

# مطالعات کانی‌شناسی و میانبارهای سیال ذخیره طلای اپی‌ترمال شرف آباد، شمال باختر ایران

نوشته: سوسن ابراهیمی\*، یوان مینگ پن\*\*، سعید علیرضایی\* و محمود مهرپر تو\*\*\*

\* گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

\*\* گروه زمین‌شناسی، دانشگاه ساسکاچوان، کانادا

\*\*\* پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۰۶/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۰۳/۱۱

## چکیده

سامانه رگه‌ای اپی‌ترمال طلا دار شرف آباد در شمال باختر ایران و در زون ماگمایی البرز-آذربایجان واقع است. سنگ میزبان اصلی رگه‌های طلا دار، توف، برش و آندزیت پورفیری ائوسن است. دگرسانی شامل یک زون سیلیسی است که بیشتر به سمت خارج به زون آرژیلیک و پروپیلیتیک منتهی می‌شود. کانه‌زایی به‌طور عمده به رگه‌ها و رگچه‌های سیلیسی و سیلیسی-کربناتی محدود بوده و توسط زون‌های گسلی کنترل شده است. هجده رگه معدنی تشخیص داده شده که طول و عرض آنها به ترتیب از ۱۰ تا ۱۰۰۰ متر و از ۰/۵ تا ۱۵ متر متغیر است. کانی اصلی پیریت همراه با مقادیری کالکوپیریت، اسفالریت و گالن است. طلا به صورت دانه‌های پراکنده و میکروسکوپی در پیریت و سیلیس و در مرز دانه‌های کالکوپیریت، اسفالریت و گالن قرار دارد. سیلیس به‌صورت کوارتز خاکستری، کوارتز سفید، کوارتز شفاف، اوپال، کالسدونی و مقدار کمی آمیتست است. بر اساس مطالعات کانی‌شناسی و روابط بافتی، چهار مرحله قابل تشخیص است: پیش از کانه‌زایی، کانه‌زایی، پس از کانه‌زایی و سوپرژن، که طلا و کانی‌های سولفیدی فلزهای پایه در مرحله کانه‌زایی تشکیل شده‌اند.

داده‌های میانبارهای سیال از اسفالریت و کوارتز خاکستری مربوط به مرحله اصلی کانه‌زایی، کربنات، و کوارتز شفاف و آمیتست مربوط به مرحله آخر به دست آمده است. میانبارهای سیال در کوارتز خاکستری نشان می‌دهند که کانه‌زایی در دامنه دمای ۱۷۰-۲۷۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۱-۸/۷ درصد وزنی معادل NaCl صورت گرفته است. میانبارهای موجود در اسفالریت، معرف دمای همگن شدن ۲۱۵-۲۶۵ درجه سانتی‌گراد و شوری ۸/۸-۱۵/۳ درصد وزنی معادل NaCl هستند. میانبارهای سیال در کربنات، در گستره دمایی ۱۶۰-۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۱/۵-۳/۸ درصد وزنی NaCl تشکیل شده است. مقادیر کمی آمیتست در مرحله آخر به‌طور محلی ایجاد شده است که با طلا و فلزهای قیمتی همراه نیست. میانبارهای سیال در این آمیتست، معرف دمای همگن شدگی ۱۷۳-۲۰۳ درجه سانتی‌گراد و شوری ۳/۵-۹/۵ درصد وزنی NaCl هستند. همراهی میانبارهای غنی از مایع و غنی از بخار در برخی نمونه‌های کوارتز و اسفالریت نشان می‌دهد که جوشش رخ داده است. رخداد جوشش توسط شواهد بافتی مانند برش‌های گرمایی، کلسیت تیغه‌ای و آدولاریا تأیید می‌شود.

داده‌های میانبارهای سیال نشان می‌دهد که کانی‌سازی طلا و فلزهای پایه، در ژرفای میانگین ۴۰۰ متری زیر سطح ایستایی دیرینه تشکیل شده است. چیرگی دگرسانی آرژیلیک حدواسط، همراهی طلا با کانی‌های سولفیدی فلزهای پایه و شوری متوسط میانبارهای سیال در شرف آباد، نمایانگر یک سامانه اپی‌ترمال طلا-نقره و غنی از فلزهای پایه از نوع سولفیدی شدن حدواسط است.

**کلید واژه ها:** اپی‌ترمال، البرز-آذربایجان، طلا، شرف آباد

## ۱- مقدمه

کلیسیمی-قلیایی گسترش زیادی در زون زمین‌ساختی البرز-آذربایجان دارند (Riou et al., 1981). این نوع سنگ‌ها میزبان اصلی ذخایر فلزهای پایه و گرانبها در بسیاری از نقاط کره زمین هستند (Sillitoe & Hedenquist, 2003). ذخیره طلای شرف آباد در ۳۰ کیلومتری شمال باختر ورزقان در استان آذربایجان خاوری، در محدوده جغرافیایی ۳۸° ۲۸' ۴۵" و ۴۶° ۳۱' ۰۴" طول خاوری و ۳۶° ۱۷' ۳۸" و ۳۸° ۳۸' ۰۲" عرض شمالی واقع شده است. این محدوده در شمال باختر مجموعه ماگمایی البرز-آذربایجان واقع شده و به‌طور عمده از سنگ‌های آتشفشانی کلیسیمی-قلیایی تشریری تشکیل شده است.

کانه‌زایی طلای اپی‌ترمال شرف آباد در اواخر دهه ۱۳۷۰ توسط سازمان زمین‌شناسی ایران کشف شد و به دنبال آن مطالعات نیمه تفصیلی شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی-معدنی، حفر ترانشه، حفاری، نمونه‌برداری و تعیین عبار صورت گرفت. سنگ‌های آتشفشانی پلیوسن و گنبد‌های نیمه آتشفشانی با ترکیب آندزیت تا تراکی آندزیت، ریوداسیت، توف و گدازه‌های آندزیتی، واحدهای آتشفشانی-رسوبی مربوط به ائوسن را پوشانده است. دگرسانی شامل یک زون سیلیسی است

