

## کانه‌نگاری و شیمی سولفیدها در رگه‌های سیلیسی طلادار چاه‌نعلی، شمال بزمان، جنوب شرق ایران

محمد بومری<sup>۱\*</sup>، حبیب بیابانگرد<sup>۱</sup>، کازو ناکاشیما<sup>۲</sup> و محمدجواد غلامی<sup>۱</sup>  
<sup>۱</sup> گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران  
<sup>۲</sup> گروه علوم زمین و محیط زیست، دانشکده علوم، دانشگاه یاماگاتا، یاماگاتا، ژاپن

### چکیده

رگه‌های طلادار چاه‌نعلی در ۱۶۰ کیلومتری شمال غرب ایران‌شهر و ۷۰ کیلومتری شمال شهر بزمان در بلوک لوت واقع شده است. سنگ‌های میزبان این رگه‌ها به طور عمده سنگ‌های بازالتی و آندزیتی هستند که در اطراف رگه‌ها دچار دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک شده‌اند. ساخت‌های پوسته‌ای متقارن و بافت‌های کواکادی، کلوپورمی و برشی در رگه‌های سیلیسی گسترش در خور توجهی دارد. عیار طلا در این رگه‌ها بالا و تا ۱۶ ppm می‌رسد. سولفیدها و کانی‌زایی طلا و نقره به طور عمده در پهنه سیلیسی مشاهده شده و به سولفیدهای اولیه و ثانویه تقسیم‌بندی می‌شود. شیمی این سولفیدها و نقشه‌های عنصری آرسنیک، طلا و نقره به وسیله تجزیه ریزکاو الکترونی تعیین و تهیه شده است. عناصری همچون: As, Ag, Au, Bi, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, S, Sb, Se, Te و Zn در سولفیدهای مورد مطالعه به طور کمی اندازه‌گیری شد. پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، تتراهیدریت و یک سولفید نقره‌دار در مرحله اولیه و کولیت و کولیت غنی از نقره در مرحله ثانویه تشکیل شده‌اند. به طور کلی، مقدار طلا در سولفیدهای مورد بررسی اندک، اما مقدار نقره در کانسنگ سولفیددار به نسبت زیاد است. کانی‌سازی طلا و نقره مورد مطالعه از نوع سیستم اپی‌ترمال کم سولفور غنی از نقره است که شاید از محلول‌های گرمابی مرتبط با فعالیت‌های آتشفشانی جوان تشکیل شده باشد.

واژه‌های کلیدی: سولفید نقره، کانی‌زایی طلا و نقره، اپی‌ترمال، رگه‌های سیلیسی، چاه‌نعلی، کوه بزمان، بلوک لوت

### مقدمه

کیلومتری شمال غرب ایران‌شهر و در ۷۰ کیلومتری شمال شهر بزمان قرار گرفته است (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه در جنوب شرق ایران و در بلوک لوت واقع و به طور عمده شامل: سنگ‌های آتشفشانی ترسیر و کواترنری است. بخشی از این سنگ‌های

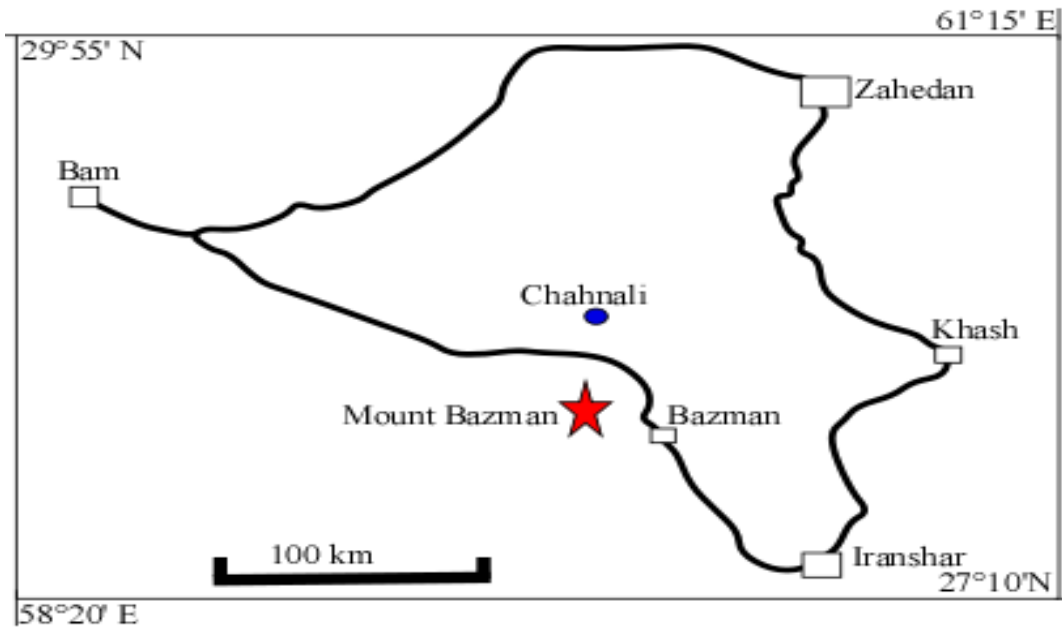
منطقه چاه‌نعلی در فاصله ۲۸ کیلومتری (فاصله هوایی) شمال قله کوه آتشفشانی بزمان واقع شده است. راه دسترسی به این منطقه از طریق جاده آسفالتی ایران‌شهر-بم امکان‌پذیر است که در ۱۶۰

Cooke؛ Simmons, 1995؛ Sawkins, 1990؛ 1985؛  
 Simmons *et al.*, 2005؛ and Simmons, 2000؛  
 Pirajno, 2009)؛ اما ماهیت کانسارهای اپی-ترمال در  
 ایران و به ویژه در منطقه مورد مطالعه به خوبی  
 شناخته شده نیست. کانسارهای اپی-ترمال از لحاظ  
 کانی‌شناسی دارای تنوع گسترده‌ای هستند و شرایط  
 فیزیکوشیمیایی حاکم بر محیط تشکیل این کانسارها  
 و شیمی سیالات در مجموعه کانی‌های کانسنگ،  
 سنگ میزبان و دگرسانی‌ها منعکس می‌شود  
 (Hedenquist *et al.*, 1996). هدف اصلی این  
 پژوهش، شناسایی و توصیف انواع کانی‌ها به ویژه  
 کانی‌های سولفیدی و نقره‌دار همراه با این رگه‌ها و  
 معرفی ترکیب شیمیایی آنها است. به علاوه، توزیع و  
 کانی‌شناسی، دگرسانی‌ها و منشأ کانی‌زایی طلا و  
 نقره نیز به طور مختصر توصیف می‌شود.

### زمین‌شناسی منطقه

از نظر زمین‌شناسی منطقه چاه‌نعلی در  
 منتهی‌الیه کمربند آتشفشانی جوان سهند-بزمان  
 (منطبق با پهنه آتشفشانی سنوزوئیک ایران مرکزی  
 یا پهنه ارومیه-دختر) و در جنوب بلوک لوت واقع  
 شده است (شکل ۲). در واقع، منطقه مورد مطالعه را  
 از نظر زمین‌شناسی می‌توان بخشی از ماگماتیسم  
 شمال مکران دانست که اگر چه مهمترین ویژگی آن  
 وجود مراکز آتشفشانی جوان و مهمی همچون: کوه  
 شاهسواران، کوه بزمان و کوه تفتان در ایران، کوه  
 سلطان در پاکستان و کوه آتشفشانی تاجز در نیمروز  
 افغانستان است اما فعالیت‌هایی پلوتونیک و  
 آتشفشانی از کرتاسه تا کواترنری در منطقه ثبت شده  
 است (Gholami, 2011؛ Berberian *et al.*, 1982).  
 زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه به طور مفصل در  
 نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ چاه‌سنگی و  
 زیرکی نشان داده شده است (Aghanabati, 1993؛  
 Kholghi Khasraghi, 2005).

آتشفشانی به کوه آتشفشانی بزمان متعلق است که  
 نسبت به زمین‌های اطراف بیش از ۲۰۰۰ متر  
 اختلاف ارتفاع دارد و بلندترین قله آن دارای ارتفاع  
 ۳۴۵۰ متر است. از نظر اقتصادی مهم‌ترین  
 کانسارهای فلزی که با سنگ‌های آتشفشانی و  
 سیستم‌های زمین گرمایی مرتبط با آنها همراه است  
 کانسارهای اپی-ترمال طلا و نقره است (Hayba *et al.*,  
 1985؛ Heald *et al.*, 1987؛ White and  
 Richards, 1995؛ Hedenquist, 1990؛  
 Cooke؛ Hedenquist *et al.*, 1996, 2000؛ 1995  
 and Simmons, 2000). با توجه به  
 گسترش سنگ‌های آتشفشانی در ایران و به ویژه در  
 کمربندهای آتشفشانی سهند-بزمان، البرز و در بلوک  
 لوت، زمینه مناسبی برای اکتشاف طلای اپی-ترمال  
 وجود دارد. به طوری که مطالعه روی این نوع  
 کانی‌زایی طلا در ایران به تازگی مورد توجه قرار  
 گرفته است (Asadi *et al.*, 2004؛ Shamanian *et al.*,  
 2010). آثار و شواهد تاریخی که نشان‌دهنده  
 معدن‌کاری قدیمی در منطقه چاه‌نعلی باشد، دیده  
 نمی‌شود. نخستین مطالعات اکتشافی توسط شرکت  
 تحقیق و گسترش صنایع معدنی پارس‌کانی، در سال  
 ۱۳۸۲ انجام شده است (Gholami, 2011). بر اساس  
 این مطالعات، در بعضی از نمونه‌های برداشت شده از  
 رگه‌های سیلیسی در منطقه چاه‌نعلی تا بیش از ۱۶  
 ppm طلا و ۱۲۰ ppm نقره گزارش شده است.  
 رگه‌های سیلیسی و مناطق دگرسان شده در منطقه  
 چاه‌نعلی روی نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰  
 چاه‌سنگی نیز مشخص شده است (Kholghi  
 Khasraghi, 2005). بر اساس مطالعات قبلی،  
 رگه‌های سیلیسی در شمال کوه بزمان از نوع  
 اپی-ترمال کم سولفور است (Karami, 2005)؛  
 (Gholami, 2011). اگرچه کانی‌زایی و زمین‌شناسی  
 کانسارهای اپی-ترمال در دنیا به طور گسترده‌ای  
 مطالعه شده است (Henley, 1933؛ Lindgren,



