

اختلاط سیال و کانه‌زایی روی و سرب در کانسار کوشک، ایران مرکزی؛ شواهدی از میانبارهای سیال

محمد مهدی زند^۱، غلامرضا میرزابابائی^{۲*} و محمد لطفی^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، واحد زمین‌شناسی و اکتشافات، مجتمع معدنی کوشک

۲. دانش‌آموخته دکترای زمین‌شناسی اقتصادی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید

بهشتی تهران

۳. دانشیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰

چکیده

کانسار سولفیدی روی و سرب کوشک در بلوک پشت بادام در کمربند نکتونوماگمایی ایران مرکزی قرار دارد. سنگ میزبان کانسار شامل شیل، ماسه‌سنگ و دولومیت می‌باشد. به منظور بررسی شرایط فیزیکوشیمیایی حاکم بر تشکیل کانسنگ سولفیدی، تعدادی از میانبارهای سیال از ریزلایه‌های سیلیسی که هم‌روند با سنگ میزبان کانسار به‌ویژه از کمربندی تا افق اصلی ماده معدنی هستند، مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش خصوصیات کلی میانبارهای سیال در سامانه کانه‌زا و تفسیر داده‌های مزبور از نظر فرایندهای تکامل سیال مورد بررسی قرار گرفت. نظر به تشکیل سینزنتیک ریزلایه‌های سیلیسی و لایه‌های شیلی کانه‌زایی شده، می‌توان شرایط تشکیل مشابهی را برای تشکیل ریزلایه‌های سیلیسی و کانسنگ سولفیدی در نظر گرفت. براساس نتایج به‌دست‌آمده، دو نوع سیال با خصوصیات فیزیکوشیمیایی متفاوت در تشکیل ریزلایه‌های سیلیسی نقش داشته است. یک سیال با شوری زیاد (متوسط ۳۸/۸ درصد وزنی معادل نمک طعام) و حامل کمپلکس‌های کلریدی فلزات و دیگری سیال با شوری کمتر (متوسط ۴/۴۶ درصد وزنی معادل نمک طعام) است که به‌عنوان حامل گونه‌های سولفیدی در نظر گرفته می‌شود. بخشی از سولفید در این نوع سیال می‌توانسته حاصل فعالیت باکتری‌ها باشد. اختلاط هم‌دمایی دو سیال به ترتیب منجر به ناپایداری کمپلکس‌های کلریدی فلزات کالکوفیل، واکنش این فلزات با گوگرد موجود در سیال با شوری پایین و تشکیل کانسنگ سولفیدی شده است.

واژه‌های کلیدی: اختلاط هم‌دمایی، ریزلایه‌های سیلیسی، کانسار کوشک، کانسنگ سولفیدی، میانبارهای سیال.

مقدمه

نماینده خصوصیات شیمیایی محلول‌های با منشأهای یکسان یا مختلف می‌باشند و یا به‌طور غیرمستقیم اطلاعاتی از شرایط فیزیکوشیمیایی محیط تشکیل سنگ و کانسنگ ارائه می‌دهند. نخستین بار (Sorby (1858)، نمونه‌هایی از

میانبارهای سیال، ثبت پیوسته یا گسسته‌ای از فرایندهای مؤثر در تشکیل کانی‌ها، در زمان تشکیل سنگ‌ها، در اختیار می‌گذارند. این سیالات یا به‌طور مستقیم