## ۲- زمین‌شناسی محلی

منطقه کانی‌سازی شرف آباد در زون فلززایی ارسباران در شمال باختر کمان ماگمایی البرز-آذربایجان قرار دارد که به دلیل ویژگی‌های زمین‌شناسی-فلززایی آن همواره مورد توجه زمین‌شناسان بوده است. این زون بخشی از کمان آتشفشانی کلیسیمی-قلیایی در شمال ایران است که به طول ۱۸۰۰ کیلومتر از شمال باختر ایران به سمت خاور تا افغانستان کشیده شده است. وسعت زون ارسباران ۲۴۲۰۰ کیلومتر مربع بوده و اهمیت آن به دلیل وجود طلای اپی‌ترمال، مس و مولیبدن پورفیری و ذخایر جیوه، آرسنیک، آنتیموان، کائولن و برخی مواد دیگر است. به دلیل گسترش فعالیت‌های ماگمایی تشریری و همچنین دگرسانی‌های وسیع، پژوهش‌های اکتشافی در این محدوده، به عنوان یکی از ۱۰ زون طلا دار برتر، در دستور کار سازمان زمین‌شناسی قرار گرفته است. ذخایر طلای اپی‌ترمال در زون ارسباران، غالباً همراه

## ۵- کانی‌سازی و پارائنز کانی‌ها

به منظور شناخت پارائنز کانی‌ها، نمونه‌های معرف از مغزه‌ها، ترانشه‌ها و سطح زمین برداشت شده است. براساس مطالعات کانی‌شناسی و روابط بافتی، چهار مرحله قابل تشخیص است.

### ۵-۱- مرحله ۱ (مرحله قبل از کانی‌سازی اصلی)

کوارتز، کانی اصلی مرحله اول است که به‌صورت توده‌ای و رگچه‌ای و با بافت ریزبلور و موزاییکی وجود دارد و رنگ آن اغلب خاکستری روشن است. به طور محلی، کوارتز خاکستری تیره به صورت عدسی شکل و رگچه‌ای وجود دارد که با پیریت فراوان همراه است و علت تیرگی آن نیز ممکن است تجمع همین کانی باشد. علاوه بر کوارتز و پیریت، مقادیر متفاوتی روتیل، مگنتیت، ایلمنیت، مولیبدنیت و کولیت در این مرحله تشکیل شده است. روتیل با بلورهای بی‌وجه و با ابعاد ۲-۴۰ میکرون به‌صورت پراکنده در مقاطع میکروسکوپی دیده می‌شود. مگنتیت به‌صورت بلورهای وجه‌دار با ابعاد ۱۰-۴۰ میکرون وجود دارد که در بعضی قسمت‌ها در حال تبدیل به هماتیت است. ایلمنیت با ابعاد ۳۰۰ میکرون در کنار مگنتیت در بعضی مقاطع میکروسکوپی مشاهده می‌شود. همچنین مقدار بسیار کمی مولیبدنیت به‌صورت بلورهای ریز و پراکنده با ابعاد ۱۵-۱۰ میکرون قابل تشخیص است. کولیت در بعضی قسمت‌ها به صورت کانی اولیه مشاهده می‌شود. فراوان‌ترین کانی در این مرحله، پیریت با ابعاد ۱۰-۵۰ میکرون است که به‌صورت بلورهای وجه‌دار تا بی‌وجه وجود دارد و در بخش‌های سطحی تحت تأثیر هوازدگی قرار گرفته است. بافت آن اغلب پراکنده، پرکننده حفره‌ها و درزه‌ها و نیز استوک ورکی است (شکل ۲-A).

### ۵-۲- مرحله ۲ (مرحله کانه زایی اصلی)

بافت برشی در این مرحله غالب بوده و برش‌های گرمایی توسط سیمان سیلیسی-کربناتی به هم متصل شده‌اند. کوارتز دارای بافت برشی و به رنگ سفید و خاکستری است و اغلب ریز تا متوسط بلور و وجه‌دار تا نیمه‌وجه‌دار است. بافت‌های دیگر شامل حفره‌ای، شانه‌ای، موزاییکی، پرماتند و رگچه‌ای است. در این مرحله، علاوه بر کوارتز، کانی‌های کربناتی نیز حضور دارند که کوارتز و ماده معدنی را در بر گرفته‌اند. کربنات‌ها گاه به صورت رگچه‌ای نیز تشکیل شده‌اند که در این حالت فاقد ماده معدنی هستند. در بعضی قسمت‌ها کلسیت تیغه‌ای وجود دارد که فاقد کانه زایی است و در مواردی قالب تیغه‌ای آن توسط کوارتز جانشین شده است. در بیشتر موارد، رگچه‌های کربناتی رگچه‌های سیلیسی را قطع کرده‌اند. به‌طور محلی، کانی آدولاریا که یک محصول دگرسانی فلدسپارهاست، با بلورهای لوزی شکل وجود دارد (Simpson et al., 2001). شکل لوزی این کانی، نوع غالب آدولاریا در ذخایر اپی‌ترمال است که به‌طور معمول دانه‌ریز بوده و در نمونه‌های دستی به رنگ کرم تا نارنجی کم‌رنگ است و دمای بین ۳۲۶-۱۴۱ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد (Dong & Marrison, 1995). حضور هم‌زمان میانبارهای غنی از بخار و غنی از مایع، نشانگر فرایند جوشش در زمان تشکیل میانبارهاست. این فرایند با شواهد بافتی مانند کلسیت تیغه‌ای، آدولاریا و برش‌های گرمایی تأیید می‌شود.

کوارتز برشی سفید، حاوی مقادیر بسیار کمتری از ماده معدنی نسبت به برش‌های خاکستری است. کانی‌های فلزی قابل تشخیص در این مرحله شامل پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، طلا، تتراهدريت، کوبانیت، بورنیت، روتیل و کولیت است. پیریت به‌صورت وجه‌دار و نیمه‌وجه‌دار با ابعاد ۲۰۰-۱۰ میکرون و حاوی میانبارهای پیرویت و کالکوپیریت و بافت آن به صورت افشان و پرکننده فضای

با سنگ‌های آذرآواری با ترکیب اسیدی تا حدواسط رخ داده و به‌طور عمده در قالب رگه‌های سیلیسی با بافت برشی هستند.

