

ذخیره روی - سرب شهرستانک، جنوب شرق قم: ملاحظات بر کانه‌زایی، زمین‌شیمی ایزوتوپ‌های پایدار و توزیع عناصر خاکی نادر

سهیلا حسن‌زاده محله^۱، علی عابدینی^{*}، قهرمان سهرابی^۲، مریم خسروی^۳

۱ - گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲ - گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳ - دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۷/۶، نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۹/۷)

چکیده: ذخیره روی - سرب شهرستانک، به عنوان بخشی از کمان ماگمایی ارومیه - دختر، در ۵۰ کیلومتری جنوب شرق شهرستان قم واقع است. نفوذ توده‌های آذرین مونزدیوریتی تا کوارتزادیوریتی به سن میوسن به درون توالی‌های آتشفشانی - رسوبی اتوسن (به طور عمده بازالت آندزیتی)، عامل اصلی گسترش دگرسانی‌های کربناتی، سیلیسی و کلریتی به همراه رخداد کانه‌زایی روی - سرب به شکل رگه‌ای و برشی در منطقه شهرستانک بوده است. بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری نشان می‌دهند که اسفالریت، گالن، پیریت، تنانتیت، سروزیت، پلانتریت، هیدروزینکیت، هماتیت و لیمونیت در این ذخیره با کانی‌های باطله چون کلسیت، باریت و کوارتز همراهی می‌شوند. بافت‌های غالب در کانسنگ‌ها شامل دانه پراکنده، رگه‌ای، برشی، جان‌شینی و بازماندی هستند. الگوی توزیع عناصر خاکی نادر (REE) بهنجار شده به کندریت در بازالت‌های آندزیتی با تک‌کانی‌هایی چون گالن، اسفالریت و کلسیت کانسنگ‌ها تا حدی متفاوت هستند، با این حال نزدیکی مقادیر Y/Ho آنها نشان می‌دهد که شستشوی فلزها از سنگ‌های میزبان بازالت آندزیتی نقش مهمی در تشکیل و گسترش این ذخیره داشته است. رخداد بی‌هنجاری مثبت Eu و Ce در گالن ($Eu/Eu^* = 2.18 - 2.83$ و $Ce/Ce^* = 1.35 - 1.54$) و اسفالریت ($Eu/Eu^* = 1.92 - 2.28$ و $Ce/Ce^* = 1.36 - 1.63$) بیانگر طبیعت احیایی سیال‌های کانسنگ‌ساز است. مقادیر ایزوتوپ $\delta^{34}S$ در نمونه‌های گالن و اسفالریت به ترتیب گستره تغییراتی از ۳- تا ۱+۰% و ۲- تا ۹+۰% را نشان می‌دهد که نشانگر خاستگاه ماگمایی این دو کانی سولفیدی است. رسم مقادیر $\delta^{18}O$ نسبت به $\delta^{13}C$ در نمونه‌های کلسیت نشان‌دهنده آمیختگی سیال‌های ماگمایی با سیال‌های جوی طی تکامل و گسترش این ذخیره است. تلفیق نتایج به دست آمده از بررسی‌های صحرایی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، نوع دگرسانی‌های گرمایی، زمین‌شیمی REE و بررسی‌های ایزوتوپ‌های پایدار نشان می‌دهد که کانه‌زایی رخ داده در منطقه شهرستانک شباهت زیادی به کانسارهای فراگرمایی سولفیدشدگی حدواسط دارد.

واژه‌های کلیدی: ذخیره روی - سرب؛ فراگرمایی سولفیدشدگی حدواسط؛ ایزوتوپ‌های پایدار؛ عناصر خاکی نادر؛ شهرستانک.

مقدمه

چند دهه گذشته نشان داده است که از مقادیر REE تک‌کانی - های تجزیه شده می‌توان به طور بهینه برای تعیین روند تکاملی سامانه‌های گرمایی و شناسایی شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل کانسنگ‌ها بهره گرفت [۱-۶]. همچنین در بین کانی‌های

بررسی زمین‌شیمی عناصر خاکی نادر (REE) تک‌کانی‌ها و بررسی‌های ایزوتوپ‌های پایدار ابزار بسیار مناسبی برای تعیین خاستگاه مواد و محلول‌های کانسنگ‌ساز هستند. بررسی‌های

*نویسنده مسئول، تلفن: ۳۲۹۷۲۱۳۴ (۰۴۴)، پست الکترونیکی: abedini2020@yahoo.com

کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی ذخیره روی - سرب شهرستانک می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای شناسایی و پی‌جویی پتانسیل‌های معدنی جدید در این ناحیه از ایران را فراهم کند. در این پژوهش، بر پایه بررسی‌های صحرایی، کانی‌شناسی (بررسی دگرسانی‌های حاضر و رگه‌های کانه‌دار) و زمین‌شیمیایی (بررسی الگوی توزیع REE در تک‌کانی‌هایی چون کلسیت، گالن و اسفالریت به همراه سنگ‌های بازالت آندزیتی و بررسی مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن، گوگرد و کربن در تک‌کانی‌های یاد شده)، نوع کانه‌زایی و شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل ذخیره روی - سرب شهرستانک تعیین شده است.

روش بررسی

این پژوهش در دو بخش بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام گردید. بخش صحرایی شامل بررسی روند توزیع رگه‌ها، بافت و ساخت کانسنگ‌ها، چگونگی ارتباط رگه‌های کانه‌دار با سنگ‌های درونگیر و نوع دگرسانی‌های گسترش یافته مربوط به آنها بوده است. بر این اساس، بیش از ۱۲۰ نمونه از سنگ‌های درونگیر، رگه‌ها و دگرسانی‌های در ارتباط به آنها جمع‌آوری شدند. بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری با تهیه ۲۰ مقطع نازک و ۲۵ مقطع صیقلی از نمونه‌های انتخابی در گروه زمین‌شناسی دانشگاه ارومیه انجام گردید.

برای بررسی‌های سنگ زمین‌شیمیایی، تعداد ۲۰ نمونه سنگی از بخش‌های کانه‌دار انتخاب و مقادیر عناصر فلزی آنها با روش طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) در شرکت کانساران بینالود تعیین شدند. افزون بر این، تعداد ۱۰ نمونه از سنگ‌های میزبان بازالت آندزیتی به همراه ۵ نمونه از کلسیت‌های گرمابی، ۶ نمونه از گالن‌ها و ۳ نمونه از اسفالریت‌های جدا شده از رگه‌ها و برش‌های کانه‌دار که نماینده مرحله اصلی کانی‌زایی هستند، انتخاب و مقادیر عناصر خاکی نادر (La-Lu) و Y آنها با روش ICP-MS در شرکت کانساران بینالود اندازه‌گیری شدند. حد تشخیص دستگاه برای Y، Lu، Tm، Yb و Eu برابر با ۰/۰۱ گرم در تن، برای Ho، Dy و Sm برابر با ۰/۰۲ گرم در تن، برای Er، Gd و Pr برابر با ۰/۰۵ گرم در تن و برای Nd، Ce و La برابر با ppm گرم در تن بوده است. دقت اندازه‌گیری‌ها برای Pr، Nd، Sm، Ho و Tm برابر

مختلف حاضر در کانسنگ‌ها، الگوی توزیع REE در کلسیت - های گرمابی می‌تواند اطلاعات بالارزشی از خاستگاه و محیط فیزیکوشیمیایی محلول‌های گرمابی را فراهم کند [۷-۱۱]. در بسیاری از ذخایر گرمابی، رگه‌های دربردارنده کلسیت شامل کانی‌های سولفیدی و اکسیدی هستند که از سیال‌های با گستره وسیعی از ترکیب، فشار، و دما ترسیب شده‌اند. بررسی‌ها نشان داده است که اختلاف آشکاری بین مقادیر تمرکز REE در کلسیت‌های مربوط به ذخایر مختلف وجود دارد [۶، ۱۲]. از این رو، توزیع REE در کانی کلسیت می‌تواند ابزار بسیار مناسبی برای بررسی فلززایی باشد [۱]. افزون بر این، در ذخایر رگه‌ای، بررسی روند توزیع REE در کانی‌های سولفیدی چون اسفالریت و گالن به همراه بررسی ایزوتوپ پایدار می‌تواند کمک شایانی به تشخیص نوع و شرایط تشکیل کانسارها، به ویژه تعیین نوع ذخایر فراگرمایی نماید.

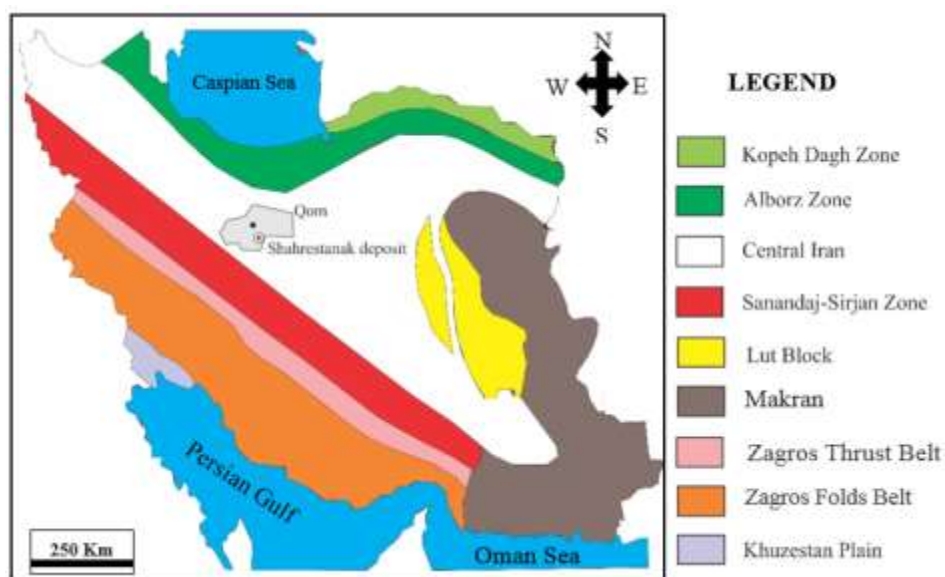
کمان ماگمایی ارومیه - دختر از مهم‌ترین پهنه‌های دربردارنده ذخایر مس پورفیری و کانسارهای فراگرمایی در کشور است [۱۳]. ذخیره روی - سرب شهرستانک یکی از رخدادهای چندفلزی شناسایی شده بر این کمان ماگمایی است که در ۵۰ کیلومتری جنوب شرق شهرستان قم قرار دارد. این ذخیره در شمال نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کهک [۱۴] واقع است. در گستره این ذخیره، شواهدی از فعالیت‌های معدنکاری قدیمی چون حفر ترانشه، چاهک و تونل‌های دنباله لایه دیده می‌شود. توان کانه‌زایی در منطقه شهرستانک نخستین بار توسط شرکت معدنی کاوش گستر ارسباران با نظارت شرکت معادن منگنز ایران (ونارچ قم) بررسی شده است. عملیات پی‌جویی بر این ذخیره شامل حفر ۲۴ حلقه گمانه، ۲۰ ترانشه و بررسی‌های زمین‌فیزیکی القای قطبشی و مقاومت ویژه بوده است. بر اساس نتایج تجزیه‌های شیمیایی انجام شده بر ۵۰۵ نمونه جمع‌آوری شده از ترانشه‌ها، تونل‌ها و مغزه‌های حفاری، تناژ بیش بر ۲۱۷ هزار تن کانسنگ سولفیدی و اکسیدی با عیار متوسط ۴/۲ درصد روی و ۱/۵ درصد سرب برای این ذخیره برآورد شده است [۱۵]. با وجود بررسی‌های پی‌جویی بر این ذخیره، اطلاعات مدونی پیرامون سازوکار تشکیل و نوع کانه‌زایی در منطقه شهرستانک وجود ندارد. با توجه به گسترش کانه‌زایی‌های نوع فراگرمایی در کمان ماگمایی ارومیه - دختر، بررسی دقیق ویژگی‌های زمین‌شناسی،

شهرستان قم واقع است. این ذخیره، بر اساس تقسیمات پهنه‌های زمین‌ساختی ایران [۱۶] در پهنه ایران مرکزی قرار دارد (شکل ۱). بارزترین واحدهای زمین‌شناسی گستره ذخیره به ترتیب قدیم به جدید شامل سنگ‌های آتشفشانی ائوسن، تشکیلات رسوبی و آذرین درونی میوسن هستند (شکل ۲). سنگ‌های آتشفشانی ائوسن شامل بازالت آندزیتی (به طور عمده)، آندزیت و توف هستند. سنگ‌های آذرین درونی با ترکیب کوارتز دیوریت تا مونزودیوریت به صورت دایک‌هایی که واحد آتشفشانی ائوسن را قطع کرده‌اند، در گستره ذخیره دیده می‌شوند. تشکیلات رسوبی میوسن با دو نوع سنگ‌شناسی متفاوت (۱) شیل، مارن و ماسه‌سنگ و (۲) مارن و سنگ آهک قابل دیدن هستند. رگه‌های کانهدار در این ذخیره درون سنگ‌های بازالت آندزیتی (به طور عمده)، توف و دایک‌های مونزودیوریت گسترش یافته‌اند. کانه‌زایی روی - سرب در ذخیره شهرستانک در ارتباط با شکستگی‌ها و تشکیل رگه‌هایی به نسبت دراز همراه با مجموعه‌های برشی رخ داده است. راستای رگه‌های کانهدار اغلب شمال‌شرق - جنوب‌غرب با شیب ۵۵ تا ۸۰ درجه به سمت جنوب‌شرق است. ضخامت رگه - رگچه‌های کانهدار بین ۱ تا ۱۰۰ سانتی‌متر متغیر است. بر اساس بررسی - های صحرایی و میکروسکوپی، کانه‌زایی روی - سرب در این ذخیره به صورت رگه - رگچه‌های سیلیسی - کربناتی و همچنین برش‌هایی با سیمان سیلیسی - کربناتی رخ داده است. در گستره ذخیره شهرستانک، ساختارهای اصلی شامل گروهی از سامانه‌های گسلی با روندهای متفاوت است که طی سه مرحله شکل گرفته‌اند: (۱) سامانه گسلی با روند شمال‌غرب - جنوب‌شرق که پیش از کانه‌زایی تشکیل شده‌است، (۲) سامانه گسلی با روند شمال‌شرق - جنوب‌غرب که همزمان با کانه‌زایی ایجاد شده‌است و (۳) سامانه گسلی در راستاهای مختلف که پس از کانه‌زایی به وجود آمده است. این سامانه‌های گسلی رگه‌های کانهدار را قطع کرده‌اند. به طور ویژه، گسل‌های با روند شمال‌شرق - جنوب‌غرب که همزمان با کانه‌زایی هستند، هم‌راستا با دایک‌های مونزودیوریتی بوده و نشان دهنده نقش کنترل کننده این گسل‌ها بر رگه‌های کانهدار هستند.

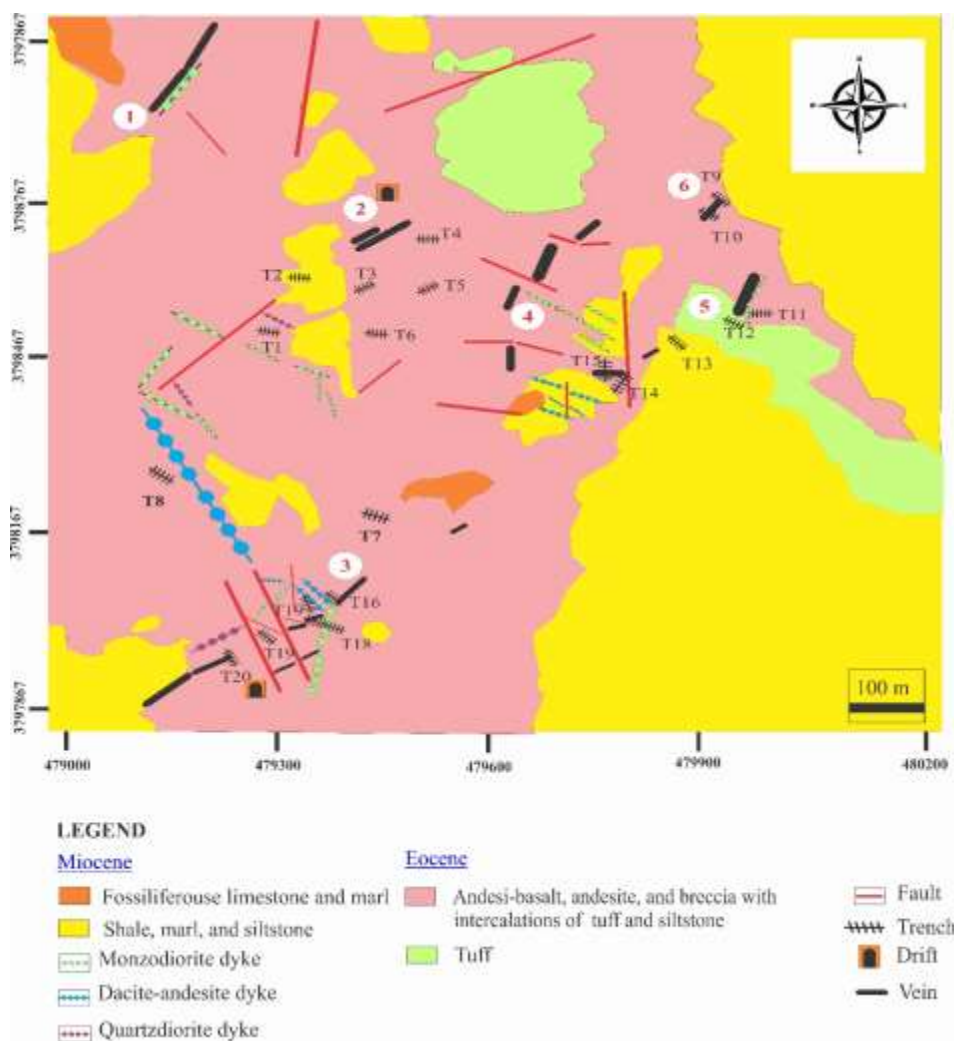
با $\pm 2\%$ ، برای $Y, La, Ce, Eu, Tb, Dy, Er$ و Lu برابر با $\pm 5\%$ و برای Yb و Gd برابر با $\pm 10\%$ بوده است. در این پژوهش، برای بررسی‌های تکمیلی تعداد ۵ نمونه از کلسیت‌های گرمابی برای تجزیه ایزوتوپی کربن و اکسیژن و تعداد ۸ نمونه از کانی‌های سولفیدی (۵ نمونه گالن و ۳ نمونه اسفالریت) برای اندازه‌گیری مقادیر گوگرد از رگه‌ها و برش‌های کانهدار انتخاب شدند. این نمونه‌ها نخست با سنگ‌شکن فکی خرد گردیدند و سپس با میکروسکوپ دوچشمی، کانی‌های یاد شده جدا شدند. در مرحله بعد، نمونه‌های یاد شده با هاون عقیق پودر شده و حدود ۱ گرم از آنها به یک لوله کوچک منتقل شدند. ریزلوله‌ها سرانجام برای تجزیه ایزوتوپی به آزمایشگاه تحقیقاتی ایزوتوپ‌های پایدار دانشگاه اراک ارسال شدند. برای تجزیه ایزوتوپ گوگرد کانی‌های سولفیدی، نخست با احتراق نمونه‌ها در دستگاه تجزیه عنصری در دمای بالا در حضور اکسیژن اضافی، گوگرد موجود در آنها تبدیل به گاز SO_2 گردید. سپس گاز تولید شده پس از طی مراحل خالص‌سازی از سایر گازهای همراه جدا شده، از سامانه جریان پیوسته به همراه گاز هلیوم به عنوان گاز حامل وارد دستگاه طیف‌سنج جرمی نسبت ایزوتوپی شد. برای اندازه‌گیری نسبت ایزوتوپی ($^{34}S/^{32}S$) نسبت شدت مولکولی جرم‌های ۶۶ به ۶۴ سنجیده و گزارش گردید. برای تجزیه ایزوتوپ‌های کربن و اکسیژن نمونه‌های کلسیت، نخست نمونه‌های خردایش شده با اسیدفسفریک در معرض واکنش قرار گرفتند و گاز CO_2 تولید شد. این گاز پس از خالص‌سازی و رطوبت‌گیری، از دستگاه ورودی دوگانه (Dual-Inlet) به طیف‌سنج نسبت ایزوتوپی تزریق گشت و نسبت‌های جرمی $^{18}O/^{16}O$ و $^{13}C/^{12}C$ تعیین شدند. برای اندازه‌گیری مقدار $\delta^{34}S$ در کانی‌های گالن و اسفالریت از استانداردهای IAEA-SO-6 و IAEA-S-4 و برای اندازه‌گیری مقادیر $\delta^{18}O$ و $\delta^{13}C$ در کلسیت از استاندارد IAEA-CO-8 برای واسنجی سامانه استفاده گردید. دقت اندازه‌گیری‌ها برای $\delta^{34}S$ ، $\delta^{18}O$ و $\delta^{13}C$ برابر با $\pm 0.2\%$ بوده است.

زمین‌شناسی ذخیره

ذخیره روی - سرب شهرستانک، در ۵۰ کیلومتری جنوب‌شرق



شکل ۱ نقشه پهنه‌های زمین‌ساختی ایران [۱۶] و موقعیت ذخیره روی - سرب شهرستانک بر آن.



