



شیمی کانی و زمین دماسنجی اسفالریت و گالن در ذخیره فراگرمایی چنگوره، شمال غرب تاجیکستان - رهیافتی بر نوع کانی سازی

کمال سیاه چشم^{۱*}، لیلا علی جانی^۱، علی اصغر کلاگری^۱، بهروز آهین^۲

۱- گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲- شرکت زمین فن آوران پویا، تبریز

(دریافت مقاله: ۹۶/۵/۷، نسخه نهایی: ۹۶/۱۰/۲۷)

چکیده: ذخیره چنگوره در ۲۵ کیلومتری شمال غرب تاجیکستان، در پهنه فلززائی ترشیاری طارم سفلی واقع است. تزریق نفوذی‌های مونزوگرانیته تا گرانودیوریتی به درون مجموعه آندزیتی- داسیتی ائوسن در منطقه سبب ایجاد دگرسانی گرمابی گسترده آرژیلی و سیلیسی و کانی‌زائی رگه-رگچه‌ای درون‌زاد سولفیدی گالن، اسفالریت، پیریت و به ندرت کالکوپیریت و تتراهدریت- تنانتیت همراه کانی‌های ثانویه برون‌زاد سولفاتی (آنگلزیته)، کربناتی (سروزیت، مالاکیته، آزوریت)، سولفیدی (کولیت) و اکسیدی (هماتیت، گوتیت) در پهنه اکسیدان شده است. در این پژوهش از زمین شیمی و زمین دماسنجی اسفالریت و گالن برای تعیین شرایط سولفیدشدگی، دمای سیال کانه‌دار و نوع کانی‌زایی استفاده شده است. حضور دو نسل گالن (رگچه‌ای برشی شده الف دما بالا دربردارنده میانبارهای تتراهدریت و ب) دما- پایین همراه با اسفالریت کلوفرمی از ویژگی‌های کانی‌شناسی شاخص این ذخیره بشمار می‌آید. براساس بررسی- های شیمی کانی نمونه‌های اسفالریت چنگوره، متوسط تراکم عناصر Ga ، Cd و Ge در شبکه اسفالریت به ترتیب ۵۸۷۰، ۹۷۰ و ۱۳۸۰ ppm است و میانگین نسبت‌های Zn/Cd و Ga/Ge به ترتیب ۱۶۵/۴ و ۱/۳۹ بدست آمد. زمین دماسنج Ga/Ge در اسفالریت نیز دمای سیال کانه‌دار را در گستره $170-220^\circ\text{C}$ نشان می‌دهد. محاسبه $\log a_{\text{S}_2}$ سیال گرمابی (۱۱/۵ - تا ۱۳/۵-) براساس درصد مولی FeS (۰/۸۰-۰/۳۳)، شرایط سولفیدشدگی متوسط را برای ذخیره گرمابی چنگوره پیشنهاد می‌کند. با توجه به نتایج زمین دماسنجی Sb/Bi گالن و زمین‌شیمی اسفالریت [مجموع گوگرد احیا ΣS_{red} نسبتاً پایین، تراکم متوسط Cd (۵۸۷۰ ppm) و نسبت میانگین Zn/Cd (۱۶۵/۴)] شرایط فیزیکوشیمیایی و ترمودینامیکی سیال کانه‌دار در ذخیره چنگوره با ذخایر فراگرمایی دما-متوسط تا بالا همخوانی دارد.

واژه‌های کلیدی: اسفالریت؛ گالن؛ Ga/Ge ؛ Zn/Cd ؛ زمین دماسنجی؛ چنگوره؛ تاجیکستان.

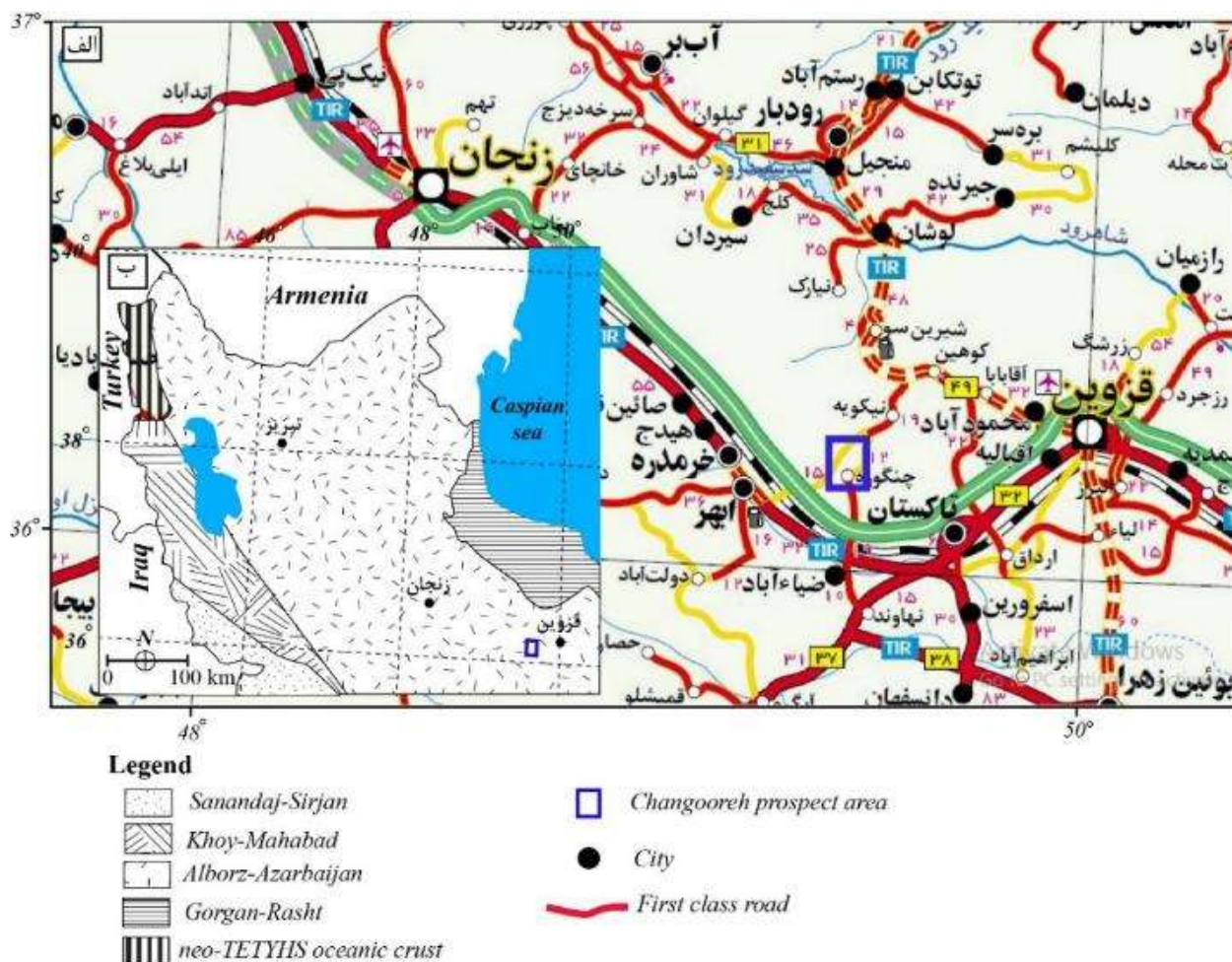
مقدمه

تاجیکستان، در نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی تاجیکستان و ابهر واقع است. اکتشاف مقدماتی بعمل آمده در گستره‌ای به مساحت حدود ۲۰ کیلومتر مربع شواهد کانی‌زایی پراکنده عناصر سرب، روی، مس، نقره و طلا در بخش‌های مختلف منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد [۱]. شاخص سرب با الویت اکتشافی بالا دارای مختصات $12^\circ 29' 49''$ طول جغرافیایی و $15^\circ 13' 36''$ عرض جغرافیایی بوده و در

منطقه طارم سفلی واقع در پهنه فلززایی ترشیاری البرز باختری- آذربایجان با داشتن سیستم گسترده دگرسانی گرمابی از جمله مناطق پتانسیل‌دار برای اکتشاف فلزات پایه است که از آن جمله می‌توان به کانسارهای مس باریک آب، زاجگان سفلی، رشیدآباد و چهرآباد اشاره کرد. منطقه مورد بررسی در ۷۰ کیلومتری غرب قزوین و در ۲۵ کیلومتری شمال غرب

تراکم برخی از عناصر جزئی در اسفالریت این کانی را برای بررسی‌های زمین دماسنجی مناسب نموده است. تنها پژوهش اصولی در نزدیکی منطقه، بررسی سنگ‌زمین شاخص چندفلزی هفت صندوق (در فاصله دو کیلومتری) با تأکیدی بر روش فرکتالی با هدف شناسایی نواحی مستعد کانی سازی است که منجر به شناسایی ناهنجاری سه عنصر Cu, Pb و Ag شده است [۶]. ما در این پژوهش برای نخستین بار به معرفی جنبه‌های مختلف زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و شرایط تشکیل نهشته می‌پردازیم. در این جا به منظور بررسی شرایط فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌دار؛ درصد مولی FeS، نسبت‌های میانگین Zn/Cd، Ga/Ge در اسفالریت و متوسط نسبت Sb/Bi گالن به ترتیب جهت تعیین حالت سولفیدشدگی، دمای تشکیل و نوع ذخیره چنگوره مورد استفاده قرار گرفته است.

حداصل دهستان‌های قاقازان غربی و شرقی و در جنوب روستای چنگوره واقع است (شکل ۱ الف). در حالت کلی، تفاوت در شرایط فیزیکوشیمیایی و ترمودینامیکی سیال‌های گرمایی سازنده انواع ذخایر سرب و روی عامل اصلی تعیین کننده میزان جانشینی Cd اسفالریت و رهیافت زمین‌شیمیایی مناسبی برای تعیین نوع و دمای تشکیل ذخایر سرب و روی بحساب می‌آیند. اهمیت اسفالریت در بررسی‌های زمین‌شناسی ناشی از ماهیت دیرگداز آن و قابلیت این کانی برای ثبت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محیط تشکیل یا دگرگونی به واسطه تغییراتی در ترکیب عناصر جزئی است [۲]. برخی از عناصر جزئی، جانشین روی در اسفالریت شده و برخی نیز در میانبرهای کوچک کانی‌های دیگر حضور دارند [۳]. حضور عناصری مانند کبالت، گالیم، ژرمانیم و قلع می‌تواند ناشی از جانشین شدن این عناصر به جای روی باشد [۵،۴].



شکل ۱ الف) موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه مورد بررسی و ب) نقشه پهنه‌های ساختاری- رسوبی شمالغرب ایران [۸،۷] و موقعیت منطقه در پهنه البرز غربی- آذربایجان.

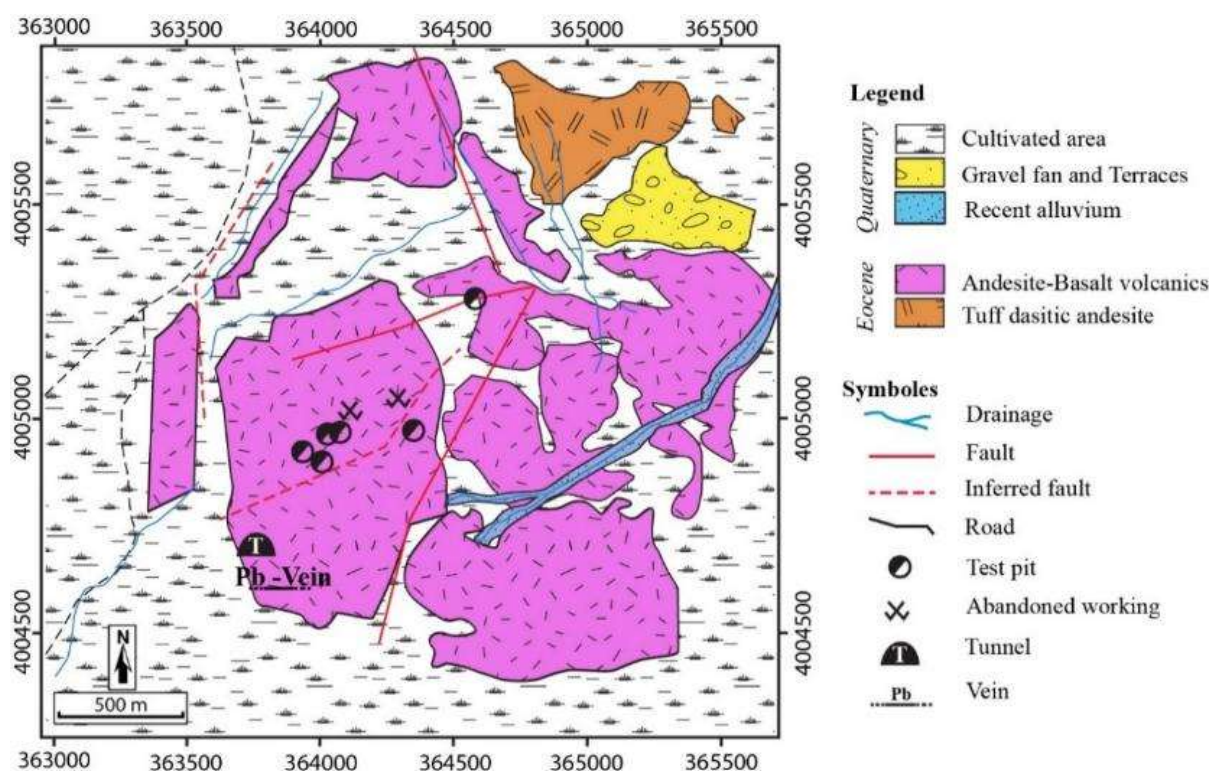
روش پژوهش

بررسی‌های صورت گرفته شامل مطالعات و برداشت‌های دقیق صحرایی به منظور تهیه و تکمیل نقشه زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ و نمونه برداری از رگچه‌های کانی‌سازی شده است. تعداد زیادی نمونه‌های دربردارنده رگچه‌های کانی‌سازی شده جمع‌آوری شدند و پس از تهیه ۱۲ مقطع نازک-صیقلی (در کارگاه مقطع زنی دانشگاه تربیت مدرس)، مورد بررسی کانه‌نگاری قرار گرفتند. برای تعیین کمی عناصر فرعی و کمیاب در ساختار اسفالریت و گالن، این کانی‌ها در سه مقطع منتخب با نشانگر علامت‌گذاری شده و جهت تجزیه با ریزپردازنده الکترونی (EPMA) به آزمایشگاه مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران ارسال شدند. این پژوهش، تلاشی برای مشخص نمودن ترکیب شیمیایی کانی‌های سولفیدی با بررسی‌های جدید ریزپردازنده الکترونی در این ذخیره است. تجزیه EPMA بر روی مقاطع نازک-صیقلی با پوشش کربنی و با استفاده از دستگاه Cameca SX100 با ۵ طیف‌سنج صورت گرفت. ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ kV، جریان ۲۴ nA، قطر باریکه الکترونی ۳-۱۰ μ و زمان شمارش ۱۲ تا ۱۵ ثانیه برای

اندازه‌گیری عناصر اصلی و ۲۰ تا ۲۵ ثانیه برای اندازه‌گیری عناصر کمیاب موجود در نمونه‌های سولفیدی در نظر گرفته شده است.

زمین‌شناسی

براساس تقسیم‌بندی مراجع [۸،۷]، منطقه چنگوره بخشی از پهنه ساختاری رسوبی البرز - آذربایجان محسوب می‌شود (شکل ۱ ب). رخنمون واحدهای سنگ چینه‌ای در مقیاس ناحیه‌ای شامل سازندهای با سن ائوسن معادل سازند کرج، بصورت توالی به نسبت ستبری از توف‌های سبزرنگ، سنگ‌های رسوبی و گدازه‌های آتشفشانی است [۷] که تقریباً همه گستره منطقه مورد بررسی را پوشش می‌دهد. واحدهای سنگی در رخنمون وسیعی از منطقه متشکل از سنگ‌های آندزیتی-بازالت، آندزیت و داسیت، همراه با میان لایه‌های پیروکلاستی و توف‌های آندزیتی-داسیتی سبز و قرمز است که در قسمت‌های شمال غرب خارج منطقه به رخساره آتشفشانی - رسوبی توف و لایه‌های آهکی تغییر یافته و مجموعه توسط رسوبات آبرفتی دوران چهارم و پوشش گیاهی یا زمین‌های کشاورزی پوشیده شده است (شکل ۲).



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی ذخیره چنگوره و پیرامون آن با مکان‌نمایی حفره‌های اکتشافی.

اسفالریت، پیریت به همراه کانی‌های برون‌زاد آنکلیزیت، گوتیت و سروزیت است.

کانی‌سازی

شواهد بررسی‌های کانه نگاری میکروسکوپی نشان دهنده کانی شناسی به نسبت ساده ذخیره است. رگه‌های کانی‌سازی شده به طور عمده از مجموعه کانی‌های درون‌زاد سولفیدی شامل گالن، اسفالریت، پیریت و به ندرت کالکوپیریت و تتراهدریت-تنانتیت به همراه کانی‌های برون‌زاد آنکلیزیت، گوتیت-هماتیت، سروزیت و مالاکیت است.

کانی‌سازی درون‌زاد

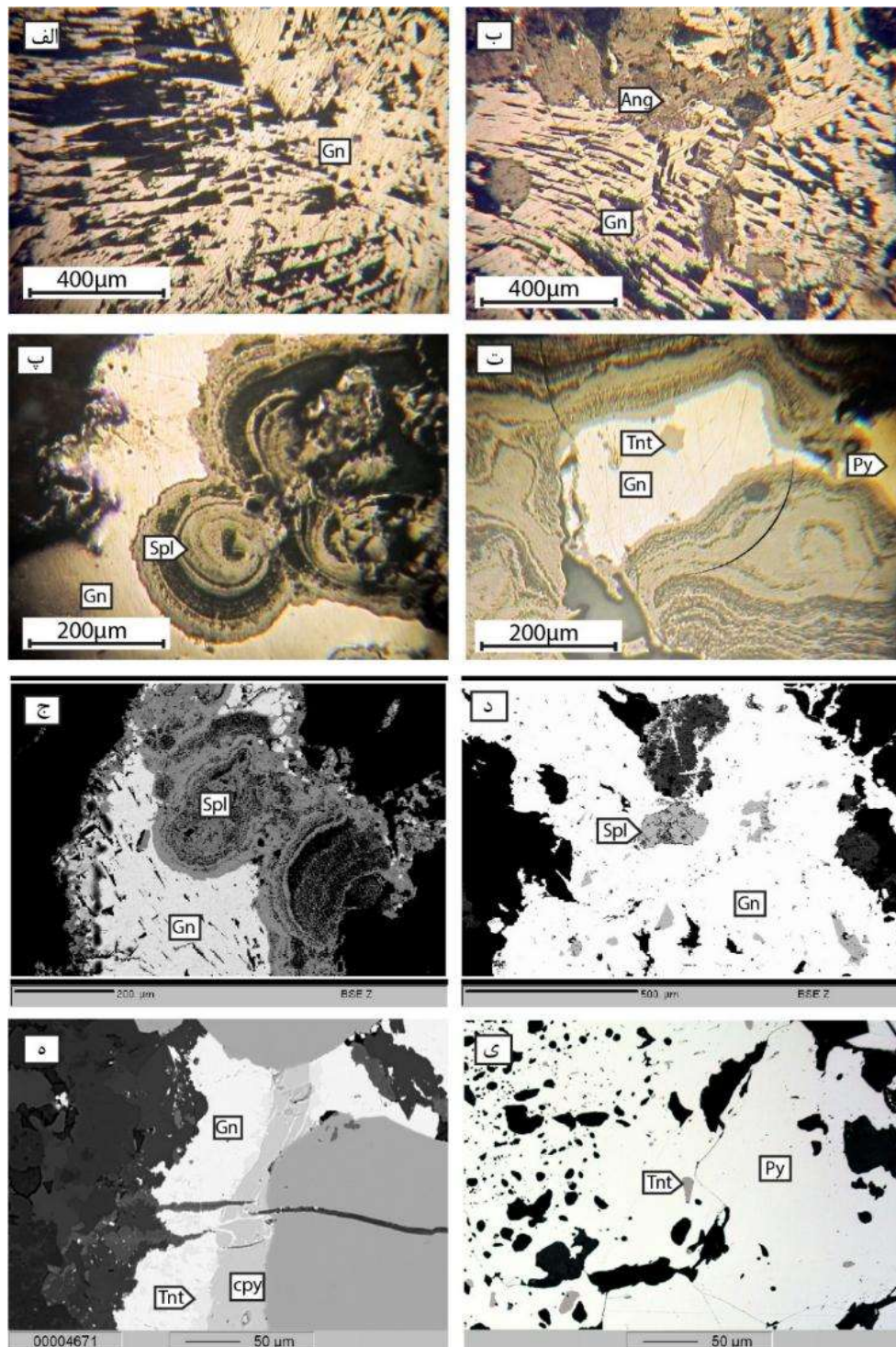
- **گالن** فراوانترین کانی سولفیدی اولیه در رگه-رگه‌های منطقه چنگوره است. در مقاطع بررسی شده، این کانی بیشترین هم یافتی را با اسفالریت نشان می‌دهد (شکل‌های ۳ پ تا ج). دیگر سولفیدها در مقیاس میکروسکوپی بحالت میانبار در گالن دیده می‌شوند که از مهمترین آنها می‌توان به پیریت و به ندرت کالکوپیریت و تتراهدریت-تنانتیت اشاره کرد. که با توجه به حالت نیمه خودشکل آنها بنظر می‌رسد که پیش از گالن تشکیل شده و در آن حبس شده‌اند. دو نسل گالن در این ذخیره قابل تشخیص است: الف) گالن‌های ریز بلور که بصورت رگچه‌ای و دارای بافت برشی هستند و شامل میانبارهای سولفیدهای مختلف مانند پیریت و کالکوپیریت و به ندرت سولفوسالت (شکل‌های ۳ ت و چ) بوده و اغلب توسط اسفالریت جایگزین شده‌اند (شکل‌های ۳ ث و ج) و بنابراین در دمای بالاتری تشکیل شده و قدیمی‌تر اند؛ ب) گالن‌های درشت بلور به‌همراه اسفالریت با بافت کلوفرم که در دماهای پایین‌تر تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۳ پ، ت).

در حضور کاتیون‌های سه ظرفیتی مانند Bi^{+3} یا Sb^{+3} ، جایگزینی Ag^+ در جایگاه هشت‌وجهی بجای Pb^{+2} در ساختار گالن براساس رابطه $2\text{Pb}^{+2} \leftrightarrow \text{Ag}^{+2}(\text{Bi}, \text{Sb})^{+3}$ صورت می‌گیرد [۱۲، ۱۳]. Cd و مقادیر بسیار جزئی Hg نیز در شرایط گرمایی دما پایین می‌توانند بصورت هم ظرفیت در شبکه گالن جایگزین شوند ($\text{Pb}^{2+} \leftrightarrow (\text{Cd}, \text{Hg})^{+2}$) [۱۴]. با توجه به نتایج تجزیه EPMA، میانگین عناصر اصلی S و Pb در گالن به ترتیب ۱۱/۰۶ درصد و ۸۷/۹۵ درصد است. بیشترین فراوانی عناصر Sb ، Cd ، Cu و Zn در گالن به ترتیب ۹۰۰، ۱۵۰۰، ۶۰۰ و ۲۱۰۰ ppm است (جدول ۱) و عناصر Ga ، Bi و Ag نیز در مقادیر بسیار جزئی در شبکه گالن حضور دارند. کاهش

کانی‌زایی در سنگ میزبان تراکی-آندزیتی واقع در عضو آمند، بخش بالایی معادل سازند کرج، تشکیل شده است [۹]. در منطقه طارم سفلی توده‌های نفوذی و نیمه نفوذی پس برخوردی الیگومیوسن با ترکیب غالب مونزوگرانییتی تا گرانودیوریتی و سیال‌های گرمایی ناشی از آنها نقش مهمی در گسترش پهنه‌های دگرسانی آرژیلی پیشرفته، سیلیسی، آلونیتی، سریسیتی و پروپیلیتی در سنگ‌های آتشفشانی - آذرآواری داشته‌اند [۱۰] بطوریکه در منطقه یوزباش چای بیشترین گسترش دگرسانی آرژیلیک پیشرفته آلونیتی دیده می‌شود و به سمت منطقه چنگوره گستردگی دگرسانی‌های سیلیسی و سریسیتی شدن نمود بیشتری دارد. کانی‌سازی اصلی روی و سرب در ارتباط با دگرسانی سیلیسی در منطقه است. بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهد که منطقه علاوه بر دگرسانی، به شدت دستخوش دگرشکلی‌های ساختاری و تشکیل گسل‌ها و درزه‌های با سازوکار متفاوت شده است. تحلیل ساختاری منطقه بر اساس آرایه گسله‌ها و درزه‌های غیر مرتبط و مرتبط با کانه‌زایی صورت گرفته است [۱۱]. براین اساس، تنش‌های اصلی تأثیرگذار بر منطقه دارای راستاهای NW-SE و NE-SW بوده‌اند که به ترتیب باعث ایجاد گسله‌ها و درزه‌هایی با روندهای شمال شرق-جنوب غرب و شمال غرب-جنوب شرق شده است. بررسی آماری گسله‌های منطقه نشان می‌دهد که دو سیستم شکستگی شامل رگه-رگچه‌های کانه دار قابل شناسایی است [۱۱]: الف) گسل F1 همراستا با تونل، دارای شیب ۸۰ درجه بسمت جنوب‌شرق و طول ظاهری ۵۵۰ متر، که منطبق بر رگه کانی‌زایی اصلی سرب در منطقه بوده و تونل اکتشافی حفر شده نیز در امتداد این رگه و گسله است؛ ب) گسل فرعی F2 دارای زاویه سمت ۱۲۱ درجه و شیب قائم و طول ۵۷۳ متر با آغستگی سطحی آنکلیزیت و سروزیت دربردارنده بقایای کانی‌های سولفیدی است. به نظر می‌رسد که این گسل‌ها با فعالیت خود باعث برشی شدن سنگ‌های دو طرف شده و شرایط را برای نفوذ سیال کانه‌دار و ترسیب ماده معدنی فراهم کرده‌اند. می‌توان گفت که کانی‌سازی سولفیدی سرب، روی و مس در چنگوره زیر کنترل عوامل ساختاری در سنگ میزبان با ترکیب غالب آندزیت - بازالت اتوسن رخ داده است. شواهد بررسی‌های کانی‌نگاری بیانگر کانی‌شناسی ساده رگه‌های کانی‌سازی شده بوده و به طور عمده از مجموعه کانی‌های درون‌زاد سولفیدی شامل گالن،

درجه سانتیگراد است [۱۵] و دمای بالاتر تشکیل گالن‌های نسل اول را توجیه می‌کند.

دما منجر به جدا شدن تتراهدریت از گالن می‌شود و حضور این کانی در گالن نشان دهنده محلول‌های با دمای بالاتر از ۲۱۰



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از کانی سازی در منطقه مورد بررسی؛ الف) گالن با بافت برشی و ایجاد ریزشستگی‌ها در امتداد آرایه پیت‌های مثلی؛ ب) هوازدگی برون‌زاد گالن و تشکیل انگلریت؛ پ) نوارهای تیره و روشن اسفالریت با بافت کلوفر و همیافتی آن با گالن دماپایین؛ ت) میانبار تنانیت گالن؛ ث و ج) تصاویر الکترونی پس پراکنده (BSE) از جانشینی اسفالریت بجای گالن؛ چ و ح) تصاویر BSE از جانشینی سولفوسالت‌ها (تنانیت - تتراهدریت) بجای کانی‌های پیریت و کالکوپیریت. علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از [۲۲].

جدول ۱ نتایج آنالیز EPMA یازده نقطه از نمونه‌های گالن در رگه‌های ذخیره چنگوره.

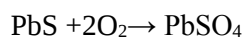
تجزیه	۰۱-۱	۰۲-۱	۰۳-۱	۰۴-۱	۰۵-۱	۰۶-۱	۰۷-۱	۰۸-۱	۰۹-۱	۱۰-۱	۱۱-۱
کانی	Gn	Gn	Gn	Gn	Gn	Gn	Gn	Gn	Gn	Gn	Gn
Wt. %											
Ag	۰	۰	۰/۰۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۳	۰/۰۳
S	۱۰/۶۱	۱۰/۵	۱۰/۶۷	۱۰/۷۱	۱۰/۷۷	۱۰/۵۱	۱۱/۶۴	۱۱/۶۴	۱۱/۴۱	۱۱/۶۱	۱۱/۶۱
Au	۰/۰۸	۰	۰	۰/۰۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Mn	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲
Pb	۸۸/۳۵	۸۹/۱۴	۸۷/۰۴	۸۸/۶۴	۸۷/۶۴	۸۹/۲۴	۸۷/۴۲	۸۷/۲۳	۸۷/۳۳	۸۷/۷۳	۸۷/۷۳
Bi	۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰	۰/۰۱	۰	۰
Zn	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱۲	۰/۰۵	۰/۰۲	۰	۰/۰۸	۰/۰۱	۰	۰/۰۱	۰/۰۲۱
Fe	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۳	۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰	۰/۰۴	۰/۰۶
Ni	۰	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰	۰
Cu	۰	۰	۰/۰۲	۰	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰/۰۶	۰	۰
Co	۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰/۰۲	۰	۰/۰۳	۰	۰
Cd	۰/۰۲	۰	۰/۰۱۳	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۱۵	۰/۰۷	۰/۰۱۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱۲
As	۰	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰	۰
Sb	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۰۴	۰	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰
Sn	۰	۰/۰۴	۰	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱
Ga	۰/۰۲	۰/۰۴	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۰۱۳	۰	۰/۰۱
Ge	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰
V	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Si	۰	۰/۰۳	۰	۰/۰۵	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰/۰۲	۰	۰/۰۲
مجموع	۹۹/۱۸	۹۹/۸۰	۹۹/۱۸	۹۹/۶۱	۹۸/۶۶	۱۰۰/۱۳	۹۹/۴۸	۹۹/۲۲	۹۹/۰۸	۹۹/۶۴	۱۰۰/۹۰
Elements (At. %)											
Ag	۰	۰	۰/۰۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۴	۰/۰۴
S	۴۳/۶۰	۴۳/۱۹	۴۳/۸۳	۴۳/۷۴	۴۴/۰۷	۴۳/۰۷	۴۶/۰۵	۴۶/۱۱	۴۵/۶۳	۴۵/۸۸	۴۵/۷۵
Au	۰/۰۵	۰	۰	۰/۰۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Mn	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۲	۰	۰	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۵
Pb	۵۶/۱۸	۵۶/۷۳	۵۵/۳۹	۵۶/۰۱	۵۵/۴۸	۵۶/۵۸	۵۳/۵۱	۵۳/۴۷	۵۴/۰۴	۵۳/۶۴	۵۳/۴۹
Bi	۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰	۰/۰۱	۰	۰
Zn	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۲۴	۰/۰۱۰	۰/۰۴۰	۰	۰/۰۱۶	۰/۰۱۹	۰	۰/۰۱۹	۰/۰۴۱
Fe	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۷	۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۵	۰	۰/۰۹	۰/۰۴۱
Ni	۰	۰	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۲	۰	۰
Cu	۰	۰	۰/۰۴	۰	۰	۰/۰۲	۰	۰	۰/۰۲	۰	۰
Co	۰	۰/۰۲	۰/۰۴	۰	۰	۰	۰/۰۴	۰	۰/۰۷	۰	۰
Cd	۰/۰۲	۰	۰/۰۱۵	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۱۸	۰/۰۸	۰/۰۱۴	۰/۰۲	۰/۰۱۱	۰/۰۱۳
As	۰	۰	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰	۰
Sb	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱۰	۰/۰۴	۰	۰/۰۱۰	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰
Sn	۰	۰/۰۴	۰	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱/۰۶
Ga	۰/۰۴	۰/۰۸	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱۸	۰/۰۱۵	۰/۰۲۴	۰	۰/۰۱۸
Ge	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۳	۰	۰	۰	۰
V	۰/۰۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Si	۰	۰/۰۱۴	۰	۰/۰۲۳	۰	۰/۰۴۷	۰	۰	۰/۰۹	۰	۰/۰۹
مجموع	۱۰۰/۰۹	۱۰۰/۲۶	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۲۳	۱۰۰/۰۱	۱۰۰/۴۷	۱۰۰/۲۲	۱۰۰/۱۵	۱۰۰/۳۳	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۳۴
نسبت های اتمی											
Pb	۵۶/۳۰	۵۶/۷۸	۵۵/۸۰	۵۶/۱۵	۵۵/۷۳	۵۶/۷۸	۵۳/۷۵	۵۳/۶۹	۵۴/۲۲	۵۳/۹۰	۵۳/۹۰
S	۴۳/۷۰	۴۳/۲۲	۴۴/۲۰	۴۳/۸۵	۴۴/۷۷	۴۳/۲۲	۴۶/۲۵	۴۱/۳۱	۴۵/۷۸	۴۶/۱۰	۴۶/۱۰
مجموع	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰

کانی سازی برون زاد

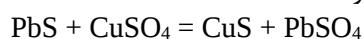
کانی های سولفیدی مختلف نرخ واکنش پذیری متفاوتی در برابر هوازدگی دارند و فراورده های اکسایشی متنوعی ممکن است بر سطح سولفیدها تشکیل شوند. پیریت در اصل واکنش پذیرترین سولفید است و اکسایش آن می تواند سیالات با pH پایین تولید کند. واکنش پذیری سایر سولفیدها از جمله کوولیت و گالن در مقایسه با پیریت بسیار کمتر است که دلایل این امر عبارتند از: الف) پایداری بیشتر ساختار بلوری آنها، ب) نبود آهن در ترکیبشان و پ) تشکیل کانی های با انحلال پذیری کم مانند سروزیت یا آنگلزیت بر آنها که از اکسایش بیشتر جلوگیری می کند [۱۹].

آنگلزیت

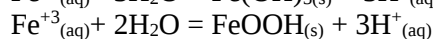
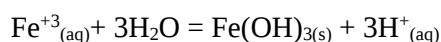
سرب موجود در گالن در محیط اسیدی می تواند براساس رابطه زیر به طور مستقیم به آنگلزیت اکسیده شود:



تشکیل آنگلزیت سبب کدر شدن سطح بلورهای گالن شده که در نور بازتابی به رنگ زرد تا قهوه ای دیده می شود (شکل ۳ ب). رخداد نسبتاً فراوان آنگلزیت در مقایسه با سروزیت (PbCO_3) در ذخیره چنگوره به اکسایش وسیع پیریت و پایین بودن نسبی pH سیالات نسبت داده می شود چراکه در حضور Fe^{+3} و یون های سولفات، ترجیحاً آنگلزیت تشکیل خواهد شد [۲۰]. رها شدن مس از میانبارهای کالکوپیریت و تتراهدریت-تنانتیت درون گالن در تماس با یون های سولفات محیط موجب تشکیل کوولیت برون زاد نیز شده است:



اکسید-هیدروکسیدهای آهن: طی هوازدگی پیریت، محیط اسید-سولفاتی شده و یون های آهن فرو (Fe^{+2}) به فریک (Fe^{+3}) اکسیده می شود. آب کافت Fe^{+3} موجب ته نشینی هیدروکسیدهای فریک ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) و اکسی هیدروکسیدها (FeOOH) در pH بالاتر از ۳ می شود به این ترتیب، هیدروژن بیشتری تولید شده و اکسایش پیشرونده پیریت ادامه می یابد [۲۱]:



بیشتر نمونه ها دارای رگچه های پیریتی با بافت برشی هستند که در اثر محلول های برون زاد اکسید شده و گوتیت در حجم وسیعی جانشین پیریت شده است. تشکیل گوتیت فراوان در ارتباط مستقیم با شستشوی اسیدی ضعیف در پهنه اکسیدان بوده و گویای آن است که اسیدیته سیال های پایین رو چندان

اسفالریت از نظر فراوانی دومین کانی سولفیدی ذخیره را تشکیل می دهد. این کانی در مقاطع نازک-صیقلی به صورت بلورهای نیمه شکل دار با اندازه ۰/۲ تا ۴ میلی متر به رنگ زرد-عسلی تا زرد-قهوه ای و به صورت پراکنده همراه با گالن دیده می شود. همچنین هم رشدی گالن با اسفالریت دارای پیوند کلوفرمی نیز مشهود است (شکل های ۳ پ و ث). اسفالریت با بافت کلوفرم از نوارهای نازک تیره و روشن تشکیل شده است و این ویژگی می تواند در ارتباط با دمای پایین تشکیل ذخیره باشد [۱۶، ۱۷].

سایر سولفیدها: پیریت سومین کانی سولفیدی فراوان در رگچه های کانی زایی شده است. از نظر شکل بلورشناسی، این کانی بصورت بلورهای نیمه شکلدار تا بی شکل با بافت غربالی و خرد شده حضور دارد (شکل ۳ ج) و هم رشدی و جانشینی مشخصی با کالکوپیریت، اسفالریت و گالن نشان می دهد (شکل ۳ ت). انواع خرد شده آن نیز در داخل رگچه های برشی دیده می شود و برآمده از شکستگی و بازشدگی مکرر رگچه های پیشین هستند. در مقاطع صیقلی کالکوپیریت به صورت بلورهای ریز با فراوانی کم دیده می شود که می تواند در اثر افزایش pH و کاهش گریزندگی اکسیژن از سیال نهشته شده باشد [۱۸]. بر پایه بررسی های میکروسکوپی در ارتباط با ترتیب تبلور کانی های سولفیدی چنین دریافت می شود که ابتدا کالکوپیریت جانشین پیریت شده و پس از آن گالن و در پایان اسفالریت نهشته شده اند.

- سولفوسالت ها (تتراهدریت-تنانتیت) در حجم کمتر از ۱٪ در داخل رگچه های سولفیدی دیده می شوند بطوریکه جانشین کانی های سولفیدی پرعیار مس مانند کالکوپیریت و بورنیت شده اند (شکل های ۳ ت و ج). این کانی ها ایزوتروپ هستند و از نمک های سولفیدی Cu-As مراحل پایانی فعالیت گرمایی محسوب می شوند. نتایج بدست آمده از تجزیه با ریزپردازشگر الکترونی فرمول شیمیایی $(\text{Cu}, \text{Fe})_{12}(\text{As}, \text{Sb})_4\text{S}_{13}$ را برای این کانی ها پیشنهاد می کند. تتراهدریت در قیاس با کالکوپیریت، مقادیر بالایی Sb (از ۲۴/۸ تا ۲۸/۲ درصد وزنی) و تنانتیت تراکم بالایی از As (۲۱/۴-۱۷/۸ درصد وزنی) دارد که جانشین S شده اند. آنها همچنین دارای مقادیر جزئی سرب و روی ($<5\text{wt}\%$) نیز هستند و مقادیر آهن اندازه گیری شده در آنها پایین است.

زیاد نبوده است. این امر گویای فراوانی کم پیریت در پهنه‌های کانی‌سازی شده چنگوره است.

بحث و بررسی

زمین شیمی اسفالریت

عامل ترکیب کنترل کننده‌ی اصلی یک کانی گرمایی به طور مشخص تراکم عناصر در سیال گرمایی طی ته‌نشست کانی است که در هر زمان توسط واکنش سیال با سنگ‌های همبر، دما و فشار حاکم، و نسبت‌های سیال به سنگ کنترل می‌شود [۲۲، ۲۳]. عوامل دیگری نیز بر شرکت عناصر جزئی در کانی‌های سولفیدی گرمایی تأثیر می‌گذارند که می‌توان به نرخ ته‌نشست کانی [۲۴]، ضریب جدایش عنصر جزئی بین سیال و کانی و تفکیک کانی‌های همزاد [۲۵] اشاره کرد.

اسفالریت با داشتن فرمول ساده، می‌تواند طیفی وسیعی از عناصر کمیاب از قبیل کادمیم، منگنز، کبالت، مس، گالیم و ژرمانیم را از طریق جانشینی ساده بجای Zn در ساختار خود داشته باشد [۲۷، ۲۶]. باتوجه به نتایج EPMA، اسفالریت‌های توده‌ای داخل رگچه‌ها به رنگ زرد روشن و کم آهن هستند ولی بخش‌های تیره در بافت کلوform دارای آهن بیشتر و در بخش‌های روشن‌تر کم آهن بوده و به نسبت غنی از کادمیم هستند. متوسط مقادیر عناصر Fe، Cd، Ga و Ge اندازه‌گیری شده در شبکه اسفالریت به ترتیب ۳۹۶۰، ۵۸۷۰، ۹۷۰ و ۱۳۸۰ ppm است و میانگین نسبت‌های Zn/Cd و Ga/Ge به ترتیب ۱۶۵/۴ و ۱/۳۹ بدست آمد (جدول ۲). به روشنی دیده می‌شود که همبستگی آهن با کادمیم منفی است، بطوریکه مقدار کادمیم در اسفالریت‌های به رنگ روشن‌تر بیشتر از انواع تیره‌تر است. از سوی دیگر، همبستگی مثبت بین کادمیم با روی دیده می‌شود و این عناصر همبستگی منفی با آهن دارند یعنی با افزایش مقدار آهن اسفالریت‌ها، تراکم عناصر روی و کادمیم کاسته می‌شود (جدول ۲).

زمین‌دماسنجی اسفالریت و گالن

زمین دماسنج نسبت گالیم به ژرمانیوم (Ga/Ge) در اسفالریت بر مبنای دو فرض پایه‌گذاری شده است [۲۳]: الف) انسجام زمین‌شیمیایی قوی گالیم-آلومینیوم (Ga-Al) و ژرمانیوم-سیلیسیم (Ge-Si) به منظور قابل استفاده کردن ثابت‌های تعادل برای واکنش‌های آپیوشی در دماهای مختلف و ب) وجود کانی‌های غنی از گالیم و ژرمانیم و عدم تفکیک قابل توجه گالیم-ژرمانیم طی تشکیل آنها. با فرض آنکه نسبت گالیم به ژرمانیم در سیال مساوی این نسبت در

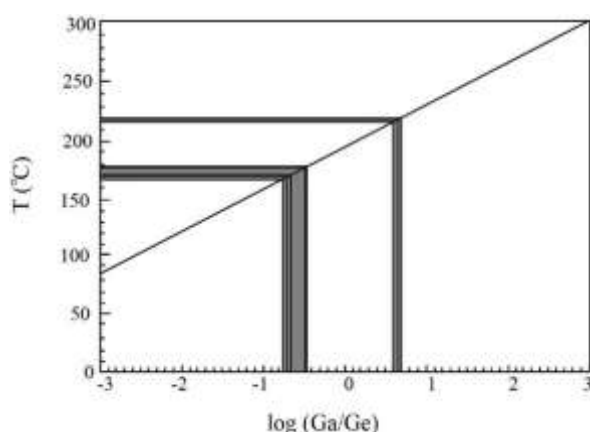
اسفالریت باشد [۲۳]. استفاده از آن به منظور برآورد دمایی که در آن فلزها به وسیله یک سیال گرمایی از سنگ‌های خاستگاه آنها شسته شده‌اند و به‌ویژه برای ارزیابی دمای ته‌نشست اسفالریت پیشنهاد شده است. نتایج تجزیه نمونه‌های اسفالریت (جدول ۲) نشان می‌دهد که تغییرات نسبت Ga/Ge در گستره ۰/۱۷ تا ۵ است و بر نمودار $\log(Ga/Ge)-T(C)$ دمایی تشکیل در گستره ۱۷۰ تا ۲۲۰ درجه سانتیگراد برآورد می‌شود [۲۸] (شکل ۴).

مقدار Bi و Sb در گالن نیز وابسته به دمای تشکیل است. آنتیموان عیار به نسبت بالائی در ذخایر دما پایین دارد [۲۹] به طوریکه اگر نسبت معرفت Sb/Bi کمتر از ۰/۶ باشد گالن در دمای بالا و اگر بین ۶ تا ۱۳ باشد در دمای پایین تشکیل شده است [۱۵]. نتایج تجزیه ده نقطه از کانی‌های گالن ذخیره مورد بررسی با ریزپردازشگر الکترونی در جدول ۱ نشان داده شده است. میانگین نسبت Sb/Bi در نمونه‌های گالن چنگوره برابر با ۱۴/۷ بوده که نشان دهنده تشکیل آن در دمای نسبتاً پائین مشابه ذخایر فراگرمایی دما پایین است.

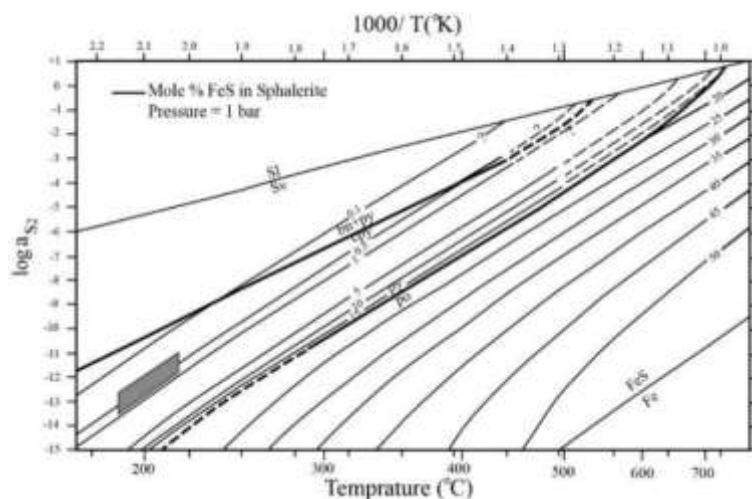
Fe اصلی‌ترین عنصر قابل جانشینی به جای Zn در اسفالریت است. اسفالریت با آهن بیشتر به رنگ تیره‌تر و در نمونه‌های با آهن کمتر روشن‌تر است [۳۰]. در شرایط تشکیل کانسنگ مقدار آهن اسفالریت رابطه مستقیم با فعالیت گوگرد و فشار حاکم دارد. با افزایش دما، مقدار FeS در اسفالریت با ثابت بودن فشار افزایش می‌یابد و با ثابت بودن دما، به ازای افزایش فشار مقدار FeS کاهش می‌یابد [۳۱]. همچنین سرعت پایین انتشار در کانی اسفالریت می‌تواند موجب حفظ ترکیب اولیه شود [۳۲، ۳۱]. مقدار تراکم آهن در ترکیب اسفالریت می‌تواند شاخصی از دما و فشار تشکیل آن باشد. بر اساس نتایج شیمی کانی نمونه‌های اسفالریت چنگوره، تراکم آهن در گستره ۰/۵۱-۰/۲۱ درصد وزنی قرار می‌گیرد؛ از اینرو گستره تغییرات درصد مولی FeS در اسفالریت بین ۰/۳۳ تا ۰/۸۰ محاسبه می‌شود. با رسم درصد مولی FeS در نمودار $\log aS_2-T$ [۳۳]، مقدار $\log aS_2$ سیال نیز در گستره ۱۱/۵ - تا ۱۳/۵ قرار می‌گیرد (شکل ۵). جهت تعیین درجه سولفیدشدگی سیالات کانه‌ساز در این ذخیره از نمودار شکل ۶ استفاده شده است [۳۴]. در این نمودار با تعیین میزان فعالیت گوگرد و با توجه به همبرزایی کانی‌های سولفیدی رایج، می‌توان نتیجه گرفت که ذخیره چنگوره از نوع فراگرمایی با شرایط سولفیدشدگی حدواسط است. وجود اسفالریت‌های کم آهن در منطقه، نیز نشانگر سولفیدشدگی حدواسط است [۳۵].

جدول ۲ ترکیب عناصر اصلی و جزئی نمونه‌های اسفالریت ذخیره چنگوره.