محدوده شرف‌آباد، یکی از مهم‌ترین رخدادهای طلا در زون ارسباران به شمار می‌آید. سنگ میزبان به‌طور عمده شامل گدازه‌های آندزیتی و توف‌های ائوسن و بیشتر با دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیک و پروپیلیتیک همراه است (شکل ۱). کانه‌زایی به‌طور عموم در قالب رگه‌ها و رگچه‌های سیلیسی و سیلیسی-کربناتی رخ داده و توسط زون‌های گسلی کنترل شده است. هجده رگه معدنی شناسایی شده است که طول و عرض آنها به ترتیب از ۱۰ تا ۱۰۰۰ متر و از ۰/۵ تا ۱۵ متر متغیر است. فعالیت‌های اکتشافی انجام شده شامل صدها متر ترانشه و ۱۴ گمانه با حداکثر ژرفای ۱۱۱ متر است. محل و موقعیت رگه‌ها در نقشه (شکل ۱) مشخص شده است. تجزیه شیمیایی نمونه‌های معرف از رگه‌ها مقادیر ppm ۰/۵-۱۵ طلا، ppm ۱۰-۴۰۰ مس، ppm ۱-۱۰ نقره، % ۰/۲-۳/۶ سرب و % ۰/۱-۵/۶ روی را نشان می‌دهد (پورنیک، ۱۳۸۵).

### ۳- دگرسانی

دگرسانی در منطقه شرف‌آباد، از گسترش وسیعی دارد و به منطقه رخنمون رگه‌ها محدود نیست. توف‌ها و گدازه‌های ائوسن بالای تحت تأثیر محلول‌های گرمایی قرار گرفته و تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی وسیعی در آنها ایجاد شده است. دگرسانی پروپیلیتیک به‌طور گسترده نواحی شمال و باختر منطقه را فرا گرفته است و با رنگ سبز تیره تاروشن مشخص می‌شود. مطالعات سنگ‌شناسی نشان می‌دهد که اغلب این سنگ‌ها به مجموعه‌ای از کلریت، کربنات، سریسیت، اپیدوت و کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند. دگرسانی آرژیلیک به رنگ سفید تا قهوه‌ای روشن در نواحی شمال، خاور و جنوب روستای هیزه‌جان گسترش دارد و با مجموعه کانی‌های کائولینیت، هماتیت، کلسیت و مقادیر کمتری جاروسیت، ژیسیت، گوتیت، آلونیت و پیریت مشخص می‌شود. دگرسانی سیلیسی به رنگ خاکستری و به صورت پراکنده در بخش شمالی روستای هیزه‌جان گسترش دارد و به‌طور عمده شامل کوارتز ریزبلور، اپال و اکسیدهای آهن است.

### ۴- دگرسانی گرمایی پیرامون رگه‌های طلا‌دار

دگرسانی گرمایی، در اطراف رگه‌های طلا‌دار به‌خوبی گسترش یافته است. این دگرسانی از بیرون به درون شامل دگرسانی پروپیلیتیک، آرژیلیک و سیلیسی است. دگرسانی پروپیلیتیک با رنگ سبز روشن خودنمایی می‌کند. در این دگرسانی، کانی‌های تیره سنگ میزبان (آمفیبول و پیروکسن) به کانی‌های ترمولیت، کلریت، اکتینولیت و مقادیر کمتری اپیدوت، کربنات، آلپیت، سریسیت، پیریت و اکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند. پیریت به‌صورت رگچه‌ای در امتداد درزه‌ها و همین‌طور به صورت پراکنده دیده می‌شود. پلاژیو کلازا تا حد زیادی توسط کربنات، کانی‌های رسی و گاه کلریت جانشین شده‌اند. به سمت داخل، دگرسانی آرژیلیک حد واسط دیده می‌شود که شدت آن به سمت رگه افزایش می‌یابد و با رنگ سفید تا زرد مشخص می‌شود. بلورهای فلدسپار به‌طور کامل به سریسیت، کلریت، کلسیت، کوارتز و کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند و در بعضی قسمت‌ها قالب‌هایی از کانی‌های تیره قابل تشخیص است. مطالعات XRD نشان می‌دهد که سنگ میزبان به کانی‌های کوارتز، دولومیت، پیریت، ایلیت، کائولینیت، کلریت، کریستوبالیت، مونتموریلونیت، کلسیت و آلونیت تجزیه شده است. محصول عمده این دگرسانی، ایلیت و کائولینیت است (پورنیک، ۱۳۸۵). دگرسانی آرژیلیک به تدریج به دگرسانی سیلیسی تبدیل می‌شود که شامل کوارتز و به مقدار کمتر اپال، کریستوبالیت، تریدمیت است. کانی‌های همراه عبارتند از روتیل، پیریت، کالکوپیریت و به مقدار کمتری ترمولیت، اکتینولیت، اپیدوت، ناتروجاروسیت و اکسیدهای آهن.

کانی‌زایی، دگرسانی‌ها و رگه‌های کربناتی و کالسدونی همراه با پیریت‌های پراکنده و کوارتزهای شفاف و آمیتست با بافت نواری و پوسته‌ای، معرف مرحله نهایی تحول سیال گرمایی هستند. پس از فرسایش سنگ‌های رویی، فرایندهای هواز دگی با تأثیر بر کانی‌های سولفیدی منجر به تشکیل کانی‌های ثانوی شده‌اند. بخشی از دگرسانی کائولینی، ناشی از تأثیر آبهای جوی اسیدی بر سنگ‌های محل است.

#### ۷- میانبارهای سیال

از نمونه‌های معرف مغزه‌ها و ترانشه‌ها، ۱۵ مقطع نازک دوبر صیقلی با ستبرای ۵۰ میکرون برای مطالعه میانبارهای سیال تهیه شد. پس از بررسی اولیه، ۸ نمونه مناسب (۳ نمونه کوارتز از انواع خاکستری و شفاف، ۲ نمونه کربنات، ۲ نمونه اسفالریت و ۱ نمونه آمیتست) انتخاب شد. موقعیت نمونه‌ها در شکل ۱ و جدول ۲ مشخص شده است. میانبارهای مطالعه شده به‌طور عمده از نوع اولیه و به مقدار کمتر، ثانویه دروغین، مطابق معیارهای (Roedder, 1984) است. شکل میانبارها بسیار متفاوت بوده و بیشتر با شکل‌های نامنظم، بیضی، کشیده و صفحه‌ای است. دو نوع میانبار غنی از مایع و غنی از بخار تشخیص داده شد. بیشتر میانبارهای سیال غنی از مایع، حاوی ۷۰-۹۰ درصد مایع و ۳۰-۱۰ درصد بخار ( $V>L$ )، و میانبارهای سیال غنی از بخار حاوی ۹۰-۶۰ درصد بخار و ۴۰-۱۰ درصد مایع ( $V>L$ ) هستند. در ۵ نمونه، میانبارهای غنی از بخار ( $V>L$ ) و غنی از مایع ( $L>V$ ) در کنار هم قرار دارند که این از نشانه‌های فرایند جوشش است (Simmons et al., 2000). با توجه به شکل میانبارها و معیارهای تشخیص میکروسکوپی، هیچ شهادی از حضور  $CO_2$  مایع و کانی‌های دختر در میانبارها دیده نشد. آزمایش‌های میکروترموتری، بر روی میانبارهای غنی از مایع که توسط ناپدید شدن بخار همگن می‌شوند، صورت گرفت. مطالعات میکروترموتری با استفاده از سیستم گرمایش-سرمايش جریان گاز USGS، در دانشکده زمین‌شناسی دانشگاه ساسکاچوان کانادا توسط مؤلف اول انجام شده است. برای کالیبره کردن دستگاه و تعیین دقت اندازه‌گیری، از نمونه‌های میانبارهای استاندارد مصنوعی آب خالص و فلئوریت استفاده شد. دقت اندازه‌گیری برای دماهای همگن شدن  $± 2^{\circ}C$  و برای ذوب یخ  $± 0.2^{\circ}C$  است.