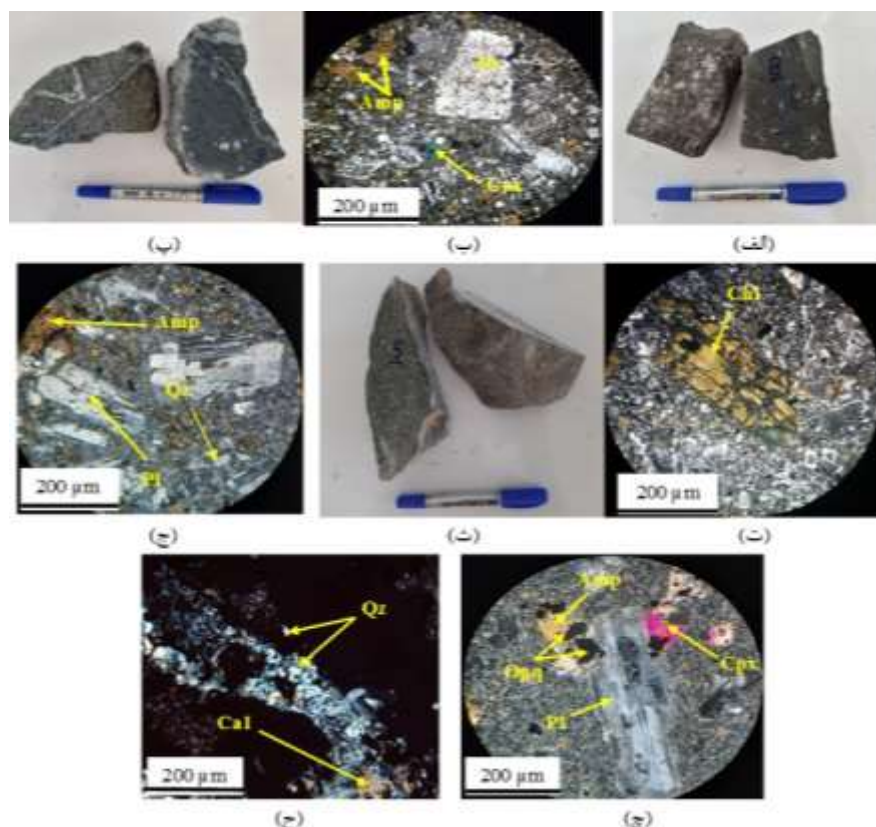
شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی ذخیره روی - سرب شهرستانک. برگرفته از مرجع [۱۴] با کمی تغییرات.

نتایج و بحث

سنگ‌شناسی

می‌رسد که آنها فازهای تاخیری توده‌های نفوذی باشند که در فضاهای کششی جایگزین شده‌اند. بر اساس بررسی‌های سنگ‌شناسی، پلاژیوکلاز در واحد مونزودیوریت ۵۰ تا ۷۰ درصد حجم سنگ را تشکیل می‌دهد. پس از پلاژیوکلاز، کانی‌های فرومنیزین چون آمفیبول و کلینوپیروکسن فراوانی بیشتری دارند. پلاژیوکلازها در اثر دگرسانی در این سنگ به کلسیت و اپیدوت تجزیه شده‌اند. همراه با پلاژیوکلاز، ۱۰ تا ۲۵ درصد حجمی سنگ را آمفیبول‌ها تشکیل می‌دهند که اغلب به کلریت تبدیل شده‌اند. پیروکسن‌ها و کانی‌های کدر به ترتیب ۲ تا ۷ درصد حجمی و ۲ تا ۵ درصد حجمی این سنگ را شامل می‌شوند (شکل‌های ۳ ث و ج). واحد کوارتزیدیوریت نسبت به دایک‌های مونزودیوریت گستردگی کمتری دارد. در این واحد سنگی، پلاژیوکلازها درشت بلور و سالم هستند. مقدار ۱ تا ۲ درصد کوارتز نیز در متن سنگ‌ها وجود دارد. مقدار کانی‌های کدر در این سنگ به ۵ تا ۱۰ درصد حجمی می‌رسد (شکل ۳ ج).

بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، مهم‌ترین کانی‌های تشکیل دهنده بازالت‌های آندزیتی شامل پلاژیوکلاز، آمفیبول و پیروکسن هستند. بخش عمده‌ای از آمفیبول‌ها در این واحد سنگی به کلریت دگرسان شده‌اند. افزون بر کلریت، کانی‌های تیره، کلسیت و کوارتز به عنوان فراورده‌های ثانویه در این سنگ‌ها حضور دارند (شکل‌های ۳ الف و ب). توف‌ها دارای بافت ریزسنگی هستند و درشت بلور اصلی آنها پلاژیوکلاز است. این بلورها زاویه‌دار هستند و حالت شکسته شده دارند. تعدادی بلور کامل جانشین شده با کلریت در این واحد دیده می‌شوند. کلریت، کوارتز و کلسیت کانی‌های ثانویه در توف‌ها هستند که در اثر تجزیه کانی‌های مافیک اولیه ایجاد شده‌اند (شکل‌های ۳ پ و ت). جوان‌ترین واحد آذرین در گستره ذخیره را دایک‌های مونزودیوریت تا کوارتزیدیوریت تشکیل می‌دهند که واحدهای آتشفشانی - رسوبی ائوسن را قطع کرده‌اند. از این رو، به نظر



شکل ۳ تصاویری از نمونه‌های دستی و میکروسکوپی واحدهای سنگی ذخیره شهرستانک: الف و ب) نمونه دستی و تصویر میکروسکوپی از بازالت آندزیتی با بافت ریزدانه‌ای، پ و ت) نمونه دستی و تصویر میکروسکوپی از واحد توفی با دگرسانی کلریتی، ث و ج) نمونه دستی و تصویر میکروسکوپی از دایک مونزودیوریتی، چ) دایک کوارتزیدیوریتی و درشت بلورهای پلاژیوکلاز در آن، ح) رگه کوارتز - کلسیت در توف‌های میزبان کانه‌زایی. همه تصاویر میکروسکوپی در نور شکستی و به صورت قطبیده متقاطع (xpl) تهیه شده‌اند. نشانه‌های اختصاری به کار رفته عبارتند از: Amp: آمفیبول، Pl: پلاژیوکلاز، Cpx: کلینوپیروکسن، Qtz: کوارتز، Chl: کلریت، Qz: کوارتز و Opq: کانی کدر.

دگرسانی

در ذخیره شهرستانک، دگرسانی‌هایی چون سیلیسی، کربناتی و کلریتی قابل تشخیص است. دگرسانی‌های سیلیسی و کربناتی در سنگ‌های میزبان بازالت آندزیتی گسترش بیشتری دارند و همراه با کانی‌زایی هستند. در دگرسانی‌های سیلیسی و کربناتی، به ترتیب کوارتز و کلسیت بیشتر در رگچه‌ها و سیمان برش‌ها همراه با کانی‌های سولفیدی حضور دارند. سنگ میزبان بازالت آندزیتی، توف‌ها و دایک‌ها دستخوش دگرسانی کلریتی شده‌اند. این دگرسانی محدود به پیرامون رگه‌های کانهدار بوده و رنگ سبز آن ناشی از کلریت و اپیدوت است (شکل‌های ۳ پ و ت). دگرسانی سیلیسی شامل تشکیل رگه - رگچه‌هایی از سیلیس به صورت کوارتز بلورین و سیلیس بی‌شکل است. کلسیت نیز به صورت رگچه‌ای و شکافه‌پرکن در این دگرسانی دیده می‌شود (شکل ۳ ح). بر اساس نوع دگرسانی‌ها و روابط قطع‌شدگی در رگه - رگچه‌ها و برش‌های کانهدار، توالی همبرزایی کانی‌های فلزی و غیرفلزی در ارتباط با محلول کانهدار در ذخیره شهرستانک در شکل ۴ نشان داده شده است.

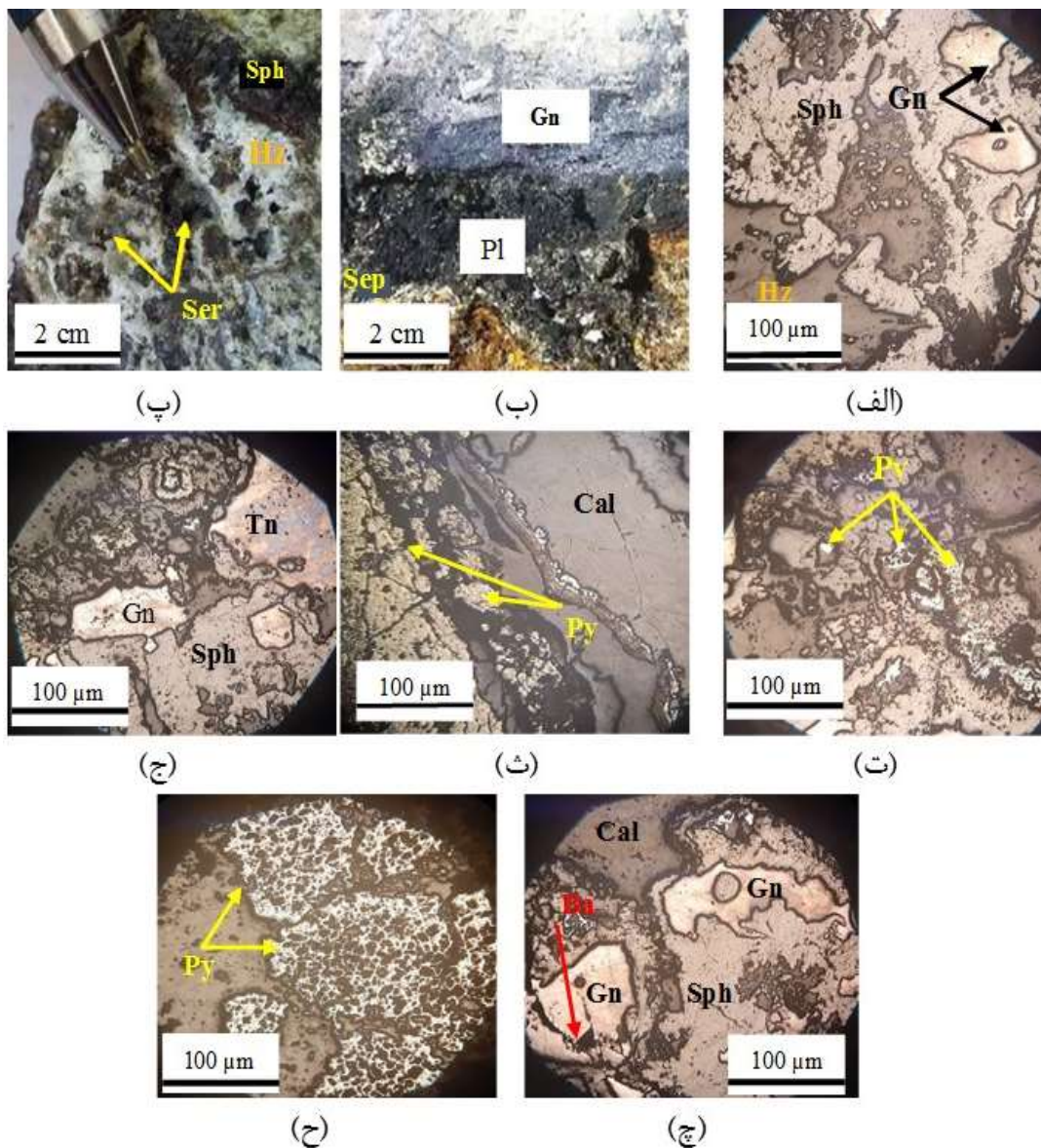
کانه‌نگاری

بررسی‌های کانه‌نگاری نشان می‌دهند که کانی‌های فلزی اصلی در این ذخیره شامل پیریت، اسفالریت، گالن و تنانتیت هستند. همچنین، کانی‌هایی چون هیدروزینکیت، سروزیت، پلانتریت، گوتیت و لیمونیت در اثر فرآیندهای برونزاد تشکیل شده‌اند. باریت، کلسیت و کوارتز نیز به عنوان کانی‌های باطله حضور