* نویسنده مرتبط: G_mirzababaei@sbu.ac.ir

به‌صورت چرت) در بخش لایه‌ای کانسنگ سولفیدی از رخدادهایی است که در موارد چندی در کانسارهای روی و سرب تیپ سدکس گزارش شده است (Emsbo et al., 2016). در مورد نحوه کانه‌زایی در کانسار روی و سرب کوشک، چندین کار تحقیقاتی صورت گرفته است. Rajabi et al (2020)، بر مبنای زمین‌شناسی کانسار، رخساره‌های کانسنگ و داده‌های ایزوتوپی پایدار گوگرد، منشأ کانه‌زایی در کانسار کوشک را خروج سیال گرمایی به داخل حوضه دریایی کم‌عمق متأثر از گسلش هم‌زمان با رسوب‌گذاری در نظر گرفته است. با این حال این پژوهش‌ها، فاقد شواهد میانبارهای سیال به‌عنوان یکی از داده‌های معتبر در زمین‌شناسی حداقل به‌عنوان یک شاهد تکمیلی در کنار سایر شواهد موجود (از جمله ایزوتوپی و ژئوشیمیایی) برای انتساب فرایندی خاص در کانه‌زایی روی و سرب در کانسار کوشک می‌باشند. در این پژوهش تعدادی از میانبارهای سیال به‌عنوان یک ابزار علمی با هدف بررسی فرایند(های) مؤثر در کانه‌زایی در این کانسار مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این نوشتار همچنین مشتمل بر بررسی میزان آمیختگی سیالات با منشأهای مختلف، درجه شوری و دمای همگن‌شدگی سیالاتی است که در کانه‌زایی روی و سرب در کانسار کوشک مؤثر بوده‌اند. شواهد مذکور در میانبارهای سیال به‌خوبی حفظ شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

