبع زیر به دست آمده باشد:

یا مستقیماً از ذوب‌بخشی که سیال ماگمایی را تولید کرده و یا به دلیل انحلال و آب‌شویی منابع آذرین سولفیددار پیشین

طلا شده و از طرفی نوع سیمان نیز در میزان عیار طلا تأثیر گذار است؛ به طوری که بر اساس داده‌های ژئوشیمی میزان متوسط عیار طلا در برش‌های هیدروترمالی با سیمان کربنات-سولفید خیلی بیشتر از برش‌هایی با سیمان کربنات-کوارتز سولفید است. از آنجا که از نظر شرایط ژئوشیمیایی، سیمان کربنات-سولفید در مقایسه با سیمان کربنات-کوارتز-سولفید در شرایط pH بالاتر (قلیایی تا خنثی) تشکیل می‌شود (Mason and Moor., 1982) و از طرفی کمپلکس کلریدی به عنوان کمپلکس غالب در کانی‌سازی برش هیدروترمالی در منطقه خونیک است، می‌توان چنین استنباط کرد که کمپلکس کلریدی طلا به دلیل افزایش pH در سیمان کربنات-سولفید ناپایدار شده و باعث ته‌نشینی بیشتر طلا (Karimpour and Saadat, 2002) و افزایش عیار آن شده است. اختلاط، جوشش و کاهش pH، فرایندهای مهم در ته‌نشینی طلا و سایر فلزات هستند. علاوه بر این، بررسی ایزوتوپ گوگرد در پیریت‌های منطقه برای سولفیدهای این مرحله از کانی‌سازی منشأ ماگمایی را پیشنهاد می‌کند.

(1985)، وجود این کمپلکس برشی، تأثیر نفوذ ماگما در یک سیستم هیدروترمالی فعال را نشان می‌دهد (Davies et al., 2008a). حضور برش‌های گرمایی احتمالاً نشانه پدیده جوشش در رخداد سیال کانه‌ساز و نهشت طلا در این مرحله هستند. داده‌های سیالات در گیر بر روی دو نوع سیمان برشی، دو سیال مختلف با دمای بالا و شوری پایین و دمای بالا و شوری متوسط تا بالا را نشان می‌دهد. دامنه دمای همگن شدن و شوری بیانگر آن است که منشأ سیالات آب‌های ماگمایی-گرمایی هستند که توسط سیالات جوی رقیق شده‌اند و شوری آنها کاهش یافته است.

بررسی‌های ژئوشیمی نشان‌دهنده ارتباط ناهنجاری بالای عنصر طلا با کانی‌سازی برش هیدروترمالی است. میزان گردش‌دگی قطعات و فراوانی سیمان نیز در افزایش عیار طلا مؤثر است؛ به طوری که در برش‌هایی با بافت موزائیکی تا رابل میزان عیار طلا بالاتر از نوع خردشده است. مقایسه داده‌های ژئوشیمیایی بر روی دو نوع سیمان مشاهده شده در زون برش هیدروترمالی نشان می‌دهد که سیمان برش هیدروترمالی باعث افزایش عیار

References

- Abdi, M., Karimpour, M.H. and Najafi, A., 2010. Geology, alteration and mineralization potential of Kuh-Shah region, South Khorasan. First Symposium of Iranian Society of Economic Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (in Persian with English abstract)
- Abdi, M. and Karimpour, M.H., 2012. Geology, alteration, mineralization, petrogenesis, geochronology, geochemistry and airborne geophysics of Kuh Shah prospecting area, SW Birjand. *Journal of Economic Geology*, 4(1): 77–107. (in Persian with English abstract).
- Andrew, G.S.D., Cook, D. and Gemmel, J.B., 2008. Hydrothermal breccias and veins at the Kelian gold mine, Kalimantan, Indonesia: Genesis of a large epithermal gold deposit. *Economic Geology*, 103(4): 717–757.
- Arjmandzadeh, R., 2011. Mineralization, geochemistry, geochronology, and determination of tectonomagmatic setting of intrusive rocks in Dehsalm and Chahshaljami prospect areas, Lut Block, eastern Iran. Ph.D. thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 215 pp. (in Persian)
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., Medina, J.M. and Homam, S.M., 2011. Sr–Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut Block, eastern Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 283–296.
- Bodnar, R.J., 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of