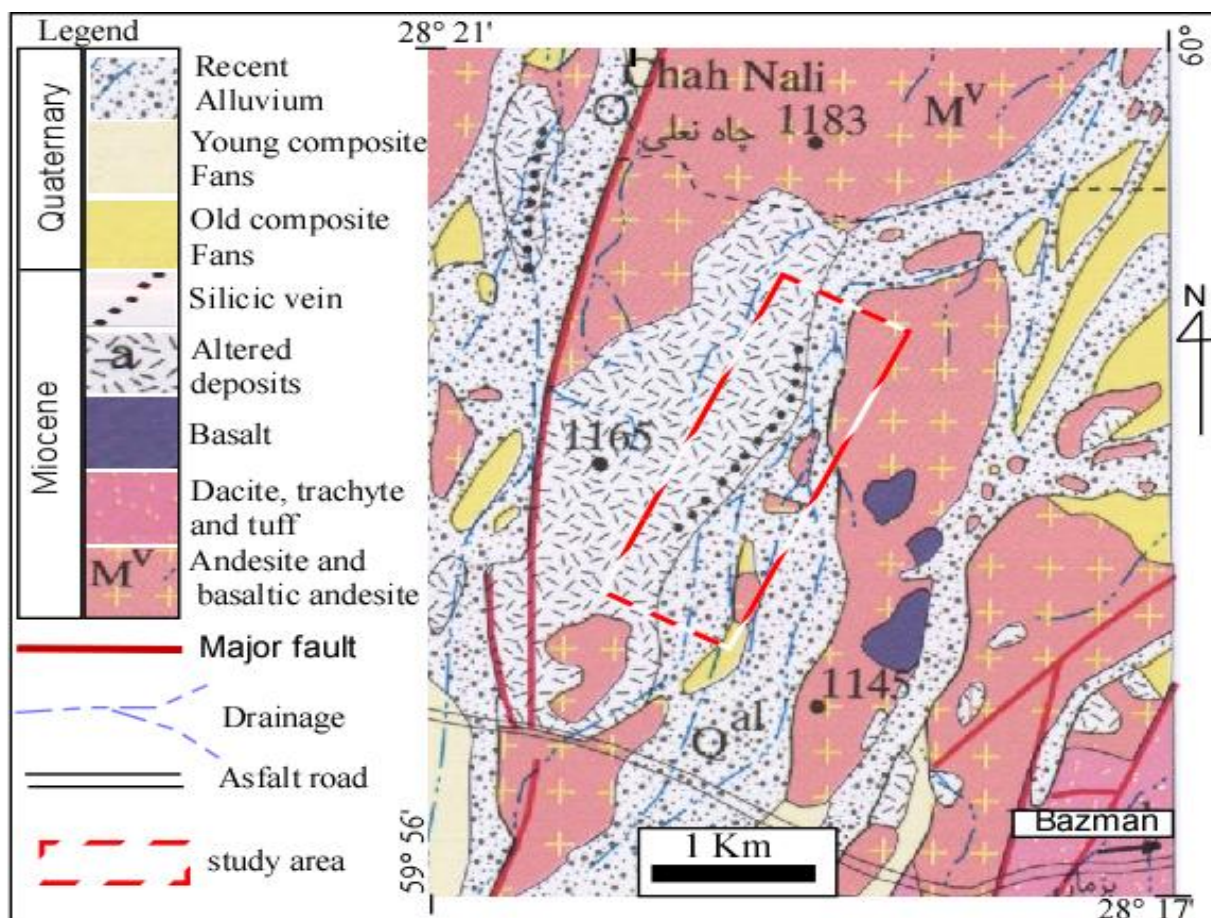
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده کانی‌زایی طلا در چاه‌نعلی (دایره آبی)



شکل ۲- موقعیت بلوک لوت نسبت به مناطق مجاور. محل تقریبی کانی‌زایی طلا در چاه‌نعلی با دایره رنگی مشخص شده است (Aghanabati, 2004; Stocklin, 1968)

جنوب این منطقه و حضور مخروط‌های کوچک بازالتی در اطراف آن به نظر می‌رسد بیشتر سنگ‌ها تحت تأثیر فعالیت‌های آتشفشانی مرتبط با کوه بزمان قرار گرفته باشد. سنگ‌های آتشفشانی منطقه چاه‌نعلی به سری ماگمایی کلسیمی-قلیایی حاشیه قاره متعلق است که تشکیل آنها شاید بر اثر فرورانش پوسته اقیانوسی عمان به زیر مکران باشد (Gholami, 2011). سن رگه‌های سیلیسی و سنگ‌های دگرسان شده در شکل ۳ جوان‌تر از سنگ‌های آتشفشانی میوسن است اما از آبرفت‌های کواترنری قدیمی‌تر هستند. این نوع رگه‌ها و دگرسانی‌ها به طور غالب به سیستم‌های زمین‌گرمایی جوان نسبت داده می‌شود (Faure *et al.*, 2002).

در ناحیه مورد مطالعه مجموعه‌های آتشفشانی رخنمون یافته به اواخر ترسیری تا اوایل کواترنری نسبت داده شده است. بر اساس نقشه زمین‌شناسی چاه‌سنگی، سنگ‌های قدیمی‌تر از میوسن در منطقه مطالعه شده وجود ندارد (شکل ۳). در شرق چاه‌نعلی سنگ‌های آتشفشانی به طور عمده آذرآواری هستند در حالی که در بخش غربی گدازه‌های داسیتی گسترش بیشتری دارد. سنگ‌های آتشفشانی محدوده مورد مطالعه ترکیبی آن‌دزیتی، آن‌دزیت‌بازالت، بازالت و اولیوین‌بازالت دارد (Gholami, 2011). اگر چه بخش زیادی از سنگ‌های منطقه چاه‌نعلی به میوسن نسبت داده شده است اما با توجه به حضور آتشفشان بزمان در



شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی ناحیه چاه‌نعلی بر گرفته از نقشه زمین‌شناسی چاه‌سنگی (Kholghi Khasraghi, 2005).  
Mv=گدازه‌ها و سنگ‌های آذرآواری سالم تا دگرسان شده

## روش انجام پژوهش

تعداد ۴۰ نمونه از رخنمون‌ها و مغزه‌های حفاری سنگ‌های در بر گیرنده، رگه‌های سیلیسی و پهنه‌های دگرسانی برداشت شد و از آنها مقاطع نازک و صیقلی تهیه و با میکروسکوپ پلاریزان عبوری و انعکاسی بررسی شدند. تعداد هفت نمونه نیز از مناطق دگرسان شده با پراش اشعه ایکس آزمایش شدند. ترکیب شیمیایی کانی‌های سولفیدی موجود در رگه‌های سیلیسی مورد بررسی با روش WDS به وسیله تجزیه ریزکاو الکترونی خودکار مدل JEOL.JXA-8600 در دانشگاه یاماگاتا در کشور ژاپن با ولتاژ ۲۰ کیلو وات و جریان  $2 \times 10^{-8}$  آمپر تعیین شده است. قطر پرتو الکترونی هنگام آزمایش پنج میکرون تنظیم شد. عناصری همچون: Ag, As, Au, Bi, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, S, Sb, Se, Te, Zn در سولفیدهای مورد مطالعه به طور کمی اندازه‌گیری شد. نقشه‌های بعضی از عناصر نیز با تجزیه ریزکاو الکترونی تهیه شده است.

**کانه‌زایی:** در منطقه چاه‌نعلی چندین رگه سیلیسی طلا و نقره دار وجود دارد که دارای طول، عرض، امتداد و شیب‌های متفاوتی هستند. رگه‌های مورد نظر در این پژوهش امتداد N25E تا N35E و شیب بیش از ۸۰ درجه دارند (Gholami, 2011). طول بعضی از این رگه‌ها به بیش از یک کیلومتر و عرض آنها تا بیش از دو متر نیز می‌رسد. این رگه‌ها در عرض به وسیله گسل‌های راست‌گرد جابجا شده‌اند (شکل ۴). رگه‌ها به طور مسلم اپی‌ژنتیک هستند. زیرا بعد از سنگ‌های میزبان تشکیل شده‌اند.

ماهیت اولیه سنگ‌های میزبان در مجاورت رگه‌های سیلیسی قابل تشخیص نیست و به شدت سیلیسی شده‌اند. اما سنگ‌هایی که از رگه‌های

سیلیسی فاصله بیشتری دارند، به طور عمده شامل: بازالت و آندزیت‌بازالت و آندزیت هستند (Gholami, 2011).

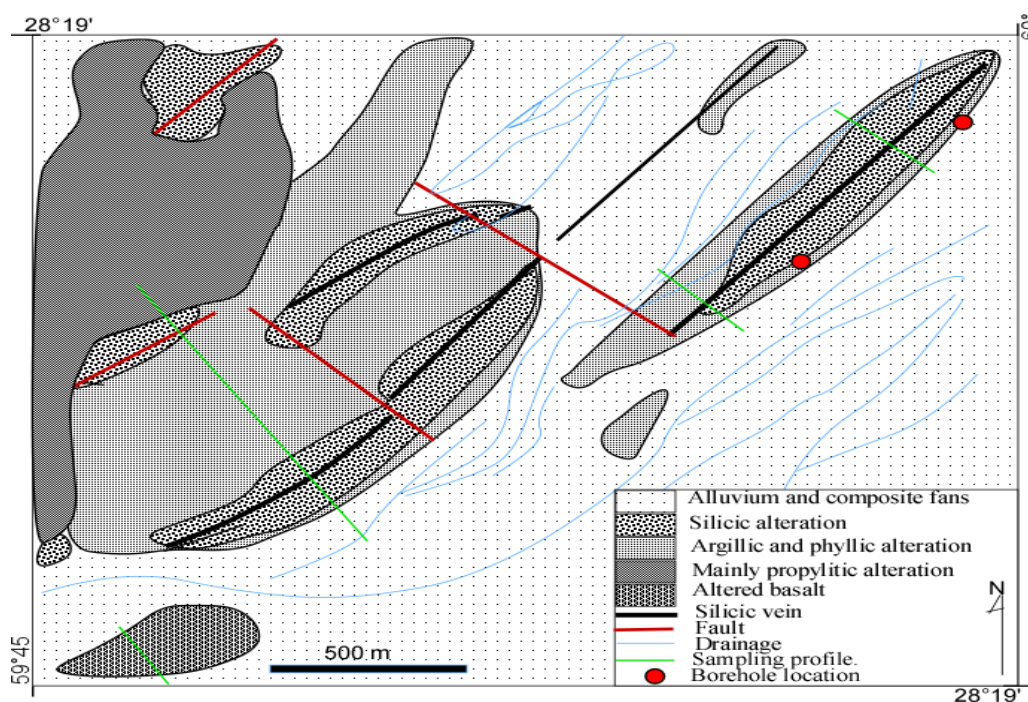
همانطور که در شکل ۴ مشخص است، بخش زیادی از منطقه مطالعه شده، دشت‌های آبرفتی است و فقط رخنمون‌هایی از رگه‌های سیلیسی و سنگ‌های سیلیسی شده به علت مقاومت بالا در مقابل فرسایش حفظ شده‌اند. در رگه‌های سیلیسی از مرکز رگه به طرف خارج از لحاظ ریخت‌شناسی، ساخت و بافت، تغییراتی مشاهده می‌شود (شکل ۵-A و B). بلندترین بخش در مرکز رگه‌ها قرار گرفته که ضخامت آن در بعضی از رگه‌ها به بیش از یک متر می‌رسد (شکل ۵-A). این بخش از رگه به طور عمده دارای ساخت ظریف لایه‌ای، آگاتی و برشی است که به طور عمده از کوارتز و کلسدون ریزبلور تشکیل شده‌اند (شکل ۵-C و D). همه ویژگی‌های بخش مرکزی یا آگاتی رگه‌های سیلیسی گویای تشکیل آنها در گسل‌ها و در فضاها خالی است. به طوری که ساخت‌های پوسته‌ای متقارن، کوکادی، کلوفرمی و ظریف‌لایه گسترش در خور توجهی دارد.