#### ۷-۱- میانبارهای سیال با میزبان کوارتز

کوارتز خاکستری مربوط به مرحله اصلی کانه‌زایی سولفیدی و طلا، فاز میزبان است. اندازه میانبارهای مورد مطالعه به‌طور متوسط ۱۰-۱۰۰ میکرون و در چند مورد تا ۳۰۰ میکرون است و گاه میانبارهای غنی از بخار و غنی از مایع در مجاورت یکدیگر قرار گرفته‌اند. کوارتز دانه‌ریز و کالسدونی، فاقد میانبارهای قابل تشخیص هستند. میانبارهای مورد مطالعه به‌طور عمده از نوع اولیه بوده و به صورت پراکنده و گاه در امتداد مناطق رشد کانی کوارتز، و دور از شکستگی‌ها و رگچه‌ها هستند. هیچ اثری از پدیده نازک‌شدگی (Necking down) مشاهده نشد (شکل ۳- C, D).

#### ۷-۲- میانبارهای سیال با میزبان کربنات

کربنات‌های انتخاب شده به‌طور عمده مربوط به مرحله ۲ (کانه‌زایی) است. کربنات‌های رگچه‌ای مربوط به مرحله آخر، فاقد میانبارهای مناسب برای مطالعه است. فراوانی میانبار در کربنات‌ها در مقایسه با کوارتز کمتر است. اندازه میانبارها ۱۰-۵۰ میکرون و به صورت جدا و پراکنده و گاه در امتداد سطوح رخ کلیست است. این میانبارها غنی از مایع و از نوع اولیه بوده و پدیده نازک‌شدگی در آنها مشاهده نشده است (شکل ۳- A, B).

#### ۷-۳- میانبارهای سیال با میزبان اسفالریت

اسفالریت به رنگ زرد و در حاشیه دانه‌ها سرخ تا قهوه‌ای است. این کانی به

خالی است. کالکوپیریت با ابعاد ۱۰۰-۵۰ میکرون به‌طور پراکنده و یا در مجاورت کانی‌های پیریت، اسفالریت، گالن و طلا قرار داشته و گاه به صورت میانبار در اسفالریت دیده می‌شود. تتراهدريت به‌صورت دانه‌های بی‌وجه با ابعاد ۷۰ میکرون و حاوی میانبارهای کالکوپیریت، گالن و اسفالریت است. گالن با بلورهای وجه‌دار تا نیمه‌وجه دار با ابعاد ۱۰-۱۲۰ میکرون وجود دارد. این کانی به صورت پراکنده و گاه در کنار اسفالریت، پیریت، کالکوپیریت قرار دارد و در بعضی قسمت‌ها در حاشیه توسط سروسیت جانشین شده است. اسفالریت با بلورهای درشت و میانبارهایی از کالکوپیریت، پیریت و گالن وجود دارد (شکل ۲- B). کوبانیت به‌صورت بی‌وجه تا وجه‌دار با ابعاد ۲۰۰ میکرون دیده می‌شود که گاه در حاشیه توسط کولیت جانشین شده است. بورنیت به‌صورت بلورهای پراکنده نیمه‌وجه‌دار تا بی‌وجه با ابعاد ۳۰-۱۰ میکرون در مقاطع میکروسکوپی مشاهده می‌شود. روتیل در این مرحله نیز حضور دارد. کانی کولیت نیز با بلورهای بی‌وجه و پراکنده، با ابعاد ۱۰۰-۳۰ میکرون در رگچه‌های سیلیسی دیده می‌شود. کانی طلا با اندازه‌های ۱۸۰-۱۰ میکرون به صورت ذرات پراکنده و همین‌طور پرکننده درزه‌های میکروسکوپی و در مرز کانی‌های گالن، اسفالریت، کالکوپیریت و گاه در درون آنها وجود دارد (شکل ۲- D, C).

#### ۵-۳- مرحله ۳ (مرحله پس از کانه‌زایی اصلی)

در این مرحله، کوارتز با بلورهای درشت و شفاف همراه با آمیتست و مقادیر بسیار کمی پیریت تشکیل شده است. کانی آمیتست به‌صورت بلورهای وجه‌دار تا نیمه‌وجه‌دار با دانه‌های درشت و به صورت پراکنده یا نواری وجود دارد که فاقد کانه‌زایی هستند. بافت‌های غالب شامل پوسته‌ای، شانه‌ای، نواری و پرکننده فضای خالی است. رگچه‌های کوارتز ریزدانه و کالسدونی، کوارتز مرحله ۳ و آمیتست همین‌طور مجموعه کانی‌های قبلی را قطع می‌کنند و خود توسط رگچه‌های کربنات درشت بلور با بافت موزاییکی و فاقد ماده معدنی قطع می‌شوند.