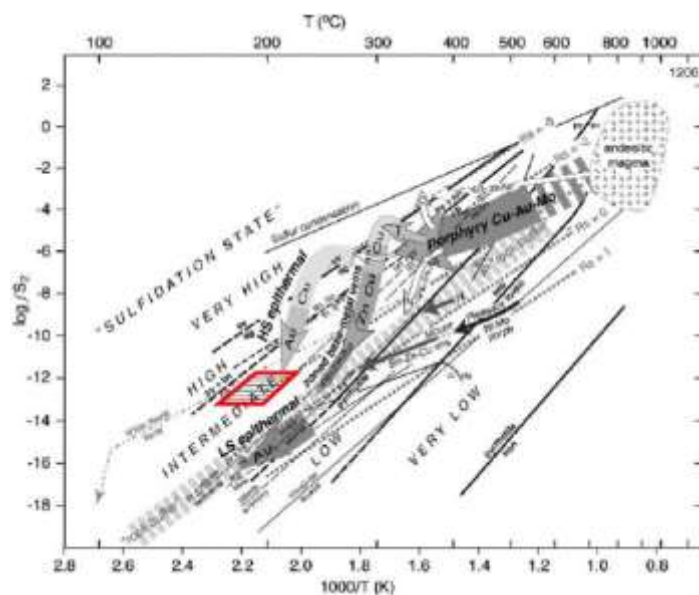
تجزیه	۰۱-۱	۰۲-۱	۰۳-۱	۰۴-۱	۰۵-۱	۰۶-۱	۰۷-۱	۰۸-۱	۰۹-۱	۱۰-۱
کانی	Spl	Spl	Spl	Spl	Spl	Spl	Spl	Spl	Spl	Spl
Wt. %										
Ag	۰	۰/۰۵	۰	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۳
S	۳۲/۵	۳۳/۲۳	۳۳/۱۹	۳۲/۹۶	۳۲/۸۳	۳۳/۵۶	۳۳/۸۳	۳۳/۸۷	۳۲/۴۴	۳۳/۵۷
Au	۰	۰	۰	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰
Mn	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰
Pb	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Bi	۰/۰۳	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۹	۰	۰
Zn	۶۵/۴۸	۶۵/۲۲	۶۶/۸۷	۶۶/۴۶	۶۵/۰۳	۶۴/۴۳	۶۳/۹۴	۶۴/۹۳	۶۵/۴	۶۴/۴۱
Fe	۰/۴۷	۰/۴۹	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۴۶	۰/۴۴	۰/۴	۰/۴۴	۰/۵۱	۰/۲۱
Ni	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱
Cu	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۶	۰/۰۱	۰
Co	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰
Cd	۰/۶۷	۰/۹۹	۰/۳۶	۰/۴۸	۰/۷۶	۰/۸۴	۰/۵۳	۰/۶۳	۰/۱	۰/۵۱
As	۰	۰/۰۴	۰	۰	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰	۰	۰/۰۱
Sb	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۰	۰/۰۱	۰	۰/۰۲
Sn	۰	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰
Ga	۰	۰	۰	۰	۰/۰۳	۰	۰	۰	۰/۰۲	۰
Ge	۰	۰	۰	۰	۰/۰۹	۰	۰/۰۲	۰/۱۳	۰/۰۳	۰
V	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Si	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱
Zn/Cd	۹۷/۷۳	۶۵/۸۸	۱۸۷/۷۵	۱۳۸/۴۶	۸۵/۵۷	۷۶/۷۰	۱۲۰/۶۴	۱۰۳/۰۶	۶۵/۴۰	۱۲۶/۲۹
Ga/Ge	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۲۲	۰/۲۰	۰/۳۳	۵/۰	۳/۳۳	۳/۸۴	۰/۳۳	۰/۳۰
مجموع	۹۹/۱۹	۱۰۰/۱۰	۱۰۰/۷۷	۱۰۰/۳۰	۹۹/۳۴	۹۹/۳۹	۹۸/۷۵	۱۰۰/۱۹	۹۸/۵۷	۹۸/۷۸
عناصر (At. %)										
Ag	۰	۰/۰۲	۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱
S	۴۹/۹۳	۵۰/۴۸	۵۰/۱۰	۵۰/۰۳	۵۰/۳۲	۵۱/۰۹	۵۱/۵۹	۵۱/۱۶	۵۰/۰۲	۵۱/۳۰
Au	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰	۰
Mn	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰
Pb	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Bi	۰/۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۲	۰	۰
Zn	۴۹/۳۳	۴۸/۵۸	۴۹/۴۹	۴۹/۴۷	۴۸/۸۸	۴۸/۱۰	۴۷/۸۱	۴۸/۱۰	۴۹/۴۵	۴۸/۲۶
Fe	۰/۴۱	۰/۴۳	۰/۲۳	۰/۲۴	۰/۴۰	۰/۳۸	۰/۳۵	۰/۳۸	۰/۴۵	۰/۱۸
Ni	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱
Cu	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۵	۰/۰۱	۰
Co	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰
Cd	۰/۲۹	۰/۴۳	۰/۱۵	۰/۲۱	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۲۳	۰/۲۷	۰/۰۴	۰/۲۲
As	۰	۰/۰۳	۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰	۰	۰/۰۱
Sb	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰/۰۱
Sn	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Ga	۰	۰	۰	۰	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰
Ge	۰	۰	۰	۰	۰/۰۶	۰	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۰۲	۰
V	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Si	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۲
مجموع	۱۰۰/۰۲	۱۰۰/۰۲	۱۰۰/۰۷	۱۰۰/۰۳	۱۰۰/۰۸	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۲	۱۰۰/۰۹	۱۰۰/۰۳	۱۰۰/۰۲
نسبت های اتمی										
Zn	۴۹/۷۰	۴۹/۰۴	۴۹/۷۰	۴۹/۷۲	۴۹/۲۷	۴۸/۴۹	۴۸/۱۰	۴۸/۴۵	۴۹/۷۱	۴۸/۴۸
S	۵۳/۳۰	۵۰/۹۶	۵۰/۳۰	۵۰/۲۸	۵۰/۷۳	۵۱/۵۱	۵۱/۹۰	۵۱/۵۵	۵۰/۲۰	۵۱/۵۲
Total	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰



شکل ۴ نمودار وابستگی دمای تشکیل اسفالریت و نسبت $\log \text{Ga/Ge}$ در آن. قسمت هاشور خورده به دمای تشکیل اسفالریت های ذخیره چنگوره در گستره دمایی $170-220^\circ\text{C}$ اشاره دارد [۲۸].



شکل ۵ نمودار ارتباط فازی در سیستم Fe-Zn-S [۳۳]؛ نوار خاکستری نشان دهنده گستره تغییرات درصد مولی FeS در نمونه های اسفالریت ذخیره چنگوره با توجه به دمای تشکیل آنها را نشان می دهد. گستره تغییر $\log a_{\text{S}_2}$ سیال از روی نمودار تعیین شده است.



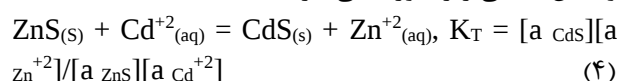
شکل ۶ نمودار $\log f_{\text{S}_2}$ نسبت به دما برای توصیف شرایط سیال تشکیل دهنده انواع ذخایر گرمایی [۳۴]. با توجه به گریزندگی گوگرد برآورد شده، تشکیل ذخیره چنگوره از نوع فراگرمایی با شرایط سولفیدشدگی حدواسط تعیین می شود.

مدل کانی سازی ذخیره

عوامل مقدار Cd و نسبت Zn/Cd اسفالریت موضوع پژوهش- های اخیر جهت رده بندی انواع ذخایر سرب و روی در چین [۳۶] بوده اند و بر اساس ۷۰ نمونه اسفالریت جدا شده (از ۹ کانسار شناخته شده) که مورد تجزیه به روش طیفسنجی نشر نوری پلاسما جفت شده القایی (ICP-OES) قرار گرفتند این ذخایر به سه گروه دما بالا، دما پایین و برون دمی (متصاعدی-رسوبی یا SedEx) تقسیم شده اند [۳۷] (شکل ۷): الف) سیستم دما بالا که طیف وسیعی از ذخایر گرمایی با خاستگاه وابسته به توده های نفوذی، اسکارنی و سولفید توده ای را در بر می گیرد در شرایط دمایی $200-250^{\circ}\text{C}$ تشکیل شده است و متوسط تراکم کادمیم ۲۹۳۳ ppm و نسبت Zn/Cd نیز در گستره ۱۵۵ تا ۲۲۳ در تغییر است؛ ب) سیستم دما پایین به ذخایر نوع دره می سی سی پی (MVT) تعلق دارد که بطور مشخص در دمای کمتر از 200°C تکوین یافته اند و مقدار Cd بالا (۲۴۹۸۱-۲۴۱۵ ppm) و نسبت Zn/Cd پایین- تر از سایر گروه ها (۲۰۱-۱۷) دارند؛ و پ) سیستم ذخایر SedEx که با داشتن مقادیر ناچیز کادمیم (۱۱۷۴-۲۵۹ ppm) و نسبت Zn/Cd قابل توجه (۲۱۱-۵۱۰) مشخص شده اند. میانگین تراکم Cd در نمونه های اسفالریت چنگوره ۵۸۰۰ ppm است و با داشتن نسبت Zn/Cd حدود ۱۶۵/۴ می تواند در رده ذخایر فراگرمایی - رگ های وابسته به توده نفوذی قرار بگیرد (شکل ۷).

تحلیل ترمودینامیکی مقدار Cd و نسبت Zn/Cd اسفالریت

جایگزینی Cd و Zn بین سیال و فاز جامد (کانی) براساس واکنش تعادلی زیر صورت می گیرد [۳۸]:

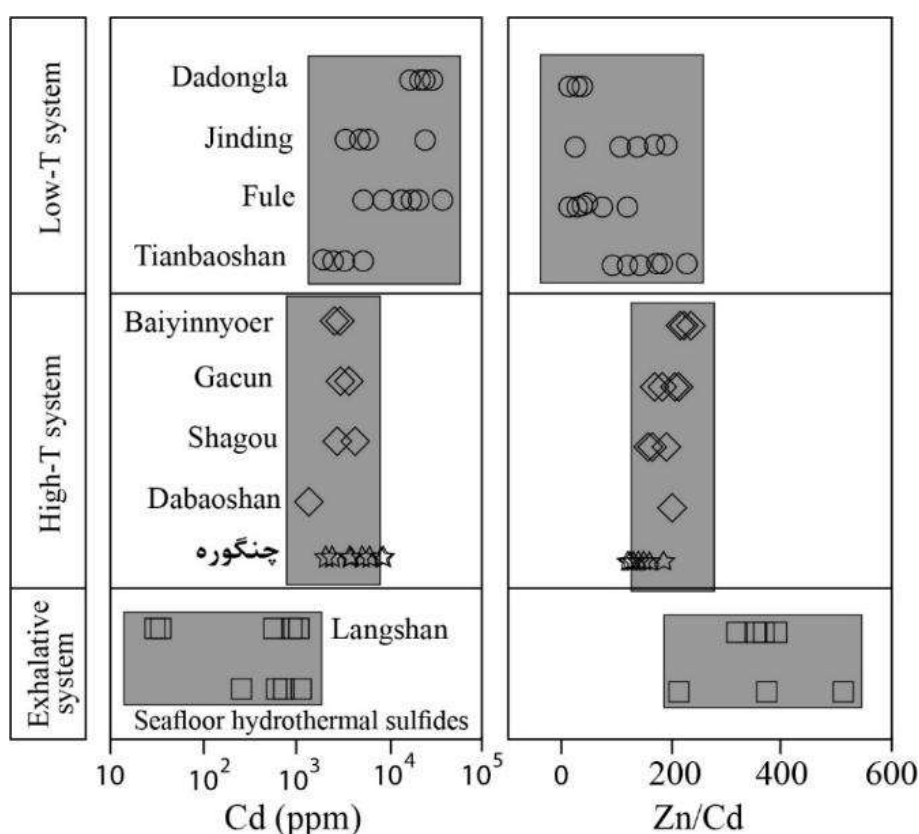


به طور نظری، در نبود یون های کمپلکس ساز ضریب توزیع (K_T) با افزایش دما از ۲۵ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد افت سریعی نشان می دهد (منحنی ۱ شکل ۸). از اینرو دماهای پایین جانشینی Cd در شبکه اسفالریت را مساعد می کند اما در سیال های گرمایی کمپلکس های آبدین سرب و کادمیم بصورت Cd^{+2} و Zn^{+2} جایگزین هم می شوند [۴۰، ۳۹] و لیگاندهای Cl^- ، HS^- و OH^- در این سیال ها بسیار متداولند. برای مثال

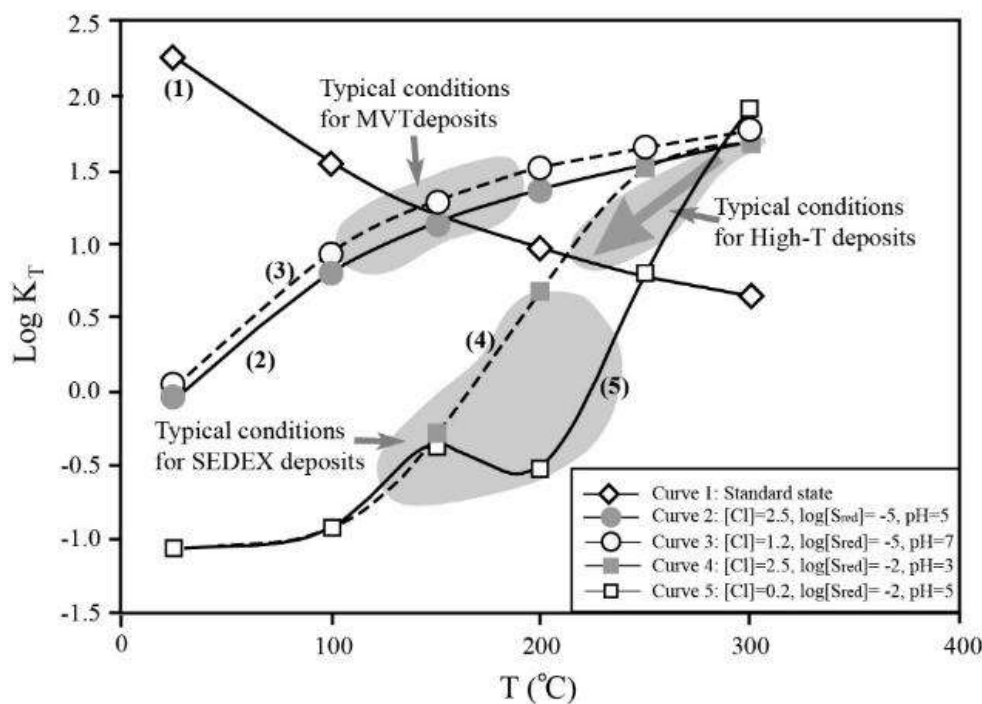
$\text{CdCl}_m(\text{H}_2\text{O})_{n-2-m}$ در گستره وسیعی از دما ($450^{\circ}\text{C} > T$)، اسیدیته ($1 \leq \text{pH} \leq 8$) و غلظت کلرید ($\text{mol/kgH}_2\text{O}$) $0.04 \leq m\text{Cl} \leq$ می تواند پایدار باشد. از اینرو علاوه بر دما، حضور کمپلکس های Cd، شوری (غلظت Cl^-)، تراکم کل گوگرد احیا ($\sum S_{\text{red}}$) و pH محلول های گرمایی عوامل اصلی میزان جانشینی Cd در اسفالریت بحساب می آیند. به توجه به شکل ۸، با در نظر گرفتن تأثیر عوامل کمپلکس ساز، منحنی- های ۲ تا ۵ روند معکوسی را در مقایسه با منحنی ۱ به نمایش خواهند گذاشت. در مقادیر مشابه $\sum S_{\text{red}}$ ، pH و شوری ($m\text{Cl}^-$)، تفاوت چندانی در K_T محاسبه شده در دماهای مشابه دیده نمی شود (منحنی های ۳ و ۲ یا ۴ و ۵). با این وجود، تراکم گوگرد احیایی سیال گرمایی تأثیر مستقیمی در ضریب توزیع Cd در اسفالریت دارد در حالیکه شوری و pH چندان نقشی ندارند. $\sum S_{\text{red}}$ بالا K_T را به مقادیر پایین تر جابجا می کند و موجب تشکیل اسفالریت فقیر از Cd خواهد شد و برعکس، که به ترتیب با شرایط تشکیل ذخایر SEDEX و MVT سازگار است (شکل ۸).

در شرایط فیزیکوشیمیایی مشابه در دمای به 300°C ، ضریب جدایش K_T به بیشترین مقدار خود می رسد بنابراین انتظار می رود که در شرایط سیال گرمایی و دماهای بالا جایگزینی Cd در شبکه اسفالریت بیشینه باشد ولی از آنجا که انحلال پذیری اسفالریت در دمای 300°C ۴ برابر بیشتر از دمای 150°C در سیال با $\text{pH} = 6$ و $\text{mNaCl} = 2$ است می- توان نتیجه گرفت که در سیستم های دما بالا تراکم اسفالریت با Cd بالا هنگامی صورت می گیرد که دما کاهش یابد (شکل ۸).

در حالت کلی، تفاوت شرایط فیزیکوشیمیایی سیالات گرمایی سازنده انواع ذخایر سرب و روی عامل اصلی تعیین کننده تراکم Cd و تفاوت در نسبت های Zn/Cd اسفالریت است [۳۶]. از اینرو با توجه به گستره دمای تشکیل و مقدار گوگرد نسبتاً پایین (درجه سولفیدشدگی متوسط) و تراکم میانگین Cd (۵۸۷۰ ppm) و نسبت میانگین (۱۶۵/۴) در اسفالریت های ذخیره چنگوره موقعیت آن در حدوسط ذخایر MVT و SedEx قرار داشته و شرایط ترمودینامیکی سیال آن با ذخایر گرمایی دما متوسط تا بالا همخوانی دارد (شکل ۸).



شکل ۷. نمودار توزیع تراکم Cd و نسبت Zn/Cd در ۹ کانسار شناخته شده چین [۳۶] و موقعیت ذخیره چنگوره در آن. داده‌های مربوط به سولفیدهای گرمابی زیردریایی برگرفته از مرجع [۳۷].



شکل ۸. نمودار جدایش Zn-Cd بین سیال و اسفالریت همزیست بر اساس $\log K_T$ نسبت به دما در شرایط گرمابی متفاوت از نظر فعالیت Cl^- ، مجموع گوگرد احیا (ΣS_{red}) و pH [۳۶]. ذخیره چنگوره با گستره کانسارهای دما بالا تا متوسط همخوانی دارد.

برداشت

گالن و اسفالریت همراه با مقداری پیریت و به ندرت کالکوپیریت و تتراهدریت- تنانتیت مهمترین کانی‌های سولفیدی ذخیره گرمایی -رگه‌ای چنگوره هستند. شیمی‌کانی نمونه‌های اسفالریت بیانگر جانشینی طیفی وسیع از عناصر کمیاب از قبیل، کادمیم، منگنز، کبالت، مس، گالیم و ژرمانیم بجای Zn در شبکه اسفالریت است. علاوه بر دما، حضور کمپلکس‌های آبگین Cd، شوری (تراکم Cl^-)، تراکم کل گوگرد احیا (ΣS_{red}) و pH محلول‌های گرمایی عوامل اصلی میزان جانشینی Cd در اسفالریت بحساب می‌آیند. زمین دماسنجی اسفالریت و گالن به ترتیب براساس نسبت‌های Ga/Ge و Sb/Bi گستره دمایی $170-220^\circ\text{C}$ و محاسبه $\log a_{\text{S}_2}$ از درصد مولی FeS، شرایط دما و سولفیدشدگی متوسط را برای ذخیره گرمایی چنگوره پیشنهاد می‌کند. با توجه به گستره دمای تشکیل و مقدار گوگرد نسبتاً پایین و تراکم میانگین Cd (5870 ppm) و نسبت میانگین ($165/4$) در اسفالریت‌های ذخیره چنگوره موقعیت آن در حدود ذخایر MVT و SedEx قرار داشته و شرایط ترمودینامیکی سیال آن با ذخایر گرمایی دما متوسط تا بالا همخوانی دارد.

مراجع

- on Economic Geology, University of Tabriz (2015), 90 p.
- [7] Nabavi M., "Preface to Iran Geology". Geological Survey & Mineral Explorations of Iran (GSI) (1976) 109 p.
- [8] Aghanabati E., "Geology of Iran". Geological Survey & Mineral Explorations of Iran (GSI) (2004) 586 p.
- [9] Nabi T., Mehrania S. R., Eslami H., "Study of lead mineralization in the Changureh region - Northwest of Takestan (Qazvin province)". The 19th Iranian Geological Society conference and the 9th National Geological Conference of Payame Noor University (2015).
- [10] Azizi B., Makizadeh M.A., "The origin of hydrothermal alteration using stable isotopes in the Takestan region (lower Tarom zone)". Journal of Economic Geology, 1 (2009) 115-101.
- [11] Alijani L., "Study of economic geology and genesis of Changureh polymetal with emphasis on Lead mineralization, Northwest of Takestan, Qazvin Province". M.s. thesis on Economic Geology, University of Tabriz (2015), 102 p.
- [12] Costagliola P., Di Benedetto F., Benvenuti M., Bernardini G.P., Cipriani C., Lattanzi P.F., Romanelli M., "Chemical speciation of Ag in galena by EPR spectroscopy". American Mineralogist 88 (2003) 1345-1350.
- [13] Renock D., Becker U., "A first principles study of coupled substitution in galena", Ore Geology Reviews 42 (2011) 71-83.
- [14] George L., Cook N. J., Ciobanu C. L., Wade B. P., "Trace and minor elements in galena: A reconnaissance LA-ICP-MS study". Am. Mineral. 100 (2015) 548-569.
- [15] Amcoff O., "The solubility of silver and antimony in galena". Neues Jahrbuch für Mineralogie Monatshefte 6 (1976) 247-261.
- [16] Atanassova R., Bonev I. K., "Two crystallographically different types of skeletal galena associated with colloform sphalerite", Mineral. Petrol 44 (2006) 1-18.
- [17] Barrie C. D., Boyce A. J., Boyle A., Williams P. C. K., Blake J. K., Wilkinson J. J., Lowther M., Mcdermott P., Prior D. J., "On the growth of colloform textures: a case study of sphalerite from the Galmoy ore body, Ireland", J. Geol. Soc. London 166 (2009) 563-582.
- [18] Zotov A.V., Kudri, A.V., Levin K.A., Shikina N.D., Varyash L.N., "Experimental studies of the solubility and complexing of selected ore elements (Au, Ag, Cu, Mo, As, Sb, Hg) in aqueous solutions", (1995) 95-132. In: Shmulovich K.I.,
- [1] Zamin Fanavaran Poya., "Preliminary Report on prospecting and exploration of Changureh Pb deposit in the North of Takestan" (2004), 125 p.
- [2] Scott S.D., "Chemical behaviour of sphalerite and arsenopyrite in hydrothermal and metamorphic environments", Mineral. Mag 47 (1983) 427-435.
- [3] Deer F. R. S., Howie R. A., Zussman J., "An introduction to the rock forming minerals", Longman Scientific & Technical, Seventeenth impression (1378) 528p.
- [4] Boyle R. W., Jambor J. L., "The geochemistry and geothermometry of sphalerite in the lead-zinc-silver lodes of the Keno Hill-Galena Hill area, Yukon", Can. Mineral 7 (1963) 479-496.
- [5] Viets J.G., Hopkins R.T., Miller B.M., "Variations in minor and trace elements in sphalerite from Mississippi Valley-Type deposits of the Ozark region: genetic implications", Economic Geology 87 (1992) 1897-1905.
- [6] Ehtesham Z., "Lithogeochemical and Economic Geology Analysis of the Haft Sandogh district, North of Takestan, Qazvin Province" M.s. thesis

- [31] Barnes H. L., "Geochemistry of hydrothermal ore deposits" (1997) John Wiley Sons.
- [32] Lusk J., Calder B.O.E., "The composition of Sphalerite and associated sulfides in reactions of the Cu-Fe-Zn-S, Fe-Zn-S and Cu-Fe-S systems at 1 bar and temperatures between 250 and 535°C", Chemical Geology 203 (2004) 319-345.
- [33] Scott S.D., Barnes H., "Sphalerite geothermometry and geobarometry". Econ Geol 66 (1971) 653-669.
- [34] Einaudi, M.T., Hedenquist, J.W., and Inan E.E., 2003. Sulfidation State of Fluids in Active and Extinct Hydrothermal Systems: transitions from Porphyry to Epithermal Environments. Society of Economic Geologists, Special Publication 10, 285-313.
- [35] John D.A., Garside L.J., Wallace A.R., "Magmatic and tectonic setting of Late Cenozoic epithermal gold-silver deposits in northern Nevada, with an emphasis on the Pah Pah and Virginia Ranges and the Northern Nevada Rift" Geological Society of Nevada Special Publication 29 (1999) 64-158.
- [36] Wen H., Zhu C., Zhang Y., Cloquet C., Fan H., Fu S., "Zn/Cd ratios and cadmium isotope evidence for the classification of lead-zinc deposits", Sci. Rep., (2016), doi:10.1038/srep25273.
- [37] Schmitt A. D., Galer S. J. G., Abouchami W., "High-precision cadmium stable isotope measurements by double spike thermal ionization mass spectrometry". J. Anal. Atom. Spectrom 24 (2009) 1079-1088.
- [38] Sverjensky D. A., Shock E. L., Helgeson H. C., "Prediction of the thermodynamic properties of aqueous metal complexes to 1000 °C and 5 kbar" Geochim Cosmochim Acta 61 (1997) 1359-1412.
- [39] Bazarkina E. F., Pokrovski G. S., Zotov A. V., Hazemann, J.L., "Structure and stability of cadmium chloride complexes in hydrothermal fluids" Chem. Geol. 276 (2010) 1-17.
- [40] Tagirov B. R., Seward T. M., "Hydrosulfide/sulfide complexes of zinc to 250 °C and the thermodynamic properties of sphalerite" Chem. Geol. 269 (2010) 301-311.
- Yardley B.W.D., Gonchar G.G., (eds.), Fluids in the Crust: Equilibrium and transport properties, Chapman and Hall, London, 323 p.
- [19] Acero P., Cama J., Ayora C., "Rate law for galena dissolution in acidic environment", Chem Geol 245 (2007), 219-229.
- [20] Szczerba M., Sawlowicz Z., "Remarks on the origin of cerussite in the Upper Silesian Zn-Pb deposits, Poland", Mineralogia 40 (2009) 53-64.
- [21] Forghani Tehrani G., Gheshlaghi A., "Mining wastes: specification, purification and environmental impacts", Shahrood University of Technology (2016), 600 p.
- [22] Whitney, D. L., & Evans, B. W. (2010). Abbreviations for names of rock-forming mineral. American mineralogist, 95(1), 185.
- [23] Moller P., "Development and application of the Ga/Ge-Geothermometer for sphalerite from sediment hosted deposits", In Germann K. (ed.), Geochemical aspects for Ore Formation in Recent and Fossil Sedimentary Environments", (1985) 15-30.
- [24] Geletii V.F., Chernishev L.V., Pastushkova T.M., "Distribution of cadmium and manganese between galena and sphalerite", Geologiya Rudnykh Mestoozhdenii 21 (1979) 66-75.
- [25] Wu Y., Hagni R.D., Paarlberg N., "Silver distribution in iron sulphides at the Buick and Brushy Creek Mines, Viburnum Trend, southeast Missouri", Society of Economic Geologists 4 (1996) 577-587.
- [26] Cook N. J., Ciobanu C. L., Pring A., Skinner W., Shimizu M., Danyushevsky L., Saini-Eidukat B., Melcher F., "Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study" Geochim. Cosmochim. Acta 73 (2009) 4761-4791.
- [27] Ye L., Cook N. J., Ciobanu C. L., Liu Y. P., Zhang Q., Gao W., Yang Y. L., Danyushevsky L. V., "Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: a LA-ICPMS study" Ore Geol. Rev 39 (2011) 188-217.
- [28] Marques de Sá, C., Noronha F., "Ga/Ge in Sphalerite Geothermometer - Application to Braçal Deposit", Comunicações Geológicas 99 (2012) 5-10.
- [29] Song X., "Minor Elements and Ore Genesis of the Fankou Lead-Zinc deposit, China" Mineralium Deposita 19 (1984) 95-104.
- [30] Monterio et al., 2005. Geology, "petrography, and mineral chemistry of the Vazante no sulfide and Ambrosia and Fagundes sulfide-rich carbonate-hosted Zn-(Pb) deposits, Minas Gerais", Brazil. Ore Geology Reviews, 34 p.