دارند. گالن در این ذخیره به طور عمده به صورت بلورهای شکل‌دار ریز تا درشت دیده می‌شود. این کانی اغلب از لبه به پلانتریت و سروزیت تجزیه شده است (شکل‌های ۵ الف و ب). اسفالریت فراوان‌ترین کانی سولفیدی در ذخیره شهرستانک بوده که در اثر عملکرد فرآیندهای برونزاد اغلب از مرکز و کناره‌ها به هیدروزینکیت دگرسان شده است. در برخی نقاط، بلورهای گالن درون اسفالریت دیده می‌شوند که بیانگر تشکیل گالن پیش از اسفالریت است (شکل ۵ پ). پیریت به طور عمده به صورت بلورهای ریز نیمه‌شکل‌دار در زمینه حضور دارد و گاه در همراهی با گالن و اسفالریت درون رگه - رگچه‌های کانهدار کوارتزی - کربناتی و برش‌های گرمابی دیده می‌شود (شکل‌های ۵ ت و ث). کانی‌های سولفوسالت (تنانتیت) به صورت میانبارهایی با اندازه ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون درون و پیرامون بلورهای گالن و اسفالریت دیده می‌شوند (شکل ۵ ج). کانی‌های سولفوسالت، به ویژه تنانتیت، به دلیل تمرکز نقره در ساختار بلوری خود مهم هستند. نقره به صورت محلول جامد در شبکه بلوری این کانی‌ها تمرکز یافته و می‌تواند دلیل بخشی از عیار نقره در برخی نمونه‌های این ذخیره باشد. فراوانی پیریت در رگه‌های سیلیسی - کربناتی و برش‌های کانهدار اغلب کمتر از اسفالریت و گالن است. این کانی از کناره‌ها به گوتیت و لیمونیت تجزیه شده است. شدت دگرسانی‌های برونزاد گاهی به حدی است که تنها بقایایی از پیریت باقی مانده و بافت بازماندی در کانسنگ ایجاد شده است (شکل ۵ ح).

کانی‌ها	فرآیندها				مرحله اکسایش
	پیش از کانه زایی	کانه زایی	پس از کانه زایی	کانه زایی	
اسفالریت					
گالن					
پیریت					
تنانتیت					
هیدروزینکیت					
پلانتریت					
سروزیت					
گوتیت					
لیمونیت					
کلسیت					
کوارتز					
باریت					

شکل ۴ توالی همبرزایی کانی‌ها در ذخیره روی - سرب شهرستانک.



شکل ۵ تصاویری از نمونه دستی و میکروسکوپی نمونه‌های کانهدار ذخیره شهرستانک: الف) کانهدزایی گالن و اسفالریت، ب) بلورهای گالن در حال تبدیل به پلاتریت و سروزیت، پ) جانشینی اسفالریت با هیدروزنیکیت، ت) پیریت‌های پراکنده در متن کانسنگ، ث) رگچه‌های پیریت در کنار گالن و اسفالریت، ج) حضور تنانتیت در سطح کانی گالن، چ) قطع شدگی گالن با باریت، ح) پیریت با بافت بازماندی. همه تصاویر میکروسکوپی در نور بازتابی قطبیده صفحه ای (ppl) تهیه شده‌اند. نشانه‌های اختصاری به کار رفته عبارتند از: Gn: گالن، Sph: اسفالریت، Py: پیریت، Tn: تنانتیت، Cal: کلسیت، Ba: باریت، Hz: هیدروزنیکیت، Sr: سروزیت و Pl: پلاتریت.

زمین‌شیمی

همبستگی بین عناصر فلزی کانسنگ‌ساز

و قوی $Ag-Sb$ ($r = 0.97$) و $Sb-Pb$ ($r = 0.80$) با وجود کانی‌های سولفوسالت در رگه‌های کانهدار قابل توجیه است [۱۹]. در کانسنگ‌های مورد بررسی، همبستگی مثبت و متوسطی بین $Zn-Cd$ ($r = 0.62$) وجود دارد. این همبستگی می‌تواند به دلیل شباهت ویژگی‌های شیمیایی Zn^{+2} با Cd^{+2} و جایگزینی کادمیم به جای روی در ساختار اسفالریت باشد.

مقادیر عناصر Ag, Pb, Zn, Cu در رگه‌های کانهدار و نتایج محاسبه ضرایب همبستگی پیرسون [۱۷] بین این عناصر به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده‌اند. همبستگی مثبت و قوی $Pb-Ag$ ($r = 0.85$) می‌تواند دلیلی بر حضور نقره در ساختار کانی گالن باشد [۱۸]. همچنین، همبستگی‌های مثبت

جدول ۱ مقادیر عناصر فلزی (بر حسب گرم در تن) در کانسنگ‌های ذخیره روی - سرب شهرستانک.

شماره نمونه	Zn	Pb	Cu	Cd	Sb	Ag
SH-1	۴۴۰۹	۱۱۷۹	۱۲۱	۱۶۱	۷	۰٫۹
SH-2	۳۹۶۸٫۲	۲۹۶	۱۴۶	۱۶۲	۶٫۲	۰٫۷
SH-3	۲۹۳۷٫۵	۲۶۷۹٫۵	۱۴۸٫۵	۴۳٫۹۵	۲۲	۱۵٫۷
SH-4	۲۳۴۴٫۵	۲۳۲٫۲۵	۱۳۱٫۷	۸۳٫۵	۹۶٫۲	۰٫۶
SH-5	۵۲۸۶٫۱	۲۱۱۷٫۸	۲۲۶٫۶	۲۰٫۲	۱۶٫۵	۲٫۳
SH-6	۱۲۰۷۵٫۵	۸۱۹۴٫۷	۸۸	۳۶٫۱۳	۱۳	۴٫۱۳
SH-7	۱۳۳۸۳	۴۵۳۸٫۵	۱۱۴	۱۱٫۳	۱۴	۷٫۸
SH-8	۱۹۵۱٫۷	۲۷۴٫۷۷	۷۶٫۷۷	۱۵٫۳	۸٫۵	۴٫۲
SH-9	۶۹۱۱	۳۴۸۴	۸۸	۷۲٫۸	۹	۰٫۴
SH-10	۲۳۹۸۱	۳۷۷۶٫۸	۱۸۴	۹۸	۱۰	۱۱
SH-11	۵۰۰۰۰	۳۵۱۳	۱۰۶	۶۵	۱۰	۳
SH-12	۵۰۰۰۰	۲۳۷۱٫۵	۱۶۸	۵۵	۴۹	۲۳
SH-13	۱۵۱۱۹	۱۵۸۴٫۷	۱۳۹٫۷	۴۷٫۱	۱۰٫۲	۱۸٫۳
SH-14	۲۴۳۱۶٫۵	۲۷۳۱٫۲	۱۰۱٫۵	۴۲٫۱	۴۶٫۵	۳۹٫۱
SH-15	۴۶۸۱۱	۱۶۴۲	۱۶۰	۶۰٫۸	۱۵	۲۶
SH-16	۴۱۳۲۳	۴۷۸۳٫۳	۱۸۵	۶۶	۱۷	۲۹
SH-17	۲۰۹۹۷	۳۵۷۲٫۷	۱۰۲٫۴۳	۳۴٫۷۸	۹	۳٫۱۴
SH-18	۹۸۵۵٫۳	۲۸۹٫۷	۱۶۵	۲۹٫۳	۱۱٫۳	۰٫۵
SH-19	۵۰۰۰۰	۴۹۸۵٫۲	۲۱۶	۵۵	۹۶	۷۸٫۵

جدول ۲ ضریب همبستگی پیرسون بین عناصر فلزی در کانسنگ‌های ذخیره روی - سرب شهرستانک.