- H₂O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683–684.
- Borna, B., Kargar, S. and Fazli, T., 2013. Final reports of project: Public exploration of gold in Khunik area, Khusf, Khorasan jonoubi. Pars Kaneh Kish Company, Tehran, Final report, 388 pp. (in Persian)
- Brown, P.E. and Lamb, W.M., 1989. P-V-T properties of fluids in the system H₂O-CO₂-NaCl: New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(6): 1209–1221.
- Calagari, A.A., 2003. Stable isotope (S, O, H and C) studies of the phyllic and potassic-phyllic alteration zones of the porphyry copper deposit at Sungun, East Azarbaijan, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(7): 767–780.
- Chaussidon, M. and Lorand, J.P., 1990. Sulphur isotope composition spinel lherzolite massifs from Ariege (N.E. Pyrenees. France): An ion microprobe study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(10): 2835–2846.
- Chen, Y.J., Pirajno, F., Li, N., Guo, D.Sh. and Lai, Y., 2009. Isotope systematics and fluid inclusion studies of the Qiyugou breccia pipe-hosted gold deposit, Qinling orogen, Henan province, China: Implication for ore genesis. *Ore Geology Reviews*, 35(2): 245–261.
- Davis, D.W., Lowenstein, T.K. and Spencer, R.J., 1990. Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in systems NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O, NaCl-MgCl₂-H₂O, and NaCl-CaCl₂-H₂O. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(3): 591–601.
- Eftekhari-Nezhad, J. and Stocklin, J., 1992. Geological map of Iran sheet K8 (Birjand), scale 1:250,000. Geological Survey of Iran, Tehran.
- 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): 373–404.
- Hoefs, J., 2004. Stable isotope geochemistry. Springer-Verlag, Berlin, 244 pp.
- Jébrak, M., 1997. Hydrothermal breccias in vein-type ore deposits; a review of mechanisms, morphology and size distribution. *Ore Geology Reviews*, 12(3): 111–134.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Farmer, G.L. and Stern, C.R., 2012. Petrogenesis of granitoids, U-Pb zircon geochronology, Sr-Nd isotopic characteristics, and important occurrence of Tertiary mineralization within the Lut Block, eastern Iran. *Journal of Economic Geology*, 4(1): 1–28. (in Persian with English abstract)
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Mazaheri, S.A. and Haidarian Shahri, M.H., 2007. Magmatism and different types of mineralization in Lut Block. 15th Symposium of Iranian Society of Crystallography and Mineralogy, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (in Persian with English abstract)
- Karimpour, M.H. and Saadat S., 2002. Applied economic geology. Mashhad publishing, Mashhad, 535 pp.
- Karimpour, M.H., Zaw, K. and Huston, D.L., 2005. S-C-O isotopes, fluid inclusion microthermometry, and the genesis of ore bearing fluids at Qaleh-Zari Fe-oxide Cu-Au-Ag mine, Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 16(2): 153–168.
- Kouzmanov, K. and Ramboz, C., 2003. Stable isotopic constraints on the origin of epithermal Cu-Au and related porphyry copper mineralizations in the southern Panagyurishte district, Srednogie zone, Bulgaria. In: Eliopoulos, D.G. (Editor), Mineral Exploration and Sustainable Development. Millpress, Rotterdam, pp. 1181–1184.
- Large, R.R., Huston, D., McGoldrick, P. and Tuxton, P.A., 1992. Gold distribution and genesis in Australian volcanogenic massive sulfide deposits and their significance for gold transport models. In: R. Reid, W. Keays, W.R. H. Ramsay and J.D. Groves (Editors), The geology of gold deposits, the perspective in 1988. Society of Economic Geologists, Yale Station, USA, pp. 509–520.
- Lattanzi, P., 1991. Applications of fluid inclusions in the study and exploration of mineral deposits. *European Journal of Mineralogy*, 3(4): 689–701.
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M.H. and Mazaheri, S.A., 2010. Rb-Sr and Sm-Nd isotopic composition and petrogenesis of ore-related intrusive rocks of gold-rich porphyry copper Maherabad prospect area (north of