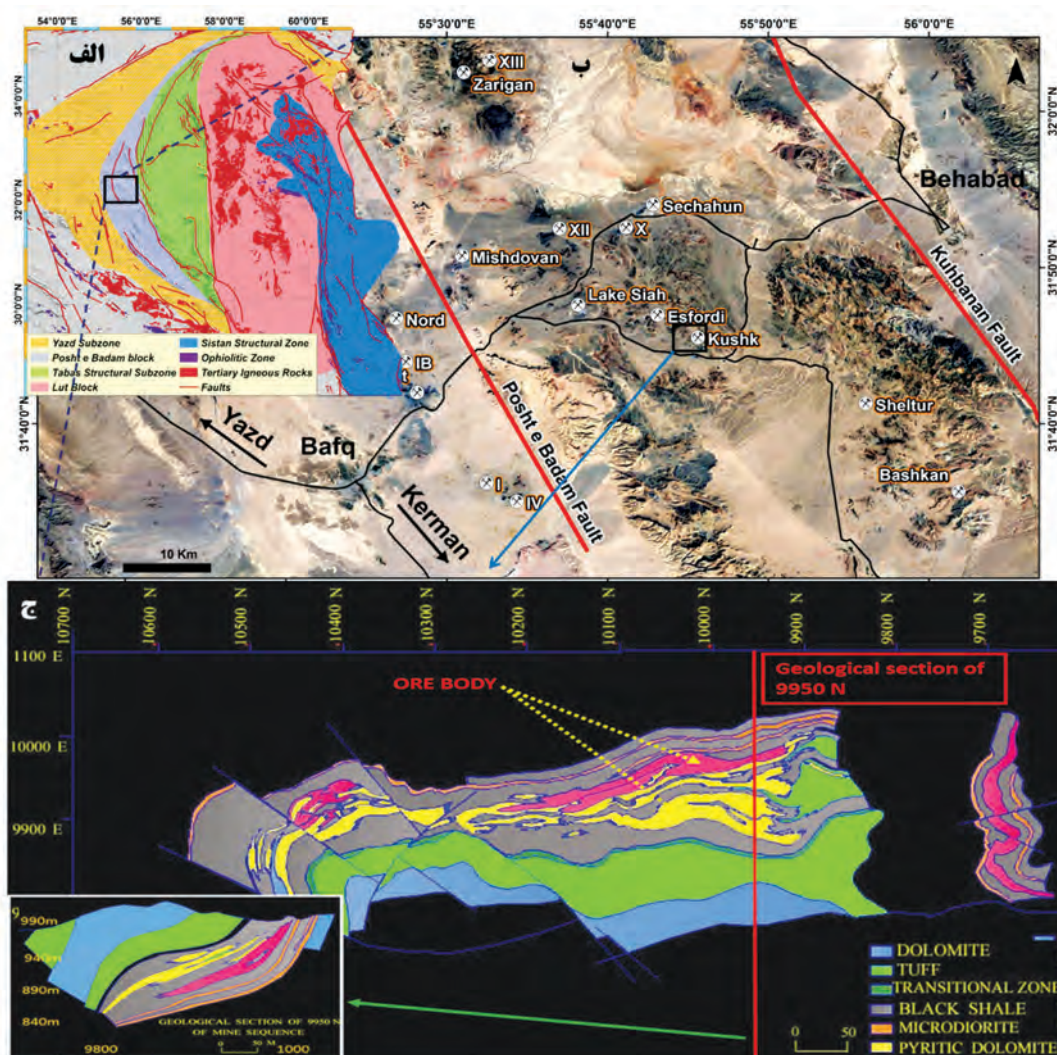
روش مطالعه

در پژوهش حاضر پس از بررسی زمین‌شناسی منطقه‌ای، زمین‌شناسی محلی و سنگ میزبان کانسار روی و سرب کوشک، به‌منظور بررسی ماهیت فیزیکی‌وشیمیایی سیالات کانه‌ساز در کانسار کوشک، بررسی میانبارهای سیال در این کانسار انجام گرفت. انتخاب نمونه‌ها در این بخش از مطالعه، از ریزلایه‌های سیلیسی صورت گرفت و از نمونه‌ها، مقاطع دو بر صیقلی تهیه شد. مطالعات پتروگرافی میانبارها با بزرگنمایی‌های ۵۰۰، ۶۲۵، ۸۰۰ و ۱۲۵۰ و اندازه‌گیری پارامترهای دمایی این میانبارها در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران انجام شد.

کانسارهای مختلف حاوی میانبارهای سیال را توصیف کرد و نتایجی را در زمینه شرایط تشکیل کانسنگ ارائه داد که برای سالیان متمادی مورد توجه جامعه علمی آن زمان قرار نگرفت. با این حال امروزه پژوهش در زمینه میانبارهای سیال به‌عنوان یکی از کلیدهای تحقیقاتی در بازسازی شرایط فیزیکی‌وشیمیایی محیط تشکیل کانسنگ به‌طور گسترده‌ای صورت می‌گیرد (Zhong et al., 2017; Diersch, 2014; Wilkinson, 2001; Roedder and Bondar, 1997; Lattanzi, 1991; Spooner, 1981). با این حال، کاربرد میانبارهای سیال از دیدگاه زمین‌شناسی اقتصادی بسیار حائز اهمیت است زیرا به‌عنوان یکی از ابزارهای بسیار کارآمد در اکتشاف سامانه‌های کانه‌زا بشمار می‌رود. به‌عنوان مثال، حضور میانبارهای CO₂ دار به‌عنوان یکی از شاخصه‌های بارز برای اکتشاف کانسارهای طلای رگه‌ای پیشنهاد شده است (Ho, 1987). کارهای متعددی در شناسایی منشأ سیال عامل کانه‌زایی و تیپ کانه‌زایی از کاربرد درجه همگن‌شدگی فازهای مایع و گاز و نیز میزان شوری صورت گرفته است (فخری‌دودویی و علی‌پوراصل، ۱۳۹۹؛ نیرومند و دیگران، ۱۳۹۹؛ قاسمی‌سیانی و عیسی‌آبادی، ۱۳۹۹). در هر صورت قابلیت منحصر به فرد میانبارهای سیال این امکان را به وجود می‌آورد تا با دستیابی به شرایط فیزیکی‌وشیمیایی تشکیل کانی میزبان میانبار سیال حتی اگر میزبان کانه‌زایی به‌صورت مستقیم نباشد، بتوان شرایط قابل استنباطی را برای کانه‌زایی همراه با آن متصور بود. در این صورت چنانچه میانبار سیال از کانی‌های منفرد انتخاب شود، شرایط پارژنتیکی آن با کانه‌های اقتصادی به‌عنوان یکی از اصول اولیه مد نظر می‌باشد و چنانچه در محیط رسوب‌گذاری میانبار از ریزلایه انتخاب شود، پیوستگی در رسوب‌گذاری از مبنای اساسی در پذیرش تناسب شرایط فیزیکی‌وشیمیایی محیط میزبان با کانی میزبان میانبار سیال بشمار می‌رود. در این پژوهش به بررسی شرایط مزبور در تعدادی از میانبارهای سیال برگرفته از ریزلایه‌های سیلیسی در کانسار روی و سرب کوشک پرداخته شده است. گفتنی است که حضور و تداوم ریزلایه‌های سیلیسی (بعضی

زمین شناسی منطقه‌ای

کانسار کوشک در خرده قاره ایران مرکزی و در بلوک پشت بادام قرار دارد (شکل ۱-الف). این بلوک در زمین شناسی ایران به عنوان میزبان بخشی از سرزمین‌های پرکامبرین پسین و اینفراکامبرین شناخته شده است. براساس بررسی‌های (Samani 1988) اینفراکامبرین در ایران با سیمای مختلفی رخنمون دارد. در ایران مرکزی شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی است که گسترش زیادی از پشت بادام تا زرنند دارد و میزبان مهم‌ترین غربی می‌باشند (شکل ۱-ج).