ساخت برشی از ویژگی‌های مهم رگه‌های سیلیسی در چاه‌نعلی است (شکل ۵-C) و حداقل از دو بخش مجزا تشکیل شده است. بخش اول: قطعات زاویه‌داری هستند که به طور اساسی از جنس رگه‌های سیلیسی نواری بوده و بخش دوم: خمیره این قطعات است که در این خمیره، کانی‌سازی سولفیدی به همراه طلا گزارش شده است. برشی شدن در محدوده مورد بررسی در دو زمان اتفاق افتاده است. نخستین رویداد برشی شدن قبل از تشکیل بخش آگاتی بوده است. زیرا این آگات‌ها به طور غالب در اطراف برش‌ها تشکیل شده و باعث بافت کوکادی شده‌اند (شکل ۶-A و B). دومین رویداد نیز بعد از تشکیل بخش آگاتی

این اشکال سیلیسی در مقیاس میکروسکوپی نیز با یکدیگر تفاوت دارد (شکل E-۶ و F) و از نظر بافتی و ساختی به صورت آگاتی و متحدالمرکز، توده‌ای و رگچه‌ای با بلورهای بی‌شکل و نیمه شکل‌دار دانه‌ای، تیغه‌ای، سوزنی و شعاعی قابل تشخیص هستند. اطراف رگه‌های سیلیسی انواع دگرسانی فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک گسترش دارد (شکل A-۴). دگرسانی فیلیک و آرژیلیک فراگیر بوده و تا حدود ۱۰ متر اطراف رگه‌ها گسترش دارد. در حالی که دگرسانی پروپیلیتیک به صورت انتخابی در سنگ‌های بازالتی و آندزیتی در مناطق وسیعی دیده می‌شود (Gholami, 2011). دگرسانی فیلیک و آرژیلیک در عمق نیز گسترش محدودی دارد و از نظر کانی‌شناسی شامل: سریسیت، ایلیت، ژپس، کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپارپتاسیم (آدولاریا) و مقادیر جزئی کلریت، اپیدوت، آراگونیت، زئولیت و کائولینیت است (جدول ۱). وجود ژپس بیانگر تشکیل بخش اعظم این کانی‌ها به صورت ثانویه است

اتفاق افتاده است. زیرا خود آگات‌ها به فراوانی از اجزای این برش‌ها هستند (شکل C-۵ و A-۶). تمام این شواهد نشان می‌دهد که بخش آگاتی تحت تأثیر عوامل فیزیکی، به طور مستقیم از محلول گرمایی نهشته شده‌اند و دارای بافت پرکننده فضای خالی (شکافه پرکن) هستند. میزان سولفیدها در بخش آگاتی ناچیز است. بخش آگاتی به طرف بیرون معمولاً به وسیله یک پهنه کوارتز بلورین احاطه شده است (شکل C-۶). کوارتزها در این پهنه، درشت‌بلور، شفاف، جلای چرب، شیشه‌ای و ساخت برشی دارند. میزان سولفیدهایی مانند: پیریت و کالکوپیریت در این پهنه بیشتر است. به نظر می‌رسد این بخش از رگه‌ها از جانشینی کوارتز به جای سنگ‌های میزبان تشکیل شده باشد. مقدار سیلیس در پهنه‌های خارجی‌تر کاهش و کانی‌های فیلسیلیکاته افزایش می‌یابد.

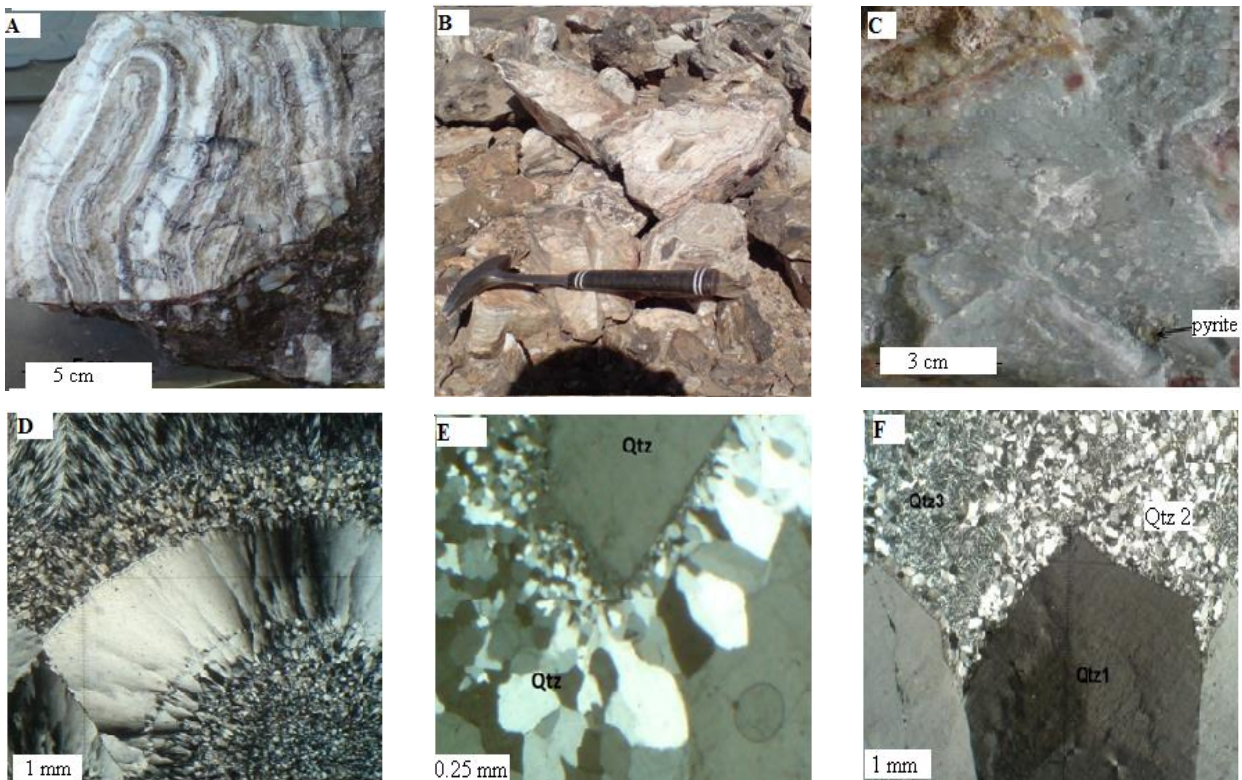
سیلیس در زیر میکروسکوپ نیز به شکل‌های مختلفی از بی‌شکل تا کوارتزهای بزرگ بلورین دیده می‌شود (شکل D-۶ و E و F). زمان تشکیل



شکل ۴- نقشه زمین‌شناسی ساده‌ای از واحدهای دگرسانی و کانی‌سازی ناحیه چاه‌نعلی (Gholami, 2011).



شکل ۵- تصاویر صحرایی از رگه‌های چاه‌نعلی. (A) نمایی از گسترش طولی و عرضی رگه و تغییرات جانبی اطراف آن و نمایش انواع دگرسانی‌ها؛ (B) تصویری از رگه سیلیسی که با ترانسه فرادیواره و فرودیواره آن مشخص شده است؛ (C) تصویر برش‌های سیلیسی که قطعات رگه سیلیسی لایه‌لایه در آن دیده می‌شود؛ (D) نمایی نزدیک از بخش مرکزی رگه سیلیسی که دارای ساخت لایه‌لایه است.



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی و میکروسکوپی از شکل‌های مختلف سیلیس چاه‌نعلی. (A) کوارتز و کالسدونی ریزبلور با ساخت نواری؛ (B) رشد متحدالمرکز آگات؛ (C) کوارتزهای درشت‌بلور حاوی پیریت در نمونه دستی؛ (D) رشد کلوفرمی و متحدالمرکز کوارتز در جهات مختلف، اندازه بلورها در هر نوار یا پوسته متفاوت است؛ (E) نسل اول کوارتز برشی شده و فضای بین آن توسط نسل دیگری از کوارتز فرا گرفته شده است؛ (F) تشکیل سه نوع کوارتز درشت‌بلور، ریزبلور و کوارتز سوزنی که به صورت شعاعی رشد کرده است.

جدول ۱- نتایج مطالعه نمونه‌های برداشت شده از مناطق دگرسان شده چاه‌نعلی با روش XRD. خطوط ضخیم سیاه نشانه حضور هر کانی در نمونه است. خطوطی که طول بیشتری دارد نشانه غلظت زیاد آن کانی در نمونه است.

Samples	B14	B18	B19	B11	B15	C9	C5
Quartz			—			—	—
Plagioclase	—				—		—
Adularia	—		—	—	—	—	
Sericite/illite		—	—	—			
Chlorite					—		—
Kaolinite				—			
Laumontite							—
Natrolite				—	—		—
Epidote						—	
Anhydrite		—	—				
Aragonite				—	—		
Gypsum	—	—	—			—	—
Pyrite				—			

دگرسان شده و در پهنه کانه‌دار یک تا دو درصد حجم سنگ میزبان را اشغال می‌کند. پیریت در منطقه معدنی شمال بزمان به اشکال مختلفی دیده می‌شود (شکل ۷-A و B).

برخی از پیریت‌ها، شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار بوده و اندازه آنها به سه میلی‌متر نیز می‌رسد. به طوری که دانه‌های پیریت با چشم غیر مسلح قابل تشخیص است (شکل ۶-C). بافت این پیریت‌ها بیشتر افشان و در موارد کمتری به صورت رگچه‌ای و برشی است. این پیریت‌ها شاید اولین نسل پیریت باشد که تحت تأثیر محلول‌های گرمایی دچار شکستگی شده‌اند و سپس این شکستگی‌ها به وسیله کالکوپیریت پر شده است (شکل ۷-B).

برخی از پیریت‌ها بی شکل تا نیمه شکل‌دار و ریزبلور هستند که به صورت افشان در رگه‌های سیلیسی گسترش پیدا کرده‌اند. این پیریت‌ها را می‌توان به عنوان نسل دوم معرفی کرد. رنگ این نسل پیریت در زیر میکروسکوپ از پیریت نسل اول روشن‌تر و زرد متمایل به سفید است (شکل

مقدار سولفیدها در کانسنگ چاه‌نعلی به ندرت به بیش از دو درصد می‌رسد. کوارتزهای برشی شده که در سنگ‌های سیلیسی شده اطراف رگه‌های آگاتی واقع شده‌اند، حاوی سولفید بیشتری هستند. سولفیدها و اکسیدها به راحتی با چشم غیر مسلح در این سنگ‌ها قابل تشخیص است. از نظر کانه‌نگاری، پیریت فراوان‌ترین سولفید در این رگه‌ها است. علاوه بر پیریت، کالکوپیریت نیز در بیشتر مقاطع دیده می‌شود. اما سولفیدهای دیگر مثل: اسفالریت، گالن، تتراندریت و بورنیت به مقدار اندک در بعضی مقاطع قابل شناسایی هستند. کوارتز، کلسیت، آدولاریا و کانی‌های فیلوسیلیکاتی از مهم‌ترین باطله‌ها محسوب می‌شوند (جدول ۱). کوارتز و دیگر شکل‌های سیلیسی بیش از ۹۰ درصد رگه‌های کانی‌زایی شده را تشکیل می‌دهد.

