

کانی‌شناسی، دگرسانی، زمین‌شیمی و بررسی سیال‌های درگیرانی‌سازی اکسید آهن - مس منطقه نامق، شمال شرقی کاشمر

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

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت مقاله: ۹۶/۴/۲۱، نسخه نهایی: ۹۶/۹/۴)

چکیده: منطقه نامق در شمال شرق کاشمر، استان خراسان رضوی، و در مرکز کمربند ماگمایی خواف-کاشمر- بردسکن واقع است. زمین‌شناسی منطقه پوشیده از تراکی‌اندزیت و واحدهای آذرآواری شامل توف تراکی‌اندزیتی تا ریولیتی است که دایک‌های مونزودیوریتی در آنها نفوذ کرده‌اند. کانی‌سازی به شکل رگه‌ای با امتداد شمال شرقی- جنوب غربی و شیب ۷۵ درجه به سمت شمال شرقی، در پهنه‌های گسلی و در سنگ میزبان تراکی‌اندزیت و توف تراکی‌اندزیتی تشکیل شده است. کانی‌های اولیه شامل اسپیکولاریت، کالکوپیریت و مگنتیت همراه با باطله کوارتز و کانی‌های ثانویه شامل گوتیت، هماتیت و ملاکیت است. سیلیسی شدن مهمترین دگرسانی همراه با کانی‌سازی است. ناهنجاری قابل ملاحظه مس تا بیش از دو درصد و مقادیر پایین طلا تا ۲۰ میلی گرم در تن در رگه دیده می‌شود. بر پایه بررسی سیال‌های درگیر، دمای تشکیل کانی‌سازی بین ۳۰۰ تا ۴۹۶ درجه سانتیگراد بوده و از محلولی شامل نمک‌های NaCl و CaCl₂ با درجه شوری ۱۱ تا ۲۲ درصد وزنی بوجود آمده است. آمیختگی دو سیال با دما- شوری بالا و دما- شوری پایین، باعث کاهش دما و شوری و رقیق‌شدگی شده و شرایط را برای ته‌نشست اکسید آهن و مس از کمپلکس‌های کلریدی فراهم کرده است. مدل آمیختگی آب ماگمایی و آب جوی بهترین مدل برای تشکیل رگه آهن- مس‌دار منطقه نامق است. این کانی- سازی در فشار ۱۰ تا ۶۰ مگاپاسکال و در عمقی بین ۰/۵ تا ۲ کیلومتر (برپایه فشار سنگ‌کره) تشکیل شده است. کنارزایی کانیایی، سنگ میزبان، دگرسانی، کنترل ساختاری و ماهیت محلول کانه‌دار نشان می‌دهد که کانی‌سازی از نوع گرمابی مس غنی از اکسید آهن (اکسید آهن- مس) است.

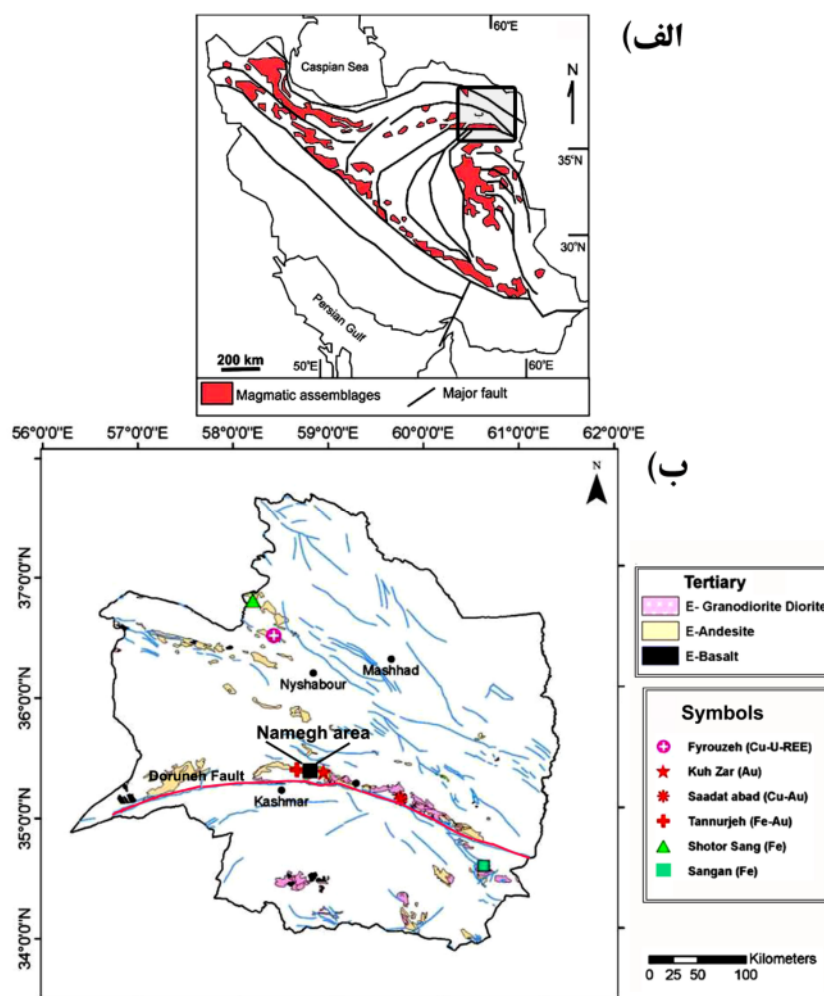
واژه‌های کلیدی: کانه‌زایی؛ دگرسانی؛ زمین‌شیمی؛ سیال‌های درگیر؛ اکسید آهن- مس؛ نامق؛ شمال شرق کاشمر.

مقدمه

ساختی تشکیل این کمربند ماگمایی مربوط به فرورانش بخشی از پوسته اقیانوسی نئوتتیس است [۲-۵]. موقعیت زمین‌ساختی و تنوع ماگمایی موجب شده است تا کمربند ماگمایی خواف- کاشمر- بردسکن به یکی از پهنه‌های مهم فلززایی ایران تبدیل شود؛ به طوریکه میزبان معادن مهمی همچون طلای نوع غنی از اکسید آهن کوه زر تربت حیدریه [۶]، مس- طلا- اورانیوم- عناصر خاکی نادر سبک نوع IOCG فیروزه نیشابور [۱]، اسکارن آهن سنگان [۷]، توده مگنتیت حاوی طلای تنورجه

کمربند آتشفشانی- نفوذی خواف-کاشمر- بردسکن با روند شرقی- غربی و با طول بیش از ۳۰۰ کیلومتر در شمال گسل درونه در شمال شرقی ایران قرار دارد [۱] (شکل ۱). این کمربند ماگمایی بیشتر از سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا حدواسط و بعضاً مافیک با سن ترشیاری تشکیل شده که توده‌های گرانیتوئیدی با ترکیب گرانیت تا مونزونیت در آنها نفوذ کرده‌اند. پژوهشگران مختلف نشان دادند که نظام زمین

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۵۱۳۸۸۰۵۴۸۸، نمابر: ۰۵۱۳۸۷۹۶۴۱۶، پست الکترونیکی: shafaroudi@um.ac.ir



شکل ۱ الف) کمرندهای ماگمایی ترشیاری ایران و موقعیت محدوده در شمال شرقی ایران، ب) موقعیت کمر بند آتشفشانی- نفوذی خواف- کاشمر- بردسکن در شمال گسل درونه در استان خراسان رضوی همراه با موقعیت کانی‌سازیهایی مهم آن (برگرفته از مرجع [۱] با اندکی تغییرات) و گستره مورد بررسی نامق.

۱). بهروزی [۱۲] این منطقه را از نظر زمین‌شناسی عمومی بررسی کرده و حاصل آن را به صورت برگه زمین‌شناسی فیض-آباد به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ منتشر نموده است. هیچگونه تاریخچه مطالعاتی از منطقه نامق وجود ندارد و کانی‌سازی آن برای نخستین بار در این مقاله به تفصیل معرفی می‌شود. هدف از این پژوهش تهیه نقشه زمین‌شناسی-کانی‌سازی با مقیاس مناسب، بررسی دگرسانی‌ها، کانی‌شناسی و تعیین توالی کنارزایی، زمین‌شیمی و بررسی سیال‌های درگیر رخداد کانه-زایی رگه اکسید آهن-مس در منطقه نامق است.