شکل ۱. الف) موقعیت زمین‌ساختی کانسار کوشک در منطقه ایران مرکزی (آقاناتی، ۱۳۸۵)، ب) موقعیت کانسار کوشک در بین کانسارهای منطقه ایران مرکزی و راه‌های ارتباطی و دسترسی به این کانسار، ج) طرح اصلی زمین‌شناسی کانسار کوشک از کمربالای کانسنگ روی و سرب

زمین‌شناسی ناحیه‌ای و سنگ میزبان کانسار کوشک

کمر پایین کانسار کوشک با سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب ریولیت آغاز می‌شود و روی آن‌ها آهک‌های دولومیتی قرار می‌گیرد که به طرف بالا، به آهک ماسه‌ای و شیل دولومیتی و در نهایت به شیل‌های سیاه آلی تبدیل می‌شوند. درون این شیل‌ها، سیل‌های نازکی از میکرودیوریت وجود دارد که نشان‌دهنده سن کمتر سیل نسبت به رسوبات می‌باشد. میزان پیریت در شیل‌ها به سمت بالا به تدریج افزایش می‌یابد، تا اینکه تبدیل به شیل پیریتی (حاوی لایه‌های نازک پیریت) و پیریت توده‌ای می‌شود. بعد از واحد پیریتی، افق معدنی میزبان سولفیدهای روی، آهن، سرب و کادمیوم، قرار دارد. به سمت بالا به تدریج از میزان پیریت نیز کاسته می‌شود، تا اینکه دوباره به شیل نابارور می‌رسد. روی این شیل‌ها، یک توالی کربناتی با ترکیب آهک و دولومیت قرار می‌گیرد. توالی سنگی که کانسار کوشک در آن تشکیل شده است، اغلب شامل واحدهای رسوبی ریزدانه از جمله شیل و سیلت‌سنگ می‌باشد. براساس بررسی‌های صورت گرفته و مشاهدات میدانی، کانسار کوشک از نوع کانسارهای سدکس^۱ می‌باشد. کانسارهای سدکس شامل سامانه‌های کانه‌زایی هستند که اغلب در سنگ میزبان شیلی تشکیل می‌شوند و مبین محیط عمیق دریایی می‌باشند. این کانسارها از نوع همزاد^۲ هستند و واجد برخی از خصوصیات کانسارهای نوع ایرلندی می‌باشند. دو نوع کانسار سدکس از نظر محیط زمین‌ساختی مشاهده شده است یکی نوع حاشیه قاره‌ای که از نظر کانه‌زایی باریت (با توالی چینه‌ای چرت)، شناخته شده است و دیگری نوع ریفتی که با کانه‌زایی روی-سرب-باریت همراه است و در ریفت‌های کراتونی مشاهده می‌شود و توالی چینه‌شناختی آن اغلب شامل توربیدایت، شیل و ماسه‌سنگ می‌باشد (آفتابی، ۱۳۷۸). بدیهی است که کانسار کوشک از نوع دوم می‌باشد که با شیل، سیلت‌سنگ و کمتر ماسه‌سنگ همراه است. از خصوصیات بارز کانسارهای نوع سدکس، همزادی کانه‌زایی با توالی چینه‌ای است که متأثر از ساختارهای گسلی تغذیه‌کننده هستند.

