

بررسی دگرسانی و کانی‌سازی مس پورفیری در منطقه سوناجیل (خاور هریس - استان آذربایجان شرقی)

قادر حسین‌زاده^{۱*}، علی‌اصغر کلاگری^۲، محسن مؤید^۱، بهزاد حاج‌علیلو^۳ و محسن مؤذن^۱

^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ مرکز تحقیقات علوم پایه تبریز، تبریز، ایران

^۳ گروه زمین‌شناسی دانشگاه پیام نور تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۱۱/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۰۹/۱۰

چکیده

منطقه سوناجیل در ۱۷ کیلومتری خاور هریس در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. واحدهای سنگ‌شناختی اصلی در این منطقه از قدیم به جدید عبارتند از: توده‌های آتشفشانی - آذرآواری ائوسن زیرین - میانی، استوک سوناجیل پورفیری به سن ائوسن بالایی - الیگوسن زیرین، توده گرانیتوئیدی اینچه با ترکیب دیوریت، سینودیوریت تا گابرو به سن الیگوسن میانی - بالایی و توده آتشفشانی پلبو - کواترنری اکوزداغی. استوک سوناجیل پورفیری میزبان کانی‌سازی مس پورفیری بوده و ترکیب شیمیایی آن در حد میکروسینودیوریت تا میکروگابرو دیوریت و تا حدی میکروگابرو و میکروگرانودیوریت با بافت چیره پورفیری و تا حد کمتری میکروولیتیک پورفیری می‌باشد. ماگمای مولد این توده، دارای سرشت شوشونیتی (تا کلسیمی - قلیایی با K بالا) بوده و جایگیری آن در یک کمان آتشفشانی پس‌برخوردی صورت گرفته است. نسل‌های مختلفی از رگچه‌های کوارتز نواری، کوارتز - سولفید، کوارتز - اکسید و سولفید در داخل توده پورفیری توسعه یافته و بافت استوک و رک مشخصی را به نمایش گذاشته‌اند. در اطراف توده پورفیری، رگه‌های حاوی کانی‌سازی سولفیدی قابل مشاهده‌اند. ^۳ تیپ دگرسانی هیپوزن گرمایی شامل پتاسیمی، فلیک و پروپیلیتیک در این توده حضور دارند. کانی‌های هیپوزن اصلی در این توده عبارتند از اپریت، کالکوپریت، بورتیت، تتراندريت، انارزیت، مولیدنیت، مگنتیت و هماتیت که به صورت افشان و استوک و رک (رگچه‌ای و ریز رگچه‌ای) حضور دارند. کانی‌های اصلی سوپرژن در این توده نیز شامل هماتیت، گوتیت، مالاکیت، آزوریت، کالکوسیت، کولیت و کانی‌های رسی می‌باشند.

کلیدواژه‌ها: سوناجیل، مس پورفیری، کمان آتشفشانی پس‌برخوردی، دگرسانی هیپوزن، دگرسانی پتاسیمی، دگرسانی سوپرژن.

*نویسنده مسئول: قادر حسین‌زاده

۱- مقدمه

منطقه سوناجیل در فاصله ۱۷ کیلومتری خاور هریس در استان آذربایجان شرقی واقع شده است (شکل ۱). وجود کانی‌سازی مس و دگرسانی شدید گرمایی در این منطقه در سال ۱۳۸۰ توسط امور اکتشافات شرکت ملی صنایع مس ایران مشخص شده و از آن زمان تا کنون پروژه‌های مختلف زمین‌شناسی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و حفاری در این منطقه ادامه دارد. در این نوشتار ضمن مطالعه زمین‌شناسی، جایگاه زمین‌شناختی و سنگ‌شناسی توده‌های آذرین، به بررسی تیپ‌های مختلف و کانی‌شناسی دگرسانی گرمایی هیپوزن و شیوه کانی‌سازی در توده پورفیری پرداخته شده است.

۲- روش مطالعه

برای انجام بررسی‌های حاضر، عملیات صحرایی و نمونه‌برداری سطحی، لاگینگ گمانه‌ها (به متر از حدود ۵۵۰۰ متر شامل ۱۷ حلقه گمانه با ژرفای متوسط حدود ۳۳۰ متر) و به طور همزمان، بررسی سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری نمونه‌های سطحی و ژرفی توسط نگارنده انجام شد که به تهیه نقشه زمین‌شناسی و دگرسانی انجامید. تعداد ۳۴ عدد نمونه از توده پورفیری سوناجیل برای تعیین عناصر اصلی (نمونه‌های با کم‌ترین دگرسانی)، فرعی و کمیاب به روش‌های ICP و XRF (جدول ۱) به آزمایشگاه ALS-Chemex کشور کانادا ارسال شد و تعدادی از نمونه‌های دگرسان شده در دانشگاه لنوین اتریش مورد تجزیه میکروپروب (Electron Probe Micro Analysis) قرار گرفت. بررسی‌های ترمومتری سیالات درگیر نیز به تعداد ۱۰ نمونه در دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام شد.

۳- بحث

۳-۱. زمین‌شناسی

محدوده مورد بررسی، در تقسیم‌بندی‌های زمین‌شناسی ایران در زون البرز - آذربایجان (Nabavi, 1976) و زون آتشفشانی ترشیر - کواترنری (Stoklin, 1977) قرار می‌گیرد. منطقه سوناجیل بخشی از ارتفاعات قوشاداغ یعنی ارتفاعات جنوب اهر به‌شمار می‌رود که طبق نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اهر دارای رخنمون‌های متنوعی از سنگ‌های فیلیشویی و آهک‌های پلاژیک، نهشته‌های آتشفشانی و آذرآواری، توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی و توده‌های نیمه ژرف با بافت پورفیری و دگرسانی گرمایی شدید می‌باشد. مهم‌ترین واحدهای سنگی موجود در این محدوده از قدیم به جدید (شکل ۱) و بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چهارگوش اهر عبارتند از: الف) توده‌های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن زیرین - میانی شامل تناوبی از آندزیت مگاپورفیری، بازالت آندزیتی، آندزیت بازالتی، بازالت و توف که در قسمت‌هایی از منطقه به‌صورت مطبق و جریانی دیده می‌شوند. این توده‌ها دارای بافت پورفیری، مگاپورفیری و ریزدانه بوده و دگرسانی پروپیلیتیک ضعیف تا متوسط از سیماهای مشخص آنها بویژه در همبری با توده سوناجیل پورفیری می‌باشد. ب) توده میکرودیوریت پورفیری (سوناجیل پورفیری) به سن ائوسن بالایی - الیگوسن زیرین که به داخل توده‌های ائوسن نفوذ نموده است و حاوی کانی‌سازی مس پورفیری بوده و تحت تأثیر دگرسانی شدید گرمایی قرار گرفته است (حسین‌زاده، ۱۳۸۷). ج) استوک گرانیتوئیدی اینچه به سن الیگوسن میانی - بالایی دارای ترکیب به طور عمده دیوریتی که به داخل توده‌های ائوسن و سوناجیل پورفیری نفوذ کرده است. نمونه‌های توده اینچه از نظر کانی‌شناسی دارای ترکیب دیوریتی تا کوارتز دیوریتی بوده و نفوذ دایک‌های منشعب از این توده به داخل توده پورفیری از

کلی، انواع آنها از قدیم به جدید عبارتند از:

- رگچه‌های کوارتز-سولفید حاوی تنوعی از سولفیدها (<5%)، کلسیت، اورتوکلاز ثانویه و مگنتیت اندک در زون پتاسیم.

- رگچه‌های کوارتز نواری (Banded quartz) در بخش‌های مختلف زون پتاسیم حاوی کوارتزهای به نسبت ریزدانه و به رنگ خاکستری تیره که حالت متقاطع آنها نشان دهنده خردشدگی‌های مکرر و چندمرحله‌ای بوده (شکل ۲) و دارای مگنتیت و سولفیدهای میکرونی و سیال‌های درگیر غنی از بخار به همراه مقادیر جزئی کلسیت می‌باشند.

- رگچه‌های کوارتز-هماتیت در ژرفاهای مختلف زون فلیک و پتاسیم که دارای مقادیر اندکی کالکوپیریت و دیگر سولفیدها و سولفوسالت‌های مس هستند.

- رگچه‌های پیریتی در زون‌های پتاسیم و فلیک که در محل شکستگی‌ها در اثر دگرسانی سوپرژن به هماتیت (۲%) و گوتیت (۵/۰%) تبدیل شده‌اند (شکل ۲). مقادیر بسیار اندکی کلسیت (<۵/۰%) نیز در این رگچه‌ها قابل مشاهده‌اند.

- رگچه‌های کوارتز شیری سفیدرنگ و به نسبت عریض (<۳mm) که فاقد کانی‌سازی اکسیدی یا سولفیدی بوده و در برخی قسمت‌ها به صورت پرکننده فضاهای خالی و دروزی دیده می‌شوند.

- رگچه‌های سولفیدی به عرض متوسط حدود ۴cm در حاشیه توده پورفیری (زون فلیک) دارای کانی‌سازی مس به نسبت پرعیار (۳%) که رخنمون مشخص آن در طول دره اصلی جنگل با تشکیل مالاکیت و آزوریت قابل مشاهده است (شکل ۶).

- رگچه‌های تک کانیایی ژپیس، کلسیت و هماتیت که در بخش‌های مختلف توده حضور دارند.