#### کانه‌نگاری و شیمی سولفیدها

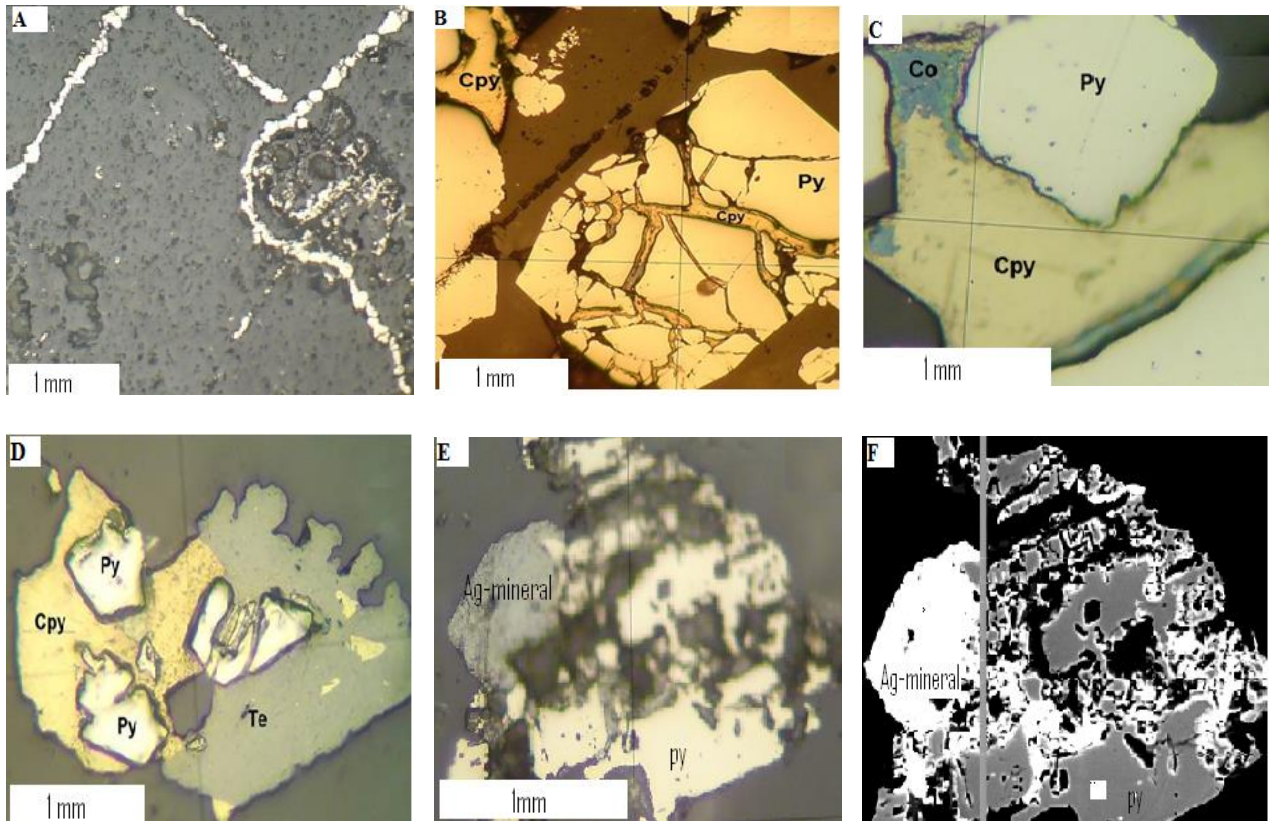
پیریت: پیریت تقریباً ۹۰ درصد کانی‌های سولفیدی موجود در منطقه شمال بزمان را به خود اختصاص می‌دهد و در بخش‌های به شدت

پیریت‌های شکل‌دار در جدول ۲ نشان داده شده است.

مقدار مس، آرسنیک و سرب در این پیریت‌ها در خور توجه است. مقدار نقره و طلا نیز در بعضی از آنها بالا است. همبستگی مقدار آرسنیک با مس، نقره و آهن مثبت است. در حالی که همبستگی بین طلا و آرسنیک منفی است (شکل ۸). مقدار جیوه از ۰/۰۳ تا ۰/۲۴ درصد وزنی و مقدار بیسموت تقریباً از صفر تا ۰/۱۸ درصد وزنی تغییر می‌کند.

C-۷ و D). علاوه بر این، پیریت‌های ریزبلور و نیمه شکل‌دار تا بی‌شکلی که به صورت رگچه‌ای تشکیل شده‌اند ممکن است نسل سوم پیریت‌ها در این منطقه باشد (شکل ۷-A). این پیریت‌ها از نظر رنگ میکروسکوپی شبیه به پیریت‌های نسل دوم هستند.

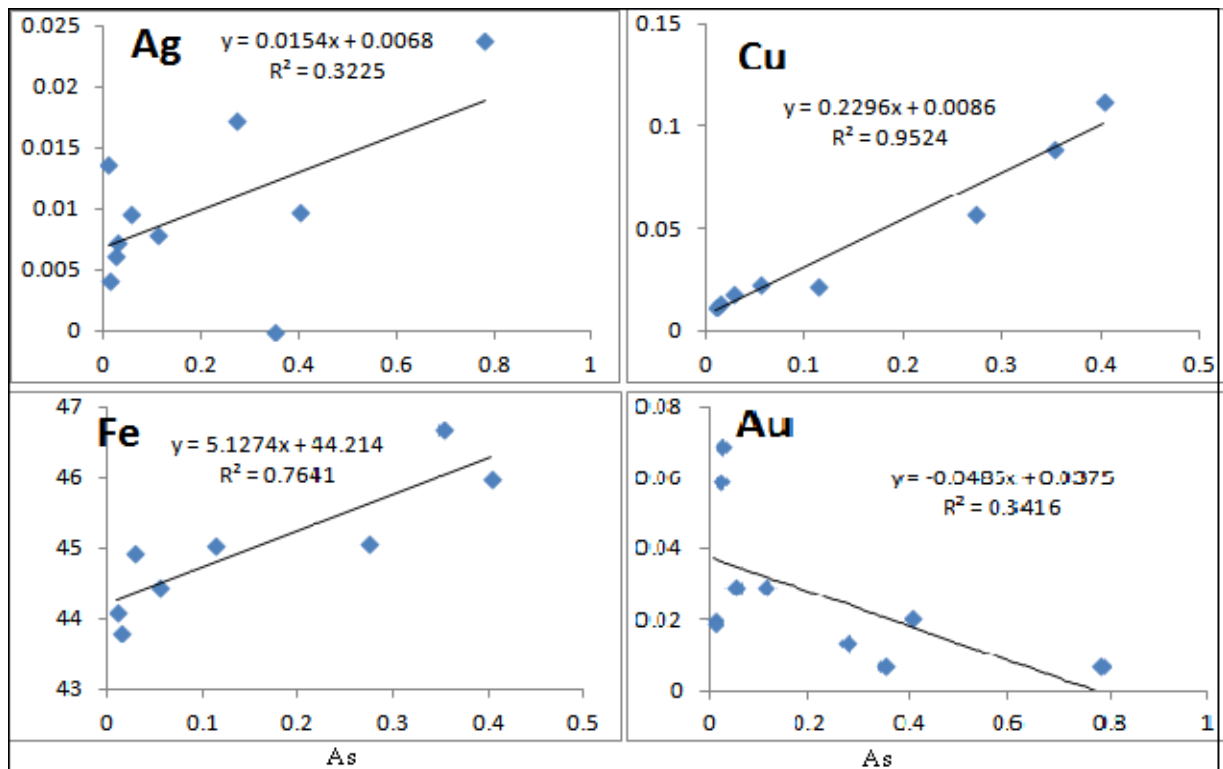
پیریت‌های رخنمون یافته معمولاً به هیدرواکسید آهن تبدیل شده‌اند. در این فرآیند، دانه‌های ریز پیریت گاهی به طور کامل به وسیله گوتیت جانشین شده‌اند. ترکیب شیمیایی



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی و BSI از کانی‌های سولفیدی موجود در رگه‌های سیلیسی شمال بزمن. A) دانه‌های ریز پیریت که به صورت رگچه‌ای و زنجیری دیده می‌شوند؛ B) پیریت‌های شکل‌دار که برشی شده و رگچه‌ها و دانه‌های کالکوپیریت در فضای خالی آنها تشکیل شده‌اند؛ C) جانشینی کالکوپیریت به وسیله کوولیت؛ D) کالکوپیریت و تترائیدریت در فضای بین دانه‌های پیریت دیده می‌شود؛ E) تصویر پیریت زرد رنگ و سولفید نقره‌دار خاکستری رنگ؛ F) BSI پیریت (خاکستری) که توسط سولفید نقره‌دار (سفید) مورد هجوم و جانشینی قرار گرفته است و تصویر میکروسکوپی آن در شکل ۷-E دیده می‌شود.

جدول ۲- شیمی پیریت برحسب درصد وزنی از رگه‌های سیلیسی چاه‌نعلی. برای آهن و مس دو تا از داده‌ها حذف شده‌اند.

samples	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11
N	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2
Cu	0.09	0.11	0.11	0.02	0.02	0.01	0.06	0.02	0.02	0.01
Fe	46.68	45.98	46.84	44.95	44.45	43.48	45.07	45.03	43.81	44.10
Mn	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
As	0.35	0.40	0.02	0.03	0.05	0.78	0.27	0.11	0.01	0.01
Ag	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01
Sb	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
Zn	0.03	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00
Pb	0.15	0.09	0.09	0.18	0.08	0.07	0.12	0.09	0.12	0.11
Hg	0.21	0.14	0.04	0.03	0.24	0.11	0.15	0.12	0.10	0.08
Cd	0.01	0.02	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Bi	0.14	0.07	0.06	0.08	0.13	0.06	0.00	0.13	0.12	0.18
Au	0.01	0.02	0.06	0.07	0.03	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02
Se	0.00	0.02	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Te	0.00	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
S	53.20	53.43	53.48	55.20	54.09	53.91	54.08	54.12	53.99	54.72
total	100.89	100.32	100.76	100.62	99.20	98.49	99.80	99.70	98.23	99.33
Cu	0.001	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Fe	0.836	0.823	0.839	0.805	0.796	0.779	0.807	0.806	0.784	0.790
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
As	0.005	0.005	0.000	0.000	0.001	0.010	0.004	0.001	0.000	0.000
Ag	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001
Hg	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000
Cd	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Bi	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001
Au	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Se	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Te	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S	3.318	1.666	1.668	1.721	1.687	1.681	1.686	1.688	1.684	1.706



شکل ۸- ارتباط آرسنیک با نقره، مس، آهن و طلا در پیریت‌های شکل‌دار منطقه چاه‌نعلی. مقادیر تمام عناصر نمایش داده شده بر حسب درصد وزنی است.

ثبت شده است (جدول ۳). مقدار طلا در این کانی تا ۰/۰۳۴ درصد یا ۴۳۰ ppm می‌رسد. بین مقدار طلا و آرسنیک در کالکوپیریت همبستگی مثبتی وجود دارد.

اسفالریت، گالن و تترائیدریت از دیگر سولفیدهای هستند که به مقدار اندک در رگه‌های سیلیسی مشاهده می‌شود. تترائیدریت و اسفالریت خواص نوری مشابهی نشان می‌دهند و گاهی با کالکوپیریت بافت جدایشی ایجاد کرده‌اند. به نظر می‌رسد این کانی‌ها جانشین کالکوپیریت شده باشند (شکل ۷-D).

**سولفیدهای نقره‌دار:** از ویژگی‌های عمده کانسار چاه‌نعلی تشکیل سولفیدهای نقره‌دار است. یکی از این سولفیدها با میکروسکوپ نوری مشاهده می‌شود. این کانی در زیر میکروسکوپ رنگ خاکستری دارد و تقریباً دارای رنگ اسفالریت است

#### کالکوپیریت: کالکوپیریت در فضای خالی

پیریت‌های شکل‌دار و برشی شده تشکیل شده است. در تمام مقاطع مطالعه شده، تشکیل کالکوپیریت بعد از پیریت شکل‌دار اتفاق افتاده است (شکل ۷). کالکوپیریت‌ها غالباً به صورت بی‌شکل و رگچه‌ای گسترش یافته‌اند. این کانی در زیر میکروسکوپ با رنگ زردتر از پیریت تشخیص داده می‌شود (شکل ۷-B) و مقدار آن از نظر حجمی در مقایسه با مقدار پیریت ناچیز است. میانگین ترکیب شیمیایی این کانی در جدول ۳ نشان داده شده است. فرمول حاصله از این تجزیه‌ها با فرمول ایده‌آل کالکوپیریت ( $\text{CuFeS}_2$ ) نزدیک است.

عناصری مثل: سرب، جیوه و بیسموت در کالکوپیریت‌های مورد بررسی در خور توجه است. مقداری طلا نیز در بیشتر نمونه‌های تجزیه شده

توزیع نقره، طلا و آرسنیک نقشه‌هایی از مقاطع صیقلی با تجزیه ریزکاو الکترونی تهیه شد. شکل ۹- A نقشه توزیع طلا است که در آن نشانه‌ای از طلا دیده یا ثبت نشده است. معمولاً در این نقشه‌ها فقط عناصری قابل تشخیص هستند که مقدار آنها در خور توجه باشد و به دلیل این که مقدار طلا در حد کمتر از چند گرم در تن است، نمی‌توان انتظار ثبت طلا را در این نقشه‌ها داشت. اما به دلیل مقدار بالای نقره در نمونه‌های مورد بررسی، فازهای نقره‌دار در این نقش‌ها به راحتی تشخیص داده می‌شود (شکل ۹-B و C). فازهای آرسنیک‌دار نیز به راحتی در شکل ۹-D مشاهده می‌شوند. این فازهای آرسنیک‌دار، پیریت هستند. مقدار آرسنیک در پیریت نسبت به دیگر سولفیدها زیادتر است. توزیع آرسنیک در پیریت همگن نیست و در بعضی قسمت‌ها مقدار آن زیادتر و در بعضی قسمت‌ها کمتر است.

(شکل ۷-E). بلورهای این کانی نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل بوده و به سیستم کوبیک شبیه است. محل تشکیل این سولفید فضاهای خالی و شکستگی‌های ایجاد شده در پیریت است. تصویر BSI این کانی و پیریت در شکل ۷-F نشان داده شده است. تصویر BSI این سولفید نقره نسبت به تصویر BSI پیریت روشن‌تر و کاملاً سفید رنگ است. زیرا کانی‌هایی که از عناصر سنگین‌تری تشکیل می‌شوند دارای تصاویر BSI روشن‌تری هستند. وجود نقره که عنصر سنگینی است در هر کانی باعث تصاویر BSI روشن‌تر و کاملاً سفید می‌شود. این کانی حدود ۳۵ درصد وزنی نقره دارد (جدول ۴). فرمول این کانی  $Cu_7Ag_{3.5}S_8$  است که با کانی‌های شناخته شده نقره‌دار کاملاً متفاوت است و از نظر ترکیب شیمیایی یک کانی جدید محسوب می‌شود. فرمول این کانی به فرمول کوولیت شبیه است که مقدار زیادی نقره به جای مس وارد شده است. برای نحوه

جدول ۳- شیمی کالکوپیریت برحسب درصد وزنی از رگه‌های سیلیسی چاه‌نعلی

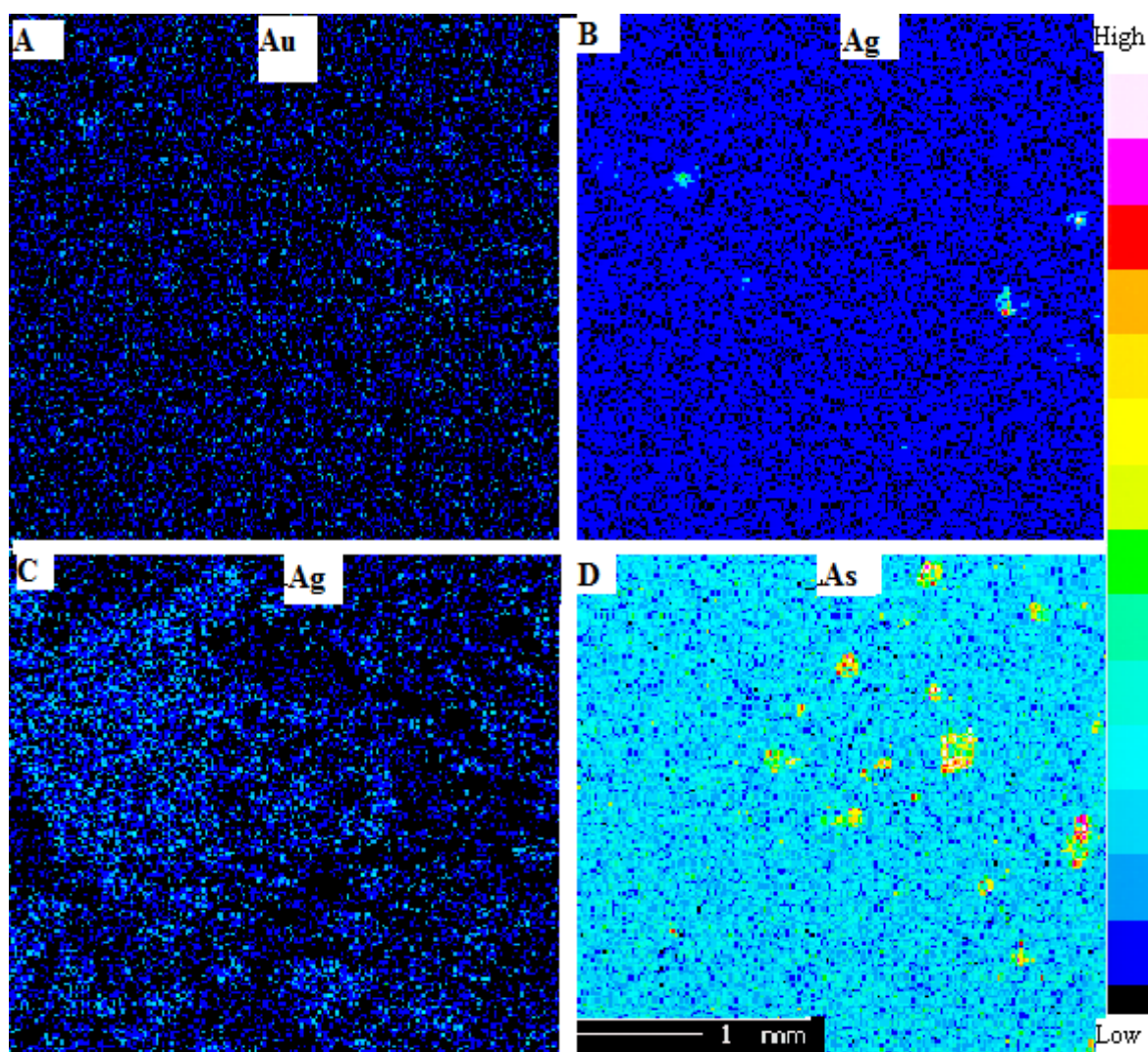
samples	2	3	4	5	6
Cu	33.379	34.309	34.311	34.032	34.387
Fe	29.937	30.238	30.004	30.413	29.464
Mn	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000
As	0.000	0.009	0.073	0.092	0.034
Ag	0.006	0.000	0.005	0.000	0.007
Sb	0.032	0.001	0.002	0.000	0.036
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb	0.146	0.104	0.063	0.038	0.058
Hg	0.193	0.000	0.138	0.087	0.200
Cd	0.000	0.034	0.019	0.014	0.000
Bi	0.242	0.090	0.000	0.000	0.037
Au	0.017	0.031	0.000	0.043	0.022
Se	0.000	0.022	0.000	0.000	0.000
Te	0.020	0.000	0.003	0.019	0.007
S	35.254	34.531	35.237	34.812	35.189
total	99.225	99.378	99.855	99.549	99.441
Cu	0.525	0.540	0.540	0.536	0.541
Fe	0.536	0.541	0.537	0.545	0.528
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

samples	2	3	4	5	6
	ادامه جدول ۳-...				
As	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000
Ag	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
Hg	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001
Cd	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Bi	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Au	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Se	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Te	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S	1.099	1.077	1.099	1.085	1.097

جدول ۴- شیمی سولفیدهای نقره‌دار برحسب درصد وزنی از رگه‌های سیلیسی چاه‌نعلی

minerals	New Ag-sulfide		Ag-pyrite				Ag-covellite	
	1	2	1	2	3	4	1	2
Cu	42.940	40.809	0.553	0.481	1.519	1.061	60.772	56.633
Fe	1.112	0.381	37.415	37.893	38.786	39.692	0.931	2.588
Mn	0.046	0.012	0.000	0.007	0.020	0.000	0.000	0.001
As	0.000	0.000	0.118	0.000	0.033	0.341	0.000	0.046
Ag	32.082	34.786	16.106	1.149	2.803	0.531	3.999	5.964
Sb	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.023	0.000
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb	0.093	0.000	0.195	0.073	0.064	0.330	0.104	0.073
Hg	0.234	0.000	0.026	0.059	0.104	0.124	0.053	0.000
Cd	0.000	0.000	0.000	0.011	0.000	0.006	0.000	0.000
Bi	0.073	0.000	0.000	0.337	0.000	0.262	0.189	0.000
Au	0.004	0.000	0.014	0.014	0.000	0.000	0.000	0.050
Se	0.000	0.010	0.119	0.264	0.181	0.170	0.000	0.076
Te	0.069	0.072	0.028	0.011	0.000	0.118	0.036	0.013
S	24.111	23.786	48.485	46.875	41.959	52.039	34.897	33.154
total	100.763	99.857	103.059	87.184	85.469	94.674	101.004	98.598
Cu	0.676	0.642	0.009	0.008	0.024	0.017	0.956	0.891
Fe	0.020	0.007	0.670	0.678	0.694	0.711	0.017	0.046
Mn	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
As	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.005	0.000	0.001
Ag	0.297	0.322	0.149	0.011	0.026	0.005	0.037	0.055
Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000
Hg	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000

minerals	New Ag-sulfide		Ag-pyrite				Ag-covellite	
	1	2	1	2	3	4	1	2
samples	1	2	1	2	3	4	1	2
ادامه جدول ۴-۴....								
Cd	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Bi	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.001	0.000
Au	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Se	0.000	0.000	0.002	0.003	0.002	0.002	0.000	0.001
Te	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
S	0.752	0.742	1.512	1.462	1.308	1.623	1.088	1.034