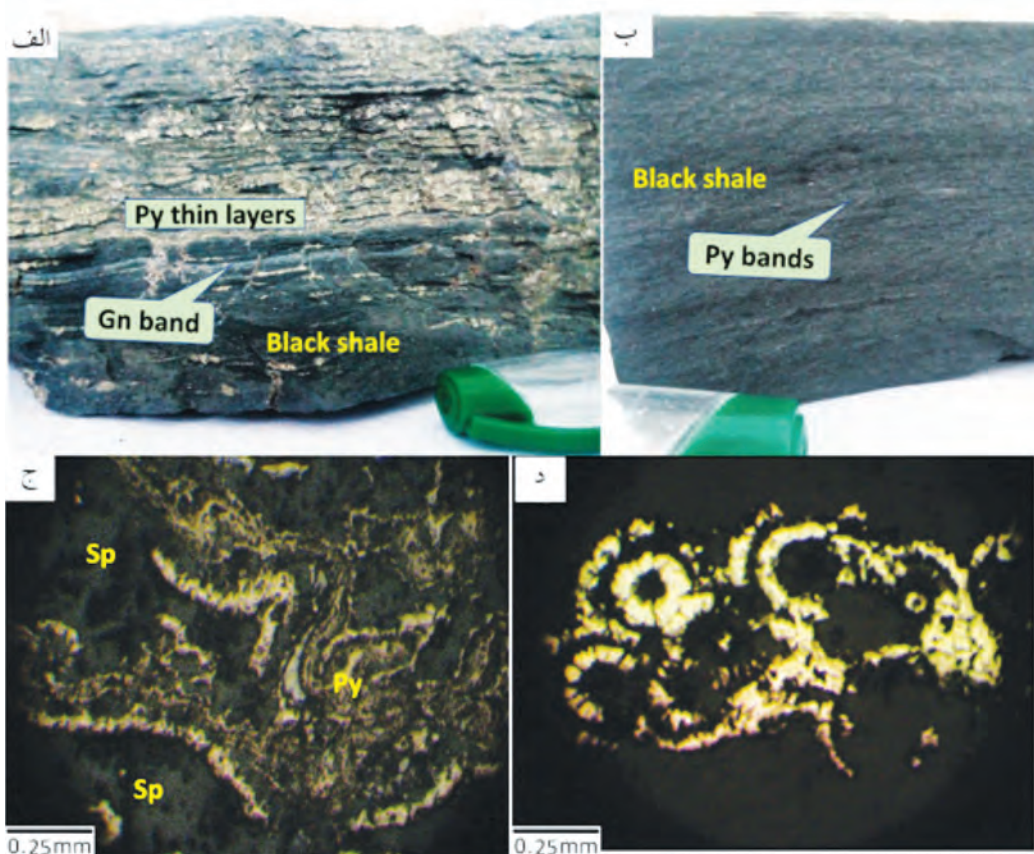
کانی‌شناسی کانسنگ روی و سرب کوشک

کانی‌های بارز در کانسار کوشک را می‌توان به مجموعه‌های کربناتی (کلسیت، دولومیت، آنکریت، کوتناهوریت و غیره)، اکسیدها (هماتیت، مگنتیت، اکسیدهای سرب و روی)، سیلیکات‌ها (کوارتز، همی‌مورفیت)، فسفات‌ها (واریسکایت و پیرومورفیت) و به ویژه سولفیدها تقسیم‌بندی کرد. کانسنگ سولفیدی به‌عنوان مهم‌ترین میزبان کانی‌های اقتصادی در کانسار کوشک بشمار می‌رود. کانی‌های سولفیدی اصلی به ترتیب فراوانی شامل پیریت، اسفالریت و گالن می‌باشد. یکی از ویژگی‌های کانسارهای رسوبی روی و سرب، وجود چندین نسل پیریت است که به‌طور عمده شامل پیریت کلوفر، پیریت فرامبوئیدال و پیریت بلورین می‌باشد که در مراحل ابتدایی تشکیل کانسار، ایجاد شده‌اند. در این سیستم‌ها، سولفیدهای روی، سرب و گاهی کادمیم جانشین هر سه نسل پیریت می‌شوند. در بسیاری از موارد پیریت علاوه بر رخداد به‌صورت لایه‌ای و بلورین (شکل ۲-الف و ب)، با بافت کلوفر و فرامبوئیدال دیده می‌شود که در داخل آنها حفره‌هایی دیده می‌شود (شکل ۲-ج). به این فرم از پیریت ملنیکویت (یا گریجیت) نیز می‌گویند که به‌طور اولیه به‌صورت کلوفر و ژل می‌باشد. صورت دیگر رخداد پیریت در کانسار کوشک به‌صورت بافت فرامبوئیدال یا تمشکی است و عبارت از اجتماعات کمابیش گلوله‌ای، از ریزبلورهای منظم یا غیرمنظم پیریت با قطر اغلب کمتر از ۲۰ میکرون است (شکل ۲-د). تشکیل پیریت فرامبوئیدی در رسوبات کم‌عمق به آغشتگی سولفید هیدروژن و در اعماق زیاد نسبت داده شده است (Kozina et al., 2018). همچنین Popa et al (2003)، یک منشأ زیست‌زادی را برای پیریت فرامبوئیدی پیشنهاد کرده‌اند.