#### ۵-۴- مرحله ۴ (سویرزن)

در این مرحله، هیدروکسیدهای آهن بر اثر دگرسانی سویرزن پیریت و کالکوپیریت پدید آمده است. هماتیت با ابعاد ۳۰-۲ میکرون به‌صورت نامنظم بر روی پیریت تشکیل شده است. بلورهای گالن از اطراف توسط سروسیت جانشین شده‌اند. همچنین مقداری کولیت در اطراف بلورهای گالن و اسفالریت دیده می‌شود که محصول جانشینی مس در محلول به جای سرب و روی در گالن و اسفالریت است. دیزنیت نیز یک کانی دگرسان شده حاصل از کالکوپیریت است. اولیژیست نیز به‌صورت سوزن‌های ظریف و کشیده و به‌صورت کانی‌های مستقل وجود دارد. مقداری مالاکیت و آزوریت که حاصل دگرسانی کالکوپیریت و کولیت است، نیز دیده می‌شود.

#### ۶- توالی پاراژنتیکی کانی‌ها

توالی پاراژنتیکی کانی‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. دگرسانی‌های پروپلیتیک و آرژیلیک حد واسط در مرحله پیش از کانه‌زایی تشکیل شده‌اند و بافت چیره در این مرحله، پرکننده فضای خالی است. دگرسانی آرژیلیک تا مرحله کانه‌سازی ادامه داشته و در این مرحله به دگرسانی سیلیسی منتهی شده است. کانی‌سازی غالباً همراه با بافت‌های پرکننده فضای خالی، نواری، و استوک ورکی است. در مرحله دوم، برش‌های گرمایی همراه با کانی‌سازی طلا و کانی‌های سولفیدی تشکیل شده است. حضور کربنات‌های تیغه‌ای و کانی آدولاریا در این مرحله، همراه با برش‌های گرمایی، نشانه رخداد جوشش است. در مرحله پس از

شدن پایین به دو گروه کانسارهای با سولفیدی شدن پایین (عضو انتهایی) و کانسارهای سولفیدی شدن حد واسط تقسیم شده‌اند. کانسارهای با سولفیدی شدن بالا با حضور کانی‌های انارژیت، باریت، لوزونیت و کولیت، دگرسانی آرژولیک پیشرفته و میان‌بادهای سیال با دامنه شوری متغیر مشخص می‌شوند. سیال‌های کانه‌دار گروه سولفیدی شدن پایین در ذخایر Au-Ag دارای شوری‌های پایین (< ۵) بوده و در ژرفای کمتر از ۴۰۰ متر تشکیل می‌شوند. سیال‌های کانه‌دار در ذخایر Au-Ag به همراه فلزهای پایه، شوری متوسط بین ۴-۱۴ دارند و کانسنگ در قسمت‌های ژرف‌تر، بین ۴۰۰-۱۰۰۰ متر زیر سطح آب زیرزمینی، تشکیل می‌شوند (Albinson et al., 2001). تغییرات مکانی و زمانی نهشت کانسنگ با استفاده از نمودار دمای همگن‌شدگی و ذوب یخ در میان‌بادهای سیال توسط Hedenquist and Henley (1985) بررسی شده است. نتایج حاصل از مطالعات میان‌بادهای سیال در شرف‌آباد و روند آن نشان می‌دهد که جوشش سیال غنی از گاز با رقیق‌شدگی بعدی همراه بوده است (شکل ۳). شوری‌های متغیر در کوارتز خاکستری نسبت به ژرفا، پیشنهاد می‌کند که سیال به طور متناوب به سیستم تزریق شده است. تغییرات pH ناشی از خروج CO<sub>2</sub> در طول فرایند جوشش، عامل مهمی در نهشت کانی‌ها بویژه سولفیدهای فلزهای پایه است (Hedenquist and Henley, 1985; Giggenbach, 1992). در شرایط اکسایش همراه با از دست رفتن H<sub>2</sub> در طول جوشش، سبب ناپایدار شدن کمپلکس‌ها و نهشت طلا و عناصر همراه می‌شود (Hedenquist and Henley, 1985). دامنه دمای همگن‌شدگی برای کربنات‌ها در ذخیره شرف‌آباد بین ۱۶۰-۲۴۹ °C با میانگین ۱۹۰ °C است که این دامنه وسیع دمایی می‌تواند ناشی از سه حالت در سیال باشد (Simmons et al., 2000). ۱) سرد شدن سیال در طول زمان؛ ۲) اندازه‌گیری بر روی میان‌بادهای نازک شده؛ و ۳) وجود دو سیال که در محیط جوشش شرکت داشته‌اند. دمای ذوب یخ از ۰/۹ تا -۲/۳- متغیر است که می‌تواند معرف شوری بین ۱/۵ تا ۳/۸ درصد وزنی معادل نمک طعام باشد و نشان می‌دهد که سیال گرمایی رقیق شده است. تشکیل همزمان میان‌بادهای غنی از بخار و غنی از مایع، نشانگر فرایند جوشش است. حضور کلسیت تیغه‌ای، آدولاریا و برش‌های گرمایی نیز از نشانه‌های فرایند جوشش است (Simmons et al., 2000).

همراهی طلا با سولفیدهای فلزی در مرحله ۲ کانه‌زایی نشان می‌دهد که شوری سیال در حین نهشت مواد معدنی به نسبت بالا بوده است. سیال حاوی اسفالریت با شوری ۱۰/۸-۱۵/۳ درصد وزنی نمک طعام در یک دوره به تدریج توسط سیال رقیق‌تر در حال رقیق شدن بوده و با تشکیل کوارتز با شوری ۱ تا ۸/۷ و کلسیت با شوری ۱/۹ تا ۳/۷ درصد وزنی معادل نمک طعام، همراه بوده است میان‌بادهای موجود در آمیتیت، شوری به نسبت بالا، بین ۳/۵ تا ۹/۵ درصد وزنی معادل نمک طعام، که این می‌تواند ناشی از جوشش درازمدت محلی در یک سیستم باز باشد (Brathwaite and Faure, 2002). Scott and Watanabe (1998) و Simmons and Browne (1997) میان‌بادهای با شوری متوسط و پایین را با یکی از این دو فرایند توصیح داده‌اند: ۱) ورود یک شوراب بیگانه به قسمت‌های کم ژرفای سیستم؛ ۲) گیرافتادن سیال‌های با شوری متغیر که در اثر جوشش و خروج بخار (Vaporization) به طور گسترده، در یک سیال با شوری پایین رخ داده است، که فرایند دوم را محتمل‌تر می‌دانند. Brathwaite and Faure (2002) متذکر می‌شوند که شوری بالای آمیتیت از سیال مادر مشتق شده و ادامه تشکیل کوارتز مرحله اصلی بوده است که این فرایند در یک سیستم باز و ممتد ایجاد شده و تشکیل این نوع آمیتیت را با شوری بالا به جوشش غیر آدیاباتیک و از دست دادن وسیع بخار نسبت داده‌اند، زیرا سرد شدن آدیاباتیک مانع از جوشش پیوسته در سیال می‌شود. بنابراین، ترکیب فرایندهای جوشش وسیع و خروج بخار، باعث گیر افتادن سیالات با شوری‌های متفاوت در یک زمان می‌شود.