روش بررسی

در راستای تهیه نقشه زمین‌شناسی و دگرسانی، نخست برداشت اطلاعات صحرایی و نمونه‌برداری از واحدهای سنگی در منطقه-

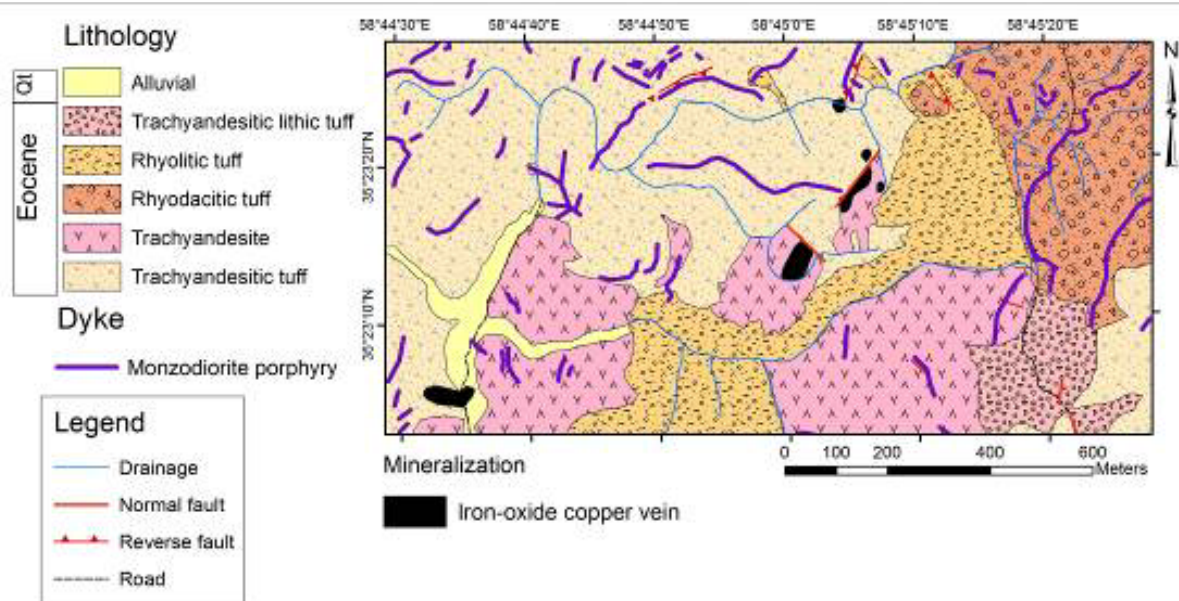
[۸] و توده‌های مگنتیت-اسپیکولاریت حاوی مس-طلا سعادت‌آباد [۹]، اسکارن آهن شترسنگ [۱۰] همراه با تعداد زیادی منطقه اکتشافی و نهشته مس و آهن است (شکل ۱). کریم‌پور و همکاران [۱۱] عقیده دارند که این کمر بند ماگمایی پتانسیل بالایی برای تشکیل ذخایر مس-طلا غنی از اکسید آهن (IOCG) و کانی‌سازی مگنتیت دارد. منطقه نامق در شمال شرقی شهر کاشمر در استان خراسان رضوی و ۵ کیلومتری روستای نامق حد فاصل $30^{\circ} 44' 58''$ - $20^{\circ} 45' 45''$ عرض $35^{\circ} 23' 30''$ - $35^{\circ} 23' 00''$ طول جغرافیایی و این منطقه در مرکز کمر بند آتشفشانی-نفوذی خواف-کاشمر- بردسکن واقع است که به لحاظ وجود تعداد زیادی معدن آهن، مس، عناصر خاکی نادر، طلا و نهشته-های مس، طلا و آهن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (شکل

در مرحله سرد و گرم کردن $\pm 1^\circ\text{C}$ و گستره دمایی آن بین (-190) تا $(+600)$ درجه سانتیگراد است. مقدار شوری و چگالی در سیستم $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ با استفاده از نرم‌افزار موجود در برنامه اکسل HOKIEFLINCS- $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ [۱۴،۱۳] محاسبه شد. نمودارهای ستونی مربوطه در نرم‌افزار SPSS ترسیم شد.

زمین‌شناسی

منطقه نامق در شمال برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ فیض‌آباد [۱۲] قرار دارد. براساس این نقشه، سنگ‌شناسی گستره نامق شامل واحد توف برشی سفیدرنگ، ایگنمبریت، لاپیلی‌توف و توف‌های ماسه‌ای به رنگ سبز به سن ائوسن است. این در حالی است که بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی این پژوهش نشان داد که علاوه بر وجود انواع مختلف سنگ‌های آتشفشانی به شکل آذرآواری و گدازه، توده‌های نفوذی نیمه عمیق حدواسط متعددی با ترکیب مونزودوریت به شکل دایک در منطقه وجود دارد که در واحدهای آتشفشانی نفوذ کرده‌اند. بیشترین بخش اعظم منطقه نامق را سنگ‌های آتشفشانی ترشیاری پوشانده‌اند که شامل تراکی‌آندزیت به شکل گدازه و واحدهای آذرآواری توف تراکی‌آندزیتی، توف سنگی تراکی‌آندزیتی، توف ریوداسیتی و توف ریولیتی هستند (شکل ۲). از این میان واحدهای توف تراکی‌آندزیتی و تراکی‌آندزیت گدازه شکل بیشترین گسترش را دارند.

ای به وسعت تقریبی ۲ کیلومتر مربع انجام شد. بیش از ۵۵ نمونه از سطح منطقه جمع‌آوری شد که از این میان ۳۵ مقطع نازک برای بررسی‌های سنگ‌شناسی و دگرسانی و ۲۰ مقطع نازک صیقلی و قطعه صیقلی جهت بررسی‌های کانه‌زایی و تعیین توالی کنارزایی تهیه شدند. نقشه زمین‌شناسی-کانی-سازی منطقه با نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. جهت بررسی‌های زمین‌شیمی از پهنه‌های کانی‌سازی، تعداد ۱۱ نمونه خرده سنگی برداشت شد و به روش طیف‌سنجی نشری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) با آماده‌سازی نمونه به روش محلول در تیزاب سلطانی برای عناصر مس، سرب، روی و غیره و روش عیارسنجی گرمایی برای طلا در آزمایشگاه زراژما تجزیه شدند. همچنین برای بررسی سیال‌های درگیر، پس از بررسی-های دقیق کنارزایی کانی کوارتز (مهمترین باطله همراه با کانی‌سازی) تعداد ۱۰ مقطع دوبرصقل (پوک) از آن تهیه شد و داده‌های دماسنجی، نوع نمک‌ها و مقدار شوری محلول کانه-ساز آنها تعیین شد. آزمایش‌های مربوطه با استفاده از یک دستگاه سردکننده و گرم‌کننده مدل THM 600 ساخت شرکت لینکام در دانشگاه فردوسی مشهد صورت گرفت. واسنجی دستگاه در دمای پایین توسط هپتان (-90.6°C)، کلروفرم (-63°C)، کلروبنزن (-45.6°C)، آن-دودکان ($^\circ\text{C}$) و آب مقطر (صفر درجه سانتیگراد) و در 30.6°C درجه سانتیگراد توسط نیترات سدیم انجام می‌شود. دقت کار دستگاه



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی-کانی‌سازی منطقه نامق.

واحد توف تراکی‌آندزیتی که بیشترین گسترش را در منطقه دارد در بخش مرکزی، غرب و شمال منطقه رخنمون دارد و میزبان بخشی از کانی‌سازی رگه‌ای است (شکل ۲). این واحد توسط دایک‌های متعدد مونزودیوریتی مورد نفوذ قرار گرفته است. رنگ آن در صحرا خاکستری مایل به سبز روشن بوده که تحت تاثیر دگرسانی سیلیسی شدید و سرسیتی- پروپلیتیک ضعیف قرار گرفته است. این واحد دارای بافت پورفیری است و بلورهای پلاژیوکلاز به اندازه ۲ تا ۲ میلی‌متر در آن دیده می‌شود. واحد تراکی‌آندزیت گدازه شکل در بخش مرکزی و جنوبی منطقه رخنمون دارد (شکل ۲). رنگ آن در صحرا خاکستری تیره بوده و دچار دگرسانی شدید سیلیسی شده است. بافت این واحد نیز پورفیری بوده و دارای بلورهای پلاژیوکلاز به اندازه ۳ میلی‌متر است. بخشی دیگر از کانی‌سازی اکسید آهن - مس نامق در این واحد تشکیل شده است. واحد توف ریوداسیتی در بخش شمال شرقی منطقه رخنمون دارد (شکل ۲). این واحد در صحرا به رنگ سفید مایل به زرد بوده و دچار دگرسانی سیلیسی- سرسیتی شدید شده است. بلورهای کوارتز به اندازه تا یک میلی‌متر در آن به چشم می‌خورد. واحد توف ریولیتی در بخش شرقی و جنوبی منطقه رخنمون دارد (شکل ۲). این واحد در صحرا به رنگ سفید بوده و دچار دگرسانی سیلیسی- سرسیتی متوسط و آرژیلی شدید شده است. در بخش جنوبی رگه کانی‌سازی، تنها دستخوش دگرسانی شدید آرژیلی شده است. واحد توف خرده‌سنگی تراکی‌آندزیتی در بخش جنوب شرقی گستره مورد بررسی دیده می‌شود (شکل ۲). این واحد دچار دگرسانی شدید سیلیسی- سرسیتی شده است. اندازه خرده‌سنگ‌های تراکی‌آندزیتی از ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر متغیر است. گفتنی است که بخش عمده دگرسانی وسیع مشاهده شده در منطقه مربوط به حضور یک سیستم کانی‌سازی دیگر در ناحیه نامق است که موضوع بحث این مقاله نیست. دگرسانی مربوط به کانی‌سازی رگه‌ای سیلیسی شدید است که در بخش کانی‌سازی و دگرسانی توضیح داده می‌شود.