اسفالریت از نظر فراوانی پس از پیریت قرار می‌گیرد و کانه اصلی اقتصادی کانسار می‌باشد. در کانسنگ کوشک دو نوع اسفالریت قابل مشاهده است: (۱) اسفالریت روشن (قهوه‌ای تا زرد رنگ) و (۲) اسفالریت تیره (خاکستری تا دودی)، نوع اول دارای مقادیر پایین‌تری از آهن می‌باشد و در

1. Sedimentary exhalative deposits

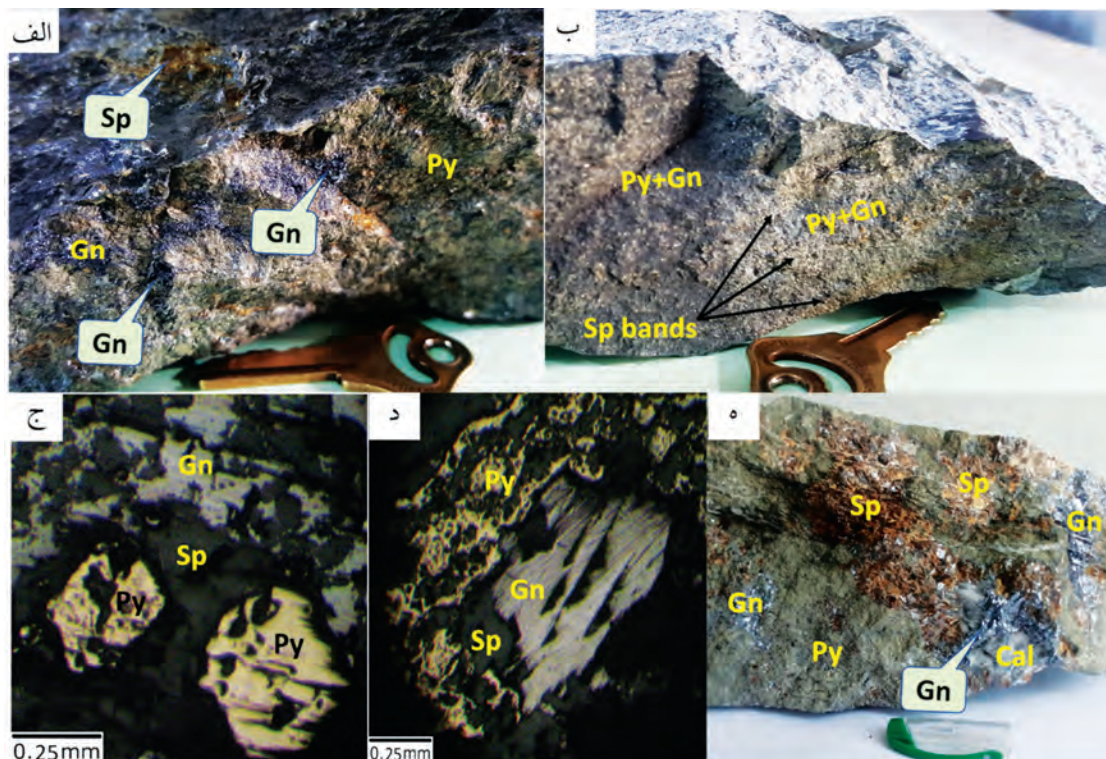
2. Syngenetic



شکل ۲. الف) رخداد ریزلایه‌های پیریت و باند گالن در سنگ میزبان شیل سیاه، ب) باندهای پیریت بسیار ریز در سنگ میزبان شیل سیاه، ج) تناوب ژل سولفیدی و رشته‌های کلوفرم پیریت در زمینه‌ای از اسفالریت، د) اجتماعات پیریت تمشکی (نشانه‌های اختصاری: Py: پیریت؛ Sp: اسفالریت؛ Gn: گالن) (نشانه‌های اختصاری از Whitney and Evans, 2010)