۴-۳. دگرسانی گرمابی هیوزن

توده سوناجیل پورفیری تحت تأثیر سیال‌های گرمابی متحمل دگرسانی گسترده‌ای شده و انواع مختلف دگرسانی را می‌توان در آن مشاهده نمود. بسته به نوع دگرسانی گرمابی، انواع کانی‌های ثانویه در این سنگ حضور داشته و کانی‌های سولفیدی و اکسیدی به فرم افشان، ریز رگچه‌ای، رگچه‌ای و رگه‌ای به فراوانی در این زون‌های دگرسانی به چشم می‌خورند. تنوعی از رگچه‌های کوارتز-سولفید، کوارتز-اکسید و کوارتز-کربنات همراه با این دگرسانی‌ها نفوذ کرده‌اند. مجموعه‌های دگرسانی در این توده به شرح زیر قابل مشاهده‌اند:

- **دگرسانی پتاسیمی:** (Lowell and Guilbert, 1970) یا K سیلیکاتی (Creasey, 1966; Sillitoe, 2000) دگرسانی شاخص در کانسارهای پورفیری مس بوده و با تشکیل بیوتیت غنی از منیزیم (Sillitoe, 2000) و پتاسیم فلدسپار ثانویه مشخص می‌شود. طبق Sedorff et al. (2005) تورمالین و کلریت نیز در این زون قابل مشاهده بوده و مقادیر زیادی کلسیت به‌طور فرعی اکتینولیت (Sillitoe, 2000) حضور دارد. این دگرسانی در منطقه مورد مطالعه، در نمونه‌های سطحی و نیز تا ژرفای بسیار فراوانی از گمانه‌های حفاری قابل مشاهده بوده و در نمونه دستی بالک‌های تیره حاصل از تجمع پولک‌های بیوتیت مشخص می‌باشد. در مقاطع نازک، این مجموعه متشکل از پولک‌های بسیار ریز بیوتیت نوپیدا (۳۰%-۵%) حاصل از دگرسانی هورنبلند و صفحات درشت بیوتیت ماگمایی به صورت انباشت‌های پولکی (شکل ۵-a) و مقادیر به نسبت کمتری - فلدسپارقلیایی ثانویه (۱۵%) حاصل از دگرسانی پلاژیوکلاز با رویهم رشدی (Overgrowth) مشخص (شکل ۵-b) می‌باشد. همچنین اورتوز ثانویه در این زون به صورت رگچه‌های کوارتز-K-فلدسپار ظاهر شده و در این حالت به طور معمول حاشیه کوارتز را تشکیل می‌دهد. مقادیر خیلی جزئی اکتینولیت نیز در برخی نمونه‌ها مشاهده شده است. ویژگی

سیماهای مشخص برای اثبات تأخر این توده نسبت به توده سوناجیل پورفیری است. ماگمای مولد این توده دارای سرشت شوشونیتی بوده و از نظر جایگاه زمین‌ساختی در محدوده کمان‌های آتشفشانی با تمایلی مشخص به سمت جایگاه‌های پس‌برخوردی واقع شده‌اند (حسین زاده، ۱۳۸۷).

د) توده آتشفشانی اکوزداغی به سن پلیو-کواترنری با ترکیب آندزیت، تراکی آندزیت، داسیت و ریولیت نمونه بارز فوران نقطه‌ای در منطقه هریس بوده و بخش بزرگی از توده سوناجیل پورفیری و توده‌های درون‌گیر آن توسط گدازه‌ها و واریزه‌های این توده پوشانده شده است. ماگمای مولد این سنگ‌ها دارای سرشت کلسیمی-قلیایی تا کلسیمی-قلیایی با پتاسیم بالا بوده و در یک کمان ماگمایی پس‌برخوردی جایگزین شده است (حسین زاده و همکاران، ۱۳۸۷).

۳-۲. سنگ‌نگاری و سنگ‌شناسی توده سوناجیل پورفیری

نمونه‌های مربوط به توده سوناجیل پورفیری به رنگ خاکستری روشن با بافت پورفیری (شکل ۲-a) و ظاهری دگرسان‌شده بوده و رگچه‌های متقاطع (نسل‌های مختلف) کوارتز-سولفید به صورت استوک‌ورک (شکل ۲-b) در آن به فراوانی دیده می‌شوند. در زیر میکروسکوپ، بافت چیره سنگ، پورفیری بوده اما بافت میکرولیتی پورفیری نیز گاه دیده می‌شود. پلاژیوکلاز (۶۵%-۴۰) به صورت درشت بلور (<۲mm) و میکرولیتی در زمینه سنگ فراوان‌ترین کانی در این توده بوده و به شدت دگرسان شده است. کلینوپیروکسن اوژیته (۲۰%-۰) به مقدار کمی حفظ شده و به طور عمده به کانی‌های ثانویه تبدیل شده است. هورنبلند (۱۵%-۰) و بیوتیت (<۱۰%) به مجموعه‌ای از بیوتیت ثانویه، کانی‌های تیره (هماتیت، مگنتیت و تیتانومگنتیت)، کوارتز، کلریت و اپیدوت تبدیل شده و مقادیر کمی از آنها باقی مانده است. کوارتز اولیه (۵%-۰) به صورت ریزدانه در متن سنگ حضور داشته اما کوارتز ثانویه (۳۵%-۰) به طور عمده به صورت رگه-رگچه‌ای یا در انباشت‌های ثانویه دیده می‌شود. به دلیل دگرسانی شدید این توده، کانی‌شناسی اولیه آن به طور دقیق قابل بررسی نبوده، اما بر اساس کانی‌های اولیه سالم و کانی‌های ثانویه تشکیل شده می‌توان ترکیب دیوریتی تا کوارتز دیوریتی برای آن در نظر گرفت. همچنین تعیین ترکیب این توده نمودارهای شیمیایی بر اساس اکسیدهای اصلی ممکن نبوده اما بر اساس عناصر فرعی و کمیاب (جدول ۲) در نمودار (Nb/Y) - (Zr/TiO₂ × 0.0001) پیشنهادی (Winchester & Floyd (1977) بیشتر نمونه‌ها در محدوده سینودیوریت تا گابرو دیوریت و تعداد کمی در محدوده گابرو و گرانودیوریت قرار می‌گیرند (شکل ۳). با توجه به بافت و ماهیت نیمه‌نفوذی این توده، بهتر است از پیشوند "میکرو" استفاده شود.

برای تعیین سری ماگمایی توده سوناجیل پورفیری از نمودار Th/Yb-Ta/Yb پیشنهادی (Pearce et al. (1984) استفاده شده است. در این نمودار، تمامی نمونه‌های این توده در محدوده شوشونیتی قرار گرفته‌اند (شکل ۴). لازم به ذکر است که همین نتایج از مطالعه سنگ‌شناسی دیگر توده‌های آذرین منطقه (حسین زاده، ۱۳۸۷؛ حسین زاده و همکاران، ۱۳۸۴) نیز به دست آمده است.

بررسی جایگاه زمین‌ساختی توده پورفیری، کمان‌های آتشفشانی با تمایلی مشخص به سمت جایگاه‌های پس‌برخوردی را برای این توده نشان داده است در ضمن، این توده در محدوده گرانیت‌های کمان‌های آتشفشانی و همزمان با برخورد (VAG+Syn-Col) و محدوده پس‌برخوردی پیشنهادی (Pearce (1996) جایگیر شده است.

۳-۳. انواع رگه-رگچه‌های در توده پورفیری

در بررسی‌های ماکروسکوپی، نسل‌های مختلفی از رگچه‌ها با محتویات متفاوت شناسایی شده‌اند گرچه تقدم و تأخر برخی از آنها قابل تشخیص نیست اما به طور

پلاژیوکلاز) مشخص می‌باشد. در این زون بخش اعظم نمونه به سرسیت (۶۰٪-۵۰) تبدیل شده است (شکل c-۵). مقدار زیادی از پلاژیوکلازها به سرسیت دگرسان شده‌اند و فقط شکل و قالب آنها تا حدی قابل تشخیص است (شکل d-۵). در رخنمون‌های سطحی زون پتاسیم در این توده، همپوشانی شدیدی بین دگرسانی‌های فیلیک و پتاسیک دیده می‌شود. کوارتز (۴۵٪-۲۰) به همراه سرسیت و سولفیدهایی مثل پیریت (۵٪-۰) و کالکوپیریت (۳٪-۰) و مقادیر اندکی تراندریت و تنانیت در این سنگ‌ها دیده می‌شوند. تورمالین دراویتی به شکل شعاعی (۶۰٪-۵) در بیشتر نمونه‌ها، حضور داشته (شکل e-۵) و مقادیری ایلیت و کائولینیت در تجزیه‌های XRD (حسین زاده، ۱۳۸۷)، گزارش شده است. با توجه به ماهیت مخرب این دگرسانی، آثار بسیار اندکی از کانی‌های اولیه قابل تشخیص بوده و مقادیر به نسبت زیادی کلسیت در هم‌رشدی با تورمالین و سرسیت حضور دارد. با توجه به گرماسنجی (ترموتری) سیال‌های درگیر، درجه حرارت تشکیل این مجموعه دگرسانی در منطقه مورد مطالعه، کمتر از 300°C برآورد شده و به عقیده Seedorff et al. (2005) حضور ایلیت نشان‌دهنده دمای تشکیل $250-300^{\circ}\text{C}$ می‌باشد.

