

شیمی کانی‌های سولفیدی و سولفوسالتی در کانسار باریت (طلا-نقره) چشمه نقره، زیر پهنه سبزوار، شمال غرب کاشمر

اسماعیل غفوری سدهی، حسینعلی تاج‌الدین*، ابراهیم راستاد، پوریا محمودی

گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۲/۲۶، نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۵/۳۰)

چکیده: کانسار باریت (طلا-نقره) چشمه نقره در ۲۰ کیلومتری شمال غرب کاشمر، در زیرپهنه سبزوار واقع است. واحدهای سنگی منطقه کانسار از یک توالی از واحدهای آتشفشانی-رسوبی ائوسن شامل توف سنگی، توف ریولیتی، شیل توفی، لاپیلی توف و آگلومرا همراه با گدازه‌های با ترکیب پیروکسن آندزیت و تراکی آندزیت تشکیل شده‌اند. در این کانسار، باریت به صورت عدسی، توده‌ای، نواری و رگه-رگچه‌ای در واحد توف ریولیتی شکل گرفته است. باریت‌های عدسی-توده‌ای و نواری شکل در بردارنده کانه‌های فلزی شامل پیریت، اسفالریت، کالکوپیریت، گالن، تتراندریت، آرزانتیت و الکتروم هستند. همراهی کانی‌های سولفیدی با باریت نشان‌دهنده شرایط زیراکسیدی در زمان نهشت کانسنگ است. در این پژوهش، شیمی کانی‌های سولفیدی موجود در کانسنگ‌های عدسی شکل باریتی با ریزپردازشگر الکترونی (EPMA) بررسی شد. بر این اساس، گستره باریک و مقدار پایین آهن درون اسفالریت با کانه‌زایی در یک محیط زیراکسیدی همخوانی دارد. حضور عناصر سنگین چون طلا و نقره درون پیریت نشان می‌دهد که پیریت‌ها در یک محیط زیراکسیدی تشکیل شده و آرسنیک موجود درون پیریت به صورت یون فلزی (As^{3+}) جانشین آهن شده است. حضور مقادیر فراوان آنتیمون، بیسموت، آرسنیک و نقره در همه کانی‌های سولفیدی و سولفوسالتی کانسار چشمه نقره نشان می‌دهد که سیال فلزدار سازنده کانسار چشمه نقره غنی از این عناصر فلزی بوده است.

واژه‌های کلیدی: کانسار چشمه نقره؛ باریت؛ سولفید توده‌ای غنی از طلا؛ شیمی کانی.

مقدمه

در سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی زیرپهنه سبزوار نیز رخ داده است (شکل‌های ۱ الف و ب). کانسار چشمه نقره در ۲۰ کیلومتری شمال غرب کاشمر، یک کانسار باریت چینه‌سان غنی از طلا (و نقره) است که در واحدهای آتشفشانی-رسوبی ائوسن شکل گرفته و پیشتر توسط برخی از پژوهشگران بررسی شده است. از آنجا که کمریند نئوتتیس میزبان ذخایر عظیمی از طلائی اپی‌ترمال است و زیرپهنه سبزوار بخشی از کمریند نئوتتیس به شمار می‌آید [۱۰]، بر اساس شواهد زمین‌شناسی و کانی‌سازی [۱۱، ۱۲]، این کانسار در اثر نهشت سیال‌های گرمایی بروندمی در کف دریا نهشته شده و از نوع ذخایر طلائی

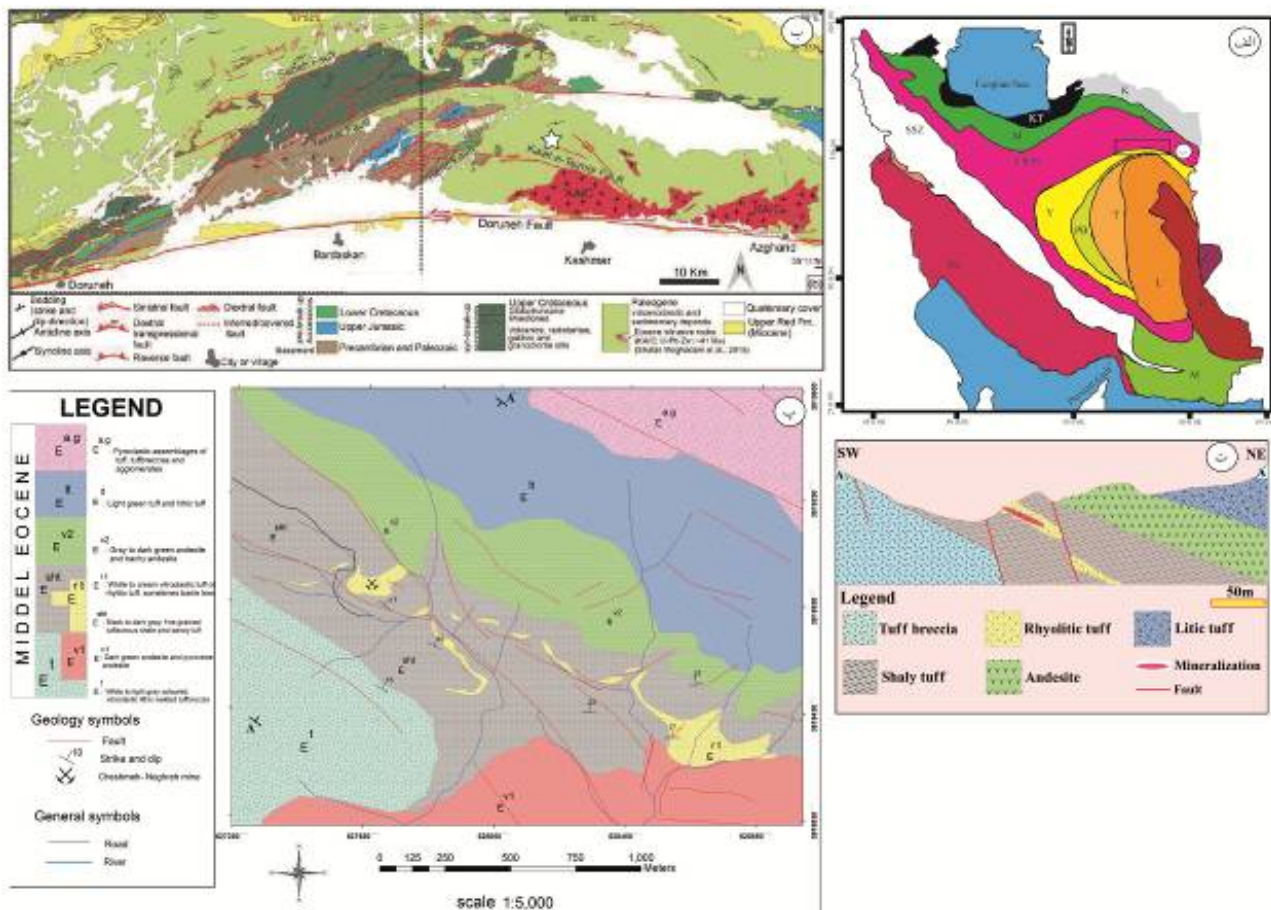
پهنه‌های ساختاری البرز مرکزی، ایران مرکزی و شمال غرب پهنه سنج-سیرجان مهم‌ترین میزبان‌های ذخایر باریت در ایران هستند [۱-۳]. بسیاری از باریت‌های شمال غرب پهنه سنج-سیرجان چون کانسارهای باریکا [۴-۶]، شکر بیگ [۷] و عبدالصمدی [۸، ۹]، ماهیت چینه‌سان دارند. عمده این کانسارها در واحدهای آتشفشانی-رسوبی تشکیل شده‌اند و از نوع کانسارهای سولفید توده‌ای (VMS) زیرگروه کوروکو هستند [۴-۹]. افزون بر پهنه سنج-سیرجان، کانه‌زایی باریت چینه‌سان