نسبت فقیر از میان‌بادهای سیال به صورت نامنظم و کشیده بوده و پدیده نازک‌شدگی را به نمایش می‌گذارند (شکل ۳-E). میان‌بادهای اندازه‌گیری شده از نوع اولیه و پراکنده بوده و غنی از مایع و بخار هستند (شکل ۳-E, F).

#### ۴-۷- میان‌بادهای سیال با میزان کوارتز شفاف و آمیتیت

میان‌بادهای موجود در کوارتز شفاف درشت بلور با بافت شانه‌ای، که مربوط به مرحله پس از کانه‌زایی است، ابعاد کمتر از ۱۰ میکرون دارند و غنی از مایع هستند. این میان‌بادهای به دلیل ریزبودن برای اندازه‌گیری دمای ذوب یخ مناسب نبودند و فقط دمای همگن‌شدگی آنها اندازه‌گیری شده است. میان‌بادهای موجود در آمیتیت، معرف مرحله پس از کانه‌زایی است. اندازه این میان‌بادهای ۱۰-۵۰ میکرون است و غنی از مایع هستند. این میان‌بادهای به طور معمول نامنظم و از نوع اولیه هستند و آثار پدیده نازک‌شدگی را نشان نمی‌دهند.

#### ۵-۷- دمای همگن‌شدگی (Th)

آزمایش همگن‌سازی بر روی ۲۵۵ میان‌بادهای که بیشتر آنها اولیه و تعداد کمی ثانویه دروغین بوده‌اند، انجام شد. دمای همگن‌شدگی برای کانی کوارتز، ۳۶۰-۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، برای اسفالریت ۲۶۵-۲۱۶ درجه سانتی‌گراد، برای کربنات ۲۴۹-۱۶۰ درجه سانتی‌گراد، برای آمیتیت ۲۰۳-۱۷۴ درجه سانتی‌گراد، و برای کوارتز شفاف ۲۰۵-۱۲۴ درجه سانتی‌گراد است (نمودار ۱).

#### ۶-۷- دمای ذوب شدگی (Tm)

تعیین دمای ذوب شدن یخ بر روی ۶۵ میان‌بادهای انجام شد که نتایج آن به شرح زیر است: کانی کوارتز، ۵/۶ تا ۰/۶- درجه سانتی‌گراد؛ اسفالریت، ۱۱/۳ تا -۷/۳- درجه سانتی‌گراد؛ کربنات ۲/۳ تا ۰/۹- درجه سانتی‌گراد؛ و آمیتیت، ۶/۲ تا -۲/۱- درجه سانتی‌گراد. میزان شوری به دست آمده (معادل درصد وزنی کلرید سدیم) برای کانی کوارتز ۸/۷ تا ۱ درصد وزنی، برای اسفالریت ۱۵/۳ تا ۱۰/۸ درصد وزنی، برای کربنات ۳/۸ تا ۱/۵ درصد وزنی و برای آمیتیت ۹/۵ تا ۳/۵ درصد وزنی است (نمودار ۲).

#### ۷-۷- ژرفای تشکیل کانسنگ

به منظور برآورد ژرفای کانی‌سازی نسبت به سطح ایستایی قدیمی، از منحنی جوشش ایستایی (هیدروستاتیک) نسبت به ژرفا استفاده شده است (نمودار ۴، Hass, 1971). منحنی صفر ایستایی مربوط به آب خالص بوده و منحنی‌های بعدی شرایط فشار ایستایی را با توجه به میزان شوری سیال تا شوری ۲۵ درصد وزنی نمک طعام نشان می‌دهد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که دمای تشکیل کانی‌ها نسبت به ژرفا افزایش می‌یابد. با توجه به میانگین دما و شوری سیال در کانی‌های اسفالریت (میانگین Th، ۲۳۷°C و شوری ۱۳ wt% معادل NaCl)، کوارتز (میانگین ۲۳۵°C و شوری ۴ wt%)، آمیتیت (میانگین ۱۹۸°C و شوری ۷ wt%)، کربنات (میانگین ۱۹۵°C و شوری ۲/۱ wt%) و کوارتز شفاف (میانگین ۱۷۵°C)، ژرفای تشکیل کانی‌ها به ترتیب ۳۷۰، ۳۵۰، ۱۸۰، ۱۷۰، ۱۵۰-۱۳۰ متر برآورد می‌شود (نمودار ۴). با توجه به موقعیت پارازنتیکی کانی‌ها و تحول سیال‌ها می‌توان تشکیل ماده معدنی و جوشش را در ژرفای ۳۷۰-۳۵۰ متر و رقیق‌شدگی سیال و صعود آن به سطح زمین و تشکیل فازهای کانی نابارور را در ژرفای کمتر در نظر گرفت.

#### ۸- بحث

بر اساس تقسیم‌بندی Hedenquist (2000) کانسارهای اپی‌ترمال به دو گروه سولفیدی شدن بالا و سولفیدی شدن پایین تقسیم می‌شود. کانسارهای با سولفیدی



۹- نتیجه گیری

جدول ۱- توالی پاراژنتیکی کانی‌ها در کانسار شرف آباد

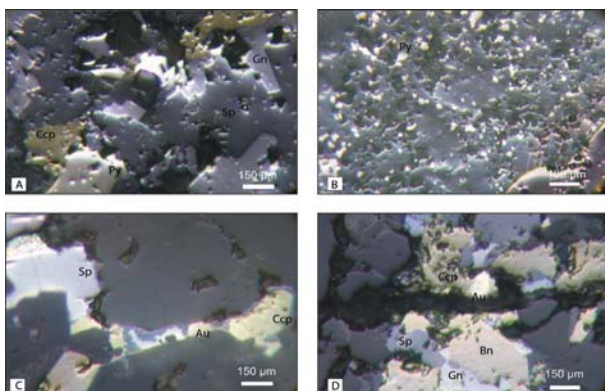
کانی‌ها	هیپوزن			سوپرژن
	قبل از کانه زایی	کانه زایی	بعد از کانه زایی	
کوارتز خاکستری				
کوارتز سفید				
کوارتز شفاف				
آمتیست				
روتیل				
مگنتیت				
ایلمنیت				
مولیبدنیت				
کولیت				
کربنات				
کلسدونی				
آدولاریا				
پیریت				
طلا				
کالکوپیریت				
اسفالریت				
گالن				
بورنیت				
کوبالیت				
نترالدزیت				
پیرویت				
سروزیت				
دیژنیت				
اولیوینیت				
مالاکیت				
آزوریت				
لیمونیت				