- Hanich), east of Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 18(2): 15–32. (in Persian with English abstract)
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M.H. and Stern, C.R., 2015. The Khopik porphyry copper prospect, Lut Block, Eastern Iran. Geology, alteration and mineralization, fluid inclusion, and oxygen isotope studies. *Ore Geology Reviews*, 65(2): 522–544.
- Mason, B. and Moore, C.B., 1982. *Principles of Geochemistry*. John Wiley & Sons, New York, 344 pp.
- Moritz, R., Jackquat, S., Chambefort, I. and Fontignie, D., 2003. Controls on ore formation at high sulfidation Au–Cu Chelopech deposit, Bulgaria: evidence from infrared fluid inclusion microthermometry of enargite and isotope systematics of barite. In D.G. Eliopoulos, (Editor), *Mineral Exploration and Sustainable Development*. Millpress, Rotterdam, pp. 1209–1212.
- Movahed Aval, H. and Emami, M., 1978, Geology map of Mokhtaran, scale 1:100000. Geological survey of Iran.
- Nadasan, L. and Nadasan, F., 2005. Gold mineralisation in hydrothermal-breccia from South Eastern part of Frasin deposit, Bucium district, Apuseni Mountains, Romania. Bulgaria Academic, Kiten, Bulgaria, Report of Project 486, 5 pp.
- Naden, J., Killias, S.P. and Darbyshire, D.P.F., 2005. Active geothermal system with entrained seawater as modern analogs for transitional volcanic-hosted massive sulfide and continental magmato-hydrothermal mineralization: the example of Milos Island, Greece. *Geology*, 33(7): 541–544.
- Nadermezerji, S., Karimpour, M.H. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2017. Geology, Alteration, Mineralization, Geochemistry and petrology of intrusive units in the Shah Soltan Ali prospect area (Southwest of Birjand, South Khorasan province). *Journal of Economic Geology*, 9(1): 117–139. (in Persian with English abstract)
- Ohmoto, H., 1972. Systematic of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 67(5): 551–581.
- Ohmoto, H. and Rye, R.O., 1979. Isotopes of sulfur and carbon. In: H.L. Barnes (Editor), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. John Wiley & Sons, Newyork, pp. 509–567.
- Omidvar, M.H., 2005. Lithochemical exploration reports of Khunik area (1:5000). 24th Iranian Conference, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran. (in Persian)
- Prokofiev, V.Y., Garofalo, P.S., Bortnikov, N.S., Kovalenker, V.A., Zorina, L.D., Grichuk, D.V. and Selektor, S.L., 2010. Fluid inclusion constraints on the genesis of gold in the Darasun district (eastern Transbaikalia), Russia. *Economic Geology*, 105(2): 395–416.
- Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Razique, A. and Fletcher, T., 2012. High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu ± Mo ± Au potential: examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan. *Economic Geology*, 107(2): 295–332.
- Ross, P.S., Jebrak, M. and Walker, B.M., 2002. Discharge of hydrothermal fluids from a magma chamber and concomitant formation of a stratified breccia zone at the Questa porphyry molybdenum deposit, New Mexico. *Economic Geology*, 97(8): 1679–1699.
- Rye, R.O., 2005. A review of the stable-isotope geochemistry of sulfate minerals in selected igneous environments and related hydrothermal systems. *Chemical Geology*, 215 (1–4): 5–36.
- Samiee, S., 2016. Mineralization, petrology and geophysical studies in Khunik area, south of Birjand. Ph.D. thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 299 pp.
- Samiee, S., Karimpour, M.H., Ghaderi, M. and Haidarian Shahri, M.H., 2013. Geology, alteration, mineralization and geochemistry of Khunik area, south of Birjand. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 21(3): 487–498. (in Persian with English abstract)
- Samiee, S., Karimpour, M.H., Ghaderi, M., Haidarian Shahri, M.R., Kloetzli, U. and Santos, J.F., 2016. Petrogenesis of subvolcanic rocks from the Khunik prospecting area, south of Birjand, Iran: Geochemical, Sr–Nd isotopic and U–Pb zircon constraints. *Journal of Asian Earth Sciences*, 115(1) 170–182.
- Samiee, S., Karimpour, M.H., Ghaderi, M., Haidarian Shahri, M.R. and Santos, J.F., 2017. Dating and source determination of volcanic rocks from Khunik area (South of Birjand,