کانی‌سازی و دگرسانی

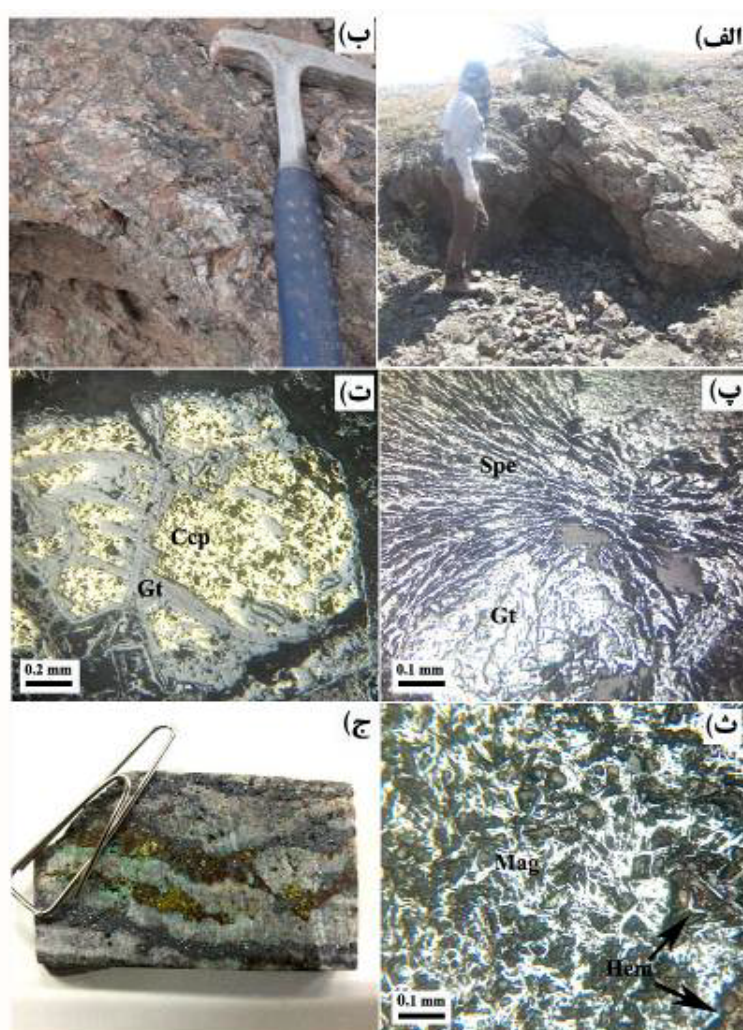
کانی‌سازی منطقه نامق کنترل ساختاری دارد و در سنگ‌های میزبان آتشفشانی تراکی‌آندزیت و توف تراکی‌آندزیتی بیشتر در مرکز و به طور محدودتر در شمال و جنوب غرب منطقه دیده می‌شود (شکل ۲). کانی‌سازی در سه رخنمون شمالی، مرکزی و جنوب شرقی در منطقه به چشم می‌خورد. رخنمون اصلی به شکل رگه‌ای با امتداد شمال شرقی- جنوب غربی و شیب ۷۵

درجه به سمت شمال شرقی، با طول تقریبی ۳۳ متر و عرض حدود ۱۰ متر دیده می‌شود (شکل‌های ۲ و ۳ الف). رخنمون غربی در منطقه با امتداد شرقی- غربی و شیب ۴۵ درجه به سمت شرق با طول ۲۰ متر و عرض ۱۰ متر و رخنمون شمالی با گستردگی اندک، طول تقریبی ۲ متر و عرض ۰/۵ متر دیده می‌شوند. کانی‌های اولیه شامل اسپیکولاریت، کالکوپیریت و مگنتیت همراه با کانی‌های غیرفلزی کوارتز و بسیار کمتر کلسیت و کانی‌های ثانویه شامل گوتیت، هماتیت و ملاکیت است (شکل ۳). سیلیسی‌شدن مهمترین دگرسانی همراه با رگه است که هم در خود رگه و هم در سنگ‌های میزبان دیده می‌شود. ساخت و بافت کانی‌سازی رگه- رگچه است که در بیشتر قسمت‌های رگه به دلیل حجم بالای کانی‌های اکسیدی و سولفیدی حالت توده‌ای پیدا کرده است. همچنین بافت پرکننده فضای خالی به ندرت دیده می‌شود. توالی کنارزایی کانی‌های اولیه و ثانویه فلزی و غیرفلزی رگه اکسید آهن- مس منطقه نامق در جدول (۱) نشان داده شده است.

کانی‌شناسی

اسپیکولاریت: اسپیکولاریت فراوان‌ترین کانی اکسیدی در منطقه نامق است که گاهی تا ۵۰ درصد حجم رگه را تشکیل می‌دهد (شکل ۳ ب). رنگ خاکستری سربی، آگرکات سوزنی، براق بودن و خاکه قرمز رنگ از مشخصه‌های مهم این کانی در نمونه دستی است. این کانی شکل‌دار به صورت تیغه‌ای تا صفحه‌ای بوده و طول آن از ۰/۵ تا ۱/۵ میلی‌متر متغیر است. اسپیکولاریت‌ها در اثر هوازدگی سطحی به مقدار ۱۰ تا ۱۵ درصد به گوتیت و به مقدار ۲۵ تا ۳۰ درصد به هماتیت تبدیل شده‌اند (شکل ۳ پ). تشکیل این کانی نشان‌دهنده گریزندگی بالای گاز اکسیژن در محلول کانه‌دار است.

کالکوپیریت: کالکوپیریت تنها کانی سولفیدی در منطقه نامق است که به طور متوسط ۱۰ تا ۱۵ درصد حجم رگه را تشکیل می‌دهد و البته در سرتاسر آن حضور ندارد. کالکوپیریت‌ها بی- شکل تا نیمه‌شکل‌دار بوده و اندازه آنها بین ۱ تا ۲ میلی‌متر متغیر است. در برخی نقاط این کانی در قالب رگچه‌هایی با بافت پرکننده فضای خالی و در وسط رگچه دیده می‌شود. همچنین قرارگیری آن در بین تیغه‌های اسپیکولاریت نشان می‌دهد که بخش عمده این کانی پس از اسپیکولاریت تشکیل شده است. کالکوپیریت‌ها بر اثر هوازدگی سطحی به مقدار ۲۰ تا ۲۵ درصد به گوتیت و ۱۵ تا ۲۰ درصد به ملاکیت تبدیل شده‌اند (شکل‌های ۳ ت و ج).



شکل ۳ الف) نمایی دور از رگه کانی‌سازی اکسید آهن- مس منطقه نامق، دید به سمت جنوب، ب) نمای نزدیک از رگه کانی‌سازی پ) تیغه‌های اسپکیولاریت و تبدیل آن به گوتیت، نور بازتابی (PPL). ت) تبدیل کالکوپیریت به گوتیت، نور بازتابی (PPL). ث) تبدیل مگنتیت سوزنی به هماتیت، نور بازتابی (PPL). ج) نمونه دستی از کانی‌سازی رگه‌ای اسپکیولاریت- کالکوپیریت- کوارتز و تبدیل آن به گوتیت و ملاکیت. =Spe اسپکیولاریت، =Ccp کالکوپیریت، =Mag مگنتیت، =Gt گوتیت و =Hem هماتیت. (مخفف‌ها برگرفته از مرجع [۱۵] هستند).

جدول ۱ توالی کنارزایی کانی‌سازی اکسید آهن- مس منطقه نامق.

Minerals	Hypogene		Oxidized zone
	Early	Late	
Specularite	—————		
Chalcopyrite		—————	
Magnetite		—————	
Quartz	—————		
Calcite		—————	
Malachite			—————
Goethite			—————
Hematite			—————

مگنتیت: مگنتیت به ندرت در رگه دیده شده می‌شود و به طور متوسط کمتر از ۴ درصد حجم رگه را تشکیل می‌دهد. این کانی تقریباً شکل‌دار بوده و به صورت تیغه‌ای همانند اسپکیولاریت‌ها دیده می‌شود و تنها با استفاده از آهنربا و به واسطه خاصیت مغناطیسی و خواص میکروسکوپی متفاوت (مانند نداشتن IR قرمز رنگ) تشخیص داده شده‌اند. اندازه تیغه‌های مگنتیت از ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر متغیر بوده و در مقایسه با اسپکیولاریت‌ها باریک‌تر هستند. این کانی به مقدار ۱۰ تا ۱۵ درصد در حال تبدیل به هماتیت است (شکل ۳ ث). رابطه تشکیل این کانی با اسپکیولاریت و کالکوپیریت به درستی مشخص نیست؛ اما به نظر می‌رسد که بیشتر همزمان با اسپکیولاریت تشکیل شده باشد.

کوارتز: کوارتز بیشترین و مهمترین کانی باطله همبرزاد با کانی‌های فلزی در منطقه نامق است که به صورت رگه- رگچه- ای و بیشتر پیش از کانه‌ها تا همزمان با کانی‌سازی سولفیدی و اکسیدی تشکیل شده است. به طور کلی، کوارتز از ۲۵ درصد تا گاهی بیش از ۶۰ درصد حجم رگه را تشکیل می‌دهد. براساس بررسی‌های آزمایشگاهی، این کانی دارای دو حالت ریزبلور با اندازه تقریبی ۰/۰۵ میلی‌متر و درشت بلور با اندازه تقریبی ۱ میلی‌متر است. حضور کوارتزهای ریزبلور در زمینه نشان می‌دهد که آنها پیش از درشت‌بلورها تشکیل شده‌اند و تشکیل کانه‌ها درون رگچه‌های درشت بلور بیانگر آن است که کوارتزهای درشت بلور همبرزاد اصلی اسپکیولاریت، کالکوپیریت و مگنتیت هستند. این کانی در بافت پرکننده فضای خالی بیشتر در کناره رگچه قرار گرفته که نشان‌دهنده تقدم تشکیل آن بر دیگر کانی- هاست (شکل ۳ ج).

کلسیت: رگچه‌های کلسیت تاخیری معمولاً کانه‌ها و کوارتز را قطع کرده‌اند. کلسیت به صورت رگچه‌های بسیار باریک به طور تقریبی ۳ تا ۵ درصد حجم رگه را تشکیل می‌دهد. براساس بررسی‌های میکروسکوپی، اندازه بلورهای کلسیت در این رگچه‌ها از ۰/۰۵ تا ۰/۱ میلی‌متر متغیر است.

هماتیت: هماتیت فراوانترین کانی اکسیدی ثانویه در منطقه نامق است که به طور کلی ۲۰ تا ۲۵ درصد حجم رگه را تشکیل می‌دهد. این کانی از دگرسانی ۲۵ تا ۳۰ درصد کانی اسپکیولاریت و ۱۰ تا ۱۵ درصد مگنتیت تشکیل شده است. بر اساس بررسی‌های صحرایی، این کانی به رنگ قرمز و به‌صورت

پراکنده در بخش‌های مختلف رگه دیده می‌شود (شکل‌های ۳ ب و ث).

گوتیت: گوتیت به طور کلی ۵ تا ۱۰ درصد حجم رگه را تشکیل می‌دهد و حاصل دگرسانی کانی‌های اسپکیولاریت (مقدار تبدیل ۱۰ تا ۱۵ درصد) و کالکوپیریت (مقدار تبدیل ۲۰ تا ۲۵ درصد) است. براساس بررسی‌های صحرایی، این کانی به رنگ قهوه‌ای تا سیاه با جلای قیری دیده می‌شود. براساس بررسی‌های میکروسکوپی، گوتیت حاصل دگرسانی کالکوپیریت به رنگ خاکستری تیره و دارای بافت گل‌کلمی است درحالی‌که گوتیت نتیجه دگرسانی اسپکیولاریت به رنگ خاکستری-سفید مایل به آبی دیده می‌شود (شکل‌های ۳ پ و ت).

مالاکیت: در منطقه مورد بررسی نامق، کانی مالاکیت تنها کانی ثانویه مس‌دار است که حاصل دگرسانی کالکوپیریت است. به طور کلی مالاکیت ۸ تا ۱۰ درصد حجم رگه را تشکیل می‌دهد. کالکوپیریت‌ها از کمتر از یک درصد تا گاهی ۲۰ درصد به مالاکیت تبدیل شده‌اند (شکل ۳ ج).

زمین‌شیمی رگه

نتایج زمین‌شیمی رگه اکسید آهن- مس نامق ۱۱ نمونه خرده- سنگی که به روش‌های ICP-OES و عیارسنجی گرمایی تجزیه شده‌اند. در جدول ۲ آورده شده است. میزان عنصر آهن بین ۴۱۹۳۰ گرم در تن تا بیشتر از ۱۰٪ متغیر است. اسپکیولاریت، گوتیت و هماتیت که مقدار آن‌ها گاهی تا ۵۰ درصد حجم رگه می‌رسد عامل بالا بودن مقدار آهن هستند. در ۱۱ نمونه خرده- سنگی، مقدار عنصر مس بین ۸۹ گرم در تن تا ۲/۸ درصد متغیر و متوسط آن ۰/۹ درصد است. بیشترین مقدار مس با مقدار بالاتر کالکوپیریت و مالاکیت در بخش‌هایی از رگه ارتباط دارد. در این ۱۱ نمونه خرده‌سنگی، مقدار عنصر طلا از کمتر از ۵ تا ۲۰ میلی‌گرم در تن متغیر و مقدار متوسط آن ۸ میلی‌گرم در تن است که مقدار قابل توجهی نیست. همچنین مقدار عنصر سرب بین ۳۱ تا ۱۴۶ و روی بین ۹۸ تا ۲۴۹ گرم در تن متغیر است. هر چند در مقدار این دو عنصر ناهنجاری وجود دارد، اما قابل توجه نیست و کانی مرتبطی نیز دیده نشده است. مقدار آرسنیک بین ۱۷ تا ۳۰ گرم در تن متغیر است که مقادیر بالایی محسوب نمی‌شود (جدول ۲). همبستگی مشخصی بین عناصر دیده نمی‌شود. بیشترین مقادیر طلا، سرب و روی و کمترین مقدار آهن در رگه جنوب غربی منطقه دیده می‌شود (نمونه A11) (شکل ۲).

جدول ۲ نتایج تجزیه عناصر مهم در نمونه‌های خرده‌سنگی برداشت شده از موقعیت‌های کانی‌سازی در منطقه نامق به روش ICP-OES و عیارسنجی گرمایی (همه عناصر جز طلا برحسب گرم در تن و طلا برحسب میلی‌گرم در تن).

شماره نمونه	موقعیت	Fe	Cu	Pb	Zn	As	Au
A ₁	۵۸° ۴۵' ۰۵" ۳۵° ۲۳' ۱۹"	۸۵۵۵۶	۸۹۵۴	۱۱۵	۱۵۸	۲۱	۹
A ₂	۵۸° ۴۵' ۰۶" ۳۵° ۲۳' ۱۹"	۹۲۱۴۷	۵۸۲۳	۳۴	۱۴۳	۳۰	۸
A ₃	۵۸° ۴۵' ۰۶" ۳۵° ۲۳' ۱۸"	۹۲۲۲۰	۴۹۶۷	۲۹	۱۲۵	۲۵	۶
A ₄	۵۸° ۴۵' ۰۵" ۳۵° ۲۳' ۱۸"	۹۸۰۱۶	۱۰۳۰۴	۳۶	۱۳۳	۲۵	<۵
A ₅	۵۸° ۴۵' ۰۶" ۳۵° ۲۳' ۱۸"	>۱۰	۴۵۷۷	۳۹	۹۸	۲۰	۵
A ₆	۵۸° ۴۵' ۰۵" ۳۵° ۲۳' ۱۷"	۹۱۱۹۲	۷۶۴۶	۳۱	۱۳۷	۲۳	<۵
A ₇	۵۸° ۴۵' ۰۵" ۳۵° ۲۳' ۱۷"	۹۶۲۷۶	۸۸۹۹	۳۵	۱۱۷	۱۷	۱۲
A ₈	۵۸° ۴۵' ۰۵" ۳۵° ۲۳' ۱۷"	>۱۰	۱۲۲۲۹	۳۵	۱۱۲	۱۷	۶
A ₉	۵۸° ۴۵' ۰۵" ۳۵° ۲۳' ۱۸"	۹۱۵۲۱	۶۷۲۴	۳۷	۱۲۴	۲۳	۶
A ₁₀	۵۸° ۴۵' ۰۶" ۳۵° ۲۳' ۲۵"	۷۹۶۵۸	۲۸۳۶۰	۸۱	۱۳۸	۲۳	۸
A ₁₁	۵۸° ۴۴' ۳۴" ۳۵° ۲۳' ۰۵"	۴۱۹۳۰	۸۹	۱۴۶	۲۴۹	۲۲	۲۰

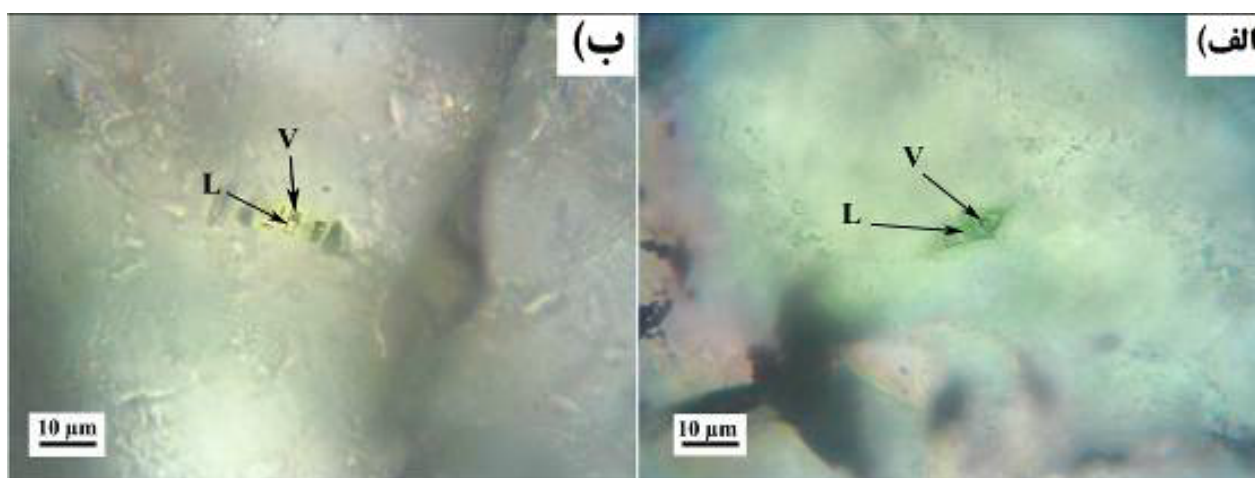
سیال‌های درگیر

بررسی سیال‌های درگیر برای تعیین دماسنجی، تعیین نوع نمک‌ها و مقدار شوری محلول کانه‌دار در کانسارهای مختلف به کار می‌رود. البته پیش از آن باید بررسی‌های دقیق کنارزایی انجام شده و کانی‌هایی انتخاب شوند که تشکیل آنها از محلول کانه‌دار تایید شده باشد. در منطقه نامق، کانی کوارتز مهم‌ترین کانی باطله همراه با رگه اکسید آهن- مس محسوب می‌شود. سیال‌های درگیر در ۱۰ نمونه دوبرصیقل از رگه کوارتز- اسپکیولاریت- کالکوپیریت $\pm$ مگنتیت که دارای سیال‌های درگیر با اندازه مناسب بودند، بررسی شد. دماسنجی به روش گرمایش بر ۱۵۸ سیال درگیر انجام شد و نوع نمک‌ها و مقدار شوری به روش سرمایش برای ۱۰۸ سیال درگیر تعیین گردید.