بر اساس روابط پاراژنتی و بافتی، تشکیل رگه‌های کانسنگ در محدوده شرف آباد در چهار مرحله به وقوع پیوسته است. مرحله اول با مقادیر فراوانی پیریت همراه بوده که فاقد ارزش اقتصادی است. کانی‌سازی فلزهای پایه و طلا در مرحله دوم رخ داده است و حضور آدولاریا و کلسیت تیغه‌ای نشانه فرایند جوشش است به همراه آمتیست در مرحله سوم تشکیل شده و با کانی‌سازی خاصی همراه نیست. در مرحله چهارم، کانسنگ تحت تأثیر فرایندهای سوپرژن قرار گرفته است. ارتباط بین داده‌های Tm و Th و نتایج حاصل از میانبرهای سیال در کانی‌های اسفالریت، کوارتز و آمتیست، حاکی از آن است که سیال داغ و شور با سیال سردتر و رقیق‌تر درآمیخته و این فرایند با جوشش همراه بوده است. ژرفای تشکیل کانسنگ در شرف آباد، هماهنگ با کانسارهای اپی‌ترمال با ژرفای کم تا متوسط است. حضور آدولاریا و کلسیت تیغه‌ای که نشانه‌های جوشش سیال هستند، دگرسانی آرژلیک حد واسط و همراهی طلا با کانی‌های سولفیدی، و همین‌طور شوری متوسط میانبرهای سیال در شرف آباد، مشخص‌کننده سیستم‌های اپی‌ترمال طلا-نقره و غنی از فلزهای پایه مربوط به گروه سولفیدی حد واسط است.

جدول ۲- داده‌های میانبرهای سیال برای کانی‌های کوارتز شفاف و خاکستری، اسفالریت، کربنات و آمتیست.

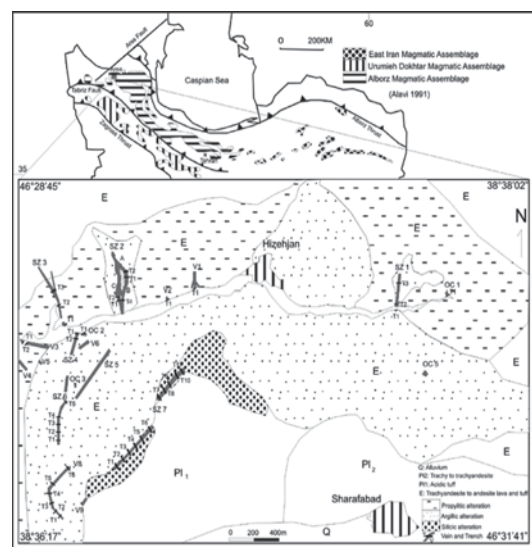
Vein Number, Elevation, Drill hole and Depth of samples	Mineral	Type	N	Th range	Avg.	Tm range	Avg.	Wt% NaCl equiv. range	Avg.	Comments
OC1- T1- 1723	Clear Quartz	P	10	124-205	175	-----	---	-----	-----	L>V
OC1- T1- 1723	Amethyst	P	13	174-238	199	-2.1, -6.2	-5.18	3.5-9.5	6.93	L>V
		P	27	154-232	181	-----	---	-----	-----	L>V
V8- 1910-DH7-88	Gray Quartz	PS	2	299-340	320	-1.4, -2.2	-1.8	2.4-3.7	3	L>V
		P	7	201-307	233	-0.6, -3.4	-2.13	1-5.5	3.64	L>V
		P, PS	41	177-334	219	-----	---	-----	-----	L>V
V8-1910- DH9-18	Gray Quartz	P	10	224-259	243	-0.6, -2.1	-1.12	1-3.5	1.89	L>V
		P, PS	40	222-350	267	-----	---	-----	-----	L>V
V8-1910- DH11-66	Gray Quartz	P	11	203-264	232	-1.8, -5.6	-3	3-8.7	5.29	L>V and V>L
		P, PS	39	192-277	229	-----	---	-----	-----	L>V and V>L
V8- 1910-DH10+2-101	Gray Quartz	P	6	196-268	226	-2.1, -5.4	-3.98	3.5-8.4	6.31	L>V and V>L
		P	3	216-275	232	-7.3, -9.6	-8.3	10.8-13.5	12.03	L>V and V>L
SZ2 - T1-m- 1650	Sphalerite	P	4	242-268	252	-8.7, -11.3	-10.32	12.5-15.3	14.25	L>V and V>L
SZ2 - T1-n- 1650	Carbonate	P	5	160-249	194	-0.9, -2.3	-1.57	1.5-3.8	2.64	L>V
		P	17	160-228	192	-----	---	-----	-----	L>V
SZ2 - T1-g- 1650	Carbonate	P	4	191-207	197	-1.1, -2.2	-1.67	1.9-3.7	2.82	L>V
		P	4	168-211	189	-----	---	-----	-----	L>V

Notes: Th: Homogenization temperature, Tm: Ice- melting temperature, P: Primary fluid inclusion, PS: Pseudosecondary fluid inclusion, L: Liquid, V: Vapor, L>V= Liquid- rich inclusion, V>L= vapor- rich inclusion, N: Number of measurements.