شکل ۹- نقشه‌های تهیه شده با تجزیه ریزکاو الکترونی برای عناصر طلا، نقره و آرسنیک منطقه چاه‌نعلی. راهنمای غلظت عناصر در کنار شکل آورده شده که از رنگ سیاه به سمت رنگ‌های قرمز و سفید نشان‌دهنده افزایش غلظت است. (A) نقشه توزیع طلا است که نشانه‌ای از وجود طلا دیده نشد، (B و C) فازهای غنی از نقره با رنگ روشن مشاهده می‌شوند، (D) وجود آرسنیک با رنگ قرمز و زرد مشخص است. این نقاط منطبق بر پیریت هستند.

سولفید دیگری که در محدوده مورد مطالعه وجود دارد گالن است که به صورت ذرات ریزی در پیریت مشاهده می‌شود (شکل ۱۰-B). این ذرات بسیار کوچک و به سختی در زیر میکروسکوپ قابل تشخیص هستند. اما به دلیل چگالی بالای گالن، به راحتی تصاویر BSI آنها قابل شناسایی است. این گالن‌ها از نظر ترکیب شیمیایی مقدار اندکی جیوه، بیسموت و کادمیم دارند اما فاقد نقره هستند (جدول ۴).

**مراحل کانه‌زایی:** از نظر زمان تشکیل می‌توان تشکیل سولفیدها را به دو مرحله اولیه و ثانویه تقسیم‌بندی کرد (جدول ۵). مرحله اولیه با تشکیل پیریت شکل‌دار از محلول‌های گرمایی شروع شده است و در ادامه فشار این محلول‌ها باعث شکستگی و برشی شدن آنها شده است و سپس تترائیدریت و کالکوپیریت به ترتیب تشکیل شده‌اند. پیریت‌های رگچه‌ای شاید از اول تا آخر مرحله اولیه تشکیل شده باشند. طلا و کانی‌های نقره‌دار ممکن است در پایان مرحله اولیه تشکیل شده باشد. در مراحل ثانویه، عوامل اکسایش و حرکت آب‌های سطحی و زیرزمینی باعث تشکیل کومات و هیدروکسیدهای آهن شده است.

### بحث

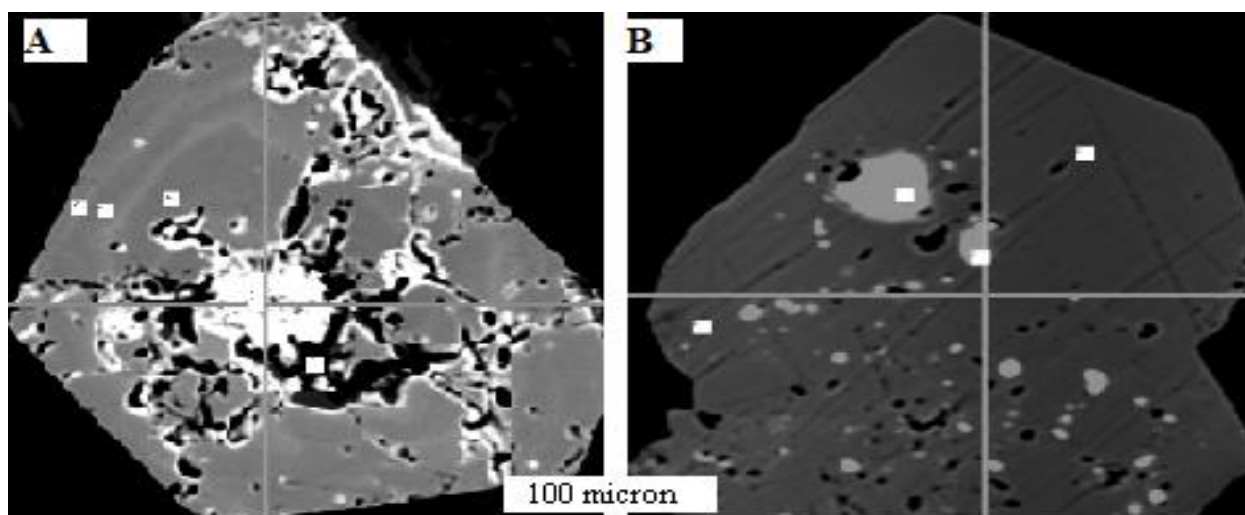
رگه‌های سیلیسی ریزبلور و دگرسانی سیلیسی از مهمترین ویژگی‌های کانسارهای اپی‌ترمال است. به ویژه اگر سنگ‌های همراه و میزبان آنها سنگ‌های آتشفشانی مرتبط با آتشفشان‌های چین‌های کواترنری باشد (Hedenquist *et al.*, 1996). وجود پیریت و دیگر سولفیدهای رایج در این رگه‌های سیلیسی، از ملاک‌های اکتشافی مهم طلا و نقره است. کانی‌های سیلیسی در رگه‌های

**پیریت‌های نقره‌دار:** مقدار نقره در بعضی از سولفیدهای آهن موجود در منطقه بالا است. این سولفیدهای آهن تا حدودی از نظر ترکیب شیمیایی شبیه به پیریت هستند و فقط به جای آهن، مقداری نقره جانشین شده که در یک مورد مقدار نقره ۱۶ درصد وزنی است. فرمول این مورد از نظر استوکیومتری صحیح به نظر می‌رسد. فرمول این سولفید  $(Fe,Ag)_2S_2$  است. درصد وزنی گوگرد در این مورد از مقدار آن در پیریت کمتر است. همچنین، سولفیدهای آهن نقره‌دار دیگری در منطقه چاه‌نعلی وجود دارد که گاهی تا حدود ۲/۸ درصد وزنی نقره و حدود یک درصد مس دارند (جدول ۴). فرمول این سولفید نیز مشابه پیریت است اما وزن کل عناصر در بعضی از این سولفیدها به ۱۰۰ درصد نمی‌رسد که ممکن است به علت وجود عنصری غیر از عناصر تجزیه شده باشد. تصاویر BSI نشان می‌دهد که پیریت‌های شکل‌دار معمولاً دارای منطقه‌بندی هستند (شکل ۱۰-A). پهنه‌هایی که رنگ روشن‌تر دارند نشانه حضور عنصری سنگین چون آرسنیک، طلا یا نقره در پیریت است.

کوولیت نیز در کانسار چاه‌نعلی دارای نقره در خور توجه است (جدول ۴). سولفیدهای اولیه به ویژه کالکوپیریت در اثر فرآیندهای ثانویه به وسیله سولفیدهای نقره‌دار مثل کوولیت جانشین شده‌اند. کوولیت در زیر میکروسکوپ نوری دارای رنگ آبی و بی‌شکل است (شکل ۷-C). مقدار نقره در کوولیت متغیر و حداکثر مقدار آن به حدود ۶ درصد وزنی می‌رسد (جدول ۴). فرمول این کوولیت‌ها را می‌توان به صورت  $(Cu,Ag)_2S$  نوشت. یکی از دلایل وجود نقره در این کانی ممکن است وجود ذرات زیر میکرونی فازهای نقره‌دار در آن باشد.

مورد مطالعه تنوع گسترده‌ای دارد و از انواع بی‌شکل و ریزبلور تا کوارتزهای درشت‌بلور متغیر هستند. آگات و انواع ریزبلور در دماهای پایین تشکیل می‌شود زیرا این نوع اشکال سیلیس نسبت به کوارتزهای درشت‌بلور قابلیت انحلالی بیشتری داشته و فقط در دماهای کم و در حدود ۱۰۰ درجه امکان رسوب آنها وجود دارد (Henley, 1985). در میدان‌های زمین‌گرمایی و چاه‌های حفر شده در آنها این وضعیت غالباً مشاهده شده است (Simmons and Browne, 2000). بر اساس مطالعات سیالات درگیر در کوارتزهای درشت‌بلور موجود در منطقه مورد مطالعه، دمای همگن سازی از ۲۵۲ تا ۳۱۲ درجه سانتی‌گراد و درجه شوری از ۸ تا ۱۷ درصد متغیر است (Gholami, 2011). بر اساس شکل ۱۱، محدوده دمایی و شوری به دست آمده از مطالعه سیالات درگیر با موارد گزارش شده برای کانسارهای اپی‌ترمال مطابقت دارد (Hassani Pak, 1999; Wilkinson, 1995).

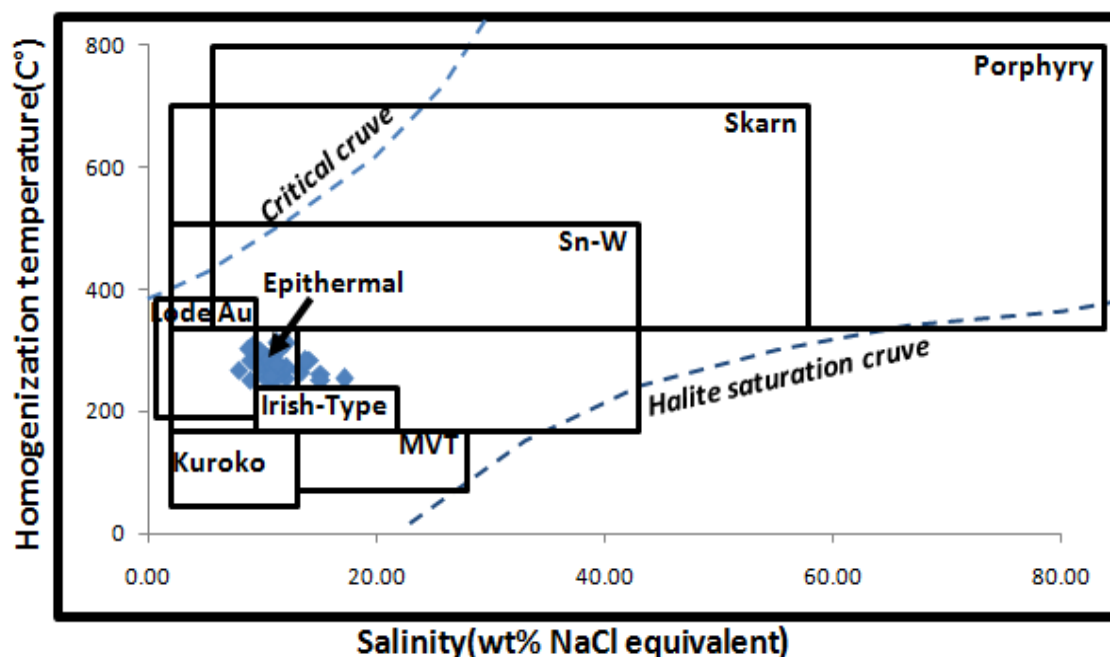
بافت‌های شکافه پرکن، استوکورکی، پوسته‌ای، برشی، متقارن و کوکادی، از بافت‌های رایج در کانسارهای اپی‌ترمال هستند. بافت نواری (Crustiform) و نواربندی قلوهای از رایج‌ترین بافت‌های کانسارهای اپی‌ترمال است (Saunders, 1994; Simpson et al., 1995; Sherlock and Lehrman, 1995). تشکیل بافت نواری نشانه تغییرات پی‌درپی سیال است که باعث تغییر در اندازه دانه‌ها و ذرات سیلیس می‌شود. معمولاً حرکت سیالات در گسل‌ها و شکستگی باعث تورم بخش‌هایی از مسیر می‌شود و سپس شرایط ته‌نشست سیلیس تغییر می‌کند. بافت‌های تیغه‌ای، سوزنی و نسل‌های متفاوت کوارتز معمولاً از جان‌شینی و تبلور مجدد کریستوبالیت، اپال و کلسدونی تشکیل می‌شوند (Saunders, 1994; Dong and Morrison, 1995).