بررسی‌های سنگ‌نگاری سیال‌های درگیر اولیه در کوارتز نشان داد که آن‌ها به صورت مثلثی، استوانه‌ای، بیضوی، مستطیلی و بی‌شکل در اندازه‌های دست کم ۴ تا ۴۰ میکرون هستند و بیشتر در ابعاد کمتر از ۱۵ میکرون مشاهده می‌شوند (شکل ۴). براساس تقسیم‌بندی‌های متداول [۱۶، ۱۷]، سیال‌ها از نوع سه-فازی غنی از مایع (LVS)، دوفازی غنی از مایع (LV, LS)، تک فاز مایع (L) و تک فاز گازی (V) هستند که فاز جامد در سیال‌های نوع LVS و LS اکسید آهن است (شکل‌های ۴ الف و ب). فاز جامد اکسید آهن میله‌ای و دایره‌ای، قرمز رنگ و با اندازه تقریبی ۱ تا ۲ میکرون دیده می‌شود. مقدار سیال‌های تک فازی L بیش از بقیه است. سیال‌های درگیر ثانویه بیشتر از نوع مایع است و اندازه آن‌ها به ۴ میکرون می‌رسد. اندازه‌گیری‌های

در سیال‌های درگیر اولیه وجود دارند. دمای ذوب نهایی (T_m) بین -20°C تا -7°C درجه سانتیگراد با میانگین $-15/6^\circ\text{C}$ درجه سانتیگراد است (شکل ۵ ب). دمای نهایی ذوب نیز مقدار شوری را تعیین می‌کند. براساس سیستم $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ [۱۳]، مقدار شوری محلول کانه‌دار بین ۱۱ تا ۲۲ درصد وزنی با میانگین ۱۹ محاسبه شد (شکل ۵ پ). مقدار چگالی سیال‌های درگیر نیز بین $0/4$ تا $0/63$ گرم بر سانتیمتر مکعب متغیر است (جدول ۳).

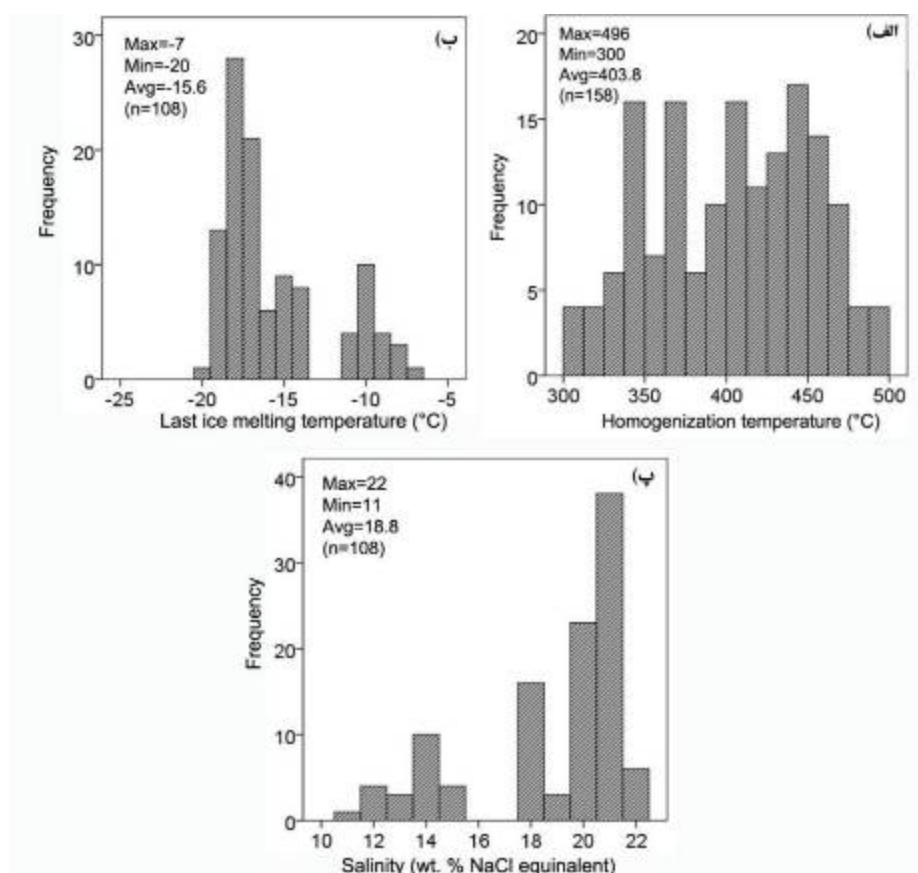
دماسنجی، تعیین نوع محلول و مقدار شوری برای سیال‌های درگیر اولیه نوع LV و LVS انجام شد (جدول ۳). دمای همگن شدگی (T_h) در سیال‌های درگیر اولیه بین 300 تا 496°C درجه سانتیگراد با میانگین $403/8^\circ\text{C}$ درجه سانتیگراد است (شکل ۵ الف). نخستین دمای ذوب‌شدگی (T_{fm}) بین -59°C تا -55°C درجه سانتیگراد با میانگین $-56/4^\circ\text{C}$ درجه سانتیگراد است. نخستین دمای ذوب‌شدگی رابطه مستقیمی با ترکیب نمک موجود در سیال گرمایی دارد [۱۷]. بر اساس مقادیر T_{fm} بدست آمده، نمک‌های CaCl_2 و NaCl



شکل ۴ سیال‌های درگیر منطقه نامق: الف) سیال درگیر مستطیلی سه‌فازی (LVS)، ب) سیال درگیر استوانه‌ای دوفازی (LV).

جدول ۳ خلاصه نتایج بررسی سیال‌های درگیر نوع LV و LVS در کوارتزهای رگه کوارتز-اسپیکولاریت-کالکوپیریت $\pm$ مگنتیت در منطقه نامق.

نمونه	اندازه (μm)	دمای همگن شدگی ($^\circ\text{C}$)	نخستین دمای ذوب‌شدگی ($^\circ\text{C}$)	آخرین دمای ذوب شدگی ($^\circ\text{C}$)	شوری (درصد وزنی)	چگالی (gr/cm^3)
N-1	۴ تا ۸	300 تا 347	$-55/8$ تا -55	$-8/8$ تا $-7/3$	$10/9$ تا $12/6$	$0/4$ تا $0/42$
N-3	۵ تا ۱۰	326 تا 383	$-55/8$ تا $-55/4$	$-19/6$ تا $-18/3$	$21/2$ تا $22/1$	$0/62$ تا $0/64$
N-5	۶ تا ۱۶	383 تا 419	$-56/7$ تا -55	$-16/7$ تا -15	$18/6$ تا 20	$0/59$ تا $0/64$
N-6	۷ تا ۱۰	422 تا 470	$-56/7$ تا $-55/1$	$-17/2$ تا $-16/4$	$19/8$ تا $20/4$	$0/60$ تا $0/61$
N-7	۵ تا ۴۰	428 تا 466	-57 تا $-55/7$	$-18/6$ تا -17	$20/2$ تا $21/4$	$0/61$ تا $0/63$
N-20	۶ تا ۲۰	430 تا 496	$-58/7$ تا $-56/1$	$-18/6$ تا $-17/6$	$20/7$ تا $21/3$	$0/61$ تا $0/63$
N-43	۸ تا ۲۰	385 تا 490	$-56/9$ تا $-55/1$	$-18/6$ تا $-16/4$	$19/8$ تا 21	$0/60$ تا $0/63$
N-63	۷ تا ۲۴	345 تا 426	$-58/4$ تا $-55/2$	$-10/7$ تا $-9/8$	$13/7$ تا $14/8$	$0/46$ تا $0/48$
N-90	۵ تا ۸	359 تا 375	$-56/9$ تا $-55/2$	$-14/8$ تا -14	$17/8$ تا $18/5$	$0/55$ تا $0/57$
N-97	۴ تا ۱۲	438 تا 477	$-56/7$ تا $-55/4$	$-19/2$ تا $-18/7$	$20/7$ تا $21/8$	$0/62$ تا $0/63$



شکل ۵ نمودارهای ستونی. الف) دمای همگن‌شدگی، ب) آخرین دمای ذوب‌شدگی و پ) مقدار شوری سیال‌های درگیر.