	Ag	Sb	Cd	Cu	Pb	Zn
Ag	۱٫۰۰					
Sb	۰٫۹۷	۱٫۰۰				
Cd	۰٫۲۰	۰٫۱۹	۱٫۰۰			
Cu	۰٫۳۴	۰٫۴۲	۰٫۲۳	۱٫۰۰		
Pb	۰٫۸۵	۰٫۸۰	۰٫۵۰	۰٫۴۰	۱٫۰۰	
Zn	۰٫۵۰	۰٫۵۷	۰٫۶۲	۰٫۳۵	۰٫۴۸	۱٫۰۰

HREE = Gd + Tb + Dy + Ho + Er + Tm + Yb +

Lu (۲)

$$(LREE/HREE)_N = (LREE/HREE)_{Sample} / (LREE/HREE)_{Chondrite} \quad (۳)$$

$$Eu/Eu^* = 2Eu_N / (Sm_N + Gd_N) \quad (۴)$$

$$Ce/Ce^* = 2Ce_N / (La_N + Pr_N) \quad (۵)$$

در این روابط، حرف N بهنجار شدن عناصر به کندریت [۲۰] را نشان می‌دهد. الگوی توزیع REE بهنجارشده به کندریت [۲۰] در کلسیت‌های گرمابی (شکل ۶ الف)، گالن‌ها (شکل ۶ ب)، اسفالریت‌ها (شکل ۶ پ) و بازالت‌های آندزیتی (شکل ۶ ت) جدایش و غنی‌شدگی عناصر خاکی نادر سبک (LREE) نسبت به عناصر خاکی نادر سنگین (HREE) را نشان می‌دهند. مهمترین اختلاف این الگوها، درجه جدایش و مقادیر بی‌هنجاری‌های Eu و Ce هستند. محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که مقدار $(LREE/HREE)_N$ در کلسیت‌های گرمابی و اسفالریت به ترتیب در گستره ۳٫۵۸ تا ۹٫۳۸ و ۸٫۶۹ تا ۹٫۵۵ در تغییر است. این در حالی است که مقدار $(LREE/HREE)_N$ در

زمین‌شیمی عناصر خاکی نادر

مقادیر لانتانیدها به همراه Y در سنگ‌های بازالت آندزیتی، کلسیت‌ها، گالن‌ها و اسفالریت‌های جدا شده از کانسنگ در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده‌اند. بر اساس یافته‌ها، مقادیر عناصر خاکی نادر (La-Lu) در بازالت‌های آندزیتی و کلسیت‌های گرمابی به ترتیب در گستره ۴۵٫۶۵ تا ۷۲٫۹۸ گرم در تن و ۶۱٫۰۷ تا ۱۰۲٫۹۶ گرم در تن متغیر است. این در حالی است که تمرکز REE در کانه‌های اسفالریت و گالن بسیار کمتر از بازالت‌های آندزیتی و کلسیت‌های گرمابی بوده و در این دو کانه سولفیدی به ترتیب در گستره ۱۷٫۸۰ تا ۲۹٫۷۶ گرم در تن و ۱۲٫۷۴ تا ۲۱٫۳۰ گرم در تن در تغییر است. در این پژوهش، برای تحلیل‌های زمین‌شیمیایی و بررسی درجه جدایش لانتانیدها الگوی توزیع REE رسم شده و $(LREE/HREE)_N$ و مقادیر بی‌هنجاری‌های Eu و Ce براساس روابط زیر محاسبه گردیدند:

$$LREE = La + Ce + Pr + Nd + Sm + Eu \quad (۱)$$

گالن و بازالت‌های آندزیتی پایین‌تر بوده و به ترتیب در گستره ۴/۲۷ تا ۵/۴۸، ۱/۶۸ تا ۲/۸۷ در تغییر است. مقدار بی‌هنجاری Eu در بازالت‌های آندزیتی منفی تا مثبت ضعیف است و گستره تغییراتی از ۰/۹۹ تا ۱/۱۰ را نشان می‌دهد. مقدار Eu/Eu^* در کلسیت‌های گرمابی، گالن و اسفالریت مثبت بوده و به ترتیب دارای گستره ۱/۵۶ تا ۲/۲۴، ۲/۱۸ تا ۲/۸۳ و ۱/۹۲ الی ۲/۲۸ است. مقدار Ce/Ce^* در بازالت‌های آندزیتی منفی (۰/۹۳ تا ۰/۹۸) و در کلسیت‌های گرمابی، گالن و اسفالریت مثبت (به ترتیب ۱/۲۰ تا ۱/۶۳، ۱/۳۵ تا ۱/۵۴ و ۱/۳۶ تا ۱/۶۳) است. در کل به نظر می‌رسد که درجه جدایش LREE از HREE و مقادیر بی‌هنجاری Eu و Ce در بازالت‌های آندزیتی متفاوت از کلسیت‌های گرمابی، گالن و اسفالریت هستند.

بررسی‌های انجام شده نشان داده است که الگوی توزیع REE در کلسیت‌های گرمابی و کانی‌های سولفیدی می‌تواند اطلاعات با ارزشی از خاستگاه و شرایط فیزیکوشیمیایی سیال

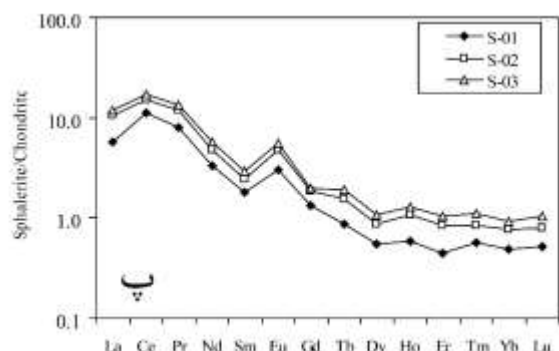
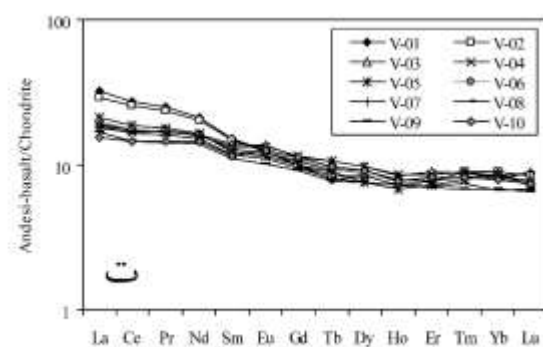
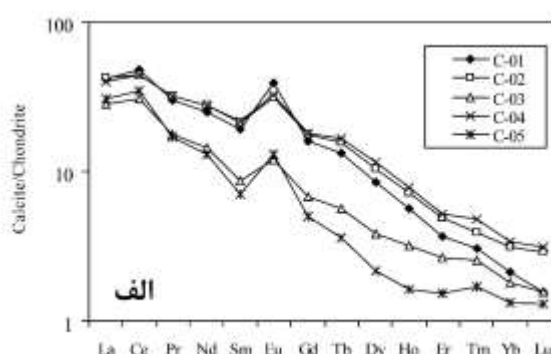
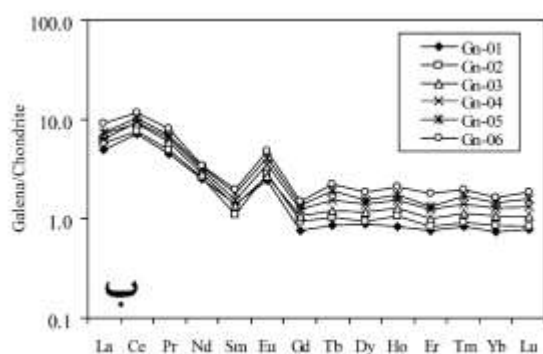
های گرمایی را فراهم آورد [۴، ۶، ۸]. افزون بر این، Y و Ho دو عنصری هستند که در اغلب محیط‌های زمین‌شناسی رفتار بسیار مشابه به هم نشان می‌دهند [۲۱-۲۳]. از اینرو، نسبت Y/Ho در مقایسه با الگوهای توزیع REE بهنجار شده ردیاب بسیار مناسب‌تری در بررسی فرآیندهای زمین‌شناسی محسوب می‌شود، زیرا این نسبت در اغلب فرآیندهای زمین‌شناسی ثابت می‌ماند. شباهت مشخصی بین الگوی توزیع REE بهنجار شده به کندریت برای سنگ‌های میزبان بازالت آندزیتی با کانی‌های کلسیت، گالن و اسفالریت کانسنگ‌ها وجود ندارد، با این حال مقادیر نزدیک به هم نسبت Y/Ho در سنگ‌های میزبان بازالت آندزیتی (۲/۵۵ تا ۲/۷۹)، کلسیت (۲/۶۱ تا ۲/۹۳)، گالن (۲/۵۶ تا ۳/۰۰) و اسفالریت (۲/۶۰ تا ۲/۸۲) آشکارا نشان می‌دهند که تشکیل و گسترش رگه‌های کربناتی-سولفیدی در ذخیره شهرستانک می‌تواند در ارتباط با شستشوی فلزها از سنگ‌های بازالت آندزیتی میزبان باشد.

جدول ۳ مقادیر REE و Y (بر حسب گرم در تن) به همراه برخی پارامترهای زمین‌شیمیایی محاسبه شده برای سنگ‌های بازالت آندزیتی ذخیره روی-سرب شهر ستانک.

[illegible]

جدول ۴ مقادیر REE و Y (بر حسب گرم در تن) به همراه برخی پارامترهای زمین‌شیمیایی محاسبه شده برای نمونه‌های کلسیت، گالن و اسفالریت کانسنگ‌های ذخیره روی-سرب شهرستانک.