- دگرسانی پروپیلیتیک: این دگرسانی در حاشیه توده سوناجیل پورفیری با تغییر رنگ سنگ‌ها از خاکستری به سبز در سطح برونزدها (با شدت متفاوت) قابل مشاهده است. این دگرسانی تا فواصل زیادی از مرکز سامانه به سمت باختر و جنوب‌باختر ادامه دارد. در این زون، پلاژیوکلازها به طور کامل به اپیدوت و کلسیت و کانی‌های فرومنیزین (به طور عمده هورنبلند و بیوتیت) به اپیدوت، کلریت و کلسیت تبدیل شده‌اند (شکل f-۵). به علت ماهیت آندزیتی-دیوریتی توده پورفیری و سنگ‌های درونگیر، میزان سرسیت در این زون بسیار جزئی بوده اما مقادیر به نسبت زیادی مگنتیت (۱۰٪-۸) به طور عمده مارتیتی شده به صورت افشان در این سنگ‌ها حضور دارد. در سطح برونزدها، کانی‌های سولفیدی در این زون به چشم نمی‌خورد اما فضاهای خالی مکعبی می‌تواند حاکی از شستشوی پیریت پیشین در این زون باشد. فضاهای حاصل از دگرسانی کانی‌های فرومنیزین توسط مجموعه کلریت-کلسیت-اپیدوت \pm تولیت پر شده‌اند (شکل g-۵). طبق شواهد میکروسکوپی، آهن آزاد شده از کانی‌های فرومنیزین و پیریت صرف تشکیل مگنتیت در این زون شده است.

- دگرسانی آرژیلیک: رخنمون‌های مشخص رسی در بخش‌های مختلف توده پورفیری قابل مشاهده بوده و نتایج تجزیه XRD از نمونه‌های سطحی و عمقی این توده، حضور کانی‌های رسی از جمله کائولینیت، مونتورینیت، ایلیت و پیروفیلیت را مشخص نموده است. حضور کانی‌های رسی در تمامی اعماق گمانه‌ها، حضور پیروفیلیت (دما بالا) و عدم همراهی گسترده جاروسیت با مجموعه‌های رسی شواهدی دال بر این که افزون بر پوشش رسی سوپرژن، بخش اعظم دگرسانی آرژیلیک دارای منشأ هیپوژن می‌باشد.

الف) دگرسانی آرژیلیک پیشرفته: بر اساس نتایج تجزیه XRD، این دگرسانی در منطقه سوناجیل با حضور پیروفیلیت و کائولینیت به عنوان کانی‌های شاخص در بخش‌های مختلف توده مشخص می‌شود (حسین زاده، ۱۳۸۷). بر اساس نظر Seedorff et al. (2005)، Sillitoe (2000) و Hedenquist et al. (1998) و Rac et al. (2003) و مطالعات دیگر، پیروفیلیت به عنوان کانی اصلی این دگرسانی به‌شمار می‌آید.

ب) دگرسانی آرژیلیک حد واسط: این دگرسانی با حضور کانی‌های رسی از قبیل کائولینیت، سرسیت، ایلیت، مونت‌موریلونیت، کلریت، کلسیت و اسمکتیت مشخص می‌شود (Seedorff et al., 2005; Sillitoe, 2000) و گاهی از واژه سرسیت-رس-کلریت (SCC) برای آن (به همراه دگرسانی فیلیک) استفاده می‌شود (Sillitoe, 2000; Sillitoe & Gappe, 1984). در نمونه‌های سطحی و عمقی

دگرسانی پتاسیم در این توده، مقدار فراوان بیوتیت و مقدار کم فلدسپار قلیایی ثانویه است که این را می‌توان به طبیعت به نسبت بازیگ‌تر توده میزان نسبت به توده‌های مونوزیتی-کوارتز مونوزیتی میزان کانسارهای مشابه نسبت داد. بر اساس نظر (Ulrich and Heinrich, 2002)، دگرسانی پتاسیم در توده‌های آندزیتی (دیوریتی) از نوع بیوتیتی بوده و مقدار کمی اورتوز ثانویه تشکیل می‌شود. بخش عمده کانی‌سازی سولفیدی و اکسیدی در این زون صورت گرفته است و بیشترین تراکم رگچه‌های کوارتز-سولفید، کوارتز-مگنتیت و کوارتز-کربنات-سولفید نیز در این زون مشاهده می‌شود. مقادیر به نسبت زیادی تورمالین دراویتی به صورت ستاره‌ای و اسفروولیتی ریزدانه به همراه کلسیت رگچه‌ای و پراکنده در این زون به چشم می‌خورند که (Hemley et al., 1980) و (Seedorff et al., 2005) محلول‌های غنی از بور (B) را عامل اصلی تشکیل این کانی‌ها در اثر واکنش با اورتوکلاز و سرسیت دانسته‌اند. طبق نتیجه تجزیه ICP، مقدار متوسط مس در این زون حدود 1200 ppm و بیشترین آن حدود 3700 ppm می‌باشد. تجزیه میکروپروب از بیوتیت‌های ثانویه زون پتاسیم و مقایسه آنها با بیوتیت اولیه (به نسبت دگرسان شده) نشان می‌دهد که مقادیر SiO_2 و MgO در انواع ثانویه، افزایش و مقادیر FeO ، TiO_2 و MnO کاهش یافته‌اند (جدول ۱).

(Selby and Nesbitt, 2000) این تغییرات را به عنوان عوامل تشخیص بیوتیت اولیه از ثانویه عنوان کرده و خاطر نشان نموده‌اند که $(\text{Mg}/\text{Mg}+\text{Fe}) X_{\text{Mg}} > 0.55$ نشان‌دهنده بیوتیت گرمایی است. نسبت $\text{Fe}:\text{Mg}$ نیز در بیوتیت‌های ثانویه به نسبت بیوتیت ماگمایی کاهش یافته که چند رنگی ضعیف بیوتیت‌های گرمایی گویای این تغییر است. چنین تغییراتی توسط Calagari (2004) و Mehrparto (1993) از سونگون نیز گزارش شده و علت کاهش Fe و Ti ، مشارکت این عناصر در ساختمان پیریت، کالکوپیریت و روتیل بیان شده است. از ویژگی‌های دیگر این دگرسانی در منطقه سوناجیل همانند دیگر مناطق مشابه (Muntean & Einaudi, 2000, 2001; Calagari et al., 2001)، رگچه‌های فراوان کوارتز-سولفید به صورت استوک‌ورک و نواری (Banded Quartz) و به رنگ تیره است (شکل ۲). (Sillitoe, 2000) حالت نواری این رگچه‌ها را به دلیل بازشدگی‌های مکرر و نفوذهای چند مرحله‌ای کوارتز و رنگ تیره آنها را به دلیل تمرکز مگنتیت و پیریت در باندهای خاص دانسته است.

(Gustafson et al., 2004) تراکم زیاد سیال‌های درگیر غنی از بخار و ذرات مگنتیت میکرومتری را دلیل رنگ تیره این رگچه‌ها ذکر نموده‌اند. در نمونه‌های مورد بررسی، حضور فراوان سیال‌های درگیر غنی از بخار و نیز سولفیدها و اکسیدهای بسیار ریز به خوبی آشکار است.

بیشترین مقدار کانی‌سازی سولفیدی و اکسیدی همراه مجموعه پتاسیم صورت گرفته و این کانی‌ها یا به صورت افشان در متن سنگ و یا در داخل رگچه‌های کوارتزی به فراوانی دیده می‌شوند. کانی‌های موجود در این زون عبارتند از: مگنتیت (۵٪-۰)، کالکوپیریت (۷٪-۰)، پیریت (۴٪-۰)، بورنیت (۱/۵٪-۰)، تراندریت (۱٪-۰) و انارژیت (۱٪-۰). فرایندهای سوپرژن سبب تشکیل مقادیر جزئی (۲٪-۱) کالکوسیت، کولیت، همتیت و گوئیت شده‌اند.

- دگرسانی فیلیک (کوارتز-سرسیت-پیریت): این دگرسانی در نتیجه بیرون رانده شدن Ca ، Na و Mg از سنگ در اثر هجوم سیال‌های و تخریب کامل بافت سنگ و تشکیل سرسیت، کوارتز، کلریت، تورمالین دراویتی (Seedorff et al., 2005; Selby and Nesbitt, 2000) و سولفیدهایی مانند پیریت، کالکوپیریت، تنانیت و مولیبدنیت حادث می‌شود. این دگرسانی در توده سوناجیل پورفیری بسیار فراگیر بوده و بخش‌های بالایی بیشتر گمانه‌ها را شامل می‌شود (شکل ۱). این دگرسانی در نمونه دستی به رنگ روشن با لکه‌های سفید (قالب درشت بلورهای

دیده می‌شود.

۳-۶. فرایندهای سوپرژن

توده پورفیری سوناجیل بعد از ظاهر شدن در سطح زمین، تحت تأثیر شرایط سوپرژن قرار گرفته و تغییراتی در آن ایجاد شده است. این تغییرات شامل تبدیل مجموعه‌های فیلیک و پتاسیک به کانی‌های رسی از قبیل کائولینیت، مونتموریلونیت، ایلیت و کلریت (دگرسانی آرژیلیک سوپرژن - Seedorff et al., 2005) و کربنات‌های مس (مالاکیت و آزوریت) و اکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت و جاروسیت) بوده که بخش‌های بزرگی از رخنمون توده پورفیری را پوشانده است. بیشتر کانی‌های مجموعه فیلیک در بخش‌های سطحی تا حدی توسط مجموعه آرژیلیک سوپرژن پوشیده شده‌اند (overprinted) هر چند بخش عمده‌ای از دگرسانی آرژیلیک در سوناجیل دارای منشأ هیپوزن می‌باشد.

– **زون اکسیدی سوپرژن:** در منطقه اکسیدان (بالای سطح آب زیرزمینی) سولفیدهای اولیه تحت تأثیر محلول‌های اکسیژن‌دار، به مجموعه‌ای از مالاکیت و آزوریت به همراه مقادیر ناچیزی نتوسیت تبدیل شده‌اند که همراه با اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت، جاروسیت و گوتیت) در رخنمون‌های توده پورفیری دیده می‌شوند. مقدار به نسبت بالای مالاکیت و آزوریت موجود در رخنمون‌های سطحی گویای این است که بخش اندکی از مس توانسته به صورت محلول به پایین حمل گردد. مگنتیت‌های موجود در این توده نیز در مناطق سطحی و نیز در طول مناطق خرد شده و گسلی به هماتیت (مگهمیت) و گوتیت تبدیل شده‌اند. این زون در گمانه‌های اکتشافی دارای ستبرای متفاوتی بوده و حداکثر به ۳۵ متر می‌رسد.