بحث و برداشت

کانی‌سازی اکسید آهن-مس نامق با کنترل ساختاری در سنگ میزبان آتشفشانی به سن ترشیاری تشکیل شده است. کانی-شناسی اصلی رگه، اسپیکولاریت-کالکوپیریت با مقادیر کمی مگنتیت و همراهی کانی کوارتز به عنوان مهمترین کانی باطله است. سنگ میزبان نیز در اثر تشکیل این رگه دچار دگرسانی سیلیسی و کمتر پروپلیتیک شده است. تجزیه‌های زمین‌شیمی نشان می‌دهد که مهمترین ناهنجاری رگه مربوط به عنصر مس است و طلا (دست کم در نمونه‌های برداشت شده) مقادیر قابل توجهی ندارد. چنان که در مقدمه بیان شد کمر بند ماگمایی خواف - کاشمر - بردسکن فراورده پهنه فروانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس است و پتانسیل بالایی برای انواع کانی-سازی‌های مختلف به ویژه ذخایر IOCG دارد. منطقه نامق در فاصله حدود ۱۷ کیلومتری غرب معدن طلای کوه زر که از نوع IOCG است [۶]، قرار دارد و اگرچه در نمونه‌های خرده‌سنگی برداشت شده از سطح، ناهنجاری بالای طلا دیده نشده است، اما از طرف دیگر ویژگی‌های زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی-

سازی آن بسیار شبیه کوه زر است. با توجه به این مطالب و اینکه بررسی‌ها و برداشت‌های انجام شده در این پژوهش مربوط به سطح بوده و هیچگونه داده عمقی از منطقه وجود ندارد و تعداد نمونه‌برداری زمین‌شیمیایی نیز محدود بوده است، رخداد کانه‌زایی نامق را در حال حاضر می‌توان یک کانی‌سازی گرمابی مس غنی از اکسید آهن (IOC) معرفی کرد که اثبات IOCG بودن آن به طور قطع نیازمند داده‌های تفصیلی عمقی است. بر مبنای بررسی سیال‌های درگیر، دمای تشکیل محلول کانه‌دار منطقه نامق بین ۳۰۰ تا ۴۹۶ درجه سانتیگراد بوده و از محلولی شامل نمک‌های NaCl و CaCl_2 با درجه شوری بین ۱۱ تا ۲۲ درصد وزنی بوجود آمده است. وجود سیال‌های درگیر دوفازی غنی از مایع و تک‌فاز گازی در کوارتزهای همراه با کانی‌های سولفیدی، نشان‌دهنده رخداد پدیده جوشش در زمان تشکیل کانی‌سازی است. معمولاً برای بدست آوردن دمای واقعی تشکیل کانسار، فشار ستون چینه‌ای که در آن زمان بر روی کانی‌سازی وارد بوده است لازم است و بر دمای همگن‌شدگی بدست آمده، باید تصحیح فشار صورت گیرد. اما از

آنجایی که شواهد فرآیند جوشش دیده می‌شود، بنابراین دمای همگن‌شدگی بدست آمده برای کانی‌سازی اکسید آهن- مس منطقه نامق، می‌تواند همان دمای واقعی تشکیل کانی‌سازی باشد. در واقع جوشش سیال‌های گرمایی یک ساز و کار و فرآیند اولیه برای تحرک و تمرکز فلزات در هنگام تشکیل کانسارهای فلزی محسوب می‌شود. این فرآیند در شرایط دمای بالا و فشار پایین رخ می‌دهد و نتیجه آن افزایش شوری، افزایش pH، تغییر در در پتانسیل اکسایش - کاهش (Eh) و ته‌نشست مواد معدنی است [۱۸]. همچنین این پدیده موجب به دام افتادن سیال‌های درگیر با نسبت‌های فازی مختلف می‌شود [۱۹]. ماگما به زمانی که سطح نزدیک می‌شود، در اثر کاهش فشار (جوشش اولیه) و تبلور (جوشش ثانویه) سیال‌ها، از حالت ماگمایی به حالت گرمایی تغییر می‌کند [۱۸]. سرد شدن، آمیختگی سیال‌ها، جوشش و واکنش سیال- سنگ میزبان نقش مهمی در ته‌نشست کالکوپیریت از سیال گرمایی دارد و همچنین رقیق‌شدگی سیال‌های کانه‌دار شور نیز می‌تواند باعث تشکیل کانی‌های مس‌دار از سیال کانه‌دار شود [۲۰]. بررسی‌ها نشان داده است که کمپلکس‌های بی‌سولفیدی در کانسارهایی که در دمای پایین‌تر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد تشکیل می‌شوند و یا در کانسارهایی که کانی‌شناسی آنها بیانگر شرایط احیاء کننده است، غالب هستند [۲۱]. در حالیکه در ذخایری که در دماهای بیش از ۳۰۰ درجه سانتیگراد شکل می‌گیرند و حضور کانی‌های اکسیدی یا سولفیدی در آنها حاکی از شرایط نسبتاً اکسیدکننده است، کمپلکس‌های کلریدی غالب هستند. بنابراین دمای تشکیل بیش از ۳۰۰ درجه سانتیگراد در منطقه نامق نشان‌دهنده حمل عناصر در قالب کمپلکس‌های کلریدی است. وجود اسپیکولاریت فراوان نیز نشان دهنده غلظت بالای اکسیژن در محلول است. کاهش دمای سیال در نتیجه جوشش باعث ناپایدار شدن کمپلکس کلریدی و ته‌نشینی کانه‌ها می‌شود [۲۲].

شوری و دمای همگن‌شدگی سیالات درگیر منطقه نامق در نمودار دما- شوری نشان می‌دهد که دو سیال دما- شوری بالا (دمای عمدتاً بیش از ۴۰۰ تا ۴۹۶ درجه سانتیگراد و شوری بیش از ۱۷ درصد وزنی) با سیال دما- شوری پایین (دمای عمدتاً کمتر از ۴۲۵ درجه سانتیگراد و شوری کمتر از ۱۵ درصد وزنی) آمیخته شده و کاهش دما و شوری و به دنبال آن رقیق‌شدگی، شرایط را برای ته‌نشست اکسید آهن و مس از

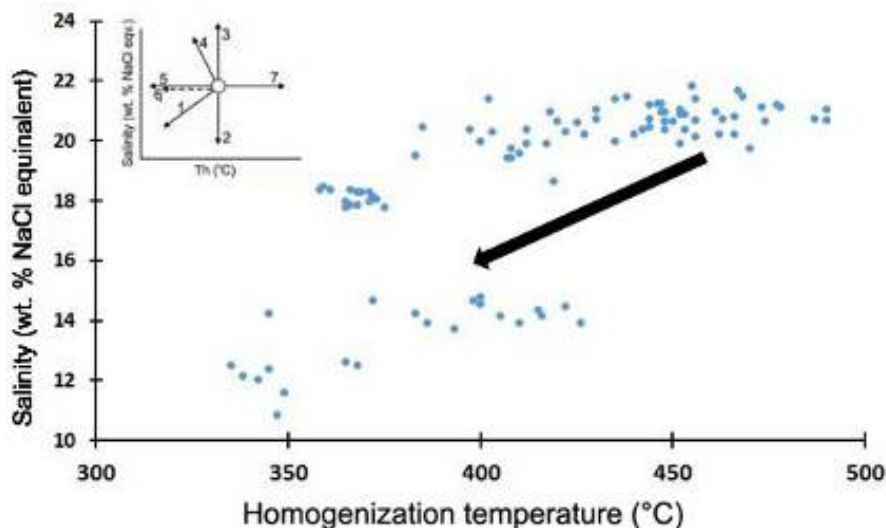
کمپلکس‌های کلریدی فراهم کرده است (شکل ۶). همچنین در نمودار دما- شوری و گستره انواع مختلف محلول‌های کانه‌دار، مدل آمیختگی آب ماگمایی گرم و شور با آب جوی سرد و کم شور، بهترین مدل برای تشکیل رگه آهن- مس‌دار منطقه نامق است [۲۳] (شکل ۷). گفتنی است که اگرچه تعدادی از نمونه‌ها در گستره آب دگرگونی قرار گرفته‌اند، اما از آنجاییکه هیچ نشانه‌ای از دگرگونی ناحیه‌ای در منطقه وجود ندارد، وجود این نوع سیال منتفی است. کاهش دما و غلظت HCl که معمولاً در پهنه جوشش رخ می‌دهد می‌تواند دو عامل مهم تشکیل کانی- سازی و ته‌نشست اکسید آهن اولیه و سولفیدها باشد. همچنین فرآیند آمیختگی محلول ماگمایی گرم و شور و محلول جوی سرد و کم شور می‌تواند باعث کاهش دما، ناپایداری کمپلکس- های و ته‌نشینی فلزات شود. با توجه به گستره دمایی و شوری رگه اکسید آهن- مس‌دار منطقه نامق، این کانی‌سازی در فشار بین ۱۰ تا ۶۰ مگاپاسکال و در عمقی بین ۰٫۵ تا ۲ کیلومتری (برپایه فشار سنگ‌کره) تشکیل شده است [۲۴] (شکل ۸).