دارد [۱۷-۱۹] که در یک محیط کششی درون قوسی تشکیل شده است [۱۲،۱۱]. توالی چینه‌شناسی در منطقه کانسار چشمه نقره شامل واحدهای آتشفشانی-رسوبی ائوسن است که از قدیم به جدید عبارت‌اند از ۱) واحد توف برش بارنگ سفید تا خاکستری روشن، ۲) واحد آندزی بازالت بارنگ سبز تیره، ۳) واحد شیل توفی و ماسه توفی خاکستری رنگ؛ ۴) واحد توف ریولیتی سفید تا کرم رنگ، ۵) واحد آندزیت و تراکی آندزیت خاکستری تا سبز تیره، ۶) واحد توف و توف سنگی سبز روشن و ۷) مجموعه آذرآواری توف، توف برش و آگلومرا (شکل‌های ۱ پ و ت).

چینه‌سان معرفی گردیده است. امروزه شیمی کانی‌های سولفیدی سولفوسالتی، به‌عنوان ابزاری برای تعیین شرایط زمین شیمیایی و حتی دمای نهشت کانه‌ها، استفاده می‌شود [۱۳-۱۶]؛ در این پژوهش، شرایط زمین‌شیمیایی سامانه کانه‌زایی و نیز الگوی فراوانی و پراکندگی برخی عناصر فلزی در فازهای مختلف کانیایی بر پایه ترکیب شیمیایی کانی‌ها، بررسی شده است.

زمین‌شناسی و کانه‌زایی

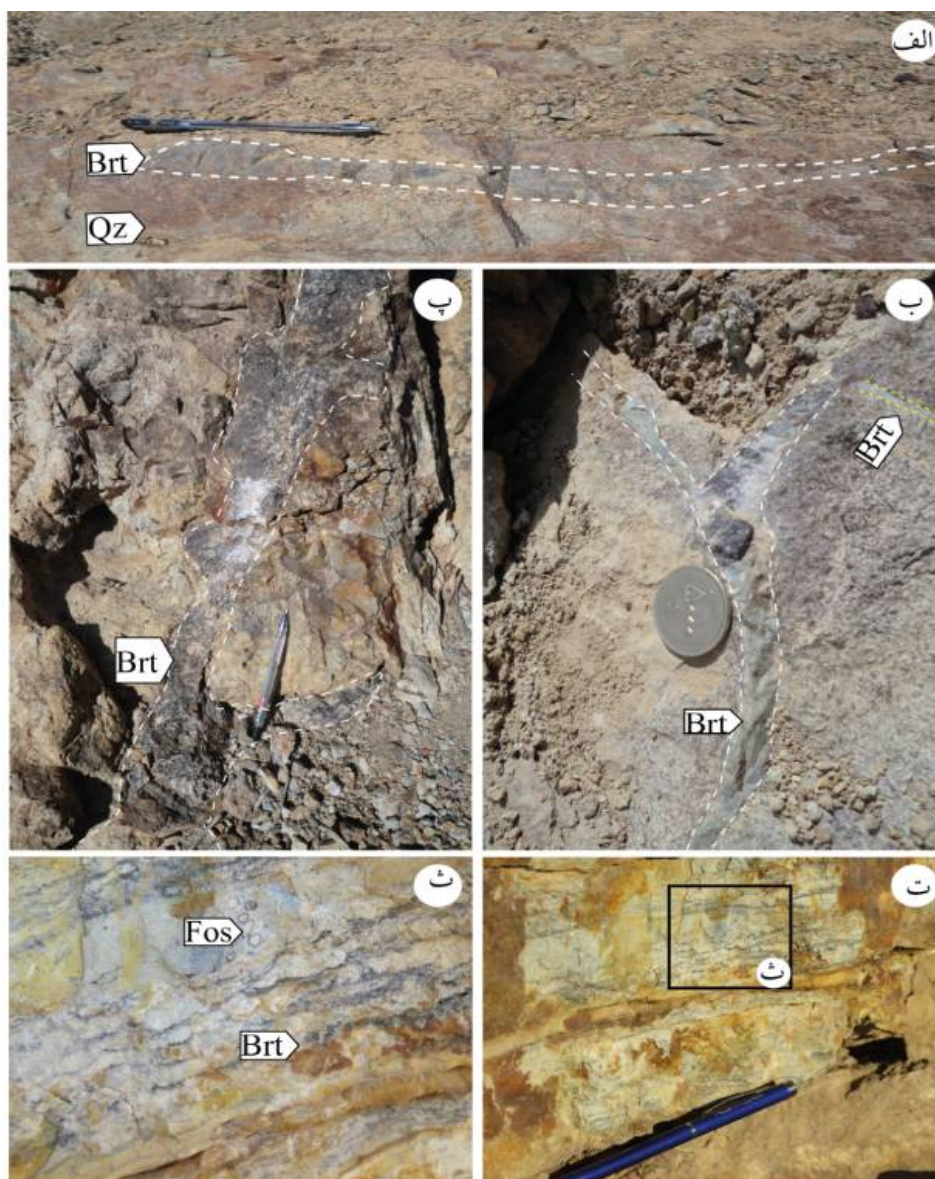
کانسار چشمه نقره در کرانه شمالی پهنه ساختاری ایران مرکزی، در جنوب زیرپهنه سبزوار و مرز بین گسل درونه و گسل تکنار و در ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کاشمر قرار