شکل ۱۰- تصاویر BSI از پیریت‌های شکل‌دار منطقه چاه‌نعلی که با رنگ تیره‌تر مشخص هستند. (A) منطقه‌بندی مشخص در پیریت‌ها. این کانی‌ها دچار انحلال و خوردگی‌های زیادی شده‌اند که بخش اعظم آنها به وسیله سولفید نقره پر شده است (رنگ سفید)؛ (B) در این تصویر در پیریت حفره‌هایی وجود دارد. لکه‌های روشن‌تر ذرات ریز گالن هستند. چهار گوش‌های سفید رنگ کوچک در هر دو تصویر نقاط تجزیه شده هستند.

جدول ۵- نمودار پاراژنز رگه‌های سیلیسی طلادار چاه‌نعلی. خط چین نشانه تشکیل احتمالی است.

Minerals	Hypogene stage	Supergene stage
Quartz	████████████████████	
Pyrite	████████████████████	
Chalcopyrite	████████████████████	
Sphalerite	████████████████████	
Tetrahedrite	████████████████████	
Galena	████████████████████	
Ag-sulfide	████████████████████	
Covellite		████████████████████
Iron oxides		████████████████████



شکل ۱۱- موقعیت نمونه‌های رگه‌های سیلیسی طلادار چاه‌نعلی در نمودار (Wilkinson, 2001). دمای هموژنیزاسیون و شوری سیالات درگیر در نمونه‌های مورد مطالعه به طور عمده در محدوده اپی‌ترمال قرار دارد (Gholami, 2011).

مطالعه، دگرسانی‌های سریسیتیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک نیز رایج هستند. بخشی از این دگرسانی‌ها به ویژه دگرسانی آرژیلیک شاید ثانویه باشد. کانی‌های کربناته و تبخیری نیز در این مجموعه‌ها دیده می‌شود و فلدسپار پتاسیم نوع آدولاریا در نمونه‌های زیادی وجود دارد (جدول

کانسارهای اپی‌ترمال دارای انواع متعددی هستند که دو قطب نهایی آنها به نوع پر سولفور (HS) و نوع کم سولفور (LS) معروف است اما تغییرات این کانسارها از یک قطب به قطب دیگر تدریجی است و انواع حد واسط بین آنها وجود دارد. علاوه بر دگرسانی سیلیسی در محدوده مورد

وسیع‌تری در اطراف کوه بزمان وجود دارد و گویای وجود مواد مذاب یا آشیانه‌های ماگمایی در این مناطق هستند می‌توان اظهار داشت که این آشیانه‌ها می‌توانستند نقش موتور گرمایی را برای گرم کردن آب‌های زیرزمینی و ایجاد آب‌های گرمایی داشته باشند. با توجه به این که کانسارهای کم سولفور (LS) معمولاً در فاصله دورتری از مراکز اصلی آتشفشان‌های چینه‌ای در مناطق سطحی تشکیل می‌شوند (Hedenquist *et al.*, 1996) بنابراین، احتمال کانی‌سازی به صورت دور از منبع در منطقه مورد مطالعه بیشتر است.

نوع کانی‌شناسی و عناصر موجود در سیستم‌های اپی‌ترمال می‌تواند تا حدی شرایط فیزیکوشیمیایی (مثل دما، اسیدیته و فوگاسیته گوگرد و اکسیژن) محیط تشکیل آنها را منعکس کند (Hayba *et al.*, 1985). کانسارهای اپی‌ترمال کم سولفور خود به دو سیستم غنی از طلا و غنی از نقره تقسیم بندی می‌شوند (Pirajno, 2009). در سیستم‌های غنی از طلا مقدار فلزات پایه اندک، Ag/Au از یک تا ۱۰ و سیالات تشکیل‌دهنده آنها دارای درجه شوری کم (تا ۲ درصد وزنی معادل نمک طعام) و غنی از گاز (CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>S) هستند. در حالی که سیستم‌های غنی از نقره دارای مقدار بالاتری از فلزات پایه، Ag/Au معادل ۱۰۰ و سیالات تشکیل‌دهنده آنها دارای درجه شوری بالاتر (۱۰ الی ۱۵ درصد وزنی معادل نمک طعام) هستند (Pirajno, 2009). بر اساس شواهد کانی‌شناسی و ژئوشیمی، کانی‌زایی طلا و نقره در چاه‌نعلی با نوع سیستم‌های غنی از نقره مطابقت دارد. سیستم‌های غنی از طلا نیاز به گونه‌های گوگردی بیشتری دارد اما سیستم‌های غنی از نقره به سیالات غنی از کلر نیاز دارد. حضور مس، سرب و روی در منطقه مورد مطالعه نیز نشان‌دهنده سیالات غنی از کلر است. زیرا این

(۱). همان طور که کانی‌های گروه زئولیت، کانی‌های رسی نوع ایلیت و وجود آدولاریا و کلسیت ویژگی کانسارهای کم سولفور است (Hudson, 2003; Yilmaz *et al.*, 2007) ترتیب مناطق در هاله دگرسانی نیز با نوع اپی‌ترمال کم سولفور مطابقت دارد. به طوری که در اطراف منطقه سیلیسی در مرکز که به طور عمده شامل: کوارتز و کالسدونی است به وسیله یک پهنه پتاسیک-سریسیتیک (فیلیک) فرا گرفته شده است. به نظر می‌رسد بخش زیادی از آدولاریا در این پهنه به وسیله کانی‌های فیلسیلیکاته ثانویه جانشین شده باشد. بنابراین، الگوی دگرسانی در چاه‌نعلی مشابه الگوی دگرسانی در کانسارهای طلا-نقره نوع اپی‌ترمال کم سولفور است. حضور کالکوپیریت، اسفالریت و گالن نشان می‌دهد که مقدار عناصر فلزات پایه در رگه‌های سیلیسی چاه‌نعلی زیاد است. وجود کانی‌های نقره‌دار که به راحتی در زیر میکروسکوپ مشاهده می‌شوند و عدم مشاهده ذرات طلا یا الکتروم و تلوریدهای طلا‌دار در نمونه‌های مطالعه شده نشان می‌دهد که مقدار نقره در رگه‌های سیلیسی چاه‌نعلی به مراتب بیشتر از طلا است. هر چند وجود ذرات طلا نیز در زیر میکروسکوپ برای محدوده مورد مطالعه گزارش شده است (Karami, 2005). با توجه به فاصله ۲۰ کیلومتری کانی‌سازی طلا و نقره در چاه‌نعلی از دهانه کوه بزمان می‌توان گفت که این کانسار به صورت دور (Distal) از مرکز اصلی بزمان تشکیل شده و آب‌های گرمایی ایجاد شده در زیر آن از طریق گسل‌ها توانسته‌اند فاصله زیادی را حرکت و به صورت چشمه یا جریان زیرزمینی در نزدیک سطح زمین عمل کنند و باعث کانی‌زایی طلا و نقره و تشکیل اکسید سیلیس شده باشند. علاوه بر این، با توجه به مخروط‌های آتشفشانی کوچکی که در منطقه

دنبال آن پیریت‌های ریزدانه، کالکوپیریت، اسفالریت، گالن، سولفید نقره و شاید طلا تشکیل شده‌اند. در مرحله برون‌زاد کوولیت و گوتیت رایج‌ترین کانی‌ها هستند. ویژگی‌هایی زیادی همچون: شکل رگه‌ای، قرارگیری در میدان آتشفشانی کوه بزمان، انواع بافت‌های نواری، نواربندی قلوهای، کوکادی، برشی و تیغه‌ای، حضور گسترده کوارتز و پلی‌مرف‌های آن، آدولاریا و کلسیت، تشکیل ایلیت در دگرسانی آرژیلیک و دمای کمتر از ۳۱۲ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که کانی‌زایی طلا و نقره در چاه‌نعلی از نوع اپی‌ترمال کم سولفور است. مقدار فلزات پایه، نسبت بالای نقره به طلا و درجه شوری (۱۰ الی ۱۵ درصد وزنی معادل نمک طعام) در چاه‌نعلی با سیستم‌های اپی‌ترمال کم سولفور غنی از نقره مطابقت دارد. شیمی کانی‌ها به طور عمده به ترکیب ایده‌آل (استوکیومتری) نزدیک است. اگر چه مقدار طلا، نقره، آرسنیک و جیوه که معمولاً در کانسارهای اپی‌ترمال زیاد هستند، در بعضی از کانی‌ها در خور توجه است. یک فاز سولفیدی که دارای فرمول  $Cu_7Ag_{3.5}S_8$  است و مقدار نقره در آن به ۳۵ درصد می‌رسد، از لحاظ ترکیب شیمیایی یک کانی جدید است. فازهای سولفیدی دیگری که در رگه‌های سیلیسی مورد مطالعه دیده می‌شود دارای فرمول‌های  $(Fe,Ag)_2S$  و  $(Cu,Ag)S$  است که به ترتیب مشابه با فرمول پیریت و کوولیت است. کانی‌زایی طلا و نقره در چاه‌نعلی در یک سیستم زمین‌گرمایی از محلول‌های گرمایی و تحت کنترل ساختاری تشکیل شده است. برش‌های گرمایی، وجود همزمان کوارتز و آدولاریا و تشکیل ایلیت نشانه‌های پدیده جوشش هستند. این پدیده (جوشش) مهمترین عامل کانی‌زایی طلا و نقره بوده است.