- South Khorasan) using Rb-Sr and Sm-Nd isotopes. *Petrology*, 7(28): 145–160. (in Persian with English abstract)
- Scott, A.M. and Watanabe, Y., 1998. Extreme boiling model for variable salinity of the Hokko low- sulfiation epithermal Au prospect, southwestern Hokkaido Japan. *Mineralium Deposita*, 33(6) 563–578.
- Sheppherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. Blackie and Son, Virginia, 239 pp.
- Sillitoe, R.H., 1985. Ore-related breccias in volcanoplutonic arcs. *Economic geology*, 80 (6): 1467–1514.
- Sillitoe, R.H., 2005. Comments on the Chahshalghami, Hired, Maherabad, Khonik, Shurab gold prospects, Lut Block, eastern Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, internal report, 11 pp.
- Simmons, S.F. and Browne, P.R.I., 1997. Saline fluid inclusions in sphalerite from the Broadlands-Ohaaki geothermal system: A coincidental trapping of fluid boiled toward dryness. *Economic Geology*, 92(4): 485–489.
- Thiersch, P.C., Williams-Jones, A.E. and Clark, J.R., 1997. Epithermal mineralization and ore controls of the Shasta Au–Ag deposit, Toadoggone District, British Columbia, Canada. *Mineralium Deposita*, 32(1) 44–57.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1–4): 229–272.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Yilmaz, H., Oyman, T., Sonmez, F.N., Arehart, G.A. and Billor, Z., 2010. Intermediate sulfidation epithermal gold-base metal deposits in Tertiary subaerial volcanic rocks, Sahinli/Tespah dere (Lapseki/western Turkey). *Ore Geology Reviews*, 37(3–4): 236–258.



Geochemistry, Fluid Inclusion and Sulfur Isotopes Studies of Hydrothermal Breccia Gold Mineralization in the Khunik Area, Khorasan Jonoubi Province (Iran)

Somayeh Samiee^{1&2*}, Majid Ghaderi³ and Sedigheh Zirjanizadeh²

1) Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2) Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Gonabad, Gonabad, Iran

3) Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Submitted: Mar. 07, 2017

Accepted: July 30, 2018

Keywords: Mineralization, fluid inclusions, hydrothermal breccia, Khunik, Lut Block

Introduction

The Khunik gold prospecting area is located 106 km south of Birjand, in the Khorasan Jonoubi province. The Khunik area is located in a strategic part of the Lut Block that includes many instances of mineralization such as the Qaleh Zari IOCG deposit (Karimpour et al., 2005; Richards et al., 2012), the Maherabad porphyry-type Cu-Au (Malekzadeh Shafaroudi et al., 2010, 2015), the Cu porphyry type of Dehsalm (Arjmandzadeh, 2011), the Kooh-Shah (Abdi et al., 2010) and the Hired intrusion-related (reduced type granitoid) gold deposit (Karimpour et al., 2007). According to geology, alteration, geochemistry and mineralization evidence the Khunik area is a hydrothermal breccia gold system. The important styles of mineralization are: hydrothermal breccia, veinlet and disseminated. The maximum gold concentration occurs along the hydrothermal breccia zone. The aim of this study is surface and deep investigation of alteration, mineralization and geochemical characteristics of hydrothermal breccia as the most important part of mineralization in the Khunik area.

Materials and methods

Two hundred samples were collected from both surface and drill holes. Mineralization and paragenesis of the system were studied based on

150 polish and thin polish sections.

Doubly polished thin sections were prepared for twelve samples containing quartz and calcite. Based on detailed petrography study of the fluid inclusion, representative fluid inclusions were selected for the measurement. Using a Linkam TH600 heating- freezing stage attached to a Zeiss transmitted light microscope at the Ferdowsi University of Mashhad, Iran. six pyrite samples prepared for conventional isotopic analysis were sent to the Isoanalytical laboratory in England.