متن اسفالریت و گالن مشاهده می‌شوند (شکل ۳-ج) و در مواردی نیز آثار پیریت با بافت آتول مشاهده می‌شود که با فازهای جوان‌تر اسفالریت و گالن جانشین شده است (شکل ۳-د). بافت آتول عبارت از لایه‌های حلقوی سولفیدهای فلزی و گانگ می‌باشند، که یک هسته مرکزی را احاطه کرده‌اند. رخداد جوان‌تری نیز از اسفالریت در این کانسار مشاهده می‌شود که به‌وضوح به‌صورت اپیژنتیک است و در برخی از شکستگی‌ها و رگه‌های کربناتی مشاهده می‌شود (شکل ۳-ه). به‌طور کلی گالن بعد از اسفالریت و در درجه دوم از نظر اقتصادی قرار دارد و میزان آن کمتر از اسفالریت است. مقدار این کانی در بخشی از کانسار که ضخامت ماده معدنی زیاد است نسبت به بخش‌های دیگر کانسار بیشتر است و به سمت حاشیه و با کاهش ضخامت ماده معدنی، نسبت سرب به روی کاهش می‌یابد.

دمای پایین‌تری تشکیل می‌شود. با افزایش دما، میزان آهن بیشتری جانشین روی در اسفالریت می‌شود و رنگ اسفالریت را تیره‌تر می‌نماید. فراوانی نسبی اسفالریت در کانسار کوشک بیانگر درجه حرارت پایین تشکیل کانسار است (آدراین، ۱۳۸۲). لازم به ذکر است که اسفالریت نوع اول در ارتباط با بخش کمربالای ماده معدنی یا بخش کانه‌زایی دوم در کانسار کوشک همراه با کانی پیریت و در داخل دولومیت‌هایی با مقادیر بالای پیریت نهشته شده‌اند که به‌صورت بلورهای درشت‌تر مشخص می‌باشند (شکل ۳-الف). اسفالریت‌های نوع دوم در داخل سنگ میزبان شیلی یا شیل‌های کربن‌دار تشکیل شده‌اند و به‌طور کلی در بخش کانه‌زایی کم‌پایین در کانسار کوشک قرار دارند (زند، ۱۳۹۲) (شکل ۳-ب). براساس بررسی‌های میکروسکوپ نور انعکاسی، در بسیاری از موارد و در بخشی از کانسنگ پر عیار، دانه‌های پیریت در