در شکل ۹ مقایسه‌ای بین دما و شوری کانی‌سازی اکسید آهن- مس نامق و برخی کانسارهای IOCG انجام شده است [۲۵-۳۰]. بررسی‌های انجام شده بر کانسارهای IOCG نشان می‌دهد که تشکیل آنها مربوط به سیال‌های ماگمایی- گرمایی با دمای متوسط تا بالا (حدود ۳۰۰ تا ۴۵۰ درجه سانتیگراد)، شوری بالا و محتوی CO₂ است [۳۱-۳۴]. اگرچه که تعدادی از کانسارها بویژه در مرحله تشکیل کانی‌سازی مس- طلا، با محلول‌های دمای متوسط تا کم (کمتر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد)، شوری بالا و مقادیر متغیر CO₂ در ارتباط هستند. البته مقدار شوری بالای محلول در همه کانسارهای IOCG قطعیت ندارد، بطوریکه در برخی از آنها مقدار شوری کمتر از ۲۶ درصد وزنی است [۳۵، ۳۶]. ویلیامز [۳۷] معتقد است که در بخش‌های بالایی ذخایر IOCG، آب‌های سرد سطحی با محلول‌های داغ ماگمایی با گرفته از عمق درهم می‌آمیزند. مقایسه رخداد کانه‌زایی نامق با ذخایر IOCG نشان می‌دهد که بسیاری از مقادیر دما و شوری سیال‌های درگیر منطقه نامق با داده‌های مربوط به ذخایر IOCG همخوانی ندارد و تنها بخش اندکی از آنها با داده‌های مربوط به کانسارهای کوهستان ایگل (Mont-de-l'Aigle) و معادن گپسی (Mines Gaspe) کانادا همخوانی دارد (شکل ۹). این امر نیاز به بررسی‌های تفصیلی و

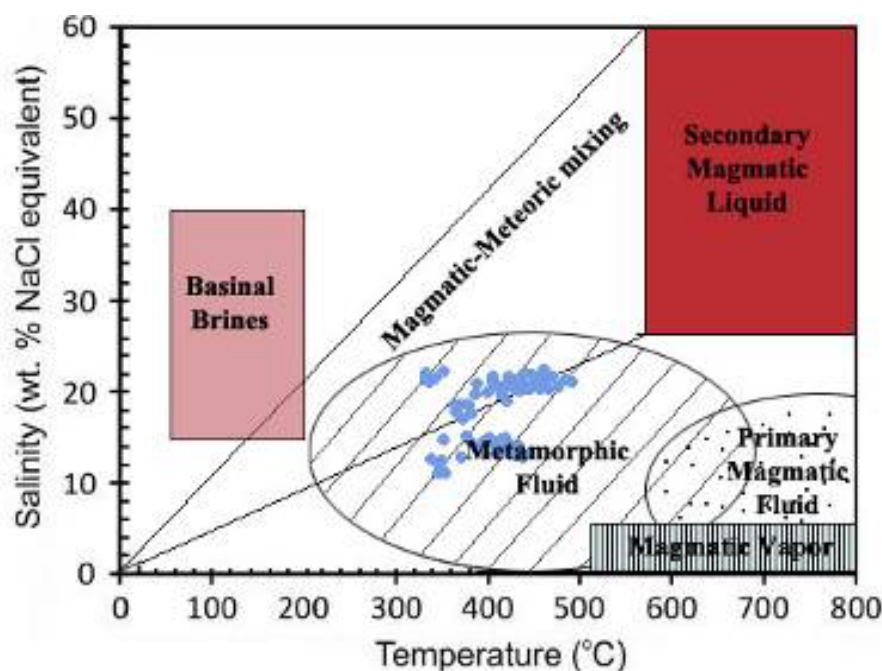
قرار دارد، الگوهای جدید اکتشافی را برای آینده به وجود خواهد آورد که می‌تواند جهت بررسی‌های تفصیلی زیرسطحی در اختیار شرکت‌های بزرگ معدنی قرار بگیرد و موجب رونق اقتصادی و شکوفایی معادن بیشتر در شمال شرقی ایران شود.

عمقی در منطقه برای اثبات IOCG بودن کانی‌سازی را بیشتر می‌کند.

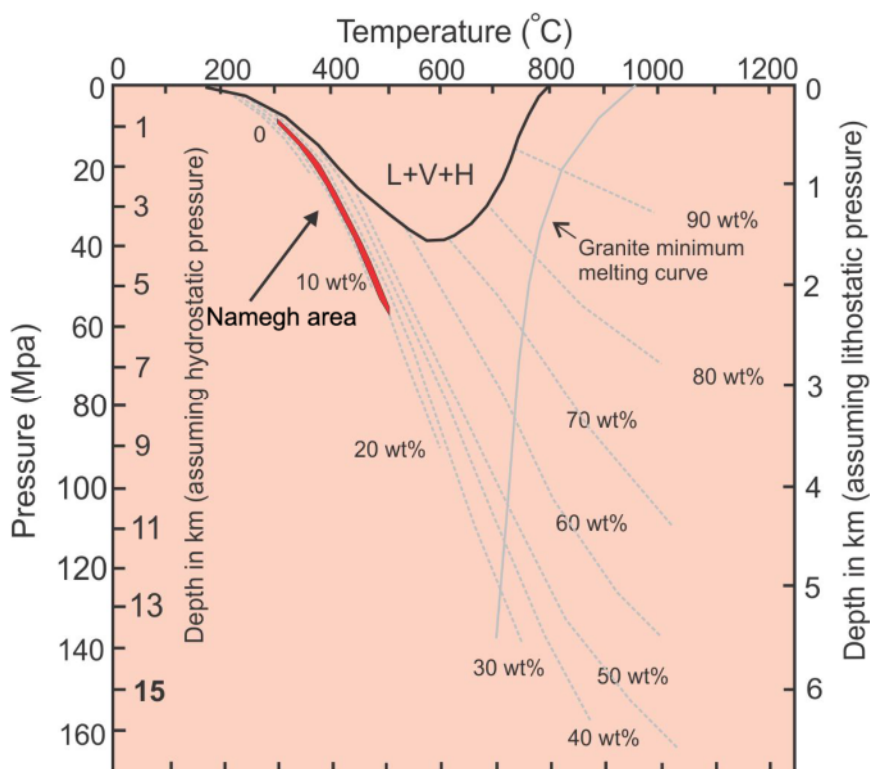
آشنایی با ویژگی‌هایی زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی، زمین‌شیمی و شرایط محلول کانه‌دار منطقه نامق و دیگر ذخایر بالقوه معدنی که در کمربند ماگمایی خواف-کاشمر-بردسکن



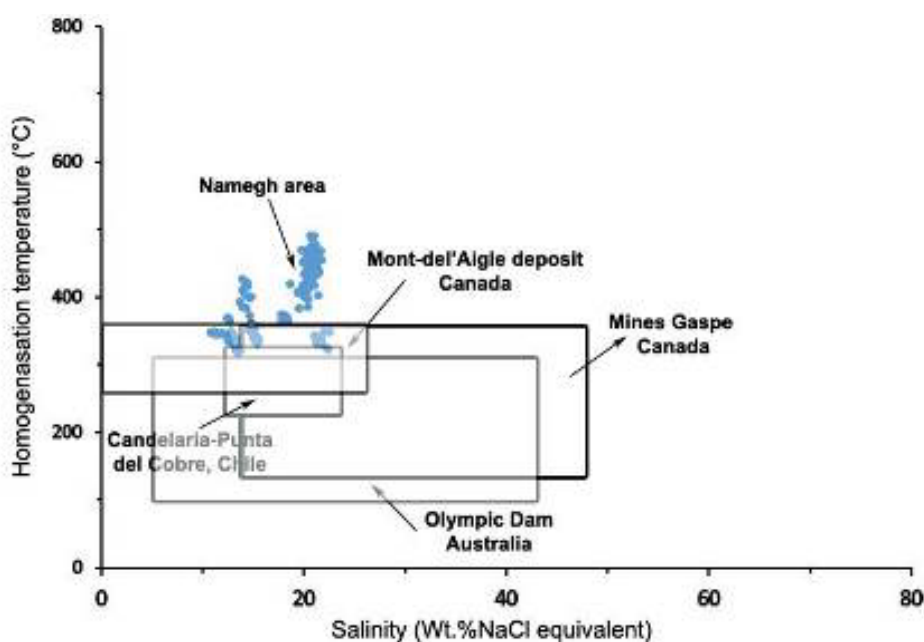
شکل ۶ نمودار شوری-دمای همگن شدگی سیال‌های درگیر رگه اکسید آهن- مس منطقه نامق به همراه روندهای ممکن تکامل سیال در نمودار دما-شوری [۱۷]. روند ۱= آمیختگی سیال A با سیال سردتر و شوری کمتر B، روند ۲ و ۳= آمیختگی سیال A با سیال‌های دیگر با شوری مختلف ولی دمای یکسان، روند ۴= شوری فاز باقیمانده در اثر جوشش افزایش پیدا کرده است، روند ۵= سرد شدگی سیال، روند ۶= باریک شدگی سیال- های درگیر، روند ۷= تراوش سیال‌های درگیر ضمن گرمایش.



شکل ۷ دمای همگن شدگی نسبت به شوری برای سیال‌های درگیر در رگه اکسید آهن- مس منطقه نامق. گستره دما و شوری سیال‌های مختلف برگرفته از مرجع [۲۳] است.