عناصر معمولاً با کلر ارتباط مثبتی دارند. معمولاً تشکیل کانسارهای اپی‌ترمال کم سولفور به محلول‌های گرمایی با منشأ جوی نسبت داده می‌شود (Hedenquist *et al.*, 1996). رگه‌های سیلیسی چاه‌نعلی از نظر کانی‌شناسی، ساخت، بافت و شکل شباهت زیادی به کانسار هیشکاری در ژاپن دارد (Faure *et al.*, 2002). مطالعات ایزوتوپی‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن روی کوارتز و کانی‌های رسی در کانسار هیشکاری نشان‌دهنده وجود آب‌هایی است که ترکیب آن می‌تواند یا از اختلاط آب‌های جوی و ماگمایی حاصل شده باشد یا این که آب‌های جوی ضمن چرخش در سنگ‌ها و برهم‌کنش با آنها ترکیب ایزوتوپی اولیه خود را از دست داده باشد (Faure *et al.*, 2002). در نهایت، دلیل اصلی تشکیل طلا و نقره در کانسار هیشکاری، جوشش بیان شده است. برشی شدن گسترده در رگه سیلیسی کانی‌زایی شده در چاه‌نعلی نیز می‌تواند نشانه‌ای از جوشش باشد. وجود کانی‌هایی مثل: آدولاریا، کلسیت، ایلیت و زئولیت شاید بیانگر شرایط قلیایی تا خنثی در چاه‌نعلی باشد. کائولینیت از نشانه‌های واکنش‌های هیدرولیزی در شرایط اسیدی است که در مرحله برون‌زاد در منطقه مورد مطالعه اتفاق افتاده، زیرا همراه با ژیپس و هیدرواکسیدهای آهن است.

### نتیجه‌گیری

سنگ‌های میزبان رگه‌های سیلیسی طلادار چاه‌نعلی آندزیت‌بازالت تا بازالت‌های میوسن هستند. این سنگ‌ها بر اثر فعالیت‌های آتشفشانی مرتبط با فرورانش صفحه عمان به زیر پهنه مکران تشکیل شده‌اند. کانی‌سازی در چاه‌نعلی در مرحله درون‌زاد با تشکیل پیریت‌های شکل‌دار شروع شده و به

## سپاسگزاری

سپاسگزاری می‌نمایند. از آقای قوامپور کارشناس کارگاه تهیه مقاطع و دیگر کارشناسان گروه زمین‌شناسی دانشگاه سیستان و بلوچستان نیز قدردانی می‌شود.

نگارندگان از آقای محمدرضا قدسی و کارکنان سازمان زمین‌شناسی مستقر در ایرانشهر به خاطر همراهی و همکاری در مطالعات میدانی

## منابع

- Aghanabati, A. (1993) Ziruki-ye- Gohar Kuh Geological Quadrangle Map 1:100000, Sheet 8046, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Aghanabati, A. (2004) Iran geology. Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).
- Arribas, A. Jr. (1995) Characteristics of high-sulphidation epithermal deposits and their relation to magmatic fluid. Mineralogical association of Canada, short course handbook 23: 419-454.
- Asadi, N., Emami, M. H. and Kheirkhah, M. (2010) Alteration characteristics of the Abtorsh-Youzbashichai area and the analysis of geochemical behavior of elements (major and trace) in alteration environment. *Petrology* 1(3): 11-83.
- Berberian, F., Muir, I. D., Pankhurst, R. J. and Berberian, M. (1982) Late Cretaceous and early Miocene andean-type plutonic activity in northern Makran and Central Iran. *Journal of the Geological Society of London* 139: 605-614.
- Cooke, D. R. and Simmons, S. F. (2000) Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. In: *Gold in 2000* (Eds. Hagemann, S. G. and Brown, P. E.) *Reviews in Economic Geology* 13: 21-244. Society of Economic Geologists, Chelsea.
- Dong, G. and Morrison, G. W. (1995) Adularia in epithermal veins, Queensland: morphology, structure state and origin. *Mineralium Deposita* 30: 11-19.
- Faure, K. Matsuhisa, Y. Metsugi, H. Mizota, C. and Hayshi, S. (2002) The Hishikari Au-Ag epithermal deposit, Japan: oxygen and hydrogen isotope evidence in determining the source of paleo-hydrothermal fluids. *Economic Geology* 97: 481-498.
- Gholami, M. J. (2011) Investigation of Au mineralization in north of Bazman, southeast of Iran. MSc thesis, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran (in Persian).
- Hassani Pak, A. A. (1999) Gold exploration. Tehran University, Tehran (in Persian).
- Hayba, D. O. Bethke, P. M. Heald, P. and Foley, N. K. (1985) Geologic, mineralogic and geochemical characteristics of volcanic-hosted epithermal precious-metal deposits. In: *Geology and geochemistry of epithermal systems* (Eds. Berger B. R. and Bethke, P. M.) *Reviews in Economic Geology* 2: 129-167. Society of Economic Geologists, Chelsea.
- Heald, P., Foley, N. K. and Hayba, D. O. (1987) Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid-sulphate and adularia sericite types. *Economic geology* 82: 1-26.
- Henley, R. W. (1985) The geothermal framework of epithermal deposits. In: *Geology and geochemistry of epithermal systems* (Eds. Berger B. R. and Bethke, P. M.) *Reviews in Economic Geology* 2: 1-24. Society of Economic Geologists, Chelsea.
- Hedenquist, J. W., Izawa, E. Arribas, A. and White, N. C. (1996) Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. Special publication, Society of Resource Geology, Tokyo.
- Hedenquist, J. W., Arribas, A. R. and Gonzalez-Urien, E. (2000) Exploration for epithermal gold deposits. In:

- Gold in 2000 (Eds. Hagemann, S. G. and Brown, P. E.) Reviews in Economic Geology 13: 245-277. Society of Economic Geologists, Chelsea.
- Hudson, D. M. (2003) Epithermal alteration and mineralization in the Comstock district, Nevada. *Economic Geology* 98: 367-385.
- Karami, Z. (2005) Geochemical investigation of Au mineralization in north of Bazman area. MSc thesis, University of Tarbiat Moalem, Tehran, Iran (in Persian).
- Kholghi Khasraghi, H. (2005) Chah Sangi Geological Quadrangle Map 1:000000, Sheet 7946, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Lindgren, W. (1933) Mineral deposits. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Pirajno, F. (2009) Hydrothermal processes and mineral systems. Springer, Geological Survey of Western Australia.
- Richards, J. P. (1995) Alkalic-type epithermal gold deposits, a review. *Mineralogical Association of Canada, short course handbook* 23: 367-400.
- Saunders, J. A. (1990) Colloidal transport of gold and silica in epithermal precious-metal systems: evidence from the Sleeper deposit, Nevada. *Geology* 18: 757-760.
- Saunders, J. A. (1994) Silica and gold textures in bonanza ores of the Sleeper deposit, Humboldt County, Nevada: evidence for colloids and implications for epithermal ore-forming processes. *Economic Geology* 89: 628-638.
- Sawkins, F. J. (1990) Metal deposits in relation to plate tectonics. 2<sup>nd</sup> edition. Springer, Berlin.
- Shamanian, G. H., Hedenquist, J. W., Hattori, K. H. and Hassanzadeh, J. (2004) The Gandy and Abolhassani epithermal prospects in the Alborz magmatic arc, Semnan province, northern Iran. *Economic Geology* 99: 691-712.
- Sherlock, R. L. and Lehrman, N. J. (1995) Occurrences of dendritic gold at the McLaughlin mine hot-spring gold deposit. *Mineralium Deposita* 30: 323-327.
- Simmons, S. F. (1995) Magmatic contributions to low-sulfidation epithermal deposits. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series* 23: 455-477.
- Simmons, S. F. and Browne, P. R. L. (2000) Hydrothermal minerals and precious metals in the Broadlands-Ohaaki geothermal system: implications for understanding low-sulfidation epithermal environments. *Economic Geology* 95: 99-112.
- Simmons, S. F. White, N. C. and John, D. A. (2005) Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. *Economic Geology* 100: 485-522.
- Simpson, C. R. J., Mauk, J. L., Arehart, G. B. and Mathews, S. J. (1995) The formation of banded epithermal quartz veins at the Golden Cross mine, Waihi, New Zealand. In: *Proceeding of PACRIM Congress; Exploring the Rim, Auckland, New Zealand*.
- Stocklin, J. (1968) Structural history and tectonics of Iran, a review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52(7): 1229-1258.
- Taylor, B. E. (2007) Epithermal gold deposits. In: *mineral deposits of Canada: a synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces and exploration methods* (Ed. Goodfellow, W. D.) Special publication 5: 113-139. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Canada.
- White, N. C. and Hedenquist, J. W. (1990) Epithermal environments and styles of mineralization: variations and their causes and guidelines for exploration. In: *Epithermal gold mineralization of the Circum-pacific, geology, geochemistry, origin and exploration, II* (Eds. Hedenquist, J., White, N. C. and Siddeley, G.) 36:.

445-474. *Journal of Geochemical Exploration*.

Wilkinson, J. J. (2001) Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos* 55: 229-272.

Yilmaz, H., Oyman, T., Arehart, G. B., Colakoglu, A. R. and Billor, Z. (2007) Low-sulfidation Au-Ag mineralization at Bergama, Izmir, Turkey. *Ore Geology Reviews* 32: 81-124.

## Mineralogy and chemistry of sulfides in Chah Nali Au-bearing silicic veins, north Bazman, southeast of Iran

Mohammad Boomeri <sup>1\*</sup>, Habib Biabangard <sup>1</sup>, Kazuo Nakashima <sup>2</sup> and Javad Gholami <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

<sup>2</sup> Department of Earth and Environment Sciences, Faculty of Sciences, Yamagata University, Yamagata, Japan

### Abstract

The Chah Nali Au-Ag silicic veins are located 160 km northwest of Iranshahr and 70 km north of Bazman town in Lut block. The veins are mainly hosted by basaltic and andesitic rocks that were altered to silicic, phyllic, argillic and propylitic alterations around the veins. Symmetrical crustified structures and colloform, cockade and breccia textures are the common features of the veins. The gold grade is high in the veins (up to 16 ppm Au). The sulfides mainly occur in silicic zone and can be divided into primary and secondary sulfides. The chemistry of sulfides and elemental maps of As, Au and Ag were determined and provided by an electron probe micro analysis (EPMA). The elements that were quantitatively measured are Sb, Zn, Pb, Hg, Cd, Bi, Au, Se, Te, Cu, Fe, Mn, As, Ag and S. Pyrite, chalcopyrite, galena, sphalerite and tetrahedrite occur as primary sulfides and covellite, Ag-rich covellite and an Ag-rich new mineral occur as secondary sulfides. In general, Au concentration is low in the studied sulfides but Ag concentration is relatively high in the sulfide-bearing ores. The investigated Au-Ag mineralization is an Ag-rich low sulphidation epithermal system that was probably formed by hydrothermal solutions that are related to the young volcanic activities.

**Key words:** Ag-sulfide, Gold and silver mineralization, Epithermal, Silicic veins, Chahnali, Mount Bazman, Lut block

---

\* boomeri@hamoon.usb.ac.ir