– **زون سولفیدی سوپرژن:** در منطقه کاهیده (احیائی) (زیر سطح آب زیرزمینی) سولفیدهای اولیه موجود در توده پورفیری به‌طور بخشی توسط کالکوسیت و کوولیت سوپرژن جانشین شده‌اند (شکل ۸-f,g,h). طبق نظر (Sillitoe (2005) و Chavez (2000) میزان کم پیریت اولیه از شدت غنی‌شدگی سوپرژن در توده‌های پورفیری می‌کاهد. لذا با توجه به کانی‌سازی اندک پیریت در این توده و پیرو آن، اسیدیت پایین محلول‌های فرورو، پیشرفت غنی‌شدگی سوپرژن به حد کافی صورت نگرفته است. گسترش این زون در سوناجیل اندک بوده و در برخی از گمانه‌ها اصلاً مشاهده نمی‌شود و در برخی دیگر تا ۳۰ متری زیر زون اکسیدی می‌رسد.

۳-۷. گرماسنجی (ترموتری) سیال‌های درگیر

به‌طور کلی ۴ تپ اصلی سیال درگیر در توده پورفیری مورد تجزیه گرماسنجی قرار گرفتند شامل:

(الف) سیال‌های درگیر دوفازی غنی از مایع که به فاز مایع همگن می‌شدند (L+V → L). تعداد این سیال‌های درگیر بیشتر از دیگر انواع بودند.

(ب) سیال‌های درگیر دوفازی غنی از بخار که به فاز بخار همگن می‌شدند (L+V → V) و از نظر تعداد کمتر بودند.

(ج) سیال‌های درگیر حالت‌دار که با ذوب‌هالت همگن می‌شدند $(T_{S(NaCl)} > T_{HL-V})$.

(د) سیال‌های درگیر حالت‌دار که به‌طور عمده با از بین رفتن بخار همگن می‌شدند $(T_{HL-V} > T_{S(NaCl)})$.

توزیع فراوانی سیال‌های درگیر حالت‌دار که با از بین رفتن حالت همگن می‌شود $(T_{S(NaCl)} > T_{HL-V})$ بین ۳۶۰°C تا ۵۸۰°C می‌باشد. سیال‌های درگیر حالت‌دار که با از بین رفتن حباب بخار همگن می‌شوند $(T_{S(NaCl)} < T_{HL-V})$ یا این که حباب بخار همزمان با حالت از بین می‌رود $(T_{S(NaCl)} = T_{HL-V})$ دامنه‌ای از ۳۲۰°C تا ۵۲۰°C نشان می‌دهند. هیستوگرام فراوانی سیال‌های درگیر دوفازی فاقد حالت که به حالت مایع همگن می‌شوند نشان می‌دهد که T_{HL-V} در این نوع سیال‌های درگیر دارای دامنه

سوناجیل گسترش این مجموعه‌ها به خوبی دیده می‌شود. در نتایج تجزیه XRD از نمونه‌های برداشت شده از گمانه‌ها (Hosseinzadeh, 2008)، حضور کائولینیت، ایلیت-سریسیت، مونت‌موریلونیت و کلریت مشخص شده است. در نمونه‌های سطحی با توجه به تأثیر پدیده‌های سوپرژن در افزایش این کانی‌ها، مقادیر بالاتری از آنها حضور دارد.

۳-۵. کانی‌سازی هیپوزن

کانی‌سازی سولفیدی گرمایی هیپوزن در داخل توده سوناجیل پورفیری به صورت افشان در متن سنگ و در داخل رگه - رگچه‌های کوارتزی و نیز به صورت رگه‌ای در حاشیه این توده رخ داده است. بیشترین حجم کانی‌سازی سولفیدی در این توده به همراه دگرسانی پتاسیمی و تا حد کمتری فیلیک می‌باشد. رگه‌های غنی از سولفید (شکل ۶) در حاشیه توده پورفیری قرار دارند. کانی‌های سولفیدی در این توده عبارتند از پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، تتراندريت، انارژیت و مولیبدنیت.

پیریت (۷۰-۰٪): به صورت افشان و نیز در داخل رگچه‌های کوارتزی حضور داشته و به‌طور عمده به حالت شکل‌دار تا بی‌شکل با جانشینی، هم‌شدی یا تأخر نسبت به کالکوپیریت (اشکال ۸-e,a) و بورنیت دیده می‌شود. مقادیری پیریت نیز در محل و اطراف کانی‌های فرومنیزین دگرسان شده دیده می‌شود. در توالی پاراژنتیک کانی‌سازی سولفیدی (شکل ۷)، این کانی اولین کانی تشکیل شده توسط محلول‌های گرمایی می‌باشد.

کالکوپیریت (۴۰-۰٪): مهم‌ترین سولفید مس در این توده بوده و به صورت افشان در کنار محصولات دگرسانی کانی‌های فرومنیزین، جانشینی به جای پیریت یا هم‌شدی با آن و همراه با رگچه‌های کوارتزی قابل مشاهده است. این کانی گاه جانشین مگنتیت شده و خود توسط بورنیت، تتراندريت و انارژیت جایگزین شده است (اشکال ۸-a تا ۸-c).

بورنیت (۲۰-۰٪) نیز همانند دیگر سولفیدها به صورت افشان، در داخل رگچه‌های کوارتزی و نیز در رگه‌های سولفیدی حاشیه‌ای (شکل ۶) حضور داشته و جانشین کالکوپیریت شده است. این کانی نیز از حاشیه به تتراندريت و انارژیت تبدیل شده است (شکل‌های ۸-b,d,f).

تتراندريت و انارژیت (۱۰-۰٪): از کانی‌های سولفوسالتی رایج در این کانسار بوده و یکی از مشخصه‌های کانی‌سازی هیپوزن در این توده می‌باشد. به عقیده (Ixer and Patrick (2000)، تتراندريت در بازه وسیعی از شرایط گرمایی پایدار بوده و به‌طور عمده از سیال‌های اسیدی و شوراب‌های کانی‌ساز در درجه حرارت ۲۰۰-۴۰۰°C تشکیل شود. این کانی از کانسارهای مس پورفیری مختلف مانند سونگون (Calagari, 2004)، بیوت، چوکی کوماتا و بینگهام (Seedorff et al., 2005) گزارش شده است. انارژیت در بازه دمایی محدودتری نسبت به تتراندريت (۳۰۰-۴۰۰°C) در شرایط HS (High sulfidation) و از محلول‌های بسیار اسیدی تشکیل می‌شود (Ixer and Patrick, 2000). در نمونه‌های مطالعه شده، این کانی‌های سولفوسالتی جانشین کالکوپیریت و بورنیت شده و در اثر دگرسانی سوپرژن از حاشیه به کوولیت تبدیل شده‌اند (شکل‌های ۸-b,c,d,f,h).

مگنتیت (۱۰-۰٪): مهم‌ترین کانی اکسیدی در این توده بوده و به‌طور عمده همراه با محصولات دگرسانی پتاسیم، پروپیلتیک و به مقدار خیلی جزئی فیلیک حضور دارد. در بخش‌های مختلف گمانه‌ها بویژه در زون پتاسیم، این کانی به صورت افشان به نسبت فراوان بوده و به مقدار کمتری در داخل رگچه‌های کوارتزی دیده می‌شود.

هماتیت (۲-۰٪) به مقدار اندک و در اعماق برخی از گمانه‌ها به صورت نسبتاً شکل‌دار (با منشأ هیپوزن) حضور داشته و در همراهی با سولفیدهای مس و پیریت

پاراژنتیک سولفیدها، نشانگر ورود مقادیر زیادی As و Sb توسط سیال‌های گرمایی به نسبت تأخیری به داخل زون‌های کانی‌سازی و جانشینی این کانی‌های سولفوسالتی به جای سولفیدهای اصلی است. در ضمن، تشکیل این کانی‌ها دال بر اسیدیت بالای سیال گرمایی و شرایط سولفیداسیون بالا (HS) در مراحل نهایی کانی‌سازی هیپوزن می‌باشد.

- غنی‌شدگی ثانویه اندک در این توده می‌تواند ناشی از حجم اندک کانی‌سازی پیریت و پیرو آن، عدم تأمین اسیدیت لازم جهت شستشوی اسیدی مؤثر سولفیدها باشد. رخنمون‌های سطحی آغشته با مالاکیت و آزوریت در بخش‌های مختلف توده پورفیری گویای این فرضیه است.

- ویژگی‌های سیال‌های درگیر مطالعه شده در این توده شباهت بسیار زیادی به دیگر توده‌های پورفیری داشته و شواهد وقوع پدیده جوشش در این مطالعه مشاهده گردید.

۵- سپاسگزاری

این کار تحقیقاتی از طرف معاونت تحصیلات تکمیلی دانشگاه تبریز، امور اکتشافات و امور تحقیق و توسعه شرکت ملی صنایع مس ایران حمایت مالی شده است. مؤلفین مقاله از مسئولان محترم دانشگاه تبریز، مدیران شرکت مس و همچنین از مدیر مسئول، هیئت تحریریه و داوران محترم فصلنامه علوم زمین تشکر و قدردانی می‌نمایند.

جدول ۱- نتایج تجزیه میکروپروب بیوتیت‌های ثانویه زون پتاسیک و یک بیوتیت اولیه به نسبت سالم

شماره نمونه	S ₂ -128	S ₂ -128	S ₂ -128	S ₂ -128	S ₃ -139
نوع دگرسانی	پتاسیک	پتاسیک	پتاسیک	پتاسیک	پتاسیک
نوع بیوتیت	اولیه	ثانویه	ثانویه	ثانویه	ثانویه
SiO ₂	36.7	35.85	36.38	38.7	37.7
TiO ₂	5.32	4.82	5.07	3.27	3.45
Al ₂ O ₃	14.14	15.11	15.32	16.17	15.91
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0.03
FeO	15.32	13.34	13.53	12.67	13.31
MnO	0.5	0.5	0.48	0.42	0.48
MgO	11.41	13.56	16.19	14.43	14.09
CaO	0	0	0	0	0
Na ₂ O	0.07	0.17	0.52	0	0.34
K ₂ O	11.9	10.72	10.47	11.6	11.47
Total	95.36	94.07	97.96	97.26	96.82
تعداد کاتیون‌ها بر اساس ۱۱ اکسیژن					
Si	2.80	2.73	2.66	2.82	2.78
Ti	0.31	0.28	0.28	0.18	0.19
Al	1.27	1.36	1.32	1.39	1.38
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.98	0.85	0.83	0.77	0.82
Mn	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Mg	1.30	1.54	1.76	1.57	1.55
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.01	0.03	0.07	0.00	0.05
K	1.16	1.04	0.98	1.08	1.08
Total	7.85	7.85	7.93	7.84	7.90

بسیار وسیع‌تری بوده به طوری که از ۱۸۰°C تا ۵۶۰°C را در بر می‌گیرد. در T_{HLL-V1} سیال‌های درگیر از این نوع که به بخار همگن می‌شوند ۳۸۰°C تا ۵۰۰°C می‌باشد. سیال‌های درگیر مطالعه شده در توده سوناجیل پورفیری دامنه وسیعی از شوری را نشان می‌دهند که از صفر تا ۷۰٪ تغییر می‌کند. بیشترین تعداد شوری اندازه‌گیری شده، شوری‌های ۱۰-۰٪ بوده و شوری‌های ۴۵-۵۵٪ در رتبه دوم قرار دارند. سیال‌های با شوری ۲۰ تا ۳۵٪ اندازه‌گیری نشده‌اند به همین دلیل دو جمعیت مشخص شوری پایین (فاقد هالیت) و شوری بالا (هالیت‌دار) دیده می‌شود. به اعتقاد (1984) Roedder، (1985) Shepherd et al. و (1994) Bodnar and Vytic، خلاء موجود در این فاصله شوری می‌تواند به دلیل نیمه‌پایداری (Metastability) هالیت باشد یعنی بلورهای نوزاد خیلی ریز هالیت قادر به هسته‌بندی نبوده یا NaCl، 2H₂O در نزدیکی نقطه اشباع قادر به هسته‌بندی نیستند. این توجیه برای شوری بین ۳۰-۲۵٪ منطقی به نظر می‌رسد. از نتایج تجزیه گرماسنجی در سوناجیل چنین برداشت می‌شود که سیال گرمایی هیپوزن سازنده رگچه‌های کوارتز-سولفید در درجه حرارت حدود ۵۲۰°C شروع به جوشیدن کرده است. شاهد وقوع این پدیده در سوناجیل، همزیستی نزدیک سیال‌های درگیر دو فاز به طور عمده بخار، سیال‌های درگیر دو فاز غنی از مایع با شوری متوسط و سیالات چند فاز هالیت‌دار با شوری بالاست که در یک محدوده دمایی همگن می‌شوند. توده ماگمایی در حال سرد شدن می‌تواند گرمای مورد نیاز را در طول جوشش فراهم نماید تا در خلال این پدیده، شوری سیال تا ۴۵٪ افزایش یابد. با پیشرفت جوشش، سیال‌های به دام افتاده به طور فزاینده‌ای شورتر می‌شوند. فرایند جوشش در سوناجیل تا درجه حرارت ۲۵۰°C چندین بار تکرار شده و خردشدگی‌های مکرر (Hydrofracturing) در توده پورفیری ناشی از این پدیده است. در شروع هر مرحله از جوشش و خردشدگی، سیالات با شوری به نسبت پایین به دام می‌افتند که با ادامه جوشش، شوری سیال باقی‌مانده افزایش تدریجی یافته و به طور همزمان شکستگی‌های موجود توسط مجموعه‌ای از کوارتز، سولفید و کربنات مَهر و موم می‌گردند که خود سبب کاهش تراوایی سنگ‌ها می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

- زمین‌شناسی عمومی، جایگاه زمین‌ساختی، سنگ‌شناسی، سبک دگرسانی و کانی‌سازی توده سوناجیل پورفیری قابل مقایسه با دیگر کانسارهای مس پورفیری از جمله سونگون می‌باشد.

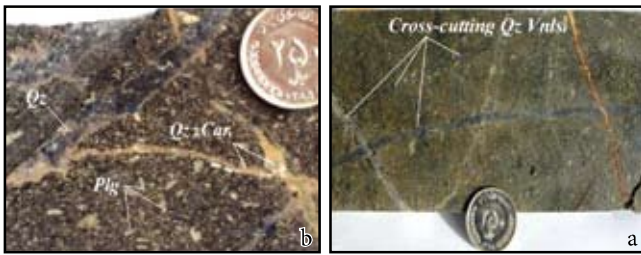
- نسل‌های مختلف رگچه‌های کوارتزی با یا بدون سولفیدها و اکسیدهای هیپوزن و تشکیل بافت استوک‌ورک، نشانگر مراحل مکرر خردشدگی (Shattering) ناشی از فعالیت سیستم گرمایی است.

- بیوتیت ثانویه زیاد و فلدسپار قلیایی ثانویه به نسبت کم در زون پتاسیک این توده، ناشی از ماهیت به نسبت بازیک (دیپوتیتی) توده سوناجیل پورفیری نسبت به توده‌های مونزوتیتی با دگرسانی پتاسیک غنی از اورتوز ثانویه می‌باشد.

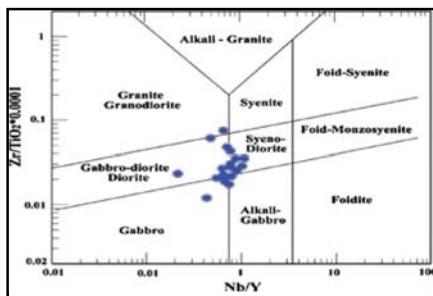
- ترکیب شیمیایی بیوتیت‌های ثانویه و میزان اکسیدهای اصلی آنها در مقایسه با بیوتیت‌های اولیه در این مطالعه، با اطلاعات حاصل از مطالعات پیشین بر روی این کانسارها همخوانی دارد.

- تورمالین بسیار زیاد در زون‌های دگرسانی پتاسیک و فیلیک این توده در مقایسه با بسیاری از کانسارهای مطالعه شده، ناشی از متاسوماتیسم شدید بور (B) توسط سیال‌های گرمایی است. گرچه به دلیل تراکم تورمالین در همبری دایک‌ها و توده نفوذی اینچ، احتمال تأمین مقداری از مواد مورد نیاز برای تشکیل تورمالین از طریق توده نفوذی را نباید از نظر دور داشت.

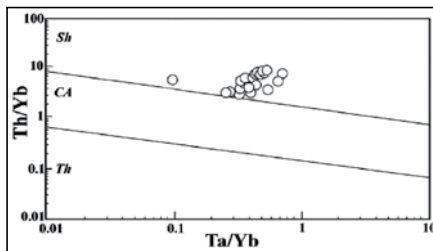
- میزان بالای تراندریت و انارزیت موجود در این توده و موقعیت آنها در توالی



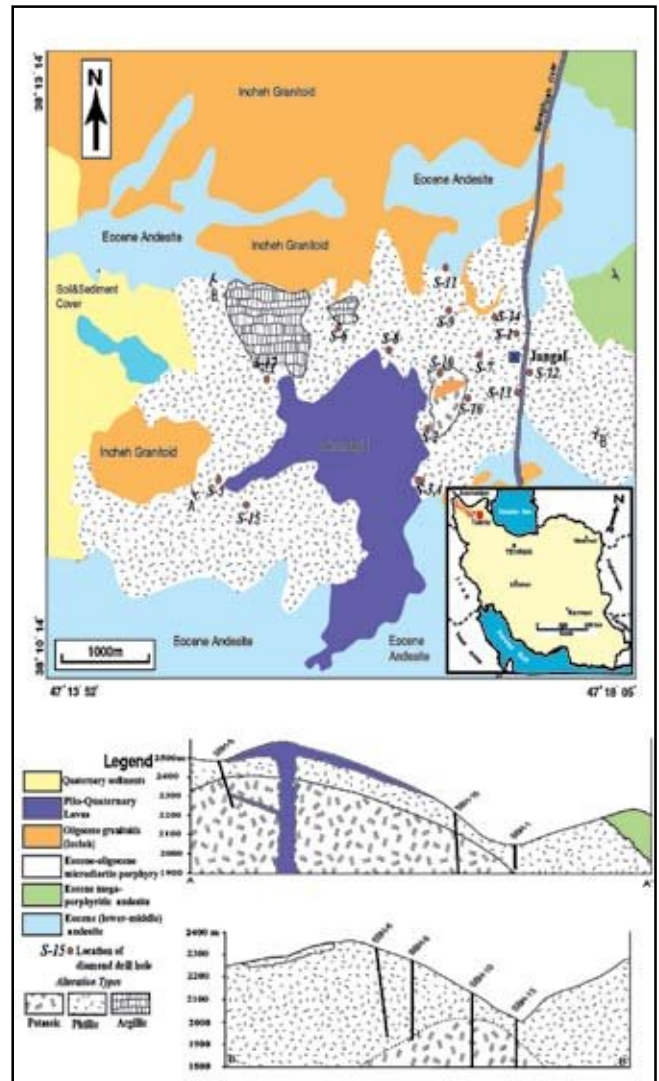
شکل ۲- (a) بافت پورفیری در توده سوناجیل پورفیری دارای درشت بلورهای دگرسان شده پلاژیوکلاز و رگه- رگچه‌های کوارتزی و کوارتز- کربناتی (b) نسل‌های مختلف رگه- رگچه‌های کوارتزی (استوک و رک) و یک رگچه پیریت اکسیده.



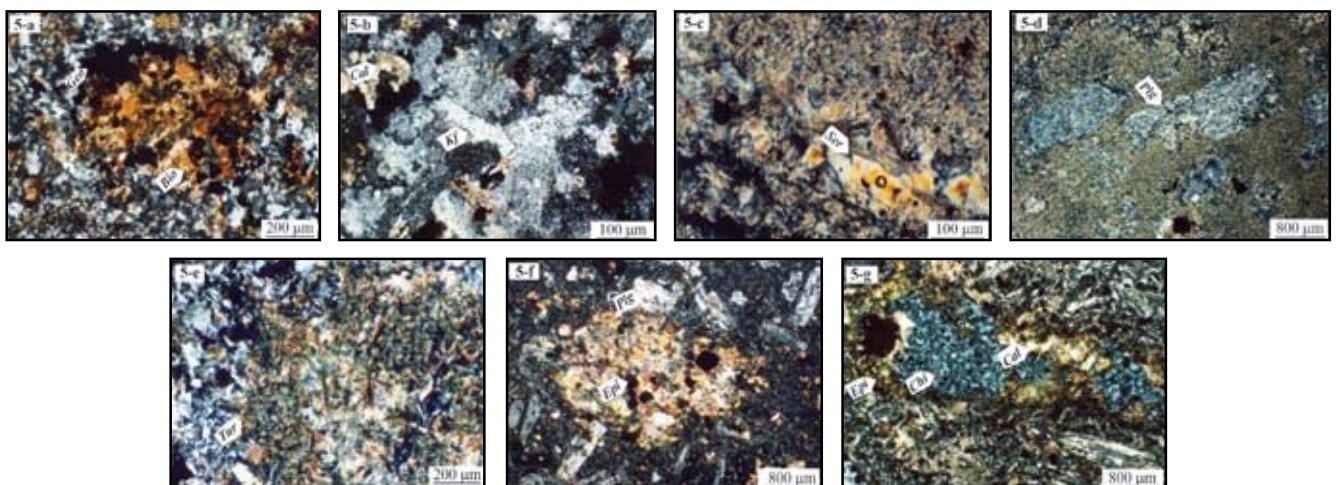
شکل ۳- موقعیت نمونه‌های توده پورفیری در نمودار پیشنهادی Winchester and Floyd (1977)



شکل ۴- موقعیت نمونه‌های توده پورفیری در نمودار (Pearce et al., 1984) Th/Yb-Ta/Yb



شکل ۱- نقشه ساده پراکنندگی واحدهای سنگی و دگرسانی در منطقه سوناجیل به همراه برش‌های عرضی و موقعیت این منطقه در شمال باختر ایران (حسین زاده، ۱۳۸۷).



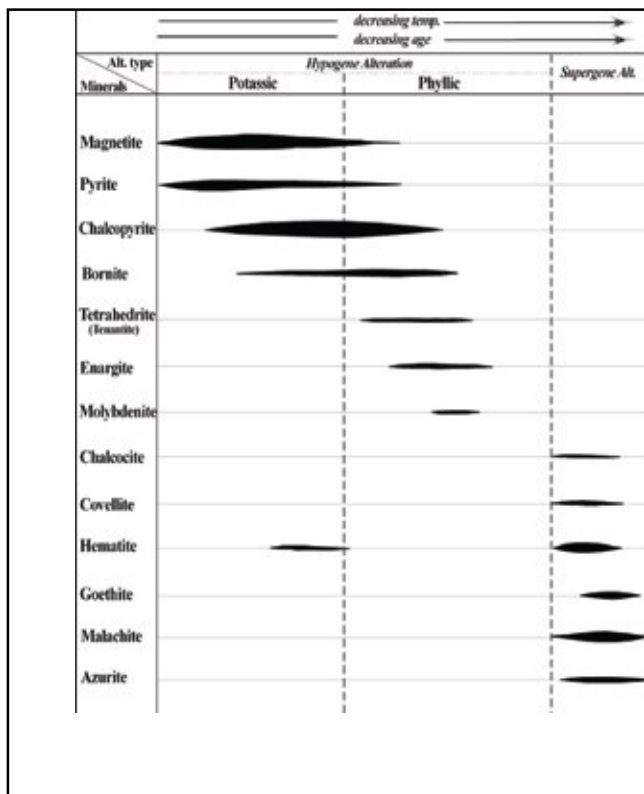
شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی از زون‌های دگرسانی توده پورفیری (a) تبدیل کامل کانی فرومیزین به بیوتیت ثانویه و اکسید آهن در زون پتاسیم (XPL)؛ (b) تشکیل اورتوز ثانویه به همراه کلسیت در زون پتاسیم (XPL)؛ (c) تبدیل درشت بلور پلاژیوکلاز به سریسیت در زون فلیک (XPL)؛ (d) سریسیتی شدن شدید در زون فلیک (XPL)؛ (e) تشکیل مقادیر فراوانی تورمالین (دراویت) در زون فلیک (XPL)؛ (f) تبدیل کانی فرومیزین به اپیدوت و کانی تیره در زون پروپیلیتیک (XPL)؛ (g) تشکیل کلریت، کلسیت و اپیدوت در زون پروپیلیتیک (XPL)

جدول ۲- نتایج تجزیه عناصر اصلی، فرعی و کمیاب نمونه های سطحی و عمقی توده سونا جیل پورفیری به روش XRF و ICP در آزمایشگاه ALS-Chemex

SAMPLE	S ₁ -116	S ₂ -31	S ₃ -124	S ₄ -128	S ₅ -161	S ₆ -200	S ₇ -50	S ₈ -145	S ₉ -206	S ₁₀ -111	S ₁₁ -115	S ₁₂ -120	S ₁₃ -127	S ₁₄ -137	S ₁₅ -64.3	S ₁₆ -70.7	S ₁₇ -98.3
محل نمونه	گمانه ۱	گمانه ۱	گمانه ۲	گمانه ۲	گمانه ۲	گمانه ۲	گمانه ۳	گمانه ۳	گمانه ۴	گمانه ۴	گمانه ۴	گمانه ۴	گمانه ۴	گمانه ۴	گمانه ۴	گمانه ۴	گمانه ۴
SiO ₂ %	56.16	65.19	61.98	53.02	49.14	58.2	57.9	59.11	58.09	52.87	57.7	54.11	52.83	54.68	55.06	55.38	57.74
Al ₂ O ₃ %	13.63	20.11	16.57	20.64	17.68	21.9	17.44	18.3	18.32	12.9	14.4	18.14	17.67	17.47	16.6	17.14	15.71
FeO %	3.15	1.39	1.63	2.03	2.2	1.19	1.58	1.9	1.93	4.5	2.97	4.01	3.06	3.57	3.35	6.23	3.34
Fe ₂ O ₃ %	2.21	1.19	1.51	2.34	2.4	1.46	2.35	2.56	2.36	2.9	2.63	4.09	2.44	2.83	2.68	3.53	2.87
CaO %	5.6	0.15	1.11	0.97	4.49	0.58	0.91	1.72	1.75	5.3	3.98	3.4	3.12	2.85	2.52	1.96	2.84
MgO %	3.16	0.43	2.03	3.58	3.3	0.81	2.26	1.61	2.15	4.49	2.29	2.29	4.34	3.03	3.7	3.43	3.07
Na ₂ O %	0.24	0.38	2.55	2.44	2.71	3.72	1.8	4.38	3.87	0.58	2.62	3.03	2.73	2.46	2.59	0.12	2.22
K ₂ O %	3.65	4.86	3.77	6.41	5.88	5.55	7.56	5.42	5.16	2.72	3.36	4.37	2.55	2.64	2.55	1.92	3.52
TiO ₂ %	0.42	0.53	0.5	0.59	0.53	0.67	0.66	0.6	0.54	0.49	0.6	0.95	0.68	0.68	0.63	0.92	0.6
MnO %	0.1	<0.01	0.11	0.17	0.15	0.02	0.14	0.06	0.08	0.2	0.14	0.14	0.18	0.15	0.13	0.14	0.15
P ₂ O ₅ %	0.19	0.27	0.26	0.37	0.26	0.35	0.32	0.33	0.31	0.22	0.24	0.4	0.25	0.25	0.24	0.35	0.27
LOI %	9.19	4.31	5.94	6.06	9.89	4.42	5.18	2.9	3.56	10.85	6.65	3.5	8.1	7.68	7.46	7.87	6.58
Total %	98.36	99.09	98.22	99.11	99.16	99.14	98.79	99.38	98.61	98.8	98.15	99.29	98.58	98.96	98.2	99.98	99.58
Ba ppm	1225	1195	691	1225	1380	1345	1245	1090	1275	561	738	911	639	660	506	507	871
Ce ppm	78.6	118.5	65.3	83.7	75	82.5	77.2	72.5	68	51.7	48.1	66.9	41.3	39.4	37.5	69.5	43.9
Co ppm	8.8	7.7	6.6	5.9	14	14.7	8.2	8.5	11.4	32	14.2	22.2	20.6	17.4	19.1	26.8	15.8
Cr ppm	40	20	50	20	30	20	50	50	40	60	70	20	30	30	50	40	60
Cs ppm	5.37	13.1	11.65	35.6	10.8	8.45	13.55	12.75	11.6	15.2	12.55	14.15	15.9	13.2	14.35	20.3	11.2
Cu ppm	45	31	1520	400	198	299	615	1595	1085	2640	2600	2760	1740	1180	1930	384	2440
Eu ppm	1.7	1.52	1.24	1.7	1.38	1.24	1.43	1.4	1.24	0.94	1.18	1.53	1.02	0.94	1.02	1.9	1.04
Hf ppm	7	3.7	4.7	5.7	5.6	7	5.6	5.6	5.7	4.5	3.8	5.2	3.7	3.4	3.5	3.5	3.9
La ppm	44.5	53.4	36.7	46.4	40.9	44.3	42.5	40.4	36.5	27.2	25.3	34.8	22	20.6	20.1	36	22.9
Nb ppm	17.2	9	14.6	18.4	17	21.4	16.4	17	17.8	11.7	9.2	12.3	7.6	8.6	7.3	7.6	8.9
Nd ppm	34.4	56.1	25.4	35.3	31.5	34.2	31.9	29.6	28.5	22.5	22.6	31.2	19	18	17.8	33.2	19.8
Rb ppm	130	167.5	143	233	165	182.5	238	170.5	160	114	129	157	103	113	94.3	87.8	124.5
Sm ppm	6.63	8.53	4.83	6.84	5.88	6.1	6.3	5.42	5.53	4.37	4.64	6.33	4.04	3.48	3.6	6.4	4.03
Sr ppm	766	599	376	641	522	389	315	523	533	209	437	421	1230	578	1230	81.1	365
Ta ppm	1.1	0.8	0.9	1.1	1.1	1.3	1.1	1.1	1.5	0.7	0.6	0.8	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6
V ppm	77	114	95	120	111	99	102	172	120	154	174	237	201	188	193	1055	182
Y ppm	37.4	53.3	16.8	23.9	20.9	21.9	21.2	20	19.8	16.1	16.3	22.3	13.7	11.6	13.1	19.8	14.5
Yb ppm	3.34	8.19	1.76	2.49	2.43	2.49	2.47	2.22	2.23	1.94	1.74	2.35	1.59	1.42	1.38	2.17	1.51
Zn ppm	65	25	176	184	138	40	329	95	79	551	338	245	285	370	207	424	304
Zr ppm	248	123	170.5	211	200	256	193	203	210	149.5	126	171.5	116	109	111.5	103.5	125