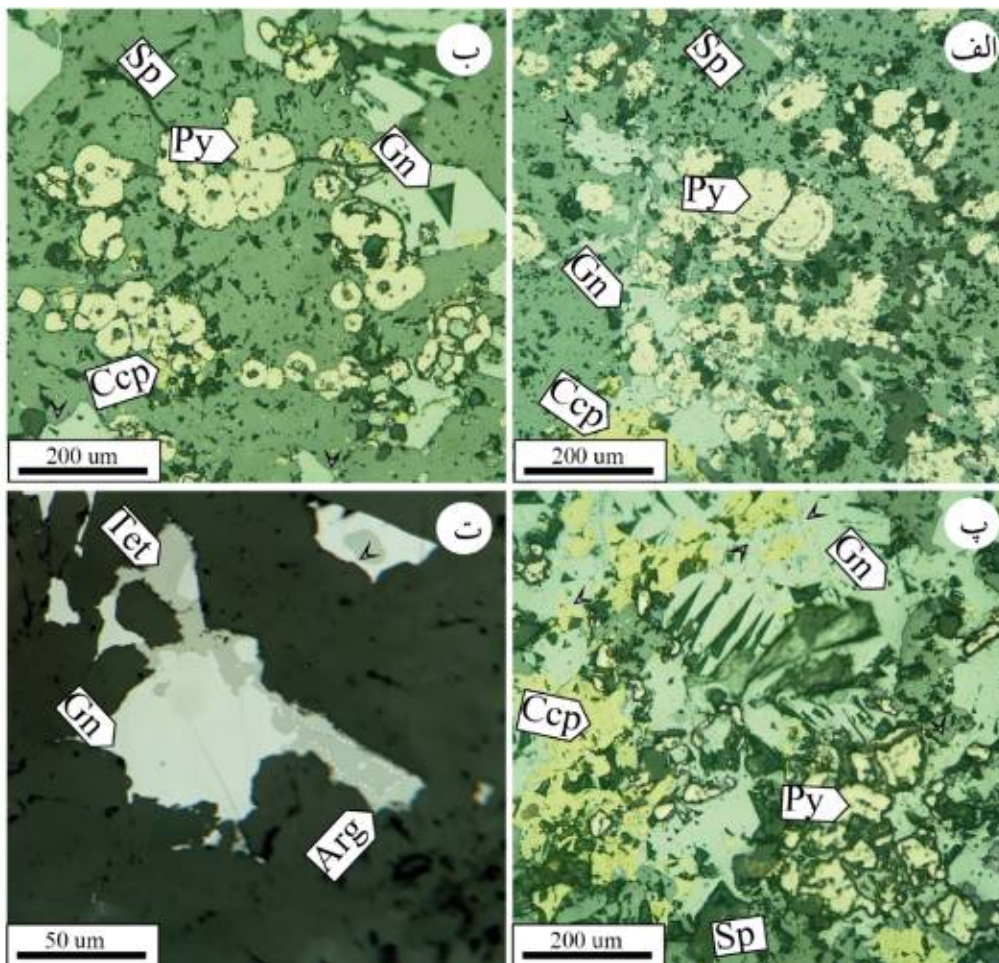
شکل ۱ الف) نقشه زمین‌شناسی ساختاری ایران [۱۸، ۱۹]. ب) نقشه زمین‌شناسی زیرپهنه سبزوار. پ) نقشه زمین‌شناسی کانسار چشمه نقره. ت) مقطع عرضی کانسار چشمه نقره که موقعیت آن با علامت ستاره نقشه زمین‌شناسی تصاویر الف و ب نشان داده شده است.

آرژانتیت و الکتروم هستند (شکل ۳). کانی‌های سولفید و سولفوسالتی فلزهای پایه (Cu, Pb, Zn) و گران‌بها (Au, Ag) به صورت رگچه‌های سولفیدی (شکل ۴) و دانه‌پراکنده درون عدسی‌های باریتی پراکنده هستند (شکل ۵). بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، به ترتیب کانی‌های پیریت، کالکوپیریت، گالن، آرژانتیت، تترائدریت و اسفالریت تشکیل شده‌اند. توالی همبرزایی کانی‌های سولفیدی و سولفوسالتی در بخش چینه-سان این کانسار در شکل ۶ نشان داده شده است.

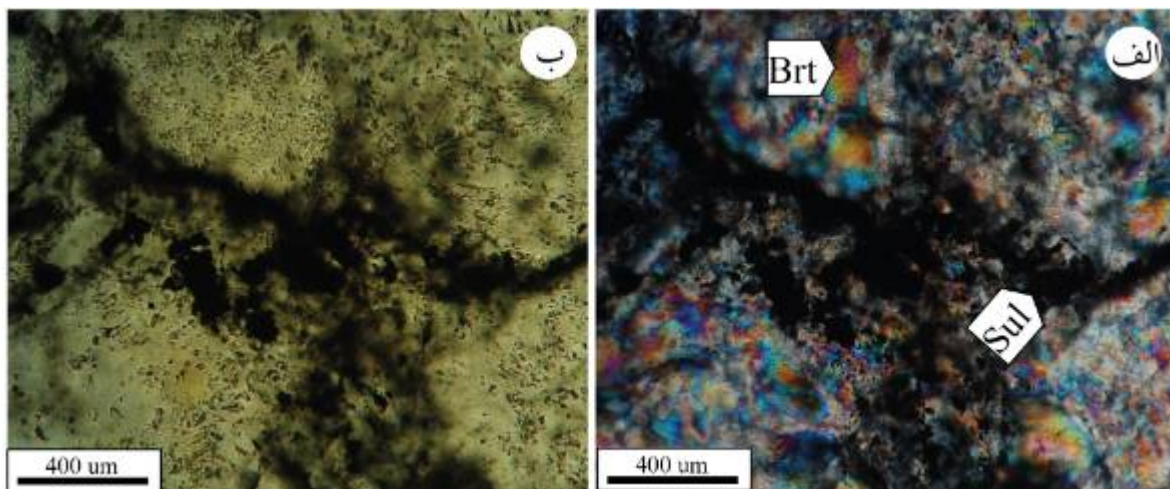
کانه‌زایی در کانسار چشمه نقره به صورت عدسی‌های باریتی-سیلیسی (شکل ۲ الف) با روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق و شیب ۱۷ درجه به سمت شمال شرق، درون واحد توف ریولیتی سفید تا کرم رنگ رخ داده است (شکل ۱ پ). عدسی‌های باریتی در مقیاس نمونه دستی ساخت نواری (شامل نوارهای باریت و توف) و توده‌ای دارند (شکل‌های ۲ ب تا ت) و بر پهنه رگه-رگچه‌ای قرار دارند (شکل ۲ ب). کانسنگ‌های باریتی با مقادیری از کوارتز همراه بوده و اغلب دارای کانه‌های فلزی پیریت، اسفالریت، کالکوپیریت، گالن، تترائدریت،



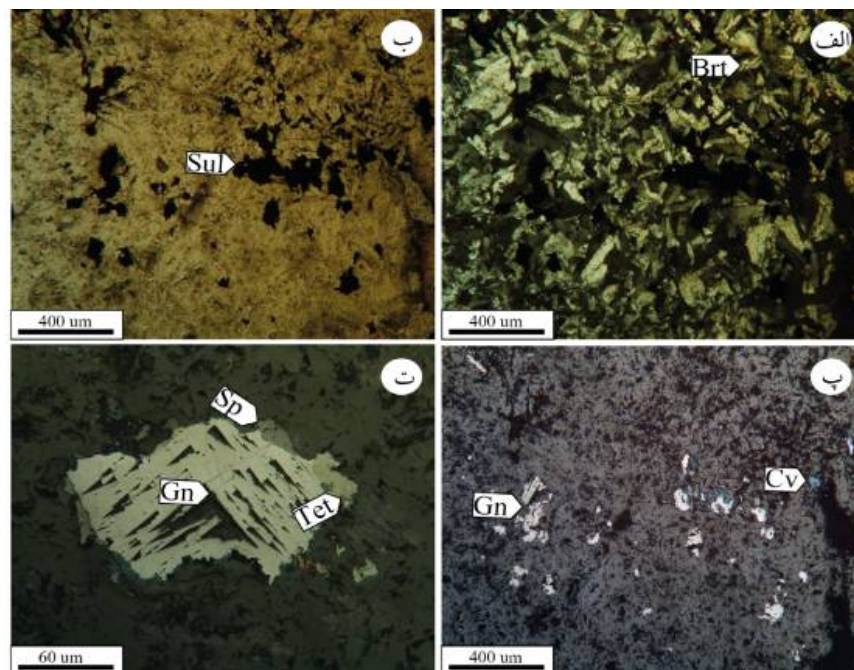
شکل ۲ الف) نمای نزدیک از عدسی سیلیسی (Qz) دربردارنده یک عدسی باریتی (Brt). ب) تصویر صحرایی از رگه و لایه باریتی. پ) تصویر رگه باریتی که سنگ میزبان توفی را قطع کرده است. ت) نمای از لایه‌های باریتی در سنگ میزبان توفی. ث) نمای نزدیک از تصویر "ت" که در آن لایه باریتی همراه با سنگواره ها (Fos) دیده می‌شود.



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی (الف) کانی‌های پیریت گل کلمی، اسفالریت، گالن و کالکوپیریت در کانسنگ سولفید توده ای، (ب) جانشینی پیریت-های گل کلمی با گالن، (پ) جانشینی کالکوپیریت با گالن و جانشینی کالکوپیریت و گالن با اسفالریت، (ت) ارتباط بافتی کانی‌های گالن، تتراندريت و آرژانتیت در باریت. که تتراندريت در حال جانشینی به جای آرژانتیت است. خط چین سفید رنگ مرز تتراندريت-آرژانتیت و پیکان‌های سفید رنگ محل جانشین کانی‌ها نسبت به هم را نشان می‌دهند. تصاویر در نور بازتابی ثبت شدند. (Arg): آرژانتیت، (Ccp): کالکوپیریت، (Gn): گالن، (Sp): اسفالریت و (Py): پیریت.



شکل ۴ تصویر میکروسکوپی از رگچه سولفیدی (Sul) درون باریت (Brt): (الف) در نور عبوری قطبیده متقاطع (XPL) و (ب) در نور عبوری قطبیده صفحه ای (ppl)



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی از کانه‌زایی سولفیدی به صورت دانه پراکنده در متن عدسی‌های باریتی: (الف، ب و پ) کانه‌های کدر سولفید در زمینه باریتی (به ترتیب نور عبوری XPL، ب) نور عبوری PPL در نور بازتابی). در تصویر پ کانی‌های کدر، گالن و کوولیت هستند. ت) ارتباط بافتی گالن به همراه تترائدریت و اسفالریت در نور بازتابی. (Br: باریت، Cv: کوولیت، Gn: گالن، Sp: اسفالریت، Sul: سولفید و Tet: تترائدریت).

Minerals	Mineralization
Pyrite	■■■■■
Chalcopyrite	■■■■■
Galena	■■■■■
Argentite	■■■■■
Tetrahedrite	■■■■■
Sphalerite	■■■■■

شکل ۶ توالی هم‌بزرایی کانی‌های سولفیدی و سولفوسالتی در بخش چینه‌سان کانسار چشمه نقره.

روش بررسی

برای بررسی شیمی کانه‌های موجود در بخش چینه‌سان کانسار چشمه نقره، تعداد ۸ مقطع نازک صیقلی از کانسار چشمه نقره انتخاب و با ریزپردازشگر الکترونی (EPMA) مدل Camera SX100 در مرکز تحقیقات و فراوری مواد معدنی ایران تجزیه و تصویربرداری شدند. برای این منظور، در مجموع ۴۱ نقطه در اسفالریت (۵ نقطه)، پیریت (۱۰ نقطه)، گالن (۷ نقطه)، کالکوپیریت (۵ نقطه)، تترائدریت (۸ نقطه)، آرژانتیت (۴ نقطه) و الکتروم (۲ نقطه) در شرایط اختلاف پتانسیل ۲۰ کیلوولت، شدت جریان ۲۰ نانو آمپر و قطر باریکه ۳ میکرومتر تجزیه شدند. حد آشکارسازی برای عناصر اصلی ۰/۰۵ درصد وزنی و

برای عناصر فرعی ۰/۰۱ درصد وزنی بود. استانداردهای استفاده‌شده برای واسنجی عناصر روی، کادمیوم، نقره، آرسنیک، کبالت، منگنز و آنتیمون به ترتیب اسفالریت، گرینوکیت، هسیت، آرسنات گالیم، کبالت خالص، رودونیت و آنتیمونیت بودند. کانی کالکوپیریت به‌عنوان استاندارد برای هر دو عنصر آهن و مس بکار برده شد.

نتایج

از تجزیه ریزپردازش الکترونی (EPMA) بر روی کانی‌های گالن، اسفالریت، کالکوپیریت، پیریت، تترائدریت، آرژانتیت و الکتروم موجود در بخش چینه‌سان کانسار چشمه نقره، نتایج زیر به دست آمد.

کالکوپیریت: فراوانی عناصر کبالت، کادمیوم و طلا در کالکوپیریت کمتر از حد آشکارسازی دستگاه و مقدار مس در کالکوپیریت ۳۴٫۳۴ تا ۳۴٫۷۴ درصد (با میانگین ۳۴٫۴ درصد و انحراف معیار ۰٫۱۵) درصد است. نقره، بیسموت، سلنیوم و آنتیمون، همراه با عناصر فرعی دوظرفیتی روی، نیکل و سرب در کانی کالکوپیریت حضور دارند (جدول ۳).

پیریت: مقدار آهن در پیریت در گستره ۴۴٫۲۰ تا ۴۵٫۶۹ درصد (با میانگین ۴۵٫۱۷ درصد و انحراف معیار ۰٫۵۳) درصد اندازه‌گیری شده است. تجزیه پیریت‌های گل کلمی نشان می‌دهد که اگرچه فراوانی عناصر طلا، کادمیوم و کبالت پایین‌تر از حد آشکارسازی دستگاه است، ولی عناصر روی، سرب، مس و نقره، همراه با بیسموت، آنتیمون و نیکل در این نوع از پیریت‌ها حضور دارند (جدول ۴).

اسفالریت: مقدار کبالت، مس، سلنیوم و طلا در این کانی کمتر از حد آشکارسازی دستگاه و مقدار روی در اسفالریت ۶۴٫۱ تا ۶۵٫۸۶ درصد (با میانگین ۶۴٫۷ و انحراف معیار ۰٫۶۸) درصد شده است. عناصر فرعی دوظرفیتی موجود در این کانی آهن و کادمیوم و عناصر فرعی شامل نقره، بیسموت و آنتیمون هستند (جدول ۱).

گالن: در این کانی، مقادیر کبالت و طلا پایین‌تر از حد آشکارسازی دستگاه است. مقدار سرب در گالن در گستره ۸۶٫۲۷ تا ۸۶٫۷۱ درصد (با میانگین ۸۶٫۴ و درصد انحراف معیار ۰٫۱۵) درصد اندازه‌گیری شده است. مس، نقره، بیسموت و آنتیمون، همراه با عناصر دوظرفیتی نیکل، روی، آهن و کادمیوم از عناصر موجود در این کانی هستند (جدول ۲).