شکل ۸. نمودار دما-فشار-عمق در سیستم $H_2O-NaCl$ [۲۴] و موقعیت محلول کانه‌دار رگه اکسید آهن-مس منطقه نامق در آن. L =مایع، V =بخار، H =هالیت. خط‌چین‌ها نشان‌دهنده مقدار شوری محلول، خط خاکستری نشان‌دهنده منحنی کمترین ذوب شدگی گرانیت و خط سیاه نشان‌دهنده مرز سه فازی برای سیستم $NaCl-KCl-H_2O$ با Na/K در محلول به تعادل رسیده با آل‌بیت و فلدسپار قلیایی در دمای نشان داده شده هستند.



شکل ۹. نمودار مقایسه‌ای دما و شوری کانی‌سازی اکسید آهن-مس منطقه نامق و برخی کانسارهای IOCG برگرفته از مراجع [۲۵-۳۰].

قدردانی

این مقاله با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۳/۴۱۰۸۳ مورخ ۱۳۹۵/۴/۱ انجام شده است. بدین وسیله از زحمات جناب آقای مهندس خواجه‌زاده در بهتر انجام شدن عملیات صحرایی قدردانی می‌شود.

مراجع

- Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 1 (2006) 3-26.
- [9] Yousefi souran L., Heidarian Shahri M., Karimpour M., "Geology, mineralogy, fluid inclusion thermometry and ground magnetic of Shahrak Magnetite-Specularite Cu-Au prospecting area, Torbat-e-Heydaryeh, Iran", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 3 (2008) 505-516.
- [10] Gholami S., "Geology, Mineralization, Geochemistry and magnetic of Shotor sang iron deposit, northeastern Sabzevar", thesis of MSc in Ferdowsi university of Mashhad (2009) 240.
- [11] Karimpour M. H., Saadat S., Malekzadeh Shafaroudi A., "Exploration and introduction of Fe oxide mineralization (Cu-Au type) and magnetite related to volcanic-plutonic belt of Khaf-Kashmar-Bardaskan", 21th of symposium of Geoscience (2002).
- [12] Behrouzi A., "Geological map of Feyzabad scaling 1:100000, Geological Survey & Mineral Exploration of Iran" (1987).
- [13] Lecumberri-Sanchez P., Steel-MacInnis M., Bodnar R.J., "A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance", Geochimica et Cosmochimica Acta 92 (2012) 14-22.
- [14] Steele-MacInnis M., Lecumberri-Sanchez P., Bodnar R.J., "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 (2012) 334-337.
- [15] Whitney D.L., Evan, B.W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", American Mineralogist 95 (2010) 185-187.
- [16] Roedder E., "Fluid inclusions. Reviews in Mineralogy", 12 (1984) 644 pp.
- [17] Sheppherd T.j., Rankin A.H., Alderton D.H.M., "A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies", Blackie and Son (1985) 239 pp.
- [18] Wilkinson J.J., "Fluid Inclusion in Hydrothermal Ore Deposits", Lithos 55 (2001) 229-272.
- [19] Van den Kerkhof A.M., Hein U.F., "Fluid inclusion petrography", Lithos 55 (2001) 27-47.
- [20] Ulrich T., Gunther D., Heinrich C.A., "Evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions: Bajo de la Alumbara, Argentina", Economic Geology 97 (2002) 1888-1920.
- [21] Seward T.M., "The hydrothermal geochemistry of gold", in: Foster, R.P. (ed.), gold
- [1] Karimpour M. H., Malekzadeh Shafaroudi A., Esfandiarpour A., Mohammad nejad H., "Neyshabur turquoise mine: The first mineralization of Cu-Au-U-LREE, IOCG type in Iran", Economic Geology 2 (2011) 193-216.
- [2] Golmohammadi A., Karimpour M. H., Malekzadeh Shafaroudi A., Mazaheri S. A., "Petrology and geochronology of Zircon in intrusion of southern A,C in U-Pb type and Dardavey regions, Iron ore Khaf Sangan ", Economic Geology 2 (2013) 155-173.
- [3] Almasi A., Karimpour M. H., Ebrahimi Nasrabadi Kh., Rahimi b., Li Q. L., Santos J. F., "Geology, minerlisation, U-Pb geochronology and geochemistry of Sr-Nd isotopes in intrusion of northeastern Kashmar", Economic Geology 1 (2015) 69-90.
- [4] Shafaii Moghadam H., Li X. H., Ling X. X., Santos J. F., Stern R. J., Li Q. L., Ghorbani G., "Eocene Kashmar granitoids (NE Iran): Petrogenetic constraints from U-Pb zircon geochronology and isotope geochemistry", Lithos 216-217 (2015) 118-135.
- [5] Malekzadeh Shafaroudi A., Karimpour M.H., Golmohammadi A., "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 (2013) 256-271.
- [6] Mazloumi A., Karimpour M. H., Rasa A., Rahimi B., Vosoughi Abedini M., "Torbat-e-Heydaryeh Kohe-Zar Gold deposit, new model of Gold mineralization", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 3 (2008) 363-376.
- [7] Golmohammadi A., Karimpour M. H., Malekzadeh Shafaroudi A., Mazaheri S. A., "Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran", Ore Geology Reviews 65 (2015) 545-563.
- [8] Karimpour M. H., Malekzadeh Shafaroudi A., "Comparison of the geochemistry of source rock at Tanourjeh Au-bearing magnetite & Sangan Au-free magnetite deposits, Khorasan Razavi, Iran",

- [31] Pollard P.J., "Sodic(-calcic) alteration associated with Fe-oxide- Cu-Au deposits: An origin via unmixing of magmatic-derived H_2O-CO_2 -salt fluids", *Mineralium Deposita* 36 (2001) 93–100.
- [32] Pollard P.J., "An intrusion-related origin for Cu-Au mineralization in iron oxide-copper-gold (IOCG) provinces", *Mineralium Deposita* 41 (2006) 179–187.
- [33] Fu B., Williams P.J., Oliver N.H.S., Dong G., Pollard P.J., Mark G., "Fluid mixing versus unmixing as an ore-forming process in the Cloncurry Fe-oxide-Cu-Au district, NW Queensland, Australia: Evidence from fluid inclusions", *Journal of Geochemical Exploration* 78, (2003) 617–622.
- [34] Rieger A.A., Marschik R., Díaz M., "The evolution of the hydrothermal IOCG system in the Mantoverde district, northern Chile: New evidence from microthermometry and stable isotope geochemistry", *Mineralium Deposita* 47 (2012) 359–369.
- [35] Marschick R., Fontboté L., "Copper (-Iron) mineralization and superposition of alteration events in the Punta del Cobre belt, Northern Chile", In: Camus, F., Sillitoe, R.H., Peterson, R., (eds.), *Andean copper deposits: new discoveries, mineralization, styles and metallogeny*, Society of Economic Geology, Special Publication 5 (1996) 171–190.
- [36] Simard M., Beaudoin G., Bernard J., Hupe A., "Metallogeny of the Mont-de-l'Aigle IOCG deposit, Gaspé Peninsula, Québec, Canada", *Mineralium Deposita* 41 (2006) 607–636.
- [37] Williams P.J., "Classifying IOCG deposits", In: Corriveau, L., Mumin, H., (eds.), *Exploring for iron-oxide copper gold deposits: Canada and global analogues*, Québec, Geological Association of Canada and Geological Survey of Canada (2010) 11–19.
- metallogeny and exploration, Blakie and Sons Ltd (1991) 432 pp.
- [22] Thiersch P.C., Williams-Jones A.E., Clark J.R., "Epithermal mineralization and ore controls of the Shasta Au-Ag deposit, Toadoggone District, British Columbia, Canada", *Mineralium Deposita* 32(1997) 44–57.
- [23] Beane R.E., "The Magmatic-Meteoric Transition", Geothermal Resources Council, Special Report 13 (1983) 245–253.
- [24] Fournier R.O., "Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment", *Economic Geology* 94 (1999) 1193–1212.
- [25] Sillitoe R.H., "Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view", *Mineralium Deposita* 38 (2003) 787–812.
- [26] Marschick R., Fontignie D., Chiaradia M., Voldet P., "Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotope composition of granitoids of the Early Cretaceous Copiaco plutonic complex (27° 30'S), Chile", *Journal of South America Earth Sciences* 16 (2003) 381–398.
- [27] Hitzman M.W., "Iron oxide-Cu-Au deposits: what, where, when and why", Porter T.M. (ed.) *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: a global perspective*, Australian Mineral Foundation, Adelaide (2000) 9–25.
- [28] Pollard P.J., "Evidence of a magmatic fluid and metal source for Fe-oxide Cu-Au mineralization", Porter T.M., (ed.) *Hydrothermal iron oxide copper -gold and related deposits: a global perspective 1* (2002) PGC Publishing, Adelaide 27–41.
- [29] Allcock J.B., "Skarn and porphyry copper mineralization at Mines Gaspé, Murdochville, Quebec", *Economic Geology* 77 (1982) 971–999.
- [30] Simard M., Beaudoin G., Bernard J., Hupe A., "Metallogeny of the Mont-de-l'Aigle IOCG deposits, Gaspé Peninsula, Québec, Canada", *Mineralium Deposita* 41 (2006) 607–636.