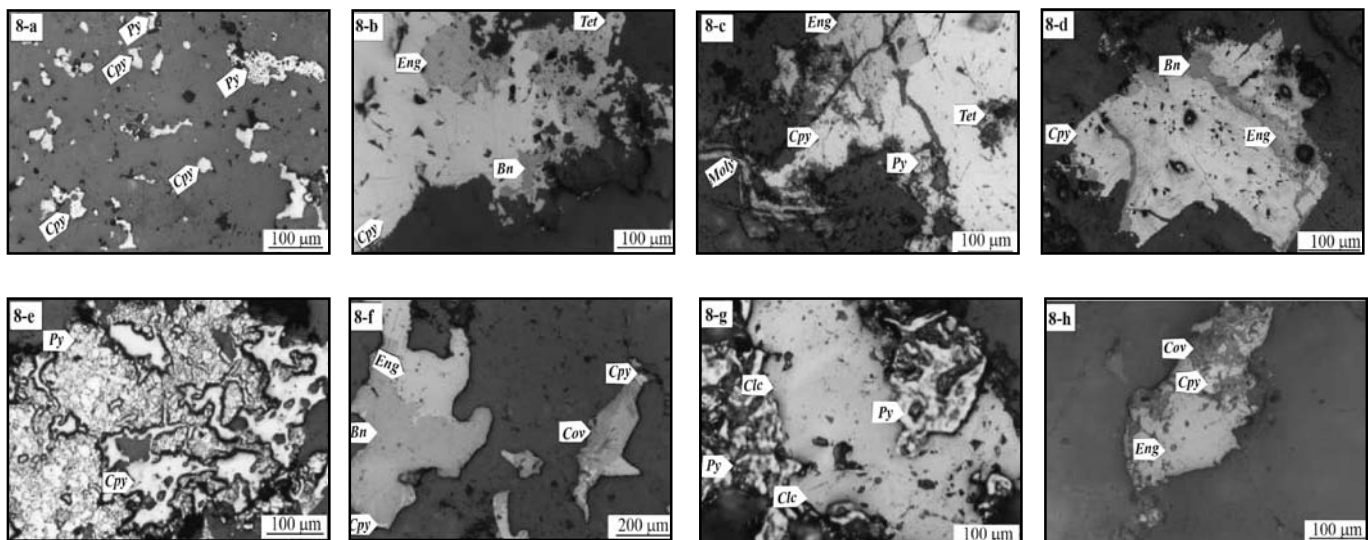
جدول ۲ (ادامه)

SAMPLE	S5-108	S5-110	S5-169	S5-178	S5-190	S5-197	S5-88.7	S5-97.2	T-32	T-47A	T-49	T-69	T-73A	T-86	T-88	T-90	T-106
محل نمونه	گمانه C	گمانه O	گمانه C	گمانه O	گمانه O	گمانه O	گمانه O	گمانه O	سطحی	سطحی	سطحی	سطحی	سطحی	سطحی	سطحی	سطحی	سطحی
SiO ₂ %	63	54.64	65.16	68.06	56.56	56.63	61.16	58.89	61.77	62.13	67.36	60.09	67	60.77	60.37	65.9	58.61
Al ₂ O ₃ %	15.81	18.6	16.82	15.11	19.4	20.64	16.74	17.95	18.19	14.14	18.53	18.44	18.79	17.24	18.47	15.68	21.31
FeO %	1.81	1.99	1.04	1.62	2.23	2.03	1.52	1.87	3.15	4.85	1.31	1.94	0.98	1.9	2.91	1.59	1.42
Fe ₂ O ₃ %	2.16	2.6	1.23	0.99	2.72	2.08	1.9	2.3	2.79	2.88	1.14	2.64	0.91	2.63	2.52	2.1	1.8
CaO %	1.71	2.3	1.28	1.38	1.85	1.11	2.65	3.07	0.51	1.97	0.31	2.89	0.09	0.34	3.28	0.42	1.6
MgO %	1.02	1.96	0.65	1.06	1.67	1.65	0.5	1.05	0.79	3.3	0.8	1.42	0.68	3.44	1.35	1.22	1.36
Na ₂ O %	3.15	3.51	2.7	0.18	3.5	1.17	4.25	4.42	4.2	0.8	0.52	4.71	0.59	3.14	4.56	3	4.18
K ₂ O %	5.25	6.33	5.68	1.76	5.42	6.09	4.69	4.6	1.49	1.24	4.79	5.04	5.21	6.69	2.01	6.29	4.98
TiO ₂ %	0.53	0.57	0.46	0.4	0.79	0.84	0.54	0.57	0.63	0.5	0.6	0.65	0.42	0.55	0.61	0.61	0.67
MnO %	0.15	0.25	0.16	0.09	0.12	0.14	0.14	0.12	0.07	0.05	<0.01	0.16	<0.01	0.1	0.03	0.04	0.06
P ₂ O ₅ %	0.28	0.33	0.66	0.19	0.29	0.54	0.34	0.35	0.21	0.21	0.23	0.33	0.08	0.29	0.23	0.26	0.29
LOI %	3.38	5.28	3.3	7.44	3.86	6.59	3.43	3.14	4.4	6.32	3.46	1.17	4.94	1.99	2.99	2.05	2.81
Total %	98.67	98.87	99.35	98.46	98.95	99.93	98.24	98.79	98.76	99.15	99.2	99.96	99.79	99.53	99.94	99.49	99.61
Ba ppm	1025	1185	959	625	1275	1245	972	1085	328	109	731	1310	669	1180	902	1155	1390
Ce ppm	68.7	70.8	80.2	65.8	83.7	85.9	64.8	71.1	40.5	26.9	69.7	83.1	95	87.5	29	66.8	79.7
Co ppm	6.9	10.2	8	4.7	10.9	8.4	4.3	7.9	17.3	10.1	19	8.5	1.4	8.5	9.5	6.1	1.3
Cr ppm	120	50	80	80	30	20	90	70	40	20	10	10	10	10	20	10	10
Cs ppm	4.93	5.25	4.99	3.5	14.45	15.35	3.67	8.2	10.25	2.06	4.68	5.09	7.54	20.2	2.88	8.61	8.3
Cu ppm	3300	2780	1490	2010	753	937	1775	1285	146	52	334	536	40	537	835	5720	20
Eu ppm	1.37	1.38	1.39	1.02	1.52	1.67	1.27	1.38	0.88	0.7	1.35	1.6	1.52	1.45	0.79	1.2	1.8
Hf ppm	4.2	5	6.3	6	5.1	5.2	4.8	5	4.5	2.9	5.9	5.8	8.4	6.4	2.8	5.5	5.9
La ppm	37.5	38.8	44.8	35.2	44.5	46.7	35.2	38.3	21.4	12.8	40.8	44.7	50.1	47.1	17.1	35.6	44.9
Nb ppm	12.7	15.1	19.1	17.8	16.8	17.2	14.4	15.6	9.3	8.1	18	18.4	26.2	21	5.3	17.4	20.4
Nd ppm	28.2	29.7	32.7	27	34.8	36.4	27.5	29.6	17.8	12.7	27.2	33.1	36.6	34.3	13.2	26.7	31.6
Rb ppm	140.5	198.5	184.5	57	168	164.5	122.5	120	65.1	41.6	150	147.5	157.5	228	45.8	163.5	150.5
Sm ppm	5.19	5.64	6.26	5.14	6.25	6.89	5.13	5.42	3.5	2.59	4.88	6.23	6.82	6.36	2.42	4.94	6.22
Sr ppm	312	381	352	165	628	404	474	606	459	230	139	611	159	146	823	208	588
Ta ppm	0.8	0.9	1.2	1.2	1.1	1.1	0.9	0.9	0.7	0.4	1.3	1.1	1.6	1.2	0.4	1.1	1.1



شکل ۶- کانی‌سازی رگه‌ای و رگچه‌ای در نمونه‌های حاشیه توده پورفیری

شکل ۷- توالی پاراژنتیک تشکیل کانی‌های اکسیدی، سولفیدی، سولفوسالتی و کربناتی همپوزن و سوپرژن در توده پورفیری سوناجیل در مراحل مختلف دگرسانی.