جدول ۱ مقادیر آماری داده‌های کانی اسفالریت کانسار چشمه نقره (بر حسب درصد وزنی)

عناصر	Fe	Ni	S	Co	Cu	Zn	As	Se	Ag	Cd	Sb	Te	Au	Pb	Bi	FeS
N	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
متوسط	۰٫۶۲	۰٫۰۶	۳۳٫۰۷	۰	۰	۶۴٫۷	۰٫۰۲	۰	۰٫۰۲	۰٫۲۹	۰٫۰۱	۰	۰	۰٫۱۱	۰٫۱۶	۱٫۱۱
انحراف معیار (S. D)	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۵۱	۰	۰	۰٫۶۸	۰٫۰۳	۰	۰٫۰۲	۰٫۲۰	۰٫۰۲	۰	۰	۰٫۱۰	۰٫۰۹	۰٫۱۲
کمینه	۰٫۵۳	۰٫۰۰	۳۲٫۴۴	۰	۰	۶۴٫۱۰	۰٫۰۰	۰	۰٫۰۰	۰٫۱۳	۰٫۰۰	۰	۰	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۹۳
بیشینه	۰٫۷۰	۰٫۱۳	۳۳٫۷۸	۰	۰	۶۵٫۸۶	۰٫۰۷	۰	۰٫۰۵	۰٫۶۳	۰٫۰۵	۰	۰	۰٫۲۵	۰٫۲۷	۱٫۲

جدول ۲ مقادیر آماری داده‌های گالن کانسار چشمه نقره (بر حسب درصد وزنی).

عناصر	Fe	Ni	S	Co	Cu	Zn	As	Se	Ag	Cd	Sb	Te	Au	Pb	Bi
N	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷
متوسط	۰٫۳۹	۰٫۱۸	۱۲٫۳	۰	۰٫۲۰	۰٫۰۲	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۵	۰٫۰۳۱	۰٫۰۵	۰٫۰۲۷	۰٫۰۳۵	۰	۸۶٫۴۰	۰٫۴۲
انحراف معیار (S. D)	۰٫۱۱	۰٫۱۹	۰٫۳۲	۰	۰٫۱۸	۰٫۰۳	۰٫۰۰۷	۰٫۰۱۱	۰٫۰۵	۰٫۰۷	۰٫۰۳	۰٫۰۳۷	۰	۰٫۱۵	۰٫۰۹
کمینه	۰٫۲۹	۰٫۰۰	۱۲٫۰۰	۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰	۸۶٫۲۷	۰٫۲۸
بیشینه	۰٫۵۷	۰٫۵۵	۱۲٫۸۸	۰	۰٫۵۱	۰٫۱۰	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۱۲	۰٫۱۹	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰	۸۶٫۷۱	۰٫۵۷

جدول ۳ مقادیر آماری داده‌های کالکوپیریت کانسار چشمه نقره (بر حسب درصد وزنی).

عناصر	Elements	Fe	Ni	S	Co	Cu	Zn	As	Se	Ag	Cd	Sb	Te	Au	Pb	Bi
N	N	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
متوسط	Mean	۲۹٫۶۰	۰٫۰۱	۴۳٫۳۰	۰	۳۴٫۴۰	۰٫۱۱	۰٫۱۵	۰٫۰۲	۰٫۰۷	۰	۰٫۰۸	۰٫۰۰۸	۰	۰٫۲۹	۰٫۲۱
انحراف معیار (S. D)	S. D	۰٫۵۹	۰٫۰۲	۰٫۵۵	۰	۰٫۱۵	۰٫۲۰	۰٫۱۰	۰٫۰۴	۰٫۰۹	۰	۰٫۱۸	۰٫۰۰۸	۰	۰٫۲۶	۰٫۱۰
کمینه	Min	۲۸٫۸۳	۰٫۰۰	۳۳٫۴۱	۰	۳۴٫۳۴	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰	۰٫۰۷	۰٫۱۰
بیشینه	Max	۳۰٫۴۵	۰٫۰۶	۳۴٫۸۵	۰	۳۴٫۷۴	۰٫۴۶	۰٫۲۴	۰٫۰۹	۰٫۲۳	۰	۰٫۴۲	۰٫۰۲	۰	۰٫۶۱	۰٫۳۶

جدول ۴ مقادیر آماری داده‌های کانی پیریت کانسار چشمه نقره (بر حسب درصد وزنی).

عناصر	Elements	Fe	Ni	S	Co	Cu	Zn	As	Se	Ag	Cd	Sb	Te	Au	Pb	Bi
N	N	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
متوسط	Mean	۴۵٫۱۷	۰٫۲۲	۵۲٫۶	۰	۰٫۴۳	۰٫۲۳	۰٫۳۰	۰٫۰۱	۰٫۲۱	۰	۰٫۱۸	۰٫۰۱	۰	۰٫۴۳	۰٫۱۹
انحراف معیار (S. D)	Std. D	۰٫۵۳	۰٫۳۱	۰٫۵۶	۰	۰٫۲۹	۰٫۲۸	۰٫۱۸	۰٫۰۲	۰٫۱۹	۰	۰٫۲۰	۰٫۰۱	۰	۰٫۲۹	۰٫۰۹
کمینه	Min	۴۴٫۲۰	۰٫۰۰	۵۲٫۱۱	۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۷	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰	۰٫۱۵	۰٫۰۵
بیشینه	Max	۴۵٫۶۹	۰٫۸۵	۵۳٫۸۸	۰	۰٫۹۸	۰٫۷۸	۰٫۷۳	۰٫۰۸	۰٫۴۹	۰	۰٫۶۶	۰٫۰۴	۰	۰٫۹۴	۰٫۳۲

به صورت جانشینی درون ساختار اسفالریت وارد شده‌اند [۱۳]. حضور عناصر بیسموت و نقره در اسفالریت نیز نشان‌دهنده جانشینی آنها به جای Zn طی واکنش زیر است [۱۳]:



مقدار آهن درون اسفالریت مشخصه شرایط ترمودینامیکی تشکیل کانسار است [۲۰]. بالا بودن گریزندگی اکسیژن و کم بودن دما در کانسارهایی که به صورت گرمایی در زیر دریا تشکیل شده‌اند، موجب پایین آمدن مقدار آهن درون اسفالریت می‌شود [۲۱]. مرحله اصلی کانی‌سازی به صورت نهشت باریت توده‌ای و لایه‌ای همراه با سیلیسی شدن در بخش چینه‌سان کانسار چشمه نقره رخ داده است؛ در همراهی با باریت و سیلیس، کانه‌های سولفیدی فلزهای پایه به صورت دانه‌پراکنده دیده می‌شوند که بیانگر نهشت کانه‌ها در یک محیط زیراکسیدی است [۲۱، ۲۲]. مقدار آهن و درصد مولی FeS موجود در اسفالریت‌های کانسار چشمه نقره نسبت به سایر کانسارهای تشکیل شده در زیر دریا پایین است. [۲۰] بر اساس نسبت Fe/Zn در اسفالریت (در گستره ۰/۰۰۸ تا ۰/۰۱)، دمای تشکیل اسفالریت‌های موجود در کانسنگ‌های طلا دار چشمه نقره حدود ۲۳۵ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است که نهشت اسفالریت در یک محیط زیراکسیدی، کم آهن (Fe < 1 wt%) و با گریزندگی اکسیژن بالا را نشان می‌دهد.

تترائدریت-تنانتیت: مقدار نقره در تترائدریت-تنانتیت در گستره ۹/۷۹ تا ۱۵/۲۳ درصد (با میانگین ۱۲/۵ درصد و انحراف معیار ۱/۸۹ درصد)، آنتیمون ۱۶/۰۹ تا ۲۱/۰۸ درصد (با میانگین ۱۸/۱ درصد و انحراف معیار ۱/۸۳ درصد) و آرسنیک در گستره ۴/۶۳ تا ۸/۲۹ درصد (با میانگین ۶/۵۴ درصد و انحراف معیار ۱/۴۷ درصد) اندازه‌گیری شده است. فراوانی تلوثور، طلا و کبالت در تترائدریت کمتر از حد آشکارسازی دستگاه است. کادمیوم، سرب، بیسموت، آهن، روی و نیکل از عناصر فرعی این کانی هستند. مقدار نقره در این کانه بالاست (جدول ۵).

آرژانتیت: مقدار نقره در آرژانتیت در گستره ۶۴/۱۸ تا ۸۶/۴۰ درصد (با میانگین ۱۲/۵ درصد و انحراف معیار ۱/۸۹ درصد) اندازه‌گیری شده است. فراوانی عناصر طلا و کبالت در آرژانتیت کمتر از حد آشکارسازی دستگاه است. عناصر آهن، نیکل، مس، آنتیمون و بیسموت در این کانی به عنوان عناصر فرعی و سیلنیوم و آرسنیک از دیگر عناصر موجود در این کانی هستند (جدول ۶).

الکتروم: مقدار طلا و نقره در الکتروم به ترتیب ۷۶/۶۱ تا ۷۹/۱۲ و ۱۷/۶۱ تا ۱۸/۸۱ درصد اندازه‌گیری شده است. مقدار عناصر دیگر در نمونه مورد بررسی در جدول ۷ آورده شده است.

بحث

اسفالریت: عناصر دوظرفیتی چون کادمیوم، سرب، آهن و نیکل

جدول ۵ مقادیر آماری داده‌های کانی تترائدریت کانسار چشمه نقره (بر حسب درصد وزنی).

عناصر	Elements	Fe	Ni	S	Co	Cu	Zn	As	Se	Ag	Cd	Sb	Te	Au	Pb	Bi
N	N	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸
متوسط	Mean	۲/۰۵	۰/۱۸	۲۴/۸۰	۰	۳/۱۰۰	۳/۹۰	۶/۵۴	۰/۰۵	۱۲/۵۰	۰/۲۰	۱۸/۱۰	۰	۰	۰/۲۵	۰/۰۸
انحراف معیار (S. D)	S. D	۰/۲۸	۰/۱۲	۰/۷۰	۰	۱/۱۹	۱/۰۲	۱/۴۷	۰/۰۲	۱/۸۹	۰/۰۸۴	۱/۸۳	۰	۰	۰/۲۷۳	۰/۰۷
کمینه	Min	۱/۶۹	۰/۰۰	۲۳/۴۴	۰	۲۸/۹۴	۲/۵۳	۴/۶۳	۰/۰۱	۹/۷۹	۰/۰۷	۱۶/۰۹	۰	۰	۰/۰۰	۰/۰۰
بیشینه	Max	۲/۳۸	۰/۳۴	۲۵/۷۱	۰	۳۲/۷۲	۵/۵۸	۸/۲۹	۰/۰۷	۱۵/۲۳	۰/۳۱	۲۱/۰۸	۰	۰	۰/۸۸	۰/۲۵

جدول ۶ مقادیر آماری داده‌های کانی آرژانتیت کانسار چشمه نقره (بر حسب درصد وزنی).

عناصر	Elements	Fe	Ni	S	Co	Cu	Zn	As	Se	Ag	Cd	Sb	Te	Au	Pb	Bi
N	N	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
متوسط	Mean	۰/۱۸	۰/۲۰	۱۲/۹۰	۰	۳/۶۰	۰/۰۱	۱/۷۰	۰/۰۲۲	۷۷/۳۹	۰/۸۸	۲/۲۵	۰/۰۸	۰	۰/۰۱	۰/۰۵
انحراف معیار (S. D)	S. D	۰/۰۵	۰/۲۶	۲/۴۰	۰	۴/۲۰	۰/۰۲	۱/۴۰	۰/۰۱	۹/۴۰	۰/۰۸	۱/۷۰	۰/۰۴	۰	۰/۰۱	۰/۰۵
کمینه	Min	۰/۱۴	۰/۰۰	۱۰/۹۶	۰	۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۴۴	۰/۰۰	۶۴/۱۸	۰/۷۸	۰/۵۴	۰/۰۵	۰	۰/۰۰	۰/۰۰
بیشینه	Max	۰/۲۴	۰/۵۶	۱۶/۵۴	۰	۹/۶۶	۰/۰۴	۳/۶۴	۰/۰۴	۸۶/۴۰	۰/۹۸	۴/۶۸	۰/۱۳	۰	۰/۰۲	۰/۱۲

جدول ۷ مقادیر آماری داده‌های الکتروم کانسار چشمه نقره (بر حسب درصد وزنی).

عناصر	Te	S	As	Bi	Fe	Cu	Ag	Au
El 1	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۲۶	۰/۳۸	۰/۱۵	۱۸/۸۱	۷۹/۱۲
El 2	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۹۳	۱۷/۶۱	۷۶/۶۱

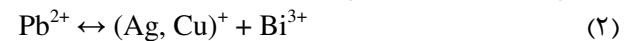
می‌دهد [۱۶]. وجود عنصر سلیوم در کالکوپیریت نیز نشان‌دهنده جانشینی سلیوم به‌جای گوگرد است [۱۶]. بیسموت، آنتیمون و نقره از دیگر عناصر مهم در کالکوپیریت‌ها هستند؛ عناصر بیسموت و آنتیمون به احتمال بسیار با جانشینی به‌جای Cu^{2+} وارد ساختار کالکوپیریت شده‌اند. نقره به‌صورت Ag^+ می‌تواند در بخش‌های چار وجهی ساختار کالکوپیریت جانشین Cu^+ شود [۱۶]. گفتنی است که در کانسار چشمه نقره، باوجود کانی‌های سولفیدی فلزهای پایه که همراه با کالکوپیریت در یک مرحله متبلور شده‌اند، کالکوپیریت نیز میزبان عناصر فرعی و گران‌بها چون نقره است.