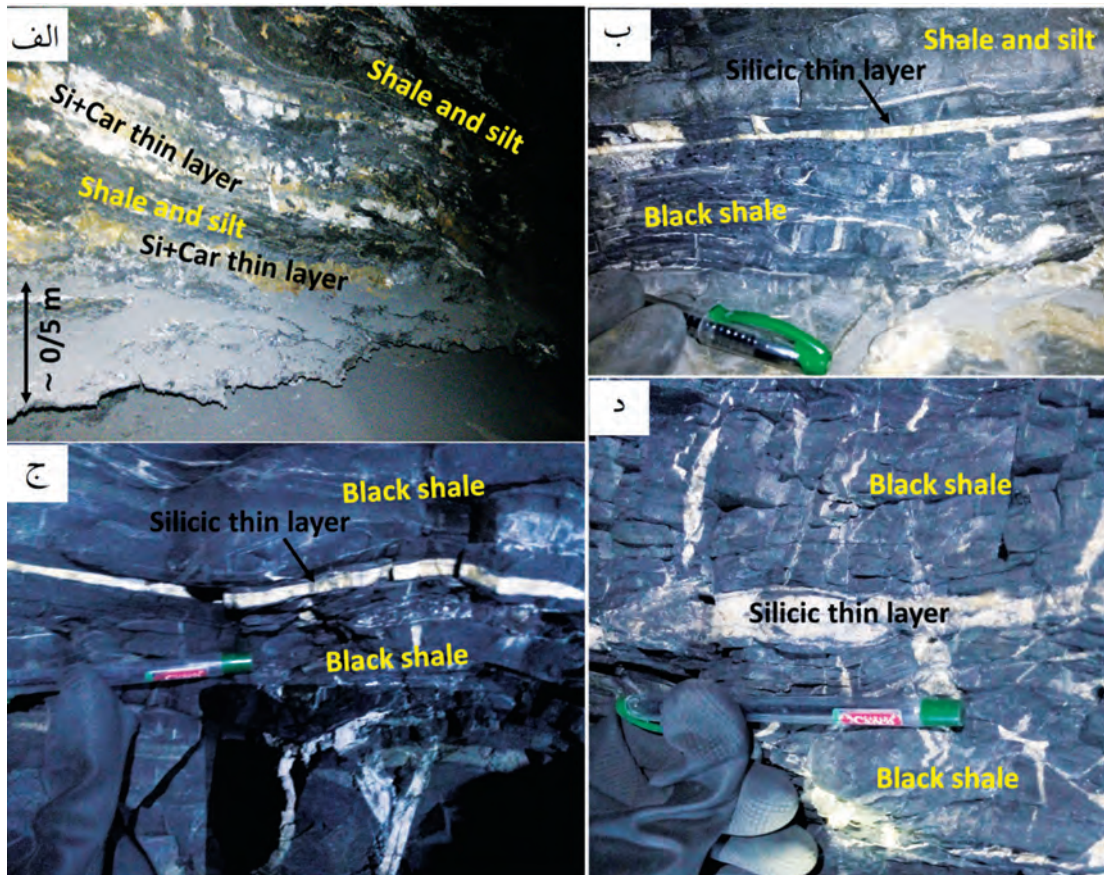


شکل ۳. الف) رخداد هم‌زمان اسفالریت، گالن و پیریت که اغلب در بخش توده‌ای کانسنگ مشاهده می‌شود، ب) باندهای اسفالریت در بخشی از کانسنگ لایه‌ای که به‌طور متناوب با لایه‌های ضخیم‌تر پیریت و با رخداد کم‌اهمیت‌تر گالن تشکیل شده است، ج) دانه‌های منفرد پیریت در میزبان اسفالریت و گالن، د) رخداد گالن و اسفالریت که میزبان پیریت در بافت آتول شده‌اند، ه) رخداد رگه‌های اسفالریت و گالن و فاز کربناتی (کلسیت) در میزبان پیریت (شیل به‌شدت پیریتی) (نشانه‌های اختصاری: Py: پیریت؛ Sp: اسفالریت؛ Gn: گالن؛ Ca: کلسیت) (نشانه‌های اختصاری از Whitney and Evans, 2010)

ریز لایه‌های سیلیسی و انتخاب نمونه‌ها

حالت چرتی نشان می‌دهند که در کانسارهای تیپ سدکس، پدیده‌ای معمول است. در برخی از لایه‌های سیلیسی حضور کربنات نیز مشهود است که اغلب جوان‌تر از فاز سیلیسی است (شکل ۴-الف). در بعضی موارد حضور ریز لایه‌های سیلیسی در سنگ میزبان شیل سیاه و سیلت به‌ویژه در بخش‌هایی از کانسار که هم ضخامت ماده معدنی و هم عیار بالاست نیز از پدیده‌های محسوس بشمار می‌رود (شکل ۴-ب) اگرچه در برخی از موارد نیز در شیل‌های سیاه زیر افق‌های معدنی نیز مشاهده می‌شود (شکل ۴-ج). در برخی از نقاط علاوه بر لایه‌ای بودن شواهد دیگری نیز دال بر تشکیل سینزنتیک لایه‌های سیلیسی و شیل میزبان کانسنگ به چشم می‌خورد (شکل ۴-د).

علاوه بر کانسنگ روی و سرب که در سنگ میزبان شیل تشکیل شده است، ریز لایه‌هایی از سیلیس نیز در سنگ میزبان شیل دیده می‌شود که به‌طور کامل هم‌روند با لایه‌های کانسنگ است و دارای امتداد و گسