

شواهدی از کانی سازی احتمالی مس-طلا پورفیری در محدوده نامق، شمال خاوری کاشمر: زمین شناسی، دگرسانی، کانی سازی، ژئوشیمی و مطالعه میانبارهای سیال

حکیمه تقدسی^۱ و آزاده ملکزاده شفارودی^{۲*}

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۲دانشیار، گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۰۷

چکیده

منطقه نامق در شمال خاوری کاشمر در استان خراسان رضوی و در مرکز کمربند ماگمایی خواف-کاشمر-بردسکن واقع شده است. منطقه پوشیده از سنگ های آتشفشانی انوسن با ترکیب آندزیت تا ریولیت است که مورد نفوذ توده های نیمه عمیق با ترکیب مونزونیت، مونزودیوریت و دیوریت قرار گرفته اند. دگرسانی وسیعی کلیه واحدها را تحت تأثیر قرار داده که شامل سیلیسی-سرسیتیک، آرژیلیک متوسط و پروپلیتیک است. کانی سازی به شکل رگچه ای و افشان تشکیل شده و شامل کانی های اولیه کالکوپریت، پیریت، مگنتیت و طلا و کانی های ثانویه گوتیت، همتایت، مالاکیت و آزوریت است. آنومالی بالای مس تا بیش از یک درصد و طلا تا ۱۲ گرم در تن در دگرسانی سیلیسی-سرسیتیک شدید دیده می شود. بر مبنای مطالعه میانبارهای سیال، دمای تشکیل کانی سازی بین ۴۰۴ تا ۵۵۱ درجه سانتی گراد بوده و از محلولی محتوی نمک های NaCl و CaCl₂ با درجه شوری بین ۱۶ تا ۲۳ درصد وزنی به وجود آمده است. کاهش دما و غلظت HCl در حین پدیده جوشش و کاهش دما بر اثر اختلاط سیال ماگمایی و متوربتی مهم ترین عامل تشکیل کانی سازی بوده است. شواهد موقعیت زمین ساختی، سنگ شناسی، گسترش و نوع دگرسانی ها، شکل و رخمون کم کانی سازی و نوع کانه ها، آنومالی های ژئوشیمیایی، نوع میانبارهای سیال و دما و شوری آنها نشان می دهد که کانی سازی منطقه نامق احتمالاً بخش فوقانی یک کانسار مس-طلا پورفیری است. موقعیت زمین ساختی و شواهد ماگمایی-کانی سازی کمربند خواف-کاشمر-بردسکن می تواند آن را به یک ایالت متالورژنی مهم ذخایر پورفیری ایران تبدیل کند که در آینده نیاز به اکتشاف تفصیلی دارد.

کلیدواژه ها: کانی سازی، ژئوشیمی، میانبارهای سیال، مس-طلای پورفیری، نامق.

* نویسنده مسئول: آزاده ملکزاده شفارودی

E-mail: shafaroudi@um.ac.ir

۱- پیش نوشتار

کمربند آتشفشانی-نفوذی خواف-کاشمر-بردسکن در شمال گسل درونه واقع در شمال خاور ایران قرار دارد. طول این کمربند بیش از ۳۰۰ کیلومتر و دارای روند خاوری-باختری است (شکل ۱). این کمربند ماگمایی اغلب از سنگ های آتشفشانی اسیدی تا حدواسط و گاه مافیک با سن ترشیاری تشکیل شده است که توده های گرانیتوئیدی با ترکیب گرانیات تا مونزونیت در آنها نفوذ کرده اند (کریم پور و همکاران، ۱۳۸۵). محققین مختلفی نشان دادند که رژیم زمین ساختی تشکیل این کمربند ماگمایی مرتبط با فرورانش بخشی از پوسته اقیانوسی نئوتیس است (گلمحمدی و همکاران، ۱۳۹۲؛ الماسی و همکاران، ۱۳۹۴؛ Shafaii Moghadam et al., 2015; Malekzadeh Shafaroudi et al., 2013). موقعیت زمین ساختی و تنوع ماگمایی موجب شده است تا کمربند ماگمایی خواف-کاشمر-بردسکن به یکی از ایالت های مهم متالورژنی ایران تبدیل شود؛ به طوری که میزان معادن مهمی همچون طلای نوع غنی از اکسید آهن کوه زر (مظلومی و همکاران، ۱۳۸۷)، اسکارن آهن سنگان (Golmohammadi et al., 2015)، معادن کائولن سرسفیدال، اوچ پلنگ و بهار به همراه با تعداد زیادی منطقه اکتشافی و اندیس مس، طلا، نقره و آهن است (شکل ۱). کریم پور و همکاران (۱۳۸۱) عقیده دارند که این کمربند ماگمایی پتانسیل بالایی برای تشکیل ذخایر مس-طلای غنی از اکسید آهن و کانی سازی مگنتیت دارد.

منطقه نامق در شمال خاوری کاشمر در استان خراسان رضوی و ۵ کیلومتری روستای نامق، حداثا فاصل طول های جغرافیایی ۳۰' ۴۴' ۵۸" تا ۲۸' ۴۵' ۵۸" و عرض های جغرافیایی ۲۷' ۲۳' ۳۵" تا ۲۲' ۲۲' ۳۵" قرار دارد. این منطقه در مرکز کمربند ماگمایی خواف-کاشمر-بردسکن واقع شده است که به لحاظ وجود تعداد زیادی معدن طلا و کائولن و اندیس های مس، طلا و آهن از اهمیت ویژه ای برخوردار است (شکل ۱). کانی سازی در محدوده نامق برای نخستین بار در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته و از جنبه های مختلف معرفی می شود. تنها اطلاعات پیشین از این منطقه، نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ فیض آباد (بهروزی، ۱۳۶۶) بوده است. هدف از این مقاله تهیه زمین شناسی با مقیاس مناسب با عنایت به شناسایی

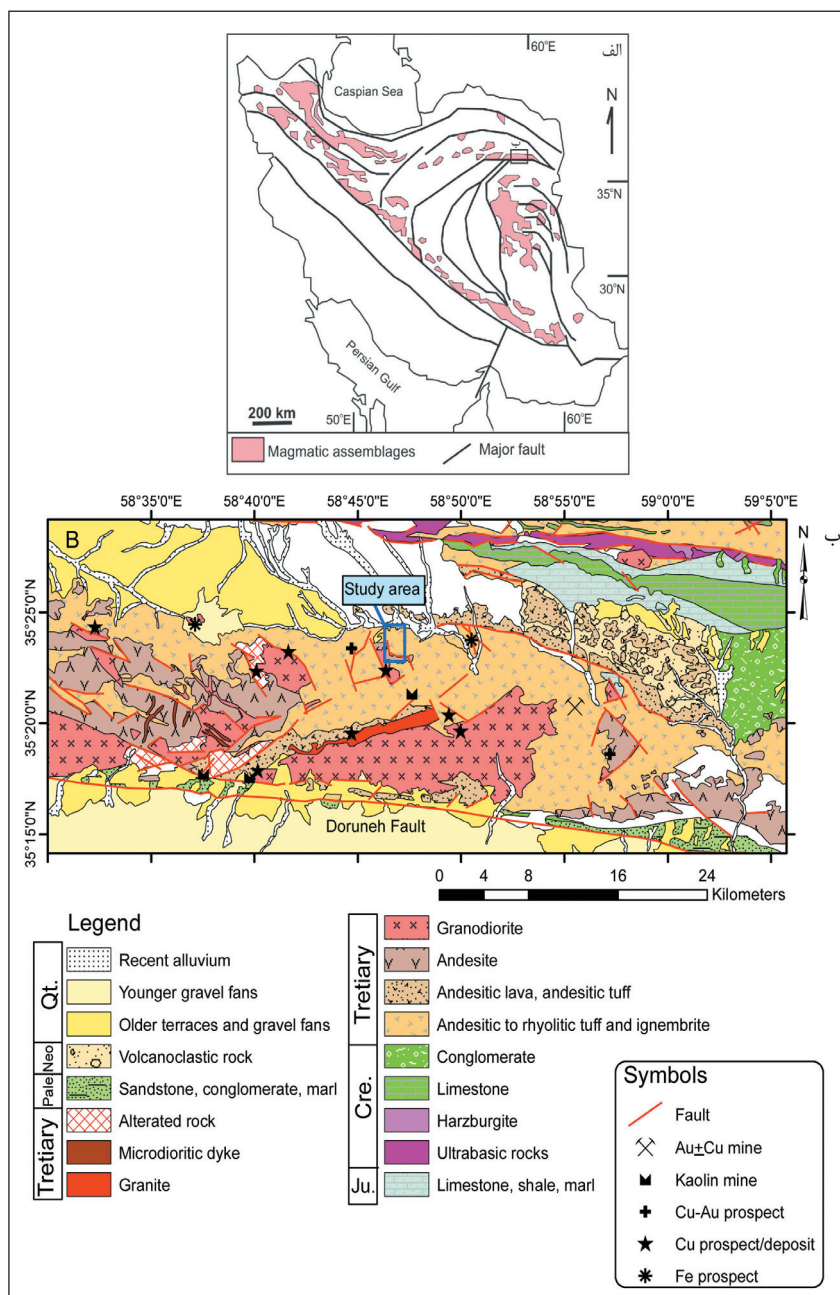
و تفکیک توده های نفوذی احتمالی، بررسی گسترش و نوع دگرسانی ها، مطالعه کانه زایی و تعیین روابط پاراژنزی، تعیین ارتباط توده های نفوذی با کانی سازی منطقه، بررسی ژئوشیمیایی، مطالعه میانبارهای سیال و سرانجام تعیین مدل کانی سازی است.

۲- روش مطالعه

در راستای تهیه نقشه زمین شناسی و دگرسانی، ابتدا برداشت اطلاعات صحرایی و نمونه برداری از واحدهای سنگی در منطقه ای به وسعت تقریبی ۲ کیلومتر مربع انجام شد. بیش از ۱۵۰ نمونه از سطح منطقه جمع آوری شد که از این میان ۸۰ مقطع نازک جهت مطالعات سنگ شناسی و دگرسانی و ۱۳ مقطع نازک صیقلی و بلوک صیقلی جهت مطالعات کانه زایی و تعیین توالی پاراژنزی تهیه و مطالعه شدند. نقشه زمین شناسی و دگرسانی منطقه در نرم افزار ArcGIS تهیه شد. جهت بررسی های ژئوشیمیایی از زون های کانی سازی، ۶ نمونه خرده سنگی برداشت و توسط روش ICP-OES (آماده سازی نمونه به روش محلول در تیزاب سلطانی) برای عناصر مس، سرب، روی و غیره و روش Fire assay برای طلا در آزمایشگاه زراژما آنالیز شد. برای شناسایی کانی های رسی در بخش دگرسانی آرژیلیک نیز ۲ نمونه به روش XRD در آزمایشگاه زراژما تجزیه شد. همچنین برای مطالعه میانبارهای سیال، ۸ مقطع دوبرصیقل از کانی کوارتز پس از مطالعات دقیق پاراژنزی تهیه شد که به دلیل نامناسب بودن اندازه میانبارهای سیال در نمونه ها، در نهایت اندازه گیری های دماسنجی، تعیین نوع املاح و مقدار شوری محلول کانه ساز فقط روی ۴ نمونه انجام شد. آزمایش های مربوطه با استفاده از یک دستگاه سرد کننده و گرم کننده ساخت شرکت لینکام مدل THM ۶۰۰ در دانشگاه فردوسی مشهد صورت گرفته است. دقت کار دستگاه در مرحله سرد و گرم کردن ± 1 درجه سانتی گراد و محدوده حرارتی دستگاه بین ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتی گراد است. کالبراسیون دستگاه در دمای پایین توسط هپتان (۹۰/۶- درجه سانتی گراد)، کلروفرم (۶۳- درجه سانتی گراد)، کلروبنزن (۴۵/۶- درجه سانتی گراد)، ان-دودکان (۹/۶- درجه سانتی گراد) و آب مقطر (صفر درجه سانتی گراد) و در ۳۰۶ درجه سانتی گراد توسط نترات سدیم انجام

می‌شود. مقدار شوری و چگالی در سیستم $H_2O-NaCl$ با استفاده از نرم‌افزار تعبیه شده در سیستم اکسل (Steele-MacInnis et al., 2012; HOKIEFLINCS- $H_2O-NaCl$) محاسبه شده است. نمودارهای ستونی مناسب در نرم‌افزار SPSS رسم شد.

شواهدی از کانی‌سازی احتمالی مس-طلا پورفیری در محدوده نامق



شکل ۱- الف) کمرندهای ماگمایی ترشیری ایران و موقعیت محدوده در شمال شرقی ایران؛ ب) بخشی از نقشه زمین‌شناسی کمرند آتشفشانی- نفوذی خواف- کاشمر- بردسکن در شمال گسل درونه همراه با موقعیت کانی‌سازی‌های مس، طلا و آهن (با تغییرات از بهروزی، ۱۳۶۶) و محدوده مورد مطالعه.

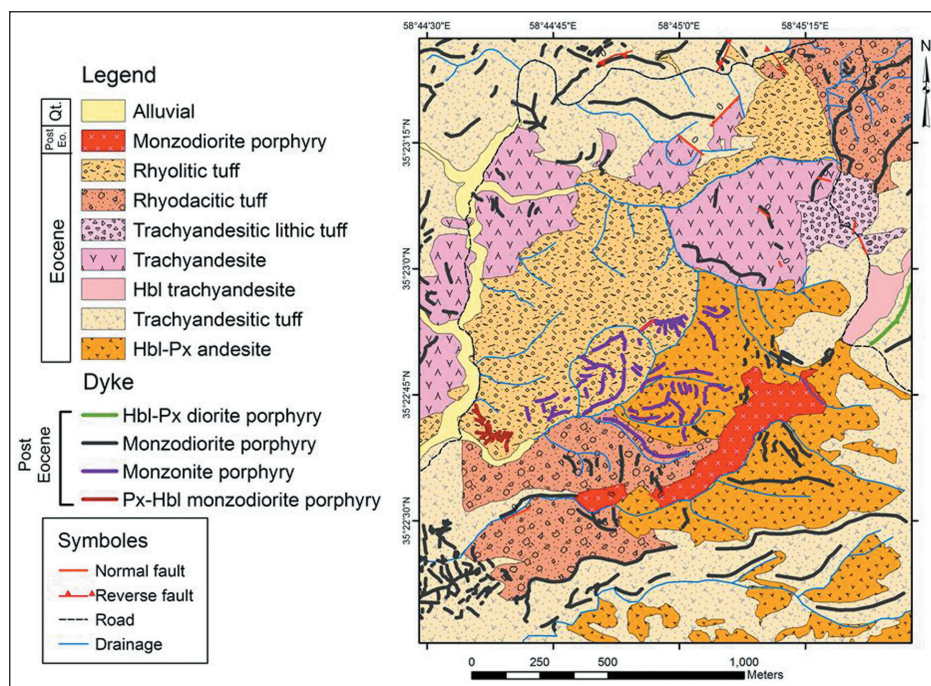
۳- زمین‌شناسی

منطقه نامق در شمال نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ فیض‌آباد (بهروزی، ۱۳۶۶) قرار دارد. بر اساس این نقشه، سنگ‌شناسی محدوده نامق شامل واحد توف برشی سفید رنگ، ایگنمبریت، لاپیلی توف و توف‌های ماسه‌ای به رنگ سبز به سن ائوس است. در حالی که مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی این پروژه نشان داد که علاوه بر وجود انواع مختلف سنگ‌های آتشفشانی به شکل آذرآواری و گدازه، توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق حدواسط متعددی با ترکیب دیوریت، مونزودیوریت و مونزونیت به شکل استوک و دایک در منطقه وجود دارد که در واحدهای آتشفشانی نفوذ کرده و موجب تشکیل کانی‌سازی و دگرسانی شده‌اند. سنگ‌های آتشفشانی ترشیری

بخش اعظم منطقه نامق را پوشانده‌اند و شامل هورنبلند- پیروکسن آندزیت، هورنبلند تراکی آندزیت و تراکی آندزیت به شکل گدازه و واحدهای آذرآواری توف تراکی آندزیتی، توف سنگی تراکی آندزیتی، توف ریوداسیتی و توف ریولیتی هستند (شکل ۲). از این میان واحدهای هورنبلند- پیروکسن آندزیت، توف ریولیتی، توف ریوداسیتی و تراکی آندزیت بیشترین گسترش را به خود اختصاص داده‌اند. از آنجایی که دگرسانی وسیع و متنوعی در کل منطقه دیده می‌شود؛ رنگ این واحدها بر اساس نوع دگرسانی در بخش‌های مختلف متغیر است. همچنین در برخی قسمت‌ها، واحدهای آتشفشانی میزبان کانی‌سازی به شکل پراکنده و رگچه‌ای شده‌اند.

هورنبلند و پیروکسن است. این دایک‌ها تحت تأثیر دگرسانی‌های سیلیسی، سیلیسی-سرسیتیک، آرژیلیک و پروپلیتیک قرار گرفته‌اند. کانی‌سازی نیز عمدتاً در دایک‌های مونزودیوریت پورفیری و کمتر پیروکسن-هورنبلند مونزودیوریت پورفیری به شکل پراکنده و رگچه‌ای مشاهده می‌شود و به نظر می‌رسد که این توده‌های نیمه‌عمیق عامل اصلی تشکیل کانی‌سازی منطقه هستند. دایک هورنبلند-پیروکسن دیوریت پورفیری که رخنمون کوچکی در شمال شرقی منطقه دارد، در واحد توف تراکی آندزیتی نفوذ کرده و فاقد هر گونه دگرسانی و کانی‌سازی است. لذا این توده از واحدهای نفوذی تأخیری محسوب می‌شود که بعد از کانه‌زایی در منطقه نفوذ کرده است.

توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق منطقه نامق به انواع پیروکسن-هورنبلند مونزودیوریت پورفیری، مونزویت پورفیری، مونزودیوریت پورفیری و هورنبلند-پیروکسن دیوریت پورفیری قابل تقسیم هستند. غالب این توده‌ها به شکل دایک دیده می‌شوند و فقط واحد مونزودیوریت پورفیری، علاوه بر دایک به شکل یک استوک نسبتاً کوچک در منطقه رخنمون دارد (شکل ۲). دایک‌های مونزویت پورفیری و مونزودیوریت پورفیری فراوان‌ترین نوع دایک‌ها هستند که عمدتاً در نیمه جنوبی محدوده به داخل سنگ‌های آتشفشانی نفوذ کرده‌اند (شکل ۲). بافت همه این واحدها پورفیری با زمینه دانه متوسط تاریز بوده و درشت بلورهای آنها شامل پلاژیوکلاز، فلدسپار آلکالی و گاه



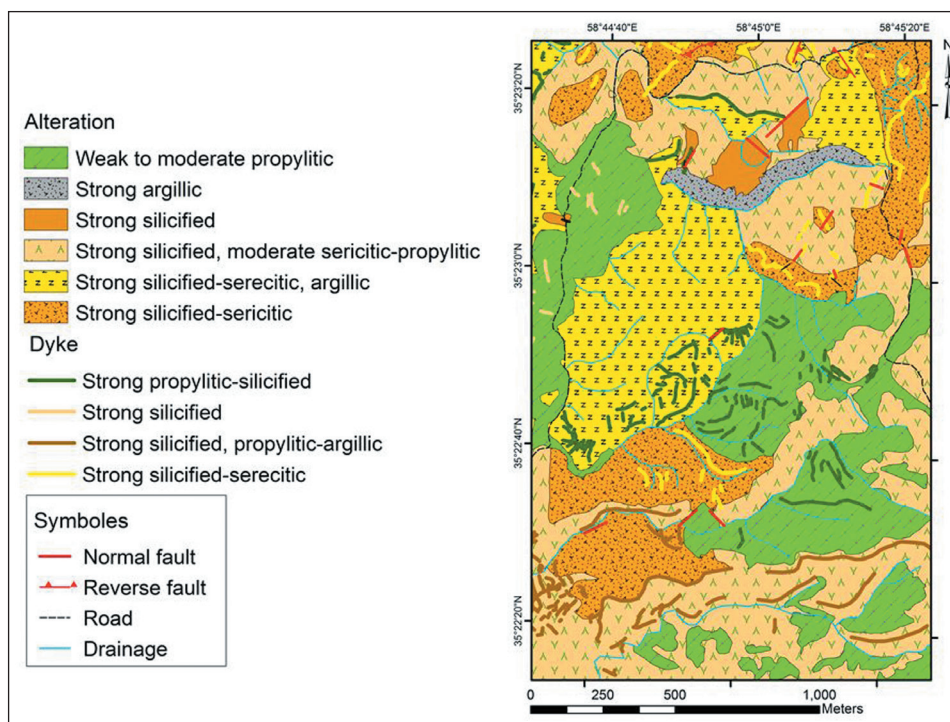
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ منطقه نامق.