پیریت

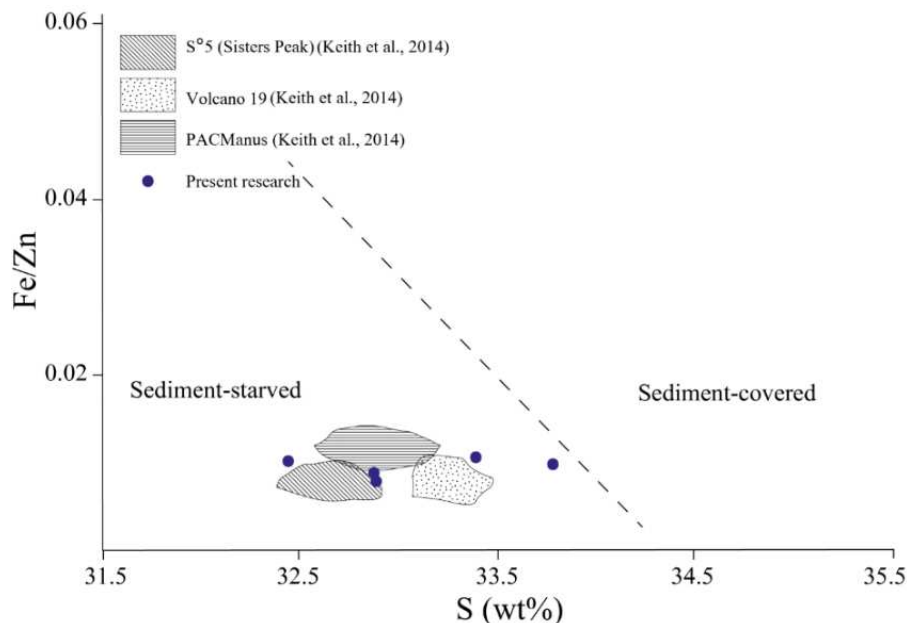
پیریت کانی رایج سولفید آهن در محیط‌های مختلف است. در کانسار چشمه نقره، پیریت اغلب بافت گل کلمی نشان می‌دهد و در بعضی بخش‌ها در حال جانشین شدن با سایر کانی‌های سولفیدی چون گالن و اسفالریت است (شکل ۳ الف). آرسنیک شاید مهم‌ترین عنصر موجود در ساختار کانی پیریت باشد. جانشینی آرسنیک در ساختار پیریت به دو صورت جانشینی As به‌جای گوگرد [۲۳، ۲۴] و جانشینی آرسنیک به‌جای آهن [۲۳، ۲۴، ۲۵] ممکن است. در شرایط احیایی، آرسنیک جانشین گوگرد و در شرایط اکسایشی جانشین آهن می‌شود [۲۵]. حضور عناصر سنگین چون نقره و سرب در پیریت نشان‌دهنده تشکیل پیریت‌ها در شرایط اکسایشی است [۲۵].

نکته مهم دیگر در مورد اسفالریت‌های کانسار چشمه نقره دیده نشدن درونگیرهای کالکوپیریت، پیریت و پیروتیت است. تشکیل این کانی‌ها به‌صورت درونگیر وابسته به وجود عناصری چون مس و آهن درون ساختار اسفالریت است. با توجه به مقدار ناچیز آهن و مس درون اسفالریت، تشکیل نشدن این کانی‌ها به‌صورت درونگیر دور از انتظار نیست [۲۰]. نمودار Fe/Zn نسبت به S نشان می‌دهد که کانسار چشمه نقره مانند کانسارهای گرمایی تشکیل‌شده در زیر دریا چون $S^{\circ}5$ (Sisters Peak) و $PACManus$ در یک محیط کم رسوب (Sediment-starved) تشکیل شده است (شکل ۷) [۲۰].

گالن: حضور آهن درون کانی گالن نشان‌دهنده جانشینی آهن و یا حضور ذرات بسیار ریز پیریت در گالن‌های کانسار چشمه نقره است. وجود کادمیوم و روی در کانی گالن نیز می‌تواند با ذرات ریز اسفالریت در گالن مربوط باشد [۱۴]. بیسموت، نقره و مس نیز به‌صورت جانشینی جفتی به‌جای سرب براساس واکنش زیر وارد ساختار گالن شده‌اند [۱۴]:



کالکوپیریت: کالکوپیریت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین کانی‌های سولفیدی مس، می‌تواند میزبان عناصر مهمی باشد. حضور کاتیون‌های دوظرفیتی سرب و روی در کالکوپیریت‌های کانسار چشمه نقره، جانشینی سرب و روی در ساختار این کانی و یا حضور اسفالریت و گالن‌های بسیار ریز در کالکوپیریت را نشان



شکل ۷ نمودار درصد وزنی گوگرد نسبت به Fe/Zn در اسفالریت [۲۰]. که براساس آن، اسفالریت‌های موجود در کانسار چشمه نقره شبیه اسفالریت‌های تشکیل‌شده در کانسارهای درون حوضه کم رسوب هستند. بر این اساس، دمای تشکیل اسفالریت‌های کانسار چشمه نقره حدود ۲۳۵ درجه سانتیگراد است.

مقدار آهن درون اسفالریت کانسار چشمه نقره پایین بوده (Fe < 1 wt%) و بر این اساس، دمای کانه‌زایی حدود ۲۳۵ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است. تشکیل کانه‌زایی در یک محیط زیراکسیدی همراه با باریت نشان می‌دهد که این کانه‌زایی در شرایط با گریزندگی اکسیژن بالا رخ داده و بالا بودن اکسیژن محیط از عوامل موثر در کم بودن آهن درون اسفالریت است. از سوی دیگر، براساس مقادیر روی، آهن و گوگرد اسفالریت، کانسار چشمه نقره مانند کانسارهای گرمایی در یک محیط کم رسوب تشکیل شده است.

کانی گالن در کانسار چشمه نقره میزبان عناصر مهمی چون بیسموت، نقره و مس بوده است که به احتمال بسیار به صورت جانشینی به جای سرب وارد ساختار گالن شده‌اند. همچنین عناصر بیسموت، آنتیمون و نقره جانشین مس موجود در ساختار کالکوپیریت شدند. نقره به صورت Ag^+ در بخش‌های چاروجهی ساختار کالکوپیریت جانشین Cu^+ گردیده است. پیریت‌های موجود در کانسار چشمه نقره عناصر سنگین چون نقره و سرب هستند که این با تشکیل پیریت‌ها در یک محیط زیراکسیدی همخوانی دارد.

مراجع

- [1] Qaemmaghami nejad A., Malehzadeh Shafaroodi A., Karimpour M.H., "Mineralogy, geochemistry, and fluid inclusion studies of Kuh-Sorbi Barite-lead \pm copper deposit, northeast of Iran", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 23 (2) 225-240 (in Persian).
- [2] Hajalilo B., Vosough B., Moayed M., "REE Geochemistry of Precambrian Shale-Hosted Barite-Galena Mineralization, a Case Study from NW Iran", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 22 (2) (2014) 39-48 (in Persian).
- [3] Pourkaseb H., Zarasvandi A. R., Aliabadi M.A., "Geochemistry and genesis of Robat-Paein barite deposit, Khomein, Markazi province", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 24 (4) (2017) 813-824 (in Persian).
- [4] Yarmohammadi A., Rastad E., Mohajjel M., Shamsa M.J., "Barika gold occurrence: gold-rich volcanogenic massive sulfide in Iran", Tehran Uni. J. Sci. 34 (2008) 47-60 (in Persian).
- [5] Yarmohammadi A., Rastad E., "Deformation effects on the gold behavior in Barika gold-rich massive sulfide deposit, east of Sardash", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 16 (3) (2008) 442-435 (in Persian).

بررسی شیمی پیریت‌های نهشته شده از سیال‌های گرمایی نشان می‌دهد که عناصر فلزی از جمله روی، مس و نیکل جانشین آهن موجود در پیریت شده‌اند [۲۳]. از سوی دیگر، بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی و تصاویر الکترون‌های پس پراکنده (BSE) می‌توان گفت که مقادیر بالای سرب، روی و مس در کانی پیریت می‌تواند ناشی از حضور میانبراهایی از کانی‌های گالن، اسفالریت و کالکوپیریت باشد.