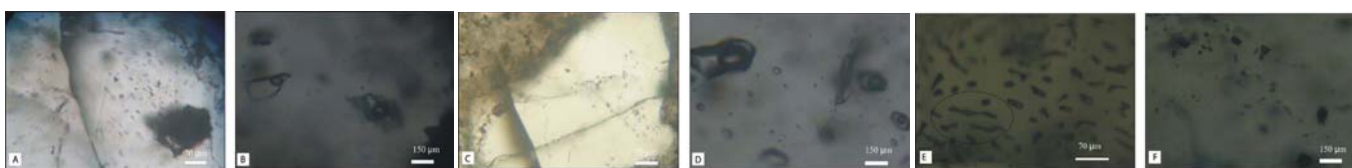


شکل ۲- کانی‌های تشکیل شده در مراحل مختلف کانی‌سازی:

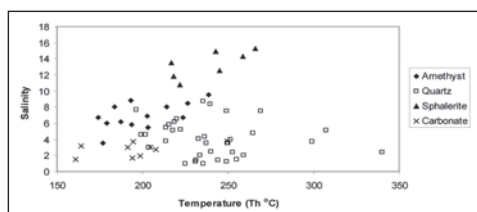
(A) هم رشدی اسفالریت، گالن، پیریت و کالکوپیریت با بافت پرکننده فضای خالی، پیریت‌های دانه ریز و پراکنده در زمینه کوارتز در مرحله اول کانی‌سازی، (C) طلا در مجاورت کالکوپیریت و اسفالریت در درون رگچه سیلیسی، (D) طلا در مجاورت کانی‌های سولفیدی در درون سیلیس. پیریت (Py)، کالکوپیریت (Ccp)، گالن (Gn)، اسفالریت (Sp)، طلا (Au) و بورنیت (Bn).



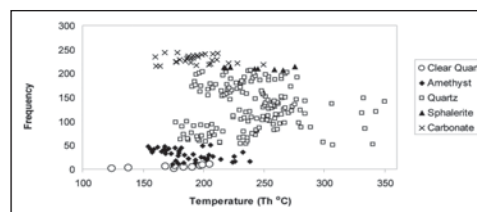
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه کانی‌سازی طلای شرف آباد با نمایش موقعیت رگه‌ها.



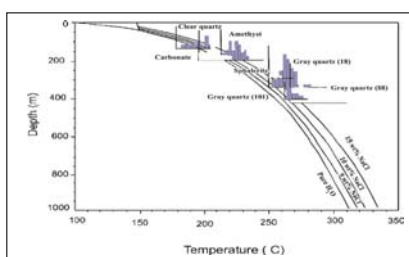
شکل ۳- (A, B) میانبارهای سیال در کربنات با شکل‌های نامنظم؛ (C) میانبارهای سیال ثانویه در امتداد شکستگی‌ها در کوارتز؛ (D) میانبارهای سیال از نوع اولیه و پراکنده در کوارتز، به بزرگی میانبارهای اولیه دو- فازی توجه کنید. (E, F) میانبارهای سیال در اسفالریت؛ به پدیده نازک شدگی در E توجه کنید.



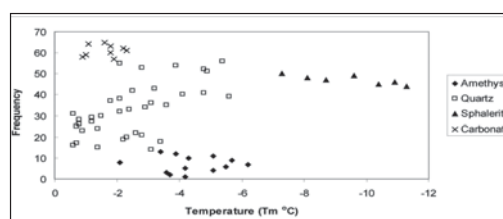
نمودار ۲- میزان شوری در برابر دمای همگن شدگی



نمودار ۱- فراوانی ۲۵۰ میانبار سیال در برابر دمای همگن شدگی.



نمودار ۴- نمودار ژرفا در برابر دمای همگن شدگی (Hass, 1971)



نمودار ۳- فراوانی میانبارهای سیال در برابر درجه ذوب یخ

## کتابنگاری

پورنیک، پ.، ۱۳۸۵- گزارش اکتشافات تفصیلی طلا در محدوده اکتشافی شرف‌آباد-هیزه‌جان "کانی‌سازی مزرعه شادی"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۲۶۴ صفحه.

## References

- Albinson, T., Norman, D. I., Cole, D. and Chomiak, B., 2001- Controls on formation of low- sulfidation epithermal deposits in Mexico: Constrains from fluid inclusion and stable isotope data: Society of Economic geologist, Special Publication 8, p. 1-32.
- Brathwaite, R. L. and Faure, K., 2002- The Waihi epithermal gold- silver- base metal sulfide- quartz vein system, New Zealand: Temperature and salinity controls on electrum and sulfide deposition: Economic Geology, v. 97, p. 260-290.
- Dong, G. and Morrison, G. W., 1995- Adularia in epithermal veins, Queensland: Morphology, structural state and origin: Mineralium Deposita, v. 30, Is. 1, p. 11-19.
- Giggenbach, W. F., 1992- Magma degassing and mineral deposition in the hydrothermal systems along convergent plate binderies: Economic Geology, v. 87, p. 1927-1944.
- Haas, J. L., Jr., 1971- The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure: Economic geology, v. 66, p. 940-945.
- Hedenquist, J. W. and Henley, R. W., 1985- Effect of CO2 on freezing point depression measurements of fluid inclusions: Evidence from active system and application to epithermal studies: Economic Geology, v. 80, p. 1379-1406.
- Hedenquist, J. W., Arribas, A. R. and Urien, E. G., 2000- Exploration for epithermal gold deposits: SEG Reviews, v. 13, p. 245- 277.
- Riou, R., Dupuy, C. and Dostal, J., 1981- Geochemistry of coexisting alkaline and calc- alkaline volcanic rocks from northern Azerbaijan (N.W.Iran), Journal of Volcanology and Geothermal Research, V. 11, P. 253-275.
- Roedder, E., 1984- Fluid inclusions: Reviews in mineralogy, v. 12, 644 p.
- Scott, A. M. and Watanabe, Y., 1998- extreme boiling model for variable salinity of the Hokko low- sulfidation epithermal Au prospect, southwestern Hokkaido, Japan: Mineralium Deposita, v. 33, p. 563-578.
- Sillitoe, H. R., Hedenquist, J. W., 2003- Linkage between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious- metal deposits, Society of Economic Geologist, Special Publication 10, 2003, p. 315-343.
- Simmons, S. F., Arehart, G., Simpson, M. P. and Mauk, J. I., 2000- Origin of massive calcite veins in the Golden Cross Low -Sulfidation, epithermal Au-Ag deposit, New Zealand: Economic Geology, v. 95, p. 99-112.
- 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, v. 92, p. 485-489.
- Simmons, S. F. and Christenson, B. W., 1994- Origins of calcite in a boiling geothermal system: American Journal of Science, v. 294, p. 361-400.
- Simpson, M. P., Mauk, J. I. and Simmons, S. F., 2001- Hydrothermal alteration and hydrologic evolution of the Golden Cross epithermal Au- Ag deposit, New Zealand: Economic Geology, v. 95, p. 773-796.