۴- دگرسانی

و کانی‌های رسی به صورت پراکنده در متن به مقدار ۱۵ تا ۲۰٪ هستند. مطالعات XRD نشان می‌دهد که نوع کانی رسی عمدتاً ایلیت است. دگرسانی سیلیسی شدید، سرسیتیک- پروپلیتیک متوسط گسترده‌ترین نوع دگرسانی در منطقه است که واحدهای توف تراکی آندزیتی، تراکی آندزیت و مونزودیوریت پورفیری را تحت تأثیر قرار داده است (شکل ۳). کانی‌های اصلی این زون شامل کوارتز، سرسیت، کلریت و کلسیت است. کوارتز به صورت پراکنده در متن به مقدار ۱۵ تا ۲۰٪، سرسیت حاصل از دگرسان شدن فلدسپارها به صورت پراکنده در متن به مقدار ۵ تا ۱۰٪، کانی کلریت از تبدیل کانی‌های فرومنیزین (هورنبلند و پیروکسن) حدود ۵ تا ۱۰٪ و کلسیت به شکل رگچه‌ای و پراکنده در متن به مقدار ۵ تا ۱۰٪ دیده می‌شود. دگرسانی سیلیسی شدید با گسترش محدود در شمال منطقه، واحد تراکی آندزیت را تحت تأثیر قرار داده است و در برخی دایک‌های مونزودیوریتی در باختر محدوده نیز دیده می‌شود (شکل ۳). کوارتز مهم‌ترین کانی ثانویه این زون است که به مقدار ۳۰ تا ۴۵٪ به صورت رگچه و پراکنده در متن حضور دارد (شکل ۴- پ). دگرسانی آرژیلیک متوسط با شدت زیاد، با گسترش محدود و روند خاوری- باختری در بخش شمالی محدوده در واحد توف ریولیتی مشاهده می‌شود (شکل ۳). کانی‌های رسی که عمدتاً ایلیت هستند؛ در برخی نقاط به مقدار بیش از ۵۰ درصد رسیده و باعث ایجاد رنگ سفید و مورفولوژی پست در صحرا شده‌اند.

دگرسانی وسیع و متنوعی تمامی واحدهای سنگی منطقه نامق را تحت تأثیر قرار داده که در اثر نفوذ توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق و اغلب مونزودیوریتی (که رخنمون اندکی از آنها در سطح دیده می‌شود) به درون سنگ‌های آتشفشانی شکل گرفته است (شکل‌های ۳ و ۴- الف). بر اساس مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، مهم‌ترین دگرسانی‌های منطقه انواع سیلیسی- سرسیتیک، آرژیلیک متوسط و پروپلیتیک است که به زیرمجموعه‌هایی تقسیم می‌شود (شکل ۳).

دگرسانی سیلیسی- سرسیتیک شدید در واحدهای توف ریوداسیتی، تراکی آندزیت و دایک‌های مونزودیوریت پورفیری و مونزویت پورفیری دیده می‌شود. کانی‌های اصلی این زون کوارتز و سرسیت است. کوارتز ثانویه به صورت رگچه‌ای و پرشدگی حفرات به مقدار ۱۵ تا ۲۰٪ و کانی سرسیت به صورت پراکنده در متن و نیز حاصل از دگرسان شدن فلدسپارها به مقدار ۱۵ تا ۲۰٪ مشاهده می‌شود. این زون همراه با کانی‌سازی رگچه‌ای و پراکنده است و از مهم‌ترین زون‌های دگرسانی منطقه به شمار می‌آید (شکل ۴- ب). دگرسانی سیلیسی- سرسیتیک و آرژیلیک متوسط در بخش‌های وسیعی در نیمه شمالی منطقه، واحدهای توف ریولیتی و کمتر توف تراکی آندزیتی را تحت تأثیر قرار داده است (شکل ۳). کانی‌های اصلی این زون شامل کوارتز، سرسیت و کانی‌های رسی است. کانی کوارتز به صورت رگچه‌ای به مقدار ۱۰ تا ۱۵٪، سرسیت حاصل از دگرسان شدن فلدسپارها به مقدار ۱۰ تا ۱۵٪



شکل ۳- نقشه دگرسانی ۱:۱۰۰۰۰ منطقه نامق.

رگچه کوارتز- کالکوپیریت $\pm$ مگنتیت $\pm$ طلا حدود ۴۵ تا ۵۰٪ رگچه را کوارتز، ۳۵ تا ۴۰٪ را کالکوپیریت، ۸ تا ۱۰٪ را گاه مگنتیت و کمتر از ۰/۲ درصد را گاه ذرات طلا تشکیل می‌دهد.

رگچه‌های شماره ۲ و ۳ عمدتاً در توده‌های نفوذی و همراه با دگرسانی‌های سیلیسی- سرسیتیک شدید و پروپلیتیک- سیلیسی شدید دیده می‌شوند؛ در حالی که رگچه کالکوپیریت هم در توده‌های نفوذی و هم در واحدهای آتشفشانی و همراه با هر سه زون دگرسانی ذکر شده مشاهده شده است. کوارتزهای موجود در رگچه‌های شماره ۲ و ۳ همگی از نوع کوارتزهای خاکستری رنگ هستند. کانی‌سازی افشان نیز شامل پیریت و کالکوپیریت است که حدود ۲ تا ۳ درصد حجم توده‌های نفوذی و سنگ‌های آتشفشانی را به خود اختصاص می‌دهد. کالکوپیریت فراوان‌ترین کانی سولفیدی منطقه است که به شکل‌های افشان و رگچه‌ای دیده می‌شود. این کانی عمدتاً بی‌شکل بوده و در برخی نقاط تا ۵۰ درصد به گوتیت و هماتیت و ۴۰ درصد به مالاکیت و آزوریت تبدیل شده است (شکل‌های ۵- الف، ب و ج). مگنتیت فقط در برخی رگچه‌های شماره ۲ دیده می‌شود. این کانی شکل‌دار است و اندازه بزرگترین دانه آن به ۰/۶ میلی‌متر می‌رسد. بافت ماریتیتی شدن با تبدیل حدود ۵ تا ۱۰٪ مگنتیت به هماتیت نیز در آن قابل مشاهده است (شکل ۵- الف). پیریت دیگر کانی سولفیدی منطقه نامق است که فقط به شکل افشان دیده می‌شود. این کانی شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار است و اندازه آن تا حداکثر ۰/۵ میلی‌متر می‌رسد. حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد پیریت‌ها در حال تبدیل به گوتیت است (شکل‌های ۵- پ، ث و ج). ذرات طلا در برخی رگچه‌های شماره ۲ تا اندازه حداکثر ۵۰ میکرون مشاهده شده است. این کانی با رنگ زرد طلایی و درخشندگی بالا قابل تشخیص است (شکل ۵- ت). توالی پاراژنزی کانی‌های فلزی و غیرفلزی منطقه نامق به تفکیک زون‌های دگرسانی در شکل ۶ نشان داده شده است.

۶- ژئوشیمی

نتایج آنالیز ژئوشیمی عناصر مهم ۶ نمونه خرده‌سنگی به روش‌های ICP-OES و Fire assay در جدول ۱ و شکل ۷ (نقشه دگرسانی) نشان داده شده است. میزان عنصر مس بین ۷ تا ۱۰۶۷۱ گرم در تن متغیر است. بیشترین مقدار مس در واحد

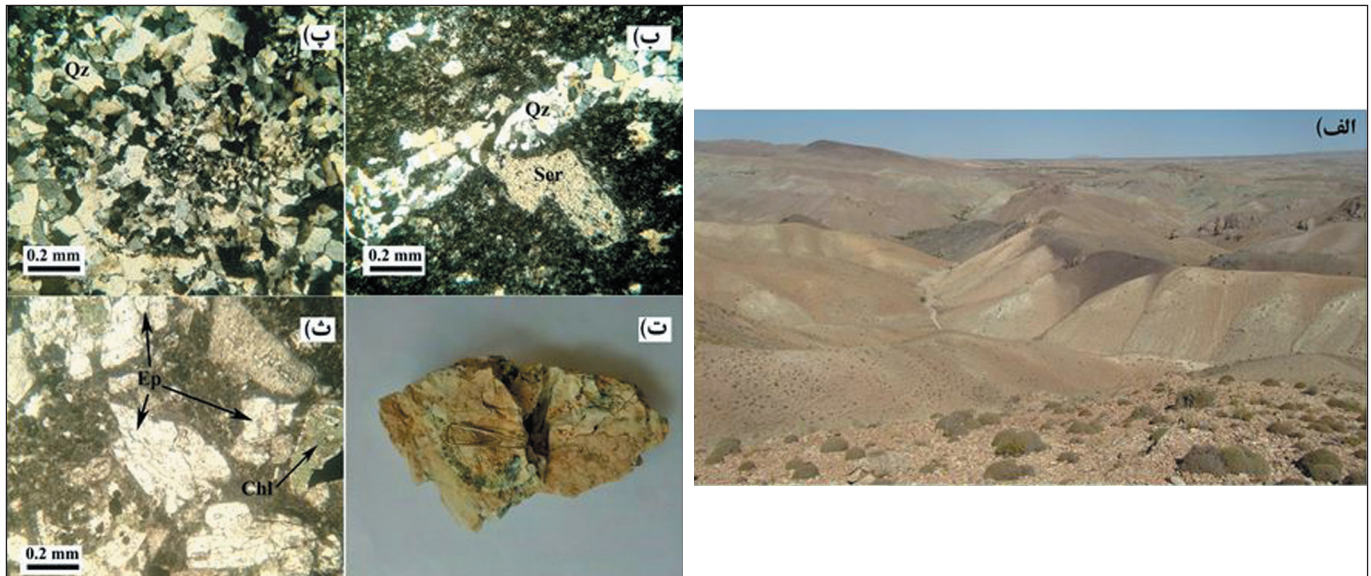
کانی‌سازی به شکل رگچه و پراکنده در بخش‌هایی از این زون نیز دیده می‌شود (شکل ۴- ت). دگرسانی پروپلیتیک ضعیف تا متوسط با گسترش قابل توجه در باختر، خاور، جنوب و مرکز منطقه، واحدهای تراکی آندزیت و هورنبلند- پیروکسن آندزیت را تحت تأثیر قرار داده است (شکل ۳). کانی کلریت پراکنده در متن و اپیدوت حاصل از دگرسان شدن کانی‌های فرومیزین به مقدار ۵ تا ۶٪ و در برخی قسمت‌ها به مقدار ۱۰ تا ۱۵٪ حضور دارند (شکل ۴- ث). کلسیت نیز به صورت رگچه‌ای با مقدار ۳ تا ۵٪ دیده می‌شود. دگرسانی سیلیسی، پروپلیتیک- آرزلیک متوسط نیز در دایک‌های مونزودیوریت پورفیری جنوب منطقه دیده می‌شود. کوارتز ثانویه در حد ۱۵ تا ۲۰٪، کلریت ۱۰ تا ۱۵٪ و کانی‌های رسی ۱۰ تا ۱۵٪ به شکل پراکنده و رگچه‌ای مهم‌ترین کانی‌های ثانویه این زون هستند. دگرسانی پروپلیتیک- سیلیسی شدید نیز عمدتاً دایک‌های مونزودیت پورفیری و پیروکسن- هورنبلند مونزودیوریت پورفیری را در مرکز نامق تحت تأثیر قرار داده است (شکل ۳). رگچه‌های کوارتز ثانویه بین ۲۰ تا ۳۰٪ و کلریت به شکل پراکنده در متن و جانشین شده در کانی‌های فرومیزین حدود ۱۰ تا ۱۵٪، کانی‌های ثانویه شاخص هستند. آثار کانی‌سازی مس اولیه و ثانویه همراه با این زون در دایک‌های پیروکسن- هورنبلند مونزودیوریت پورفیری دیده شده است.

۵- کانی‌سازی

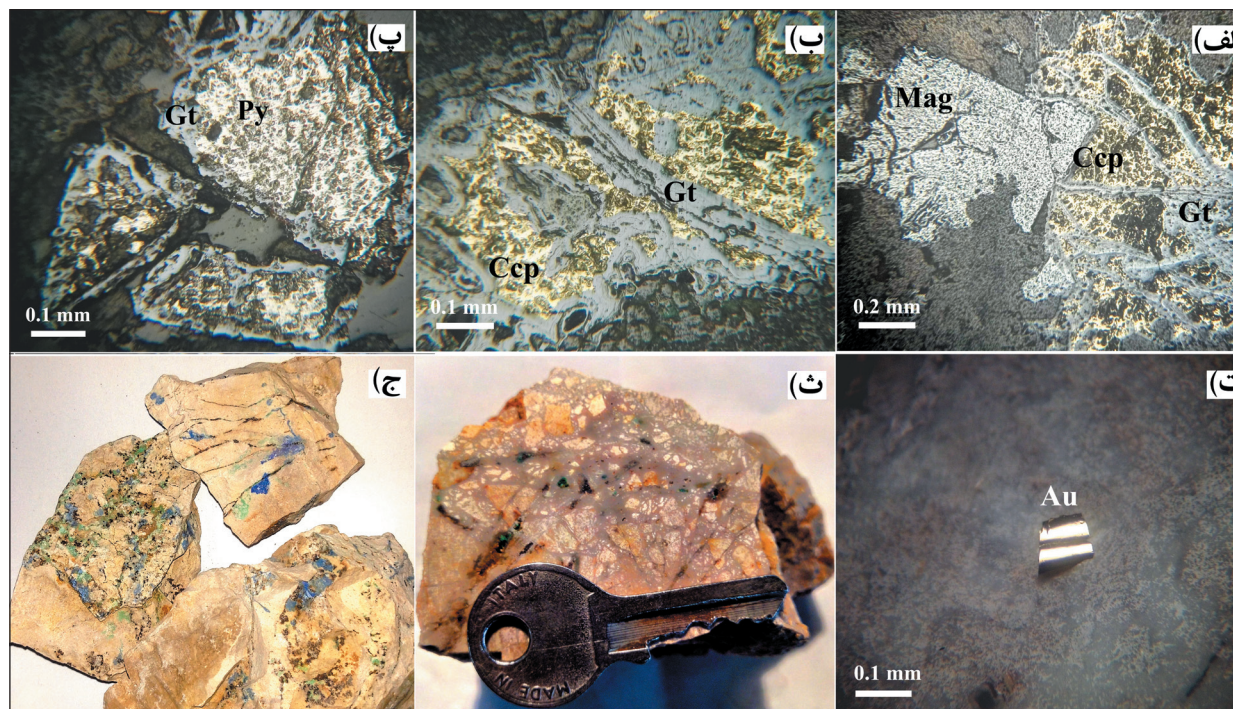
کانی‌سازی منطقه نامق در برخی دایک‌های مونزودیوریت پورفیری و پیروکسن- هورنبلند مونزودیوریت پورفیری و سنگ‌های آتشفشانی تراکی آندزیت و توف ریولیتی مجاور آنها همراه با دگرسانی‌های سیلیسی- سرسیتیک شدید، آرزلیک متوسط و پروپلیتیک- سیلیسی شدید بیشتر در نیمه شمالی منطقه دیده می‌شود. کانه‌زایی به شکل‌های رگچه‌ای و افشان است. کانی‌های اولیه شامل کالکوپیریت، پیریت، مگنتیت و طلا همراه با کانی‌های غیرفلزی کوارتز، سرسیت، کانی‌های رسی و کلریت و کانی‌های ثانویه شامل گوتیت، هماتیت، مالاکیت و آزوریت است. بر اساس ترکیب کانی‌شناسی اولیه، ۳ نوع رگچه در منطقه نامق قابل تفکیک است که عبارتند از: ۱- کالکوپیریت، ۲- کوارتز- کالکوپیریت $\pm$ مگنتیت $\pm$ طلا و ۳- کوارتز. ضخامت رگچه‌ها بین ۰/۱ تا حداکثر ۰/۳ میلی‌متر متغیر است. در

مونزودپوریت پورفیری با دگرسانی سیلیسی-سرسیتیک شدید در واحد توف ریولیتی با دگرسانی آرژیلیک متوسط نفوذ کرده است و رگچه‌های کوارتز-کالکوپیریت $\pm$ مگنتیت $\pm$ طلا نیز همراه با کانی‌سازی افشان در هر دو واحد وجود دارند. مقدار طلا در ۳ نمونه دیگر که بیش از ۰/۳ گرم در تن است قابل توجه است.

مونزودپوریت پورفیری با دگرسانی سیلیسی-سرسیتیک شدید دیده می‌شود. کالکوپیریت، مالاکیت و آزوریت به شکل رگچه و پراکنده در این موقعیت تا ۱۰ درصد حجم سنگ وجود دارد. میزان عنصر طلا از ۵ تا ۱۲۰۷۲ میلی گرم در تن متغیر است. مقدار ۱۲ گرم در تن طلا در مکانی دیده می‌شود که یک دایک



شکل ۴- الف) نمایی از دگرسانی وسیع منطقه نامق دید به سمت شمال غربی؛ ب) رگچه کوارتز و تبدیل فلدسپار به سرسیت در دگرسانی سیلیسی-سرسیتیک در نور XPL؛ پ) کوارتز ثانویه در دگرسانی سیلیسی شدید در نور XPL؛ ت) دگرسانی آرژیلیک متوسط در توف ریولیتی که موجب رنگ سفید نمونه شده است همراه با آثار کانی‌سازی مس؛ ث) کلریت و اپیدوت در دگرسانی پروپلیتیک در نور PPL (Qtz=کوارتز، Ser=سرسیت، Chl=کلریت، Ep=اپیدوت (Whitney and Evans, 2010)).



شکل ۵- تصاویری از کانی‌سازی منطقه نامق: الف) تبدیل کالکوپیریت به گوتیت در کنار مگنتیت شکل‌دار در رگچه کوارتز-کالکوپیریت $\pm$ مگنتیت $\pm$ طلا در مونزودپوریت پورفیری، نور انعکاسی PPL؛ ب) تبدیل کالکوپیریت به گوتیت در رگچه کالکوپیریت در واحد پیروکسن-هورنبلند مونزودپوریت پورفیری، نور انعکاسی PPL؛ پ) تبدیل پیریت افشان به گوتیت در مونزودپوریت پورفیری، نور انعکاسی PPL؛ ت) دانه طلای آزاد در رگچه کوارتز-کالکوپیریت $\pm$ مگنتیت $\pm$ طلا در مونزودپوریت پورفیری، نور انعکاسی PPL؛ ث) رگچه‌های کوارتز خاکستری و پیریت افشان اکسید شده در مونزودپوریت پورفیری؛ ج) کانی‌سازی رگچه‌ای و پراکنده کالکوپیریت و پیریت در واحد توف ریولیتی با دگرسانی آرژیلیک متوسط که به اکسیدهای آهن، مالاکیت و آزوریت تبدیل شده‌اند (Ccp=کالکوپیریت، Py=پیریت، Mag=مگنتیت، Gt=گوتیت، Au=طلا) (Whitney and Evans, 2010).

Minerals	Silicified-sericitic zone	Argillic zone	Propylitic-silicified zone	Oxidized zone
Chalcopyrite	—————	—————	—————	
Pyrite	—————	—————	—————	
Magnetite	—————	—————	—————	
Gold	—————	—————	—————	
Quartz	—————	—————	—————	
Sericite	—————	—————	—————	
Chlorite	—————	—————	—————	
Clay minerals	—————	—————	—————	
Malachite				—————
Azurite				—————
Hematite				—————
Goethite				—————

شکل ۶- توالی پاراژنز کانی‌های فلزی و غیرفلزی منطقه نامق.

۷- میانبارهای سیال

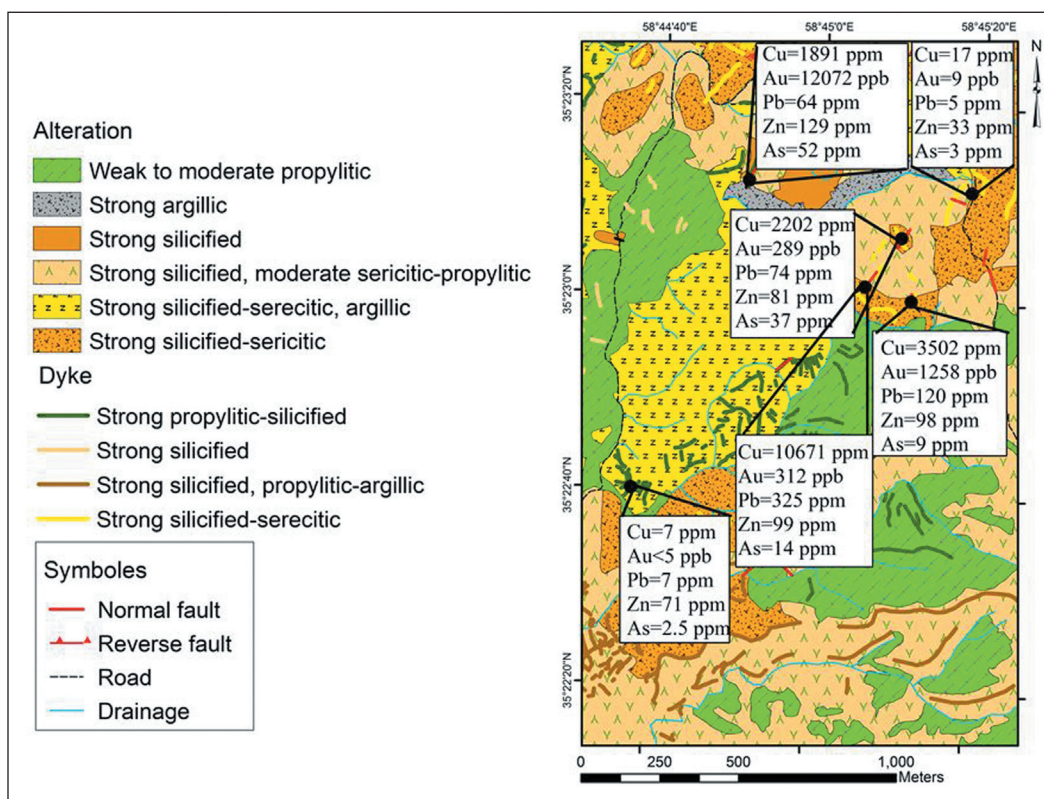
مطالعه میانبارهای سیال برای تعیین دماسنجی، تعیین نوع املاح و مقدار شوری محلول کانه‌دار در کانسارهای مختلف به کار می‌رود. البته قبل از آن می‌بایست مطالعات دقیق پاراژنزی انجام شود و کانی‌هایی انتخاب شوند که تشکیل آنها از محلول کانه‌دار تأیید شده باشد (ملکزاده شفاوردی و کریم‌پور، ۱۳۹۱). در محدوده نامق، کانی کوارتز مهم‌ترین کانی باطله همراه با رگچه‌های سولفیدی محسوب می‌شود.

مطالعه میانبارهای سیال روی ۵ نمونه دوبرصیقل از رگچه کوارتز- کالکوپیریت $\pm$ مگنتیت $\pm$ طلا در زون‌های سیلیسی- سرسیتیک شدید و پروپلیتیک- سیلیسی شدید دارای میانبارهای سیال با اندازه مناسب انجام شد؛ متأسفانه در رگچه کوارتز شماره ۳ امکان مطالعه میانبارهای سیال مناسب میسر نبود. دماسنجی به روش گرمایش روی ۸۹ میانبار سیال و تعیین نوع املاح و مقدار شوری به روش سرمایش روی ۶۶ میانبار سیال صورت پذیرفت.

این نمونه‌ها همگی در محل نفوذ دایک مونزودیوریت پورفیری به داخل توف ریولیتی با دگرسانی سیلیسی- سرسیتیک شدید دیده می‌شوند که کانی‌سازی رگچه‌ای و پراکنده حضور دارد. هر چند در چهار نمونه خرده‌سنگی مقدار مس و طلا بالاست؛ اما همبستگی بین این دو عنصر حداقل در این چند نمونه دیده نمی‌شود. میزان سرب بین ۵ تا ۳۲۵ و روی بین ۳۳ تا ۹۹ گرم در تن متغیر است. هر چند آنومالی از این دو عنصر وجود دارد؛ اما مقدار آنها قابل توجه نیست. آرسنیک بین ۳ تا ۵۲ گرم در تن متغیر است که مقادیر بالایی محسوب نمی‌شود (جدول ۱ و شکل ۷). کانی آرسنیک‌داری در منطقه مشاهده نشده است. این مسئله همراه با پایین بودن آرسنیک نشان می‌دهد که طلا و آرسنیک همبستگی مثبت ندارند و طلا در ساختار سولفیدهای آرسن دار نیست. این واقعیت با آزاد بودن دانه‌های طلا هماهنگی دارد. مقدار سلنیم بین ۳۷ تا ۶۸ گرم در تن متغیر است (جدول ۱). در مجموع بیشترین مقدار عناصر مس، طلا، سرب، روی و آرسنیک مرتبط با دایک‌های مونزودیوریت پورفیری با دگرسانی سیلیسی- سرسیتیک شدید و کمتر پروپلیتیک- سیلیسی شدید است. لازم به ذکر است که عناصر Se، Ta و Re آنالیز نشده‌اند.

جدول ۱- نتایج آنالیز عناصر مهم در نمونه‌های خرده‌سنگی برداشت شده از محل‌های کانی‌سازی در محدوده نامق به روش Fire assay و ICP-OES (همه عناصر برحسب گرم در تن و طلا برحسب میلی گرم در تن).

شماره نمونه	موقعیت جغرافیایی	Cu	Pb	Zn	As	Ce	Au
C ₁	۵۸° ۴۴' ۵۰" ۳۵° ۲۳' ۱۰"	۱۸۹۱	۶۴	۱۲۹	۵۲	۴۹	۱۲۰۷۲
C ₂	۵۸° ۴۵' ۱۸" ۳۵° ۲۳' ۰۹"	۱۷	۵	۳۳	۳	۶۸	۹
C ₃	۵۸° ۴۵' ۰۹" ۳۵° ۲۳' ۰۷"	۲۲۰۲	۷۴	۸۱	۳۷	۴۸	۲۸۹
C ₄	۵۸° ۴۵' ۱۰" ۳۵° ۲۲' ۵۵"	۳۵۰۲	۱۲۰	۹۸	۹	۵۲	۱۲۵۸
C ₅	۵۸° ۴۵' ۰۷" ۳۵° ۲۳' ۰۰"	۱۰۶۷۱	۳۲۵	۹۹	۱۴	۳۷	۳۱۲
C ₇	۵۸° ۴۴' ۳۷" ۳۵° ۲۲' ۴۰"	۷	۷	۷۱	۳	۵۲	<۵



شکل ۷- موقعیت و نتایج آنالیز نمونه‌های خرده‌سنگی منطقه نامق روی نقشه دگرسانی.

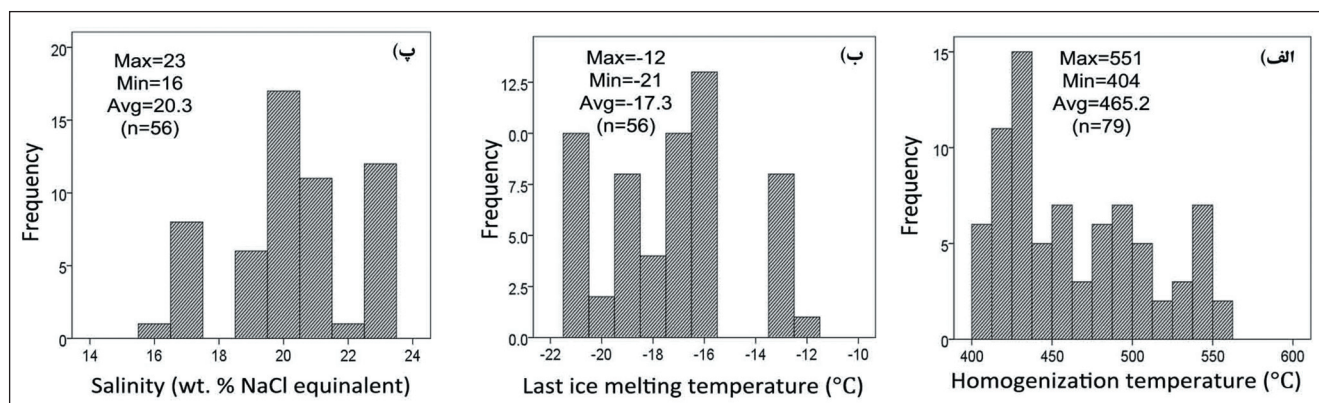
دمای همگن‌شدگی (T_h) در میان‌بازهای سیال اولیه بین ۴۰۴ تا ۵۵۱ درجه سانتی‌گراد متغیر و بیشترین مقدار مربوط به بازه ۴۳۰ تا ۴۴۰ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۸-الف). نخستین دمای ذوب‌شدگی (T_m) بین ۵۷۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۵۶۰/۲ درجه سانتی‌گراد است. نخستین دمای ذوب‌شدگی (T_m) رابطه مستقیمی با ترکیب نمک موجود در سیال هیدروترمالی دارد (Sheppherd et al., 1985). بر اساس T_m به دست آمده، نمک‌های $CaCl_2$ و $NaCl$ در میان‌بازهای سیال اولیه وجود دارند. مقدار T_m بین ۱۲/۴ تا ۲۱- درجه سانتی‌گراد است (شکل ۸-ب). دمای نهایی ذوب آخرین بلور یخ نیز مقدار شوری را تعیین می‌کند. بر اساس سیستم $H_2O-NaCl$ (Steele-MacInnis et al., 2012; Lecumberri-Sanchez et al., 2012)، مقدار شوری محلول‌کننده بین ۱۶ تا ۲۳ درصد وزنی محاسبه شد و بیشترین فراوانی میزان شوری ۲۰ درصد وزنی معادل کلرورسدیم است (شکل ۸-پ). مقدار چگالی میان‌بازهای سیال نیز بین ۰/۶ تا ۰/۹۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر است (جدول ۲).

مطالعات سنگ‌نگاری میان‌بازهای سیال اولیه در کوارتز (رگچه کوارتز- کالکوپیریت $\pm$ مگنتیت $\pm$ طلا) نشان داد که آن‌ها به صورت استوانه‌ای، بیضی، دایره و بی‌شکل در اندازه‌های حداقل ۵ تا ۱۵ میکرون هستند که غالباً در ابعاد کمتر از ۹ میکرون مشاهده می‌شوند.

بر اساس تقسیم‌بندی‌های متداول (Roedder, 1984; Sheppherd et al., 1985) سیالات از نوع سه‌فازی غنی از مایع ($L+V+D$)، دوفازی غنی از مایع ($L+V$)، تک‌فاز مایع (L) و تک‌فاز گازی (V) هستند که فاز دختر در نوع $L+V+D$ ، اکسید آهن و سیلیکات است. فاز سیلیکات شکل‌دار، بی‌رنگ و با اندازه تقریبی ۳ میکرون و فاز اکسید آهن بی‌شکل، قرمز رنگ و با اندازه تقریبی ۱ تا ۲ میکرون است. مقدار سیالات تک‌فازی V بیشتر از بقیه است. میان‌بازهای سیال ثانویه عمدتاً از نوع مایع هستند و اندازه آنها به ۴ میکرون می‌رسد. اندازه‌گیری‌های دماسنجی، تعیین نوع محلول و مقدار شوری روی میان‌بازهای سیال اولیه نوع $L+V$ و $L+V+D$ انجام شد (جدول ۲).

جدول ۲- خلاصه نتایج مطالعات میان‌بازهای سیال در سیالات نوع $L+V$ و $L+V+D$ در کوارتزهای رگچه کوارتز- کالکوپیریت $\pm$ مگنتیت $\pm$ طلا در منطقه نامق.

نمونه	ابعاد (μm)	T_h ($^{\circ}C$)	T_m ($^{\circ}C$)	شوری	چگالی
N34	۵ تا ۹	۴۲۲ تا ۵۰۰	۱۲/۴ تا ۱۹/۴	۱۶/۸ تا ۱۹/۷	۰/۸۸ تا ۰/۹۱
N52	۵ تا ۱۵	۴۵۹ تا ۵۵۱	۲۱/۲ تا ۱۷-	۲۱/۲ تا ۲۳/۱	۰/۹۲ تا ۰/۹۴
N54	۶ تا ۱۴	۴۰۴ تا ۵۲۳	۱۷/۸ تا ۱۹/۲	۱۹/۶ تا ۲۰/۸	۰/۶۰ تا ۰/۹۲
N57	۵ تا ۶	۴۱۸ تا ۴۳۸	-	-	-



شکل ۸- نمودارهای ستونی مربوط به میانبرهای سیال. الف) دمای همگن شدگی؛ ب) آخرین دمای ذوب شدگی؛ پ) مقدار شوری.

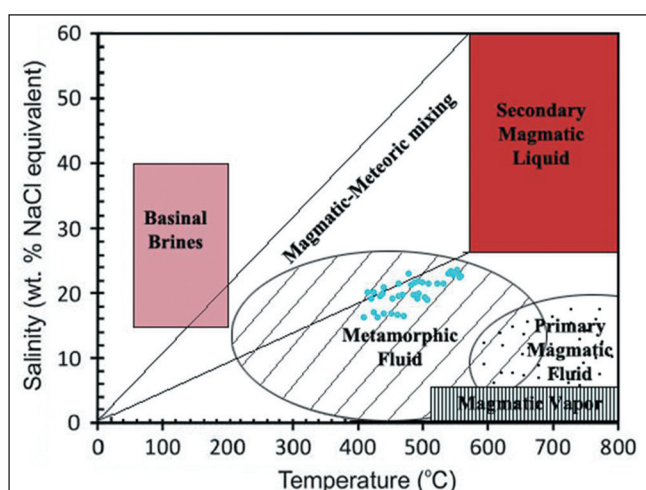
۸- بحث

۸-۱. تحول میانبرهای سیال و تشکیل کانی‌سازی

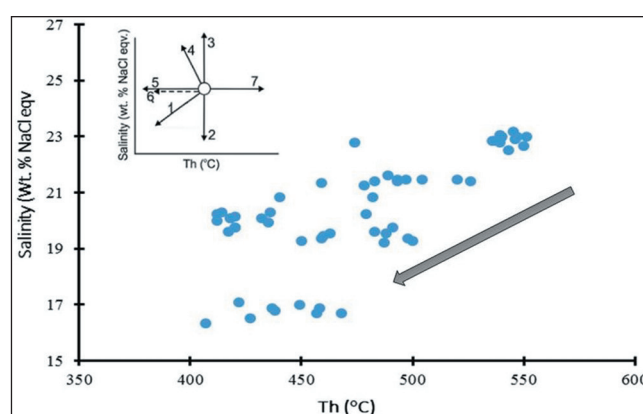
دمای همگن شدگی به دست آمده، تصحیح فشار صورت گیرد. اما از آنجایی که شواهد فرایند جوشش دیده می‌شود؛ بنابراین دمای همگن شدگی به دست آمده برای کانی‌سازی منطقه نامق، می‌تواند همان دمای واقعی تشکیل کانی‌سازی باشد. همچنین مطالعات Seward (1973, 1991) نشان داده است که کمپلکس‌های بی‌سولفیدی در کانسارهایی که در درجه حرارت پایین‌تر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شوند و یا در کانسارهایی که کانی‌شناسی آنها دلالت بر شرایط احیاء کننده دارد؛ غالب هستند. در حالی که در ذخایری که در درجه حرارت‌های بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد شکل می‌گیرند و حضور کانی‌های اکسیدی یا سولفیدی در آنها حاکی از شرایط نسبتاً اکسید کننده است؛ کمپلکس‌های کلریدی غلبه دارند. بنابراین درجه حرارت تشکیل بیش از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد منطقه نامق نشان‌دهنده حمل عناصر در قالب کمپلکس‌های کلریدی است.

شوری و دمای همگن شدگی میانبرهای سیال منطقه نامق در نمودار دما-شوری، نشان‌دهنده این است که اختلاط سیال دما-شوری بالا با سیال دما-شوری پایین، شرایط را برای ته‌نشست مس و طلا از کمپلکس‌های کلریدی فراهم کرده است (شکل ۹).

بر مبنای مطالعات میانبرهای سیال، دمای تشکیل محلول کانه‌دار در زون‌های دگرسانی سیلیسی-سرستیک شدید و پروپلیتیک-سیلیسی شدید منطقه نامق بین ۴۰۴ تا ۵۵۱ درجه سانتی‌گراد بوده و از محلولی محتوی نمک‌های NaCl و CaCl_2 با درجه شوری بین ۱۶ تا ۲۳ درصد وزنی به وجود آمده است. وجود میانبرهای سیال دوفازی غنی از گاز و تک‌فاز گازی در کوارتزهای همراه با کانی‌های سولفیدی، نشان‌دهنده وقوع پدیده جوشش در زمان تشکیل کانی‌سازی است. جوشش زمانی اتفاق می‌افتد که یک سیال تک‌فاز با شوری بالا به حالت دوفازی روی نقطه طرف مایع منحنی بحرانی می‌رسد. در این حالت تعدادی فاز بخار با شوری کمتر از آن جدا می‌شود و باعث تولید حباب می‌شود (Ulrich et al., 2002). رخداد پدیده جوشش باعث تغییراتی در شرایط فیزیکوشیمیایی محلول کانه‌دار مانند کاهش دما، افزایش pH و غیره می‌شود که لازمه ته‌نشست عناصر و ناپایداری کمپلکس‌ها و تشکیل کانی‌هاست. معمولاً برای به دست آوردن دمای واقعی تشکیل کانسار، فشار ستون چینه‌ای که در آن زمان روی کانی‌سازی بوده لازم است و می‌بایست روی

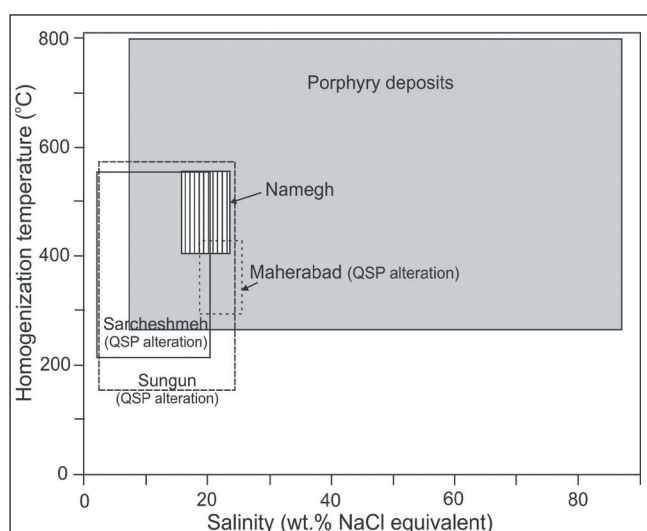


شکل ۹- نمودار دمای همگن شدگی در برابر شوری برای میانبرهای سیال منطقه نامق. محدود دما و شوری سیالات مختلف (Bean, 1983).



شکل ۱۰- نمودار شوری- دمای همگن شدگی میانبرهای سیال منطقه نامق. روندهای ممکن تکامل سیال در نمودار دما-شوری از (Shepherd et al., 1985)؛ روند ۱= مخلوط شدگی سیال A با سیال سردتر و شوری کمتر؛ روند ۲ و ۳= مخلوط شدگی سیال A با میانبرهای دیگر با شوری مختلف ولی دمای یکسان؛ روند ۴= شوری فاز باقیمانده در اثر جوشش افزایش پیدا کرده است؛ روند ۵= سرد شدگی سیال؛ روند ۶= باریک‌شدگی میانبرهای سیال؛ روند ۷= تراوش میانبرهای سیال در طول گرمایش.

می تواند احتمالاً نشان دهنده یک کانی-سازی مس- طلا پورفیری در عمق باشد. گسترش زیاد سنگ های آتشفشانی و رخنمون کم توده های نفوذی نیمه عمیق با بافت پورفیری، گسترش دگرسانی آرژیلیک و پروپلیتیک در منطقه، رخنمون بسیار کم رگچه های کانی سازی که محدود به همان دایک های مونوزودیوریتی و سنگ های آتشفشانی مجاور آنها می-شود، نوع میانبارهای سیال که فاقد بلور نمک طعام است و دما و شوری محلول کانه دار که حکایت از مخلوط شدگی سیال ماگمایی- متئوریتی دارد و عمق تشکیل نسبتاً کم را پیشنهاد می کند همگی نشان می دهند که منطقه نامق هم اکنون در سطوح فرسایشی فوقانی یک کانسار مس- طلا پورفیری است و برای تأیید وجود آن می بایست حفاری انجام شود تا با مطالعات زیرسطحی کلیه داده ها تکمیل و تأیید شود. همچنین مقایسه دما و شوری میانبارهای سیال نوع L+V رگچه های مس- طلا دار دگرسانی های سیلیسی- سرسیتیک شدید و پروپلیتیک- سیلیسی شدید منطقه نامق با دما و شوری ذخایر پورفیری (Wilkinson, 2001) و میانبارهای سیال مشابه در زون کوارتز- سرسیت- پیریت برخی کانسارهای مس پورفیری ایران مانند سرچشمه (Hezarkhani, 2006) و سونگون (Calagari, 2004) از کمر بند ارومیه- دختر و ماهرآباد (ملکزاده شفارودی، ۱۳۸۸) از بلوک لوت نشان می دهد که در حقیقت این بخش از کانی سازی مشاهده شده نامق، معادل رگچه های بخش فوقانی زون کوارتز- سرسیت- پیریت ذخایر مس پورفیری است (شکل ۱۲).

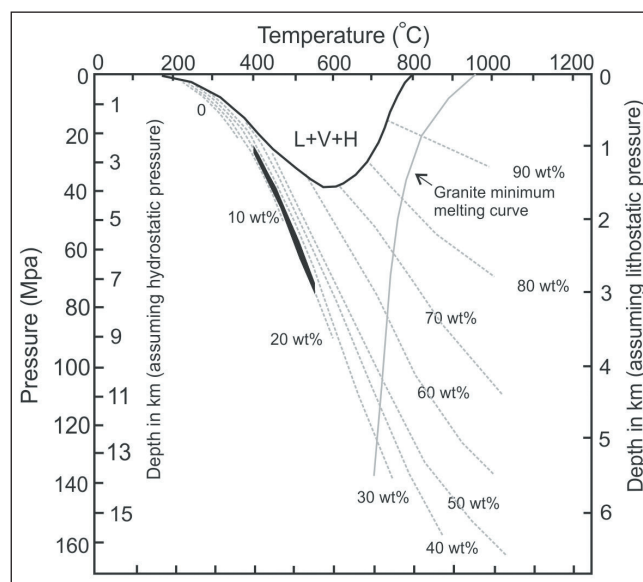


شکل ۱۲- مقایسه دما و شوری محلول کانه دار در سیالات درگیر نوع LV در رگچه های مس- طلا دار دگرسانی های سیلیسی- سرسیتیک شدید و پروپلیتیک- سیلیسی شدید منطقه نامق با محدوده کانسارهای پورفیری (Wilkinson, 2001) و سیالات درگیر مشابه در دگرسانی کوارتز- سرسیت- پیریت برخی کانسارهای مس پورفیری ایران (سرچشمه از Hezarkhani, 2006، سونگون از Calagari (2004) و ماهرآباد از ملکزاده شفارودی (۱۳۸۸)).

کمر بند ماگمایی خواف- کاشمر- بردسکن به دلیل موقعیت زمین ساختی و ویژگی هایی ماگمایی خود پتانسیل بالایی برای تشکیل ذخایر پورفیری دارد که متأسفانه تاکنون کمتر به آن پرداخته شده است. کریم پور و همکاران (۱۳۸۵) برای اولین بار منطقه تورچره در حدود ۱۷ کیلومتری غرب منطقه نامق را به عنوان یک ذخیره طلا- مس پورفیری معرفی کردند. بنابراین ضرورت دارد بخش های مختلف این کمر بند به خصوص بخش های مرکزی آن که دارای اندیس های مس فراوان هستند؛ با نگاه اکتشاف کانسارهای بزرگ مس- طلا پورفیری مورد بازبینی قرار گیرد. بی شک اکتشاف این نوع ذخایر بزرگ گام مثبتی در جهت رونق اقتصادی در شمال خاور ایران خواهد بود.

همچنین در نمودار دما- شوری و محدوده انواع مختلف محلول های کانه دار، مدل مخلوط شدگی آب ماگمایی گرم و شور با آب متئوریتی سرد و با شوری کم، بهترین مدل برای تشکیل رگچه های مس- طلا دار دگرسانی های سیلیسی- سرسیتیک شدید و پروپلیتیک- سیلیسی شدید در منطقه نامق است (شکل ۱۰). لازم به ذکر است که اگر چه تعدادی از نمونه ها در محدوده آب دگرگونی قرار گرفته اند؛ اما از آنجایی که هیچ گونه شواهدی از دگرگونی ناحیه ای در منطقه وجود ندارد؛ وجود این نوع سیال منتفی است.

کاهش دما و غلظت HCl که معمولاً در زون جوشش اتفاق می افتد؛ می تواند دو عامل مهم تشکیل کانی سازی و ته نشینت سولفیدها باشد. همچنین فرایند مخلوط شدگی بین محلول ماگمایی گرم و شور و محلول جوی سرد و با شوری کم می تواند باعث کاهش دما، ناپایداری کمپلکس ها و ته نشینی فلزات شود. با توجه به محدوده دمایی و شوری رگچه های مس- طلا دار دگرسانی های سیلیسی- سرسیتیک شدید و پروپلیتیک- سیلیسی شدید منطقه نامق، این کانی سازی در فشار بین ۳۰ تا ۷۰ مگاپاسکال و در عمق بین ۱ تا ۳ کیلومتری (برپایه فشار لیتوستاتیک) تشکیل شده است (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- نمودار دما- فشار- عمق در سیستم H₂O-NaCl (Fournier, 1999) و موقعیت محلول کانه دار منطقه نامق در آن. L=مایع، V=بخار، H=هالیت. خط چین ها نشان دهنده مقدار شوری محلول، خط خاکستری نشان دهنده منحنی ذوب حداقل گرانیب و خط سیاه نشان دهنده مرز سه فاز برای سیستم NaCl-KCl-H₂O با Na/K در محلول به تعادل رسیده با آلینت و فلدسپار آلکالی در حرارت نشان داده شده هستند.

۸-۲. مدل کانی سازی

کانی سازی مس- طلای نامق در کمان ماگمایی خواف- کاشمر- بردسکن تشکیل شده که حاصل فرو رانش اقیانوس نئوتیس است. از آنجایی که کانه زایی در توده های نفوذی مونوزودیوریتی و سنگ های آتشفشانی مجاور آنها دیده می شود و از طرفی بالاترین مقادیر آنومالی مس و طلا مربوط به این واحدهاست؛ لذا دایک ها و استوک مونوزودیوریتی منشأ اصلی کانی سازی منطقه هستند. گسترش دگرسانی ها و نوع آنها، به ویژه زون سیلیسی- سرسیتیک شدید که از اهمیت خاصی برخوردار است، حکایت از وجود یک کانی سازی بزرگ مانند پورفیری ها در منطقه دارد. علاوه بر آن، شکل و حالت کانی سازی، نوع کانی ها و وجود رگچه های خاکستری رنگ کوارتز یکی از نشانه های ذخایر پورفیری است. همه این شواهد در کنار بررسی های ژئوشیمیایی

۹- نتیجه‌گیری

موقعیت تکتونیکی، شواهد سنگ‌شناسی، نوع و گسترش آلتراسیون‌ها، شکل، حالت و مقدار کانی‌سازی، نوع کانه‌ها، ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی و بررسی میانبارهای سیال نشان می‌دهد که احتمالاً یک کانی‌سازی مس-طلا پورفیری در عمق منطقه نامق حضور و هم‌اکنون در سطوح فرسایشی فوقانی آن قرار دارد.

سپاسگزاری

این مقاله با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۳/۴۱۰۸۳ مورخ ۱۳۹۵/۴/۱ انجام شده است. از زحمات جناب آقای مهندس خواجه‌زاده به دلیل همکاری‌های لازم در بهتر انجام شدن عملیات صحرایی پروژه تشکر می‌شود.

دایک‌های مونزودیوریتی به دلیل وجود کانی‌سازی رگچه‌ای و پراکنده، آلتراسیون‌های سرسیتیک-سیلیسی و ناهنجاری بالای عناصری مانند مس و طلا عامل تشکیل کانه‌زایی منطقه نامق هستند. بر مبنای مطالعات میانبارهای سیال، دمای تشکیل محلول کانه‌دار در منطقه نامق بین ۴۰۴ تا ۵۵۱ درجه سانتی‌گراد بوده و از محلولی محتوی نمک‌های NaCl و $CaCl_2$ با درجه شوری بین ۱۶ تا ۲۳ درصد وزنی به وجود آمده است. مدل مخلوط‌شدگی آب ماگمایی گرم و شور با آب متوریتی سرد و با شوری کم، شرایط را برای ته‌نشست مس و طلا از کمپلکس‌های کلریدی فراهم کرده است.

کتابنگاری

- الماسی، ع.، کریم‌پور، م. ح.، ابراهیمی نصرآبادی، خ.، رحیمی، ب.، کلوتزلی، ا. و سانتوز، ج. ف.، ۱۳۹۴- زمین‌شناسی، کانی‌سازی، سن سنجی U-Pb و ژئوشیمی ایزوتوپ‌های Sr-Nd توده‌های نفوذی شمال شرقی کاشمر، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، جلد ۷، شماره ۱، صص. ۶۹ تا ۹۰.
- بهروزی، ا.، ۱۳۶۶- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ فیض‌آباد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- کریم‌پور، م. ح.، سعادت، س. و ملکزاده شفارودی، ا.، ۱۳۸۱- شناسایی و معرفی کانی‌سازی نوع Fe oxide (Cu-Au) و مگنتیت مرتبط با کمر بند ولکانیکی-پلوتونیک خواف-کاشمر-بردسکن. بیست و یکمین گردهمایی علوم زمین.
- کریم‌پور، م. ح.، سعادت، س. و ملکزاده شفارودی، ا.، ۱۳۸۵- ژئوشیمی، پترولوژی و کانی‌سازی طلای-مس پورفیری تنورچه، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد ۳۳، شماره ۳، صص. ۱۷۳ تا ۱۸۵.
- گلمحمدی، ع.، کریم‌پور، م. ح.، ملکزاده شفارودی، ا. و مظاهری، س. ا.، ۱۳۹۲- پترولوژی و سن سنجی زیرکن به روش U-Pb در توده‌های نفوذی مناطق A، C جنوبی و درودی، معدن سنگ آهن سنگان خواف، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، جلد ۵، شماره ۲، صص. ۱۵۵ تا ۱۷۳.
- مظلومی، ع.، کریم‌پور، م. ح.، رسا، ا.، رحیمی، ب. و وثوقی عابدینی، م.، ۱۳۸۷- کانسار طلای کوه زر تربت حیدریه، مدل جدیدی از کانی‌سازی طلا، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۳، صص. ۳۶۳ تا ۳۷۶.
- ملکزاده شفارودی، ا.، ۱۳۸۸- زمین‌شناسی، کانی‌سازی، آلتراسیون، ژئوشیمی، میکروترموتری، مطالعات ایزوتوپی و تعیین منشأ کانی‌سازی مناطق اکتشافی ماهرآباد و خویک، استان خراسان جنوبی، رساله دکتری (Ph.D) زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد، ۶۰۰ ص.
- ملکزاده شفارودی، ا. و کریم‌پور، م. ح.، ۱۳۹۱- زمین‌شناسی، کانی‌سازی و مطالعات سیالات درگیر کانسار سرب-روی-مس حوض رئیس، غرب ایران، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۶، صص. ۶۳ تا ۷۳.

References

- Beane, R. E., 1983- The Magmatic-Meteoritic Transition. Geothermal Resources Council, Special Report 13: 245-253.
- Calagari, A. A., 2004- Fluid inclusion studies in quartz veinlets in the porphyry copper deposit at Sungun, East-Azarbaidjan, Iran. Journal of Asian Earth Sciences 23: 179-189.
- Fournier, R. O., 1999- Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment. Economic Geology 94: 1193-1212.
- Golmohammadi, A., Karimpour, M. H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Mazaheri, S. A., 2015- Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran. Ore Geology Reviews 65: 545-563.
- Hezarkhani, A., 2006- Hydrothermal evolution of the Sar-Cheshmeh porphyry Cu-Mo deposit, Iran: Evidence from fluid inclusions. Journal of Asian Earth Sciences 28: 409-422.
- Lecumberri-Sanchez, P., Steel-MacInnis, M. and Bodnar, R. J., 2012- A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance. Geochimica et Cosmochimica Acta 92: 14-22.
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M. H. and Golmohammadi, A., 2013- Zircon U-Pb geochronology and petrology of intrusive rocks in the C-North and Baghak districts, Sangan iron mine, NE Iran, Journal of Asian Earth Sciences 64: 256-271.
- Roedder, E., 1984- Fluid inclusions. Reviews in Mineralogy 12, 644 pp.
- Seward, T. M., 1973- Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal solutions. Geochimica et Cosmochimica Acta 37: 379-399.
- Seward, T. M., 1991- The hydrothermal geochemistry of gold, in: Foster, R.P. (ed.), gold metallogeny and exploration, Blackie and Sons Ltd. 432 p.
- Shafaii Moghadam, H., Li, X. H., Ling, X. X., Santos, J. F., Stern, R. J., Li, Q. L. and Ghorbani, G., 2015- Eocene Kashmar granitoids (NE Iran): Petrogenetic constraints from U-Pb zircon geochronology and isotope geochemistry. Lithos 216-217: 118-135.
- Shepherd, T. J., Rankin, A. H. and Alderton, D. H. M., 1985- A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies. Blackie and Son, 239 pp.
- Steele-MacInnis, M., Lecumberri-Sanchez, P. and Bodnar, R. J., 2012- HOKIEFLINCS-H2O-NACL: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H2O-NaCl. Computer in Geosciences 49: 334-337.
- Ulrich, T., Gunther, D. and Heinrich, C. A., 2002- Evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions: Bajo de la Alumbrera, Argentina. Economic Geology 97: 1888-1920.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W., 2010- Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist 95: 185-187.
- Wilkinson, J. J., 2001- Fluid Inclusion in Hydrothermal Ore Deposits. Lithos 55: 229-272.

Evidence for probable porphyry Cu-Au mineralization in the Namegh area, Northeast of Kashmar: geology, alteration, mineralization, geochemistry, and fluids inclusion studies

H. Taqadosi¹ and A. Malekzadeh Shafaroudi^{2*}

¹M.Sc. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

²Associate Professor, Research Center for Ore Deposit of Eastern Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received: 2017 April 26

Accepted: 2017 August 29

Abstract

The Namegh area is located in northeastern Kashmar, Khorasan Razavi province, and central part of the Khaf-Kashmar-Bardaskan magmatic belt. The area is covered by Eocene volcanic rocks having andesite to rhyolite compositions, which are intruded by subvolcanic intrusions having monzonite, monzodiorite, and diorite compositions. All these units are affected by well development alteration, which are silicified-sericitic, moderate argillic, and propylitic alteration zones. Mineralization is occurred as stockwork and disseminated. The primary minerals include chalcopyrite, pyrite, magnetite, and gold. The secondary minerals are goethite, hematite, malachite, and azurite. High anomaly of Cu (up to 1%) and Au (up to 12 ppm) are correlated with strong silicified-sericitic alteration. Based on fluid inclusion studies, formation temperature of mineralization was between 404 to 551 °C and it occurred by NaCl⁺ and CaCl²-bearing fluid with 16 to 23 wt. % NaCl equivalent salinity. Decrease of temperature and HCl activity during boiling and decrease of temperature due to mixing of magmatic and meteoric fluids could be the most important factors for mineralization. Evidence of tectonic setting, lithology, development and types of alteration, mineralization form and limited outcrops, types of ore minerals, geochemical anomalies, types of fluid inclusions, and temperature and salinity of fluid indicate that the mineralization of Namegh is probably upper level of a porphyry Cu-Au deposit. The Khaf-Kashmar-Bardaskan belt can be one of the most important porphyry deposits metallogenic zones of Iran due to tectonic setting and magmatic-mineralization evidence, which needs detailed exploration in the future.

Keywords: Mineralization, Geochemistry, Fluids inclusion, Porphyry Cu-Au, Namegh

For Persian Version see pages 105 to 114

*Corresponding author: A. Malekzadeh Shafaroudi; E-mail: shafaroudi@um.ac.ir