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی از زون‌های کانه‌دار توده پورفیری سوناجیل در نور انعکاسی: (a) پیریت و کالکوپیریت افشان در متن توده پورفیری (b) تشکیل کالکوپیریت، بونیت، تتراآندریت و انارژیت در توده پورفیری که سه کانی اخیر جانشین کالکوپیریت شده‌اند. (c) رگچه مولیبدنیتی در کنار رگه سولفیدی (حاوی پیریت، کالکوپیریت و تتراآندریت) در حاشیه توده پورفیری. (d) جانشینی بونیت و انارژیت به جای کالکوپیریت (e) تأخر کالکوپیریت نسبت به پیریت (f) جانشینی کوولیت (و کالکوسیت) به جای انارژیت. (g) جانشینی کالکوپیریت و پیریت توسط کالکوسیت (h) جانشینی کوولیت به جای کالکوپیریت و انارژیت در توده پورفیری.

کتابنگاری

- حسین زاده، ق.، ۱۳۸۷- مطالعات زمین شناسی، ژئوشیمی، سیالات در گیر، کانی سازی، دگرسانی و ژنز کانسار مس پورفیری سوناجیل، خاور هریس (آذربایجان شرقی). رساله دکتری دانشگاه تبریز، ۲۱۸ صفحه.
- حسین زاده، ق.، مؤید، م.، کلاگری، ع.ا.، ۱۳۸۴- ماگماتیسیم کواترنری در کانسار مس پورفیری سوناجیل با نگرشی بر سبک کانی سازی در منطقه (هریس، آذربایجان شرقی). نهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران. دانشگاه تربیت معلم تهران.
- حسین زاده، ق.، مؤید، م.، کلاگری، ع.ا.، حاج علیلو، ب.، مؤذن، م.، ۱۳۸۷- بررسی های سنگ شناسی و سنگ زایی توده نفوذی اینچه (خاور هریس، آذربایجان شرقی). مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران. سال شانزدهم، شماره دوم. ۱۸۹ تا ۲۰۶.
- نیوی، م. ح.، ۱۳۵۵- دیباچه ای بر زمین شناسی ایران. انتشارات سازمان زمین شناسی کشور.

References

- Calagari, A. A., 2004- Geology and fracture-related hypogene hydrothermal alteration and mineralization of porphyry copper deposit at Sungun, Iran. *Journal Geological Survey of India*, 64: 595-618.
- Calagari, A. A., Patrick, R. A. D., & Polya, D. A., 2001- Veinlets and micro-veinlets studies in Sungun porphyry copper deposit, East Azarbaijan, Iran. *Geosciences, Geological Survey of Iran, English version*, 10 (39-40): 70-79.
- Chavez, W. X. Jr., 2000- Supergene oxidation of copper deposits: Zoning and distribution of copper oxide minerals, *Society of Economic Geologists Newsletter*, 41: 0-21.
- Creasey, S. C., 1966- Hydrothermal alteration, in Titley, S. R., and Hicks, C. L., eds., *Geology of the porphyry copper deposits, southwestern North America*. Tucson, University of Arizona Press, pp. 51-74.
- Gustafson, L. B., Vidal, C., Pinto, R. & Noble, D. C., 2004- Porphyry-epithermal transition, Cajamarca region, Northern Peru, *Society of Economic Geologists Special Publication*, 11: 279-299.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. & Reynolds, J. R., 1998- Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines, *Economic Geology*, 93: 373-404.
- Hemley, J. J., Montoya, J. W., Marinenko, J. W. & Luce, R. W., 1980- Equilibria in the system Al₂O₃-SiO₂-H₂O and some general implications for alteration/mineralization processes, *Economic Geology*, 75: 210-228.
- Ixer, R. A., Patrick, R. A., D., 2000- Copper-arsenic ores and bronze age mining and metallurgy with special reference to the British Isles. (Downloaded from internet).
- Lowell, J. D. & Guilbert, J. M., 1970- Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits, *Economic Geology*, 65: 373-408.
- Mehrpour, M., 1993- Contributions to the geology, geochemistry, ore genesis and fluid inclusion investigations on Sungun Cu-Mo porphyry deposit, northwest of Iran. Ph.D. dissertation, University of Hamburg, Germany. p.245.
- Muntean, J. L. & Einaudi, M. T., 2000- Porphyry gold deposits of the Refugio district, Maricunga belt, Northern Chile, *Economic Geology*, 95: 1445-1472.
- Muntean, J. L. & Einaudi, M. T., 2001- Porphyry-epithermal transition: Maricunga belt, Northern Chile, *Economic Geology*, 96: 743-772.
- Pearce, J. A., 1996- Source and setting of granitic rocks, *Episode*, 19: 120-125.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W. & Tindle, A. G., 1984- Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks, *Journal of Petrology*, 25: 956-983.
- Rae, A. J., Cooke, D. R., Phillips, D., Yeats, C., Ryan, C. & Hermoso, D., 2003- Spatial and temporal relationships between hydrothermal alteration assemblages at the Palimpinon geothermal field, Philippines: Implications for porphyry and epithermal ore deposits, *Society of Economic Geologists Special Publication*, 10: 223-246.
- Seedorff, E., Dilles, J. H., Proffett, J. M., Jr., Einaudi, M. T., Zurcher, L., Stavast, W. J. A., Johnson, D. A. & Barton, M. D., 2005- Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, pp. 251-298.
- Selby, D. & Nesbitt, B. E., 2000- Chemical composition of biotite from the Casino porphyry Cu-Au-Mo mineralization, Yukon, Canada: Evaluation of magmatic and hydrothermal fluid chemistry. *Chemical Geology*, 172: 77-93.
- Sillitoe, R. H., 2000- Gold-rich porphyry deposits: Descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery. *SEG Review*, 13: 315-345.
- Sillitoe, R. H., 2005- Supergene oxidized and enriched porphyry copper and related deposits, *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, pp. 723-768.
- Sillitoe, R. H. and Gappe, I. M., Jr., 1984- Philippine porphyry copper deposits: Geologic setting and characteristics. *United Nations Economic and Social Commission Asia-Pacific, Committee Coordination Joint Prospecting Mineral Resources Asian Offshore Areas Technical Publication 14*: 89p.
- Stoklin, J., 1977- Structural correlation of the Alpine ranges between Iran and central Asia, *Memoir Hors serie de la Societe Geologique de France*, 8: 333-335.
- Ulrich, T. and Heinrich, C. A., 2002- -Geology and alteration geochemistry of the Porphyry Cu-Au Deposit at Bajo de la Alumbrera,

- Argentina-, *Economic Geology*, 97: 1865-1888.
- Winchester, J. A. and Floyd, P. A., 1977- Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements, *Chemical Geology*, 16: 325-343.

Study of Hypogen Alteration and Copper Mineralization in Sonajil Area (East of Heris, East Azarbaijan)

Gh. Hosseinzadeh^{1*}, A.A. Calagari², M. Moayyed¹, B. Hadj-Alilu³ & M. Moazzen¹

¹Geology Department, Faculty of Natural Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran

²Research Institute for Fundamental Sciences (RIFS), Tabriz University, Tabriz, Iran

³Geology Department, Payam-Nour University, Tabriz, Iran

Received: 2008 February 13

Accepted: 2008 November 29

Abstract

The Sonajil area is located in ~17 km east of Heris, East-Azarbaijan. The major lithological units in the area include bodies of volcanic and volcanoclastic rocks (lower to middle Eocene), Sonajil porphyry stock (upper Eocene-lower Oligocene), Incheh granitoid stock (diorite, syenodiorite, gabbro) (middle-upper Oligocene), and Okuzdaghi volcanic rocks (Plio-Quaternary). The Sonajil porphyry stock hosts a porphyry copper-type mineralization and varies in composition from micro-syenodiorite through micro-gabbro-diorite to micro-gabbro and micro-granodiorite, featuring principally porphyritic to microlithic porphyry textures. The parental magma of these igneous bodies had shoshonitic character (to high-K calc-alkaline), and tectonically belongs to post-collisional volcanic arc. Various generations of banded quartz, quartz-sulfides, quartz-oxides, and sulfides veinlets and micro-veinlets were developed within the porphyry body featuring typical stockwork texture. Veins of sulfide mineralization are also present in peripheral parts of the porphyry body. Alteration and mineralization occurred principally within the Sonajil porphyry stock. Three types of pervasive hypogene alterations are developed in Sonajil stock: (1) potassic; (2) phyllic; and (3) propylitic. The principal hypogene opaque minerals include pyrite, chalcopyrite, bornite, tetrahedrite, enargite, molybdenite, hematite and magnetite occurring as dissemination and stockwork (veinlets and micro-veinlets). The chief supergene minerals in this body are hematite, goethite, malachite, azurite, chalcocite, covellite, and clay minerals.

Key words: Sonajil; Porphyry copper; Post-collisional volcanic arc; Hypogene alteration; Potassic alteration; Supergene alteration.

For Persian Version see pages 3 to 12

www.SID.ir

* Corresponding author: Gh. Hosseinzadeh; E-mail: Hosseinzadehgh@yahoo.com