تراثدریت-تنانتیت: بر اساس نتایج تجزیه ریزپردازش الکترونی مایکروپروپ (EPMA)، تراثدریت-تنانتیت تنها کانی سولفوسالتی دیده شده در کانسنگ‌های چینه‌سان است. به جز Zn و Fe که از عناصر رایج در کانی تراثدریت-تنانتیت هستند، گاهی عناصر دیگر نیز در این کانی دیده می‌شود در کانسارهایی که کانی‌های سولفیدی فلزهای پایه همراه با تراثدریت-تنانتیت تشکیل شده‌اند، عناصر آرسنیک، آنتیمون و نقره کانی تراثدریت-تنانتیت را به‌عنوان میزبان اصلی انتخاب می‌کرده و وارد ساختار تراثدریت-تنانتیت می‌شوند [۱۵]. اغلب مقدار مس و آهن درون اسفالریتی که همراه با تراثدریت-تنانتیت تشکیل شده کمتر از تراثدریت است [۱۵]. گالن اغلب میزبان مناسب‌تری نسبت به تراثدریت-تنانتیت برای عنصر بیسموت است [۱۵].

آرژانتیت: کانی آرژانتیت در کانسار چشمه نقره در همراهی با تراثدریت-تنانتیت تشکیل شده و مقادیر به نسبت قابل‌توجهی از عناصر مس، آنتیمون، آرسنیک، کادمیوم، نیکل و آهن را داراست که می‌تواند بیانگر حضور درونگیرهایی از کانی تراثدریت-تنانتیت در آرژانتیت باشد. سلنیوم و تلوریوم موجود در کانی آرژانتیت، به احتمال بسیار جانشین گوگرد کانی میزبان شده‌اند.

برداشت

کانسار Ba-Au-Ag چشمه نقره از جمله کانسارهای آتشفشانزاد نوع کروکوی غنی از باریت بوده که در یک محیط کششی درون قوسی تشکیل شده است. عدسی‌های باریتی سولفیددار کانسار که حجم اصلی ذخیره را تشکیل می‌دهند، در واحد توف ریولیتی و بر رگه-رگچه‌های باریتی-سیلیسی تشکیل شده‌اند. این رگه-رگچه‌ها تغذیه کننده عدسی‌های باریتی هستند. تشکیل عدسی‌های باریت به همراه سولفیدهای دانه‌پراکنده نشان می‌دهد که این کانسار در یک محیط زمین‌شیمیایی زیراکسیدی شکل گرفته است.

tennantite: Effects on element partitioning among base metal sulphides”, Minerals, 7(2) (2017) 17.

[16] George L. L., Cook N. J., Crowe B. B., Ciobanu C. L. “Trace elements in hydrothermal chalcopyrite”, Mineralogical Magazine, 82(1) (2018) 59-88.

[17] Alavi M., “Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: New data and interpretations”, Tectonophysics. 229 (1994) 211–238.

[18] Taheri J., Shamanian G. H., “Geological map in 1:100000 scale of Kashmar sheet”, Geological Survey of Iran (2001).

[19] Shahrabi M., Hosseini M., Shabani G., “Geological map in 1:100000 scale of Bardaskan sheet”, Geological Survey of Iran (2006).

[20] Keith M., Haase K. M., Schwarz-Schampera U., Klemd R., Petersen S., Bach W., “Effects of temperature, sulfur, and oxygen fugacity on the composition of sphalerite from submarine hydrothermal vents”, Geology, 42(8), 699-702.

[21] Koski R. A., Hein J. R., “Stratiform barite deposits in the Roberts Mountains allochthon, Nevada: A review of potential analogs in modern sea-floor environments: US Department of the Interior”, US Geological Survey (2004).

[22] Maynard J., Morton J., Valdes-Nodarse E., Diaz-Carmona A., “Sr isotopes of bedded barites; guide to distinguishing basins with Pb-Zn mineralization”, Economic Geology, 90(7) (1995) 2058-2064.

[23] Gregory, D. D., Large, R. R., Halpin, J. A., Baturina E. L., Lyons T. W., Wu S., “Maslennikov”, Trace element content of sedimentary pyrite in black shales. Economic Geology, 110(6) (2015) 1389-1410.

[24] Reich M., Becker U., “First-principles calculations of the thermodynamic mixing properties of arsenic incorporation into pyrite and marcasite”, Chemical Geology, 225(3) (2006) 278-290.

[25] Deditius A. P., Utsunomiya S., Renock D., Ewing R. C., Ramana C. V., Becker U., Kesler S. E., “A proposed new type of arsenian pyrite: Composition, nanostructure and geological significance”, Geochimica et Cosmochimica Acta, 72(12) (2008) 2919-2933.

[26] Qian G., Brugger J., Testemale D., Skinner W., Pring A., “Formation of As (II)-pyrite during experimental replacement of magnetite under hydrothermal conditions”, Geochimica et Cosmochimica Acta, 100 (2013) 1-10.

[6] Tajeddin H.A., Rastad E., Yaghubpour A., Mohajjel M., “Formation and evolution stages of gold rich Barika massive sulfide deposit, east of Sardasht, northern Sanandaj-Sirjan zone: Based on structural, textural and fluid inclusion studies”, Iranian Journal of Economic Geology. 2(1) (2010) 107-135 (in Persian).

[7] Baharvandi A., Loutfi M., Ghaderi M., Jafari M., Tajeddin H. A., “Ore mineralization and fluid inclusion and sulfur isotope studies of the Shekarbeig deposit, southwest Mahabad, Sanandaj-Sirjan Zone”, Quarterly Journal of Geosciences, Geol. Min. Expl. Surv. Iran. 26(103), (2017) 201-218 (in Persian).

[8] Tajeddin H. A., Hassankhanlou S., Mohajjel M., “Geology, mineralogy and fluid inclusion studies of the Abdossamadi barite deposit, Northeast Marivan”, Quarterly Journal of Geosciences, Geol. Min. Expl. Surv. Iran. 27(109), 97-108 (2018) (in Persian).

[9] Hassankhanlou S., “Geology, mineralogy, deformation and genesis of Abdolsamadi barite deposit in late Cretaceous volcano-sedimentary sequences”, NE Marivan. Unpublished M.Sc. thesis, Tehran, Tarbiat-Modares University, Iran.

[10] Richard P.J. Sholeh A., “The Tethyan Tectonic History and Cu-Au Metallogeny of Iran, SEG Special Publication 19”, Economic Geology

[11] Qafouri E., Tajeddin H. A., Rastad E., “Cheshmeh Noghreh gold deposit, NW Kashmar: an example of stratiform gold deposit in the Eocene volcano-sedimentary sequences”, 36th Symposium on Geosciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, 25-27 Feb. in Persian with English abstract (2018).

[12] Qafouri E., “Geology, mineralogy, geochemistry and genesis of Cheshme Noghreh gold deposit, NW Kashmar”, Unpublished M.Sc. thesis, Tehran, Tarbiat-Modares University, Iran.

[13] Cook N. J., Ciobanu C. L., Pring A., Skinner W., Shimizu M., Danyushevsky L., Melcher F., “Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study”, Geochimica et Cosmochimica Acta, 73(16) (2009) 4761-4791.

[14] George L., Cook N. J., Ciobanu C. L., Wade B. P., “Trace and minor elements in galena: A reconnaissance LA-ICP-MS study, American Mineralogist, 100(2-3) (2015) 548-569.

[15] George L. L., Cook N. J., Ciobanu C. L., “Minor and trace elements in natural tetrahedrite-