Results

There are several outcrops of granitoid subvolcanic intrusions as dykes and stocks in the area which intruded volcanic rocks. The subvolcanic bodies consist mainly of diorite, monzonite and monzodiorite. In addition, they include hydrothermal breccia outcrops in the area. Alteration in the Khunik area is related to some intrusives. Exposed alterations at the surface are: propylitic, argillic, hydrothermal breccia and carbonate. Alteration zones at depth are: quartz-sericite-pyrite, quartz- tourmaline, carbonatization and less argillic.

Mineralization is related to subvolcanic units with an age of 38.4 Ma. Mineralization outcrops in the central portion of the area are as disseminated, veinlet, and hydrothermal breccia. Hydrothermal

*Corresponding authors Email: samiee85@yahoo.co.in

breccia is the most important part of the mineralization in the central part of the Khunik area. This zone is about 730×750 meter.

The hydrothermal breccia is mostly mosaic to rubble monomictic breccia with hydrothermal cement. Detailed systematic mapping leads us to the recognition of two distinct breccia bases on cement: carbonate- quartz cement breccia and carbonate cement breccia. Mineralization occurs in both clast and cement of hydrothermal breccia and in the truncated veinlet. Metallic minerals are dominantly pyrite, and they contain chalcopyrite and tetrahedrite only in trace amounts. Based on the litho-geochemical data, the concentration of elements are as follows: Au: 2-4600 ppb, Ag: 40-980 ppb, Sb: 6.9-133.5 ppm, As: 0.5-158 ppm, Hg: 0.2-4.95 ppm, Cu: 21-601 ppm, Pb: 4-1485 ppm, Zn: 18-1095 ppm. Geochemical data in the drill cores indicated different anomalies in gold concentration. These anomalies are related to altered subvolcanic units to quartz-sericite-pyrite and hydrothermal breccia. Thermometric analysis was performed on L+V fluid inclusions. The result of Th vs. frequency and salinity vs. frequency plots indicate that quartz and calcite-hosted in the cement of hydrothermal breccia mineralization may have taken place between 300 to 430°C from a moderately saline hydrothermal fluid (2-12 wt.% NaCl equiv.). The presence of hydrothermal breccia is consistent with boiling. The average calculated $\delta^{34}\text{S}$ H₂S values for clast and cement of hydrothermal breccia are respectively -2.4‰ and 0.9‰ for pyrite that are consistent with a magmatic source for sulfur (Andrew et al., 2008). Gold deposition at hydrothermal breccia is inferred to have been largely by boiling, although mixing with meteoric waters may have also occurred.

References

- Abdi, M., Karimpour, M.H. and Najafi, A., 2010. Geology, alteration and mineralization potential of Kuh-Shah region, South Khorasan. First Symposium of Iranian Society of Economic Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (in Persian with English abstract)
- Andrew, G.S.D., Cook, D. and Gemmel, J.B., 2008. Hydrothermal breccias and veins at the Kelian gold mine, Kalimantan, Indonesia: Genesis of a large epithermal gold deposit. *Economic Geology*, 103(4): 717–757.
- Arjmandzadeh, R., 2011. Mineralization, geochemistry, geochronology, and determination of tectonomagmatic setting of intrusive rocks in Dehsalm and Chahshajami prospect areas, Lut Block, eastern Iran. Ph.D. thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 215 pp. (in Persian)
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Mazaheri, S.A. and Haidarian Shahri, M.H., 2007. Magmatism and different types of mineralization in Lut Block. 15th Symposium of Iranian Society of Crystallography and Mineralogy, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (in Persian with English abstract)
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M.H. and Mazaheri, S.A., 2010. Rb-Sr and Sm-Nd isotopic composition and petrogenesis of ore-related intrusive rocks of gold-rich porphyry copper Maherabad prospect area (north of Hanich), east of Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 18(2): 15–32. (in Persian with English abstract)
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M.H. and Stern, C.R., 2015. The Khopik porphyry copper prospect, Lut Block, Eastern Iran. Geology, alteration and mineralization, fluid inclusion, and oxygen isotope studies. *Ore Geology Reviews*, 65(2): 522–544.
- Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Razique, A. and Fletcher, T., 2012. High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu ± Mo ± Au potential: examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan. *Economic Geology*, 107(2): 295–332.