	کلسیت					گالن						اسفالریت		
	C-01	C-02	C-03	C-04	C-05	Gn-01	Gn-02	Gn-03	Gn-04	Gn-05	Gn-06	Sp-01	Sp-02	Sp-03
La	۱۵۲	۱۵۶	۱۰۳	۱۴۶	۱۱۲	۱۸	۲۱	۲۶	۲۳	۲۷	۳۳	۲۱	۳۹	۴۳
Ce	۴۶۲	۴۲۷	۲۹۶	۴۲۳	۳۳۲	۶۹	۷۳	۸۸	۹۱	۹۹	۱۱۱	۱۰۶	۱۴۶	۱۶۶
Pr	۴۰۸	۴۳۸	۲۴۲	۴۴۲	۲۳۲	۰۶۱	۰۶۸	۰۸۱	۰۸۹	۰۹۵	۱۱۲	۱۰۸	۱۶۲	۱۸۵
Nd	۱۷۷	۱۹۵	۱۰۳	۱۹۶	۹۲۲	۱۷۸	۱۸۵	۲۰۱	۲۲۱	۲۳۵	۲۴۳	۲۳۶	۳۴۱	۴۰۳
Sm	۴۴۲	۴۹۴	۲۰۲	۵۰۳	۱۶۴	۰۳۲	۰۲۵	۰۳۱	۰۳۶	۰۴۱	۰۴۵	۰۴۱	۰۵۶	۰۶۸
Eu	۳۴۱	۲۷۱	۱۰۵	۲۸۱	۱۱۳	۰۲۱	۰۲۵	۰۲۳	۰۳۱	۰۳۶	۰۴۲	۰۲۶	۰۴۲	۰۴۹
Gd	۴۸۵	۵۴۵	۲۰۶	۵۵۲	۱۵۳	۰۲۳	۰۲۹	۰۳۳	۰۳۸	۰۴۲	۰۴۶	۰۴۱	۰۵۶	۰۶۱
Tb	۰۷۷	۰۹۱	۰۳۳	۰۹۷	۰۲۳	۰۰۵	۰۰۶	۰۰۷	۰۰۹	۰۱۱	۰۱۳	۰۰۵	۰۰۹	۰۱۱
Dy	۳۲۶	۳۹۳	۱۴۶	۴۳۶	۰۸۲	۰۳۴	۰۳۶	۰۴۵	۰۵۴	۰۵۸	۰۷۱	۰۲۱	۰۳۳	۰۴۱
Ho	۰۴۸	۰۶۱	۰۲۷	۰۶۷	۰۱۴	۰۰۷	۰۰۹	۰۱۱	۰۱۳	۰۱۵	۰۱۸	۰۰۵	۰۰۹	۰۱۱
Er	۰۹۱	۱۲۱	۰۶۶	۱۳۱	۰۳۸	۰۱۹	۰۲۱	۰۲۵	۰۳۱	۰۳۳	۰۴۵	۰۱۱	۰۲۱	۰۲۶
Tm	۰۱۱	۰۱۴	۰۰۹	۰۱۷	۰۰۶	۰۰۳	۰۰۱	۰۰۴	۰۰۵	۰۰۶	۰۰۷	۰۰۲	۰۰۳	۰۰۴
Yb	۰۵۳	۰۷۷	۰۴۵	۰۸۴	۰۳۳	۰۱۸	۰۲۱	۰۲۶	۰۳۲	۰۳۶	۰۴۱	۰۱۲	۰۱۹	۰۲۳
Lu	۰۰۶	۰۱۱	۰۰۶	۰۱۲	۰۰۵	۰۰۳	۰۰۱	۰۰۴	۰۰۵	۰۰۶	۰۰۷	۰۰۲	۰۰۳	۰۰۴
Y	۱/۲۶	۱/۵۹	۰/۷۱	۱/۸۲	۰/۴۱	۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۳۱	۰/۳۶	۰/۴۱	۰/۵۲	۰/۱۳	۰/۲۴	۰/۳۱
Y/Ho	۲/۶۳	۲/۶۱	۲/۶۳	۲/۷۲	۲/۹۳	۳/۰۰	۲/۵۶	۲/۸۲	۲/۷۷	۲/۷۳	۲/۸۹	۲/۶۰	۲/۶۷	۲/۸۲
REE (La–Lu)	۱۰/۱۹۸	۱۰/۲۹۶	۶/۱۰۷	۱۰/۲۷۲	۶/۲۲۳	۱۲/۷۴	۱۳/۶۷	۱۶/۳۱	۱۷/۰۴	۱۸/۷۴	۲۱/۳۰	۱۷/۸۰	۲۶/۰۴	۲۹/۷۶
LREE (La–Eu)	۹۱/۰۱	۸۹/۸۳	۵۵/۶۹	۸۸/۷۶	۵۸/۷۱	۱۱/۶۲	۱۲/۴۳	۱۴/۷۶	۱۵/۱۷	۱۶/۶۷	۱۸/۸۲	۱۶/۸۱	۲۴/۵۱	۲۷/۹۵
HREE (Gd–Lu)	۱۰/۹۷	۱۳/۱۳	۵/۳۸	۱۳/۹۶	۳/۵۲	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۵۵	۱/۸۷	۲/۰۷	۲/۴۸	۰/۹۹	۱/۵۳	۱/۸۱
(LREE/HREE) _N	۴/۶۷	۳/۸۵	۵/۸۲	۳/۵۸	۹/۳۸	۵/۸۴	۵/۶۴	۵/۳۶	۴/۵۶	۴/۵۳	۴/۲۷	۹/۵۵	۹/۰۱	۸/۶۹
Eu/Eu*	۲/۲۴	۱/۵۹	۱/۵۶	۱/۶۲	۲/۱۵	۲/۲۶	۲/۸۳	۲/۱۸	۲/۵۴	۲/۶۳	۲/۸۰	۱/۹۲	۲/۲۷	۲/۲۸
Ce/Ce*	۱/۶۳	۱/۲۰	۱/۳۵	۱/۲۳	۱/۴۶	۱/۵۴	۱/۴۳	۱/۴۲	۱/۴۹	۱/۴۵	۱/۳۵	۱/۶۳	۱/۳۶	۱/۳۸



شکل ۶ الگوی توزیع REE به‌هم‌نوار شده به‌کندریت [۲۰] در کلسیت‌ها (الف)، گالن‌ها (ب)، اسفالریت‌ها (پ) و سنگ‌های بازالت آندزیتی (ت).

می‌کند که مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ در ذخیره روی - سرب شهرستانک شباهت زیادی به برخی از کانسارهای فراگرمایی سولفیدشدگی حدواسط شناخته شده در دنیا چون کانسار فلزهای پایه - طلای شاهینلی/تسبیج دره‌سی در غرب ترکیه [۳۲]، کانسار فلزهای پایه - گرانبه‌ای گوانجواتو در مکزیک [۳۳]، کانسار فلزهای پایه - نقره ژبیادی در چین [۳۴] و کانسارهای فلزهای پایه و گرانبه‌ای شاه علی‌بیگلو [۳۵] و قیبقاق [۱۸] در ایران دارد.

زمین‌شیمی ایزوتوپ‌های کربن-اکسیژن

در این پژوهش، از مقادیر ایزوتوپ‌های کربن و اکسیژن در کانی کلسیت رگه‌های کربناتی تاخیری به منظور اثبات نقش داشتن یا نداشتن سیال‌های جوی در مراحل پایانی کانه‌زایی در ذخیره روی - سرب شهرستانک استفاده گردید. مقادیر ایزوتوپ‌های $\delta^{13}\text{C}$ و $\delta^{18}\text{O}$ اندازه‌گیری شده در کانی کلسیت در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده، مقدار $\delta^{13}\text{C}$ برای تعیین خاستگاه سیال از محیط‌های مختلف، در سنگ‌های آذرین و ماگمایی در گستره ۳۰- تا ۳-‰ متغیر است. مقدار $\delta^{13}\text{C}$ در پوسته قاره‌ای ۷-۰‰ و در گوشته ۵-۰‰ گزارش شده است [۳۶]. مقدار $\delta^{13}\text{C}$ در جو زمین از ۱۱- تا ۷-‰ و در مواد آلی از ۳۰- تا ۱۰-۰‰ در تغییر است [۳۷]. مقدار $\delta^{13}\text{C}$ سیال‌های جوی که با سنگ‌های کربناتی مسیر واکنش داده‌اند، در گستره ۸- تا ۴+۰‰ گزارش شده است [۳۸]. این پژوهش نشان می‌دهد که مقدار $\delta^{13}\text{C}$ در نمونه‌های کلسیت بررسی شده از ذخیره روی - سرب شهرستانک دارای گستره تغییراتی از ۱۰/۹- تا ۷/۵+۰‰ است.

بر اساس بررسی‌های انجام شده، مقدار $\delta^{18}\text{O}$ در آب‌های جوی بین ۴۰- تا ۵/۷+۰‰ و در سیال ماگمایی از ۵/۷ تا ۱۰+۰‰ در تغییر است [۳۶]. نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که در مراحل پایانی کانه‌زایی در شهرستانک، سیال گرمایی در تعادل با کلسیت‌های مورد بررسی دارای مقدار $\delta^{18}\text{O}$ در گستره ۱۳/۱- تا ۱۱/۲+۰‰ است. جایابی مقادیر $\delta^{13}\text{C}$ و $\delta^{18}\text{O}$ کلسیت‌های مورد بررسی در نمودار دومتغیره $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ PDB نسبت به $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ [۳۶] نشانگر اثر سیال‌های جوی و آمیختگی آن‌ها با آب‌های ماگمایی در تشکیل و گسترش ذخیره روی - سرب شهرستانک است (شکل ۸).

یوروپیوم عضو ویژه گروه عناصر خاکی نادر است. بر اساس بررسی‌های نظری و محاسبات ترمودینامیکی، پتانسیل اکسایش و کاهش $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$ در سیال‌های گرمایی با دما کنترل می‌شود [۷، ۹]. اگر کانی‌های جذب کننده REE در دماهای بالاتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد نهشته شوند، Eu^{2+} نسبت به Eu^{3+} غالب گردیده و این امر سبب جانشینی ترجیحی آن به جای Ca^{2+} و سرانجام منجر به رخداد بی‌هنجاری مثبت Eu می‌شود. بررسی‌های انجام شده نشان داده است که رخداد بی‌هنجاری Ce وابسته به گریزندگی اکسیژن و pH بوده و در این بین، رخداد آن به شرایط pH حساس‌تر از گریزندگی اکسیژن است [۲۴]. افزون بر این، رخداد بی‌هنجاری‌های Ce در محیط‌هایی با دمای بالا بعید به نظر می‌رسد، زیرا $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ با افزایش دما به گریزندگی اکسیژن بیشتر میل می‌کند [۲۵]. در این پژوهش، با توجه به کلسیت‌های گرمایی با رخداد بی‌هنجاری مثبت Eu در رگه‌های کانه‌دار ذخیره شهرستانک، کانه‌زایی روی - سرب به احتمال بسیار در دمای بیش از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد صورت گرفته است [۷، ۹]. رخداد بی‌هنجاری‌های مثبت Eu و Ce در کانی‌های سولفیدی (گالن و اسفالریت) می‌تواند در ارتباط با ماهیت احیایی محلول‌های گرمایی باشد [۷، ۲۵].

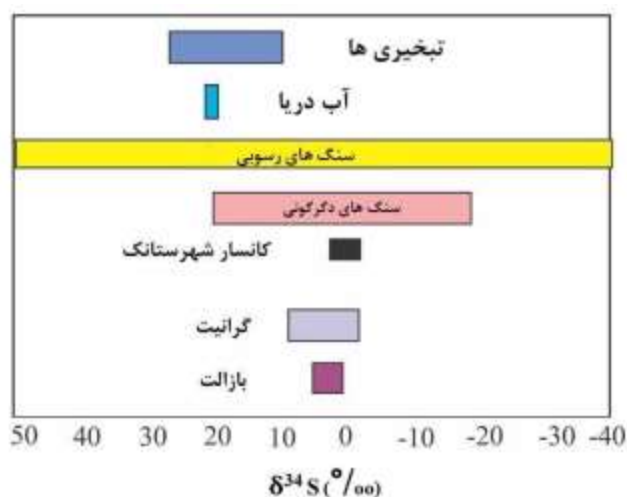
زمین‌شیمی ایزوتوپ‌های پایدار

زمین‌شیمی ایزوتوپ گوگرد

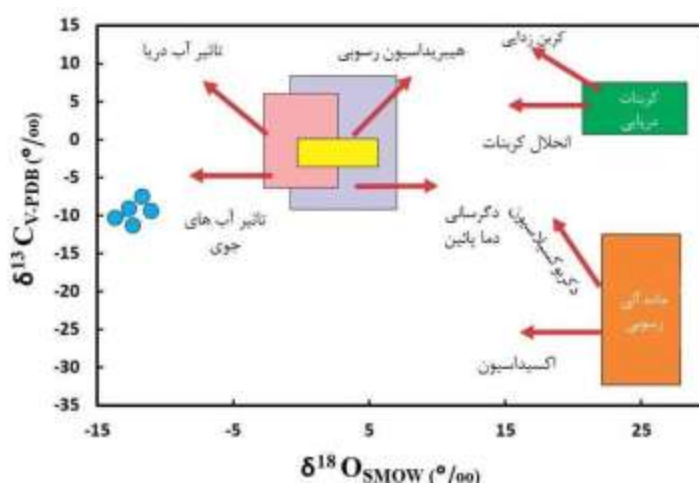
بررسی‌های زمین‌شیمی ایزوتوپ‌های پایدار اطلاعات مفیدی از نقش عوامل مختلف فیزیکوشیمیایی در نهشت کانسنگ‌ها و تشکیل و گسترش کانسارها را فراهم می‌کنند [۲۶-۳۰]. بررسی‌های انجام شده در این پژوهش نشان می‌دهد که در ذخیره شهرستانک، مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ در کانه اسفالریت از ۲- تا ۹/۰+۰‰ و در کانه گالن در گستره ۳- تا ۱+۰‰ در تغییر است (جدول ۵). بر اساس بررسی‌های انجام شده، گوگرد در محلول‌های کانسنگ‌ساز در ذخایر فراگرمایی دارای خاستگاه ماگمایی بوده و مقدار $\delta^{34}\text{S}$ در آنها حدود صفر در هزار است. نتایج به دست آمده از بررسی دو کانه گالن و اسفالریت در مجموع نشان می‌دهند که نمونه‌های انتخابی از سولفیدها در ذخیره روی - سرب شهرستانک دارای مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ در گستره ۳- تا ۱+۰‰ هستند (شکل ۷، جدول ۵). این مقادیر نشانگر خاستگاه ماگمایی گوگرد هستند [۳۱]. این پژوهش آشکار

جدول ۵ مقادیر ایزوتوپ گوگرد (بر حسب در هزار) کانی‌های سولفیدی (گالن و اسفالریت) و کربن - اکسیژن کلسیت در کانسنگ‌های ذخیره سرب - روی شهرستانک.

نمونه	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}\%$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}\%$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}\%$
C-01	-۱۲٫۳	۲۲٫۶	-
C-02	-۱۰٫۱	۲۳٫۸	-
C-03	-۱۱٫۲	۲۵٫۴	-
C-04	-۱۰٫۴	۲۲٫۴	-
C-05	-۱۳٫۱	۲۳٫۶	-
Gn-01	-	-	-۲٫۸
Gn-02	-	-	-۱٫۲
Gn-03	-	-	-۰٫۶
Gn-04	-	-	۱٫۱
Gn-05	-	-	-۳٫۲
S-01	-	-	۰٫۹
S-02	-	-	-۲٫۶
S-03	-	-	-۰٫۸



شکل ۷ گستره تغییرات ایزوتوپ گوگرد ($\delta^{34}\text{S}$) کانی‌های سولفیدی در ذخیره روی - سرب شهرستانک و مقایسه آن با سنگ‌های مختلف، آب اقیانوسی و سولفات تبخیری [۲۸].



شکل ۸ موقعیت نمونه‌های کلسیت کانسنگ‌های بررسی شده از ذخیره روی - سرب شهرستانک بر نمودار دو متغیره مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ نسبت به $\delta^{13}\text{C}$ [۲۸].

سازوکار تشکیل و نوع کانه‌زایی

بر اساس نتایج بررسی‌های صحرایی، سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری، روابط همبرزایی کانی‌ها و کانه‌ها، مراحل تشکیل و تکامل کانه‌زایی روی - سرب در ذخیره شهرستانک مشخص شد که در ادامه بیان می‌شوند.

نخست توالی‌های آتشفشانی - رسوبی آئوسن در منطقه تشکیل شده است. سپس، مجموعه سنگ‌های آتشفشانی - رسوبی آئوسن منطقه در اثر نیروهای فشارشی چین خورده و شکستگی‌هایی در آنها ایجاد شده است. در ادامه این مرحله، گرانیتوئیدهای میوسن به درون توالی‌های آتشفشانی - رسوبی آئوسن نفوذ کرده اند. توده‌های نفوذ کرده به عنوان منبع گرمایی عمل کرده و باعث جریان‌های چرخه‌ای آب‌های جوی در منطقه شده‌اند. سیال‌های گرمایی همزمان با دگرسانی سنگ‌های منطقه، سبب شسته شدن روی - سرب از سنگ‌های مسیر (توالی آئوسن) و تمرکز دوباره آن‌ها درون شکستگی‌های ناشی از فعالیت گسل‌های عادی در منطقه شهرستانک، به صورت رگه‌های کانه‌دار شده‌اند. احتمال اینکه بخشی از ماده معدنی و سیال‌های گرمایی از توده‌های گرانیتوئیدی میوسن شکل گرفته باشد، نیز وجود دارد.

ذخیره روی - سرب شهرستانک بر اساس تقسیم‌بندی‌های موجود [۳۹-۴۲] شباهت زیادی به کانسارهای فراگرمایی دارد. کانه‌زایی فراگرمایی بر اساس مقدار گوگرد مجموعه‌های سولفیدی، دگرسانی‌های اصلی و مجموعه کانی‌های باطله به سه گروه سولفیدشدگی بالا، سولفیدشدگی حدواسط و سولفیدشدگی پایین رده‌بندی شده است [۴۰، ۴۲-۴۳]. کانسارهای سولفیدشدگی بالا با مقدار بالای سولفیدها (۱۰ تا ۹۰ درصد حجمی) شامل پیریت - انارژیت - لوزونیت - فامانتیت و کوولیت به عنوان کانی‌های فلزی اصلی و مجموعه کانی‌های باطله کوارتز - سولفات (باریت) و نبود کربنات مشخص می‌شوند. کانی‌های دگرسانی شاخص در این کانسارها شامل آلونیت - کوارتز حفره‌دار و کائولینیت هستند. کانسارهای سولفیدشدگی پایین در ارتباط با ماگمای نیمه قلیایی هستند. ویژگی‌های شاخص آن‌ها مقدار پایین سولفیدها (به طور عمده کمتر از ۲ درصد حجمی) است. این کانسارها دارای پیریت - آرسنوپیریت $\pm$ پیروتیت $\pm$ اسفالریت $\pm$ گالن $\pm$ کالکوپیریت $\pm$ تتراهدريت - تنانتیت به عنوان کانی‌های فلزی اصلی هستند که با کانی‌های باطله چون کلسدونی - کوارتز $\pm$ کربنات $\pm$

فلوئوریت همراهی می‌شوند. کانی‌های دگرسانی کلیدی در این دسته ایلیت/اسمکتیت - آدولاریا هستند. کانسارهای سولفیدشدگی حدواسط با مقدار متوسط سولفیدها (۵ تا ۲۰ درصد حجمی) مشخص می‌شوند. در این دسته، پیریت - اسفالریت - گالن - کالکوپیریت - تتراهدريت - تنانتیت کانی - های فلزی اصلی و کوارتز - کربنات منگن‌دار $\pm$ آدولاریا $\pm$ سیلیکات‌های منگن‌دار $\pm$ باریت کانی‌های باطله هستند. کانی - های دگرسانی اصلی در این دسته شامل کلریت و مجموعه دگرسانی پروپیلیتیک هستند [۳۹-۴۳].

ذخیره روی - سرب شهرستانک با نبود آدولاریا و کلسیت‌های تیغه‌ای و شبکه‌ای از کانسارهای فراگرمایی سولفیدشدگی پایین متمایز است. از سویی، شناسایی نشدن طلای طبیعی و الکتروم، آلونیت، کوارتز حفره‌ای به همراه نبود کانی‌های شاخص دگرسانی آرژیلیک پیشرفته چون انارژیت و لوزونیت این ذخیره را از کانسارهای فراگرمایی سولفیدشدگی بالا تفکیک می‌کند. به طور کلی، با توجه به موارد زیر ذخیره روی - سرب شهرستانک را می‌توان در رده سامانه‌های فراگرمایی سولفیدشدگی حدواسط در نظر گرفت: (۱) این ذخیره با توجه به شکل هندسی رگه‌ای، به کانسارهای فراگرمایی سولفیدشدگی حدواسط شباهت دارد [۳۹، ۴۰]؛ (۲) مجموعه کانی‌های سولفیدی و سولفوسالتی (شامل اسفالریت، گالن، پیریت و تنانتیت) با نوع فراگرمایی سولفیدشدگی حدواسط همخوانی دارند و نبود آرسنوپیریت و پیروتیت (شاخص سامانه‌های فراگرمایی سولفیدشدگی بالا) نیز تأییدی بر این امر است [۳۹-۴۲]؛ (۳) دگرسانی‌های کلریتی و کربناتی در سنگ‌های میزبان و دیواره بیانگر وابستگی این کانسار به سامانه‌های فراگرمایی سولفیدشدگی حدواسط است؛ (۴) مقدار $\delta^{34}\text{S}$ در کانه‌های سولفیدی بسیار نزدیک به کانسارهای فراگرمایی سولفیدشدگی حدواسط شناخته شده در دنیا [۳۲-۳۴] و به ویژه در ایران [۱۸، ۳۵] است؛ (۵) اثر سیال‌های جوی در تشکیل و گسترش ذخیره بر اساس بررسی‌های ایزوتوپی و شستشوی فلزها از سنگ‌های میزبان بازالت آندزیتی بر اساس زمین‌شیمی REE آشکار است؛ (۶) سیال‌های کانسنگ‌ساز ذخیره بر اساس رخداد بی‌هنجاری‌های مثبت قوی Eu و Ce در گالن و اسفالریت طبیعت احیایی دارند.

برداشت

مهم‌ترین نتایج به دست آمده از بررسی کانه‌زایی، زمین‌شیمی ایزوتوپ‌های پایدار (S, O, C) و توزیع REE در سنگ‌های بازالت آندزیتی و تک کانی‌های کلسیت، گالن و اسفالریت کانسنگ‌های ذخیره روی - سرب شهرستانک، جنوب شرق قم عبارتند از:

۱- رخداد نوع رگه‌ای و برشی ذخیره روی - سرب شهرستانک، در ارتباط با نفوذ توده‌های آذرین مونزودیوریتی تا کوارتزادیوریتی میوسن به درون توالی‌های آتشفشانی - رسوبی ائوسن (به طور عمده بازالت آندزیتی) است.

۲- دگرسانی‌های همراه این ذخیره شامل کربناتی، سیلیسی و کلریتی هستند. اسفالریت، گالن، پیریت، تنانتیت، سرویت، پلانتریت، هیدروزینکیت هماتیت و لیمونیت به همراه کانی‌های باطله چون کلسیت، باریت و کوارتز کانسنگ‌های این ذخیره را تشکیل می‌دهند.

۳- ضرایب همبستگی بین عناصر نشان دهنده حضور نقره در ساختار گالن و Cd در ساختار کانی اسفالریت هستند. همبستگی‌های مثبت بین Sb با Ag و Pb با حضور کانی‌های سولفوسالت در کانسنگ‌ها در ارتباط هستند.

۴- نسبت زمین‌شیمیایی Y/Ho نزدیک به هم برای سنگ‌های بازالت آندزیتی و تک کانی‌های کلسیت، گالن و اسفالریت کانسنگ‌ها نشان می‌دهد که شستشوی فلزها از سنگ‌های میزبان بازالت آندزیتی نقش مهمی در تامین روی و سرب این ذخیره داشته است.

۵- رخداد بی‌هنجاری‌های مثبت Eu و Ce در گالن و اسفالریت طبیعت احیایی سیال‌های کانسنگ‌ساز را نشان می‌دهد. رخداد بی‌هنجاری مثبت Eu در کلسیت بیانگر دمای بیش از ۲۵۰ درجه سانتیگراد سیال‌های کانسنگ‌ساز است.

۶- نتایج به دست آمده از بررسی‌های ایزوتوپ‌های پایدار در مجموع نشان می‌دهند که گوگرد سیال‌های کانسنگ‌ساز دارای خاستگاه ماگمایی بوده و آمیختگی آب‌های ماگمایی با آب‌های جوی نقش مهمی در تکامل و گسترش کانسنگ‌های این ذخیره داشته است.

۷- ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی، ترکیب کانی‌شناسی، بافت کانسنگ، مجموعه دگرسانی، نتایج بررسی زمین‌شیمی REE و ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد و کربن - اکسیژن نشان می‌دهند که ذخیره روی - سرب شهرستانک می‌تواند در دسته

کانسارهای فراگرمایی سولفیدشدگی حدواسط در نظر گرفته می‌شود.

قدردانی

این پژوهش از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه ارومیه برخوردار بوده است، که نگارندگان به این وسیله قدردانی خود را از همه مسئولین مربوطه اعلام می‌دارند. نگارندگان همچنین از نظرها و پیشنهادهای سازنده داوران محترم مجله سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

- [1] Peucker E. B., Schnier C., "Investigation of rare earth elements in quartz from the Bavarian Pfahl Germany, by means of instrumental neutron activation analysis", Nuclear Geophysics (1992) 249-260.
- [2] Douville E., Bienvenu P., Charlou J. I., "Yttrium and rare earth elements in fluids from various deep-sea hydrothermal systems", Geochimica et Cosmochimica Acta 63 (1999) 627-643.
- [3] Xie Q. Q., Xu X. C., Li X. X., Chen T. H., Lu S. M., "Rare earth element geochemistry of Laowan gold deposit in Henan province: Trace to source of ore-forming materials", Journal of Rare Earths 24 (2006) 115-120.
- [4] Cao Y., Li S., Yao M., Zhang H., "Significance of quartz REE geochemistry, Shihu gold deposit, western Hebei Province, North China, using LA-ICP-MS", Frontiers Earth Science China (2010) 337-344.
- [5] Sarangi S., Srinivasan R., Balaram V., "REE geochemistry of auriferous quartz carbonate veins of Neoproterozoic Ajjanahalli gold deposit, Chitradurga schist belt, Dharwar Craton, India", Geoscience Frontiers 4 (2013) 231-239.
- [6] Cai Y., Zhang Q., Zhang Y., Wang D., Li K., "Sm-Nd dating and rare earth element geochemistry of the hydrothermal calcites from Guling carbonate-hosted talc mineralization in the central Guangxi province, South China", Chinese Journal of Geochemistry 34 (2015) 156-66.
- [7] Sverjensky D. A., "Europium redox equilibria in aqueous solution", Earth and Planetary Science Letters 67 (1984) 70-78.

- [19] Heidari S. M., Safavi S., "Geology and mineralization of the NE Narbaghi epithermal Cu (Au-Ag) deposit (Saveh)", *Advanced Applied Geology* (2023) 1–25.
- [20] Taylor S. R., McLennan S.M., "The continental crust: Its composition and evolution", Blackwell, Oxford (1985) 312p.
- [21] Bau M., Dulski P., "Comparative study of yttrium and rare earth element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 119 (1995) 213–223.
- [22] Uysal I. T., Zhao J. X., Golding S. D., "Sm-Nd dating and rare earth element tracing of calcite: Implications for fluid-flow events in the Bowen Basin, Australia", *Chemical Geology* 238 (2007) 63–71.
- [23] Uysal I. T., Gasparon M., Bolhar R., "Trace element composition of near-surface silica deposits-a powerful tool for detecting hydrothermal mineral and energy resources", *Chemical Geology* 280 (2009) 154–169.
- [24] Elderfield H., Sholkoviz E. R., "Rare earth elements in the pore waters of reducing nearshore sediments", *Earth and Planetary Science Letters* 82 (1987) 280–288.
- [25] Bau M., "Rare earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium", *Chemical Geology* 93 (1991) 219–230.
- [26] Ohmoto H., Ray R. O., "Isotope of sulfur and carbon. In: H.L. Barnes (Editor), *Geochemistry of hydrothermal of ore deposits*", Wiley Interscience, New York (1979) 509–567.
- [27] Shanks W.C., "Stable Isotope Geochemistry of Mineral Deposits", In: *Treatise on Geochemistry*, 2nd ed., Elsevier Ltd (2013).
- [28] Li G. Q., Gu X. X., Cheng W. B., Zhang Y. M., Zhang Y., Dai H. Z., Lv P.R., Zhang X. G., Xia B. B., "The analysis of metallogenic material sources of the Zhaxikang antimony (sulfur salts) polymetallic deposits in southern Tibet: Concurrent discussion on the differences of the ore sources of major mineral deposits in north Himalayan metallogenic belt", *Earth Science Frontiers* 21 (2014) 90–104.
- [8] Michard A., "Rare earth element systematics in hydrothermal fluids", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53 (1989) 745–750.
- [9] Bau M., Möller P., "Rare earth element fractionation in metamorphogenic hydrothermal calcite, magnesite and siderite", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 45 (1992) 231–246.
- [10] Gammons C. H., Wood S. A., Williams-Jones A. E., "The aqueous geochemistry of the rare earth elements and yttrium: VI. Stability of neodymium chloride complexes from 25 to 300 °C", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60 (1996) 4615–4630.
- [11] Cherniak D. J., "REE diffusion in calcite", *Earth and Planetary Science Letters* 160 (1998) 273–287.
- [12] Heynke U., Leeder O., Schulz H., "On distinguishing quartz of hydrothermal or metamorphogenic origin in different monomineralic veins in the eastern part of Germany", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 46 (1992) 315–329.
- [13] Ghaderi M., Yasemi N., Mousavi Motlagh H. A., "Epithermal Deposits of Iran", (2023) 1–860.
- [14] Ghalamghash J., Babakhani M., "Geological map of Kahak (scale 1: 100000)", Geological survey of Iran (1998).
- [15] Sohrabi Q., "Detailed exploration studies of zinc-lead mining in Shahrestanak, southeast Qom", Kavosh Gostar Arasbaran Company (2021).
- [16] Aghanabati A., "Major sedimentary and structural units of Iran (map)", *Journal of Geosciences* 7 (1998) 29–30.
- [17] Rollinson H., "Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation", Longman Scientific and Technical, Essex, UK (1993) 352p.
- [18] Sohbato M., Kouhestani H., Mokhtari M. A., "Intermediate-sulfidation epithermal base and precious metal mineralization in the Qebchaq deposit (NW Qarachaman, East Azerbaijan): Geology, mineralization, and geochemical evidence", *Journal of Economic Geology* 15 (2023) 53–85.

- sulfidation epithermal type mineralization*", Minerals 8 (2018) 148.
- [36] Hoefs J., "Stable Isotope Geochemistry 7th edition", Springer, Heidelberg (2015) 1–285.
- [37] Clark I. D., Fritz P., "Environmental isotopes in hydrogeology", CRC press (2013) 249p.
- [38] Kakegawa T., Nanri H., "Sulfur and carbon isotope analyses of 2.7 Ga stromatolites, cherts and sandstones in the Jeerinah Formation, Western Australia", Precambrian Research (2006) 115–24.
- [39] Einaudi M. T., Hedenquist J. W., Inan E., "Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments", In: Volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: Rulers and witnesses of processes within the Earth, Special Publications of the Society of Economic Geologists (2003) 285–313.
- [40] Hedenquist J. W., Arribas R. A., Gonzalez-Urien E., "Exploration for epithermal gold deposits", Reviews in Economic Geology 13 (2000) 245–277.
- [41] Gemmell J. B., "Low and intermediate-sulfidation epithermal deposits; ARC-AMIRAP: Canberra, Australia", 24 Ct Gold Workshop, University of Tasmania (2004) 57–63.
- [42] Sollittoe R., Hedenquist J., "Linkages between volcanotectonic settings, ore–fluid compositions", In: Society of Economic Geologists: Special Publication (2003) 315–343.
- [43] Simmons S. F., White N. C., John D. A., "Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits", Economic Geology 29 (2005) 485–522 .
- [29] Jiang H., Han J., Chen H., Zheng Y., Zhang W., Lu W., Deng G., Tan Z., "Hydrothermal alteration, fluid inclusions and stable isotope characteristics of the Shaquanzi Fe–Cu deposit, Eastern Tianshan: Implications for deposit type and metallogenesis", Ore Geology Reviews 100 (2018) 385–400.
- [30] Li S. N., Ni P., Bao T., Li C. Z., Xiang H. L., Wang G. G., Huang B., Chi Z., Dai B. Z., Ding J. Y., "Geology, fluid inclusion, and stable isotope systematics of the Dongyang epithermal gold deposit, Fujian Province, southeast China: Implications for ore genesis and mineral exploration", Journal of Geochemical Exploration 195 (2018) 16–30.
- [31] Chaussidon M., Albarède F., Sheppard S. M., "Sulphur isotope variations in the mantle from ion microprobe analyses of micro-sulphide inclusions", Earth and Planetary Science Letters (1989) 144–156.
- [32] Yilmaz H., Oyman T., Sonmez F. N., Arehart G. B., Billor Z., "Intermediate sulfidation epithermal gold-base metal deposits in Tertiary subaerial volcanic rocks, Sahinli/Tespilh Dere (Lapseki/Western Turkey)", Ore Geology Reviews 37 (2010) 236–258.
- [33] Mango H., Arehart G., Oreskes N., Zantop H., "Origin of epithermal Ag–Au–Cu–Pb–Zn mineralization in Guanajuato, Mexico", Mineralium Deposita 49 (2014) 119–143.
- [34] Liu T., Xiong S. F., Jiang S. Y., Li H. L., Chen Q. Z., Jiang H., "Genesis of the Zhijiadi Ag–Pb–Zn deposit, central North China Craton: Constraints from fluid inclusions and stable isotope data", Geofluids 1 (2017) 1–16.
- [35] Mikaeili K., Hosseinzadeh M.R., Moayyed M., Maghfouri S., "The Shah-Ali-Beiglou Zn–Pb–Cu (–Ag) deposit, Iran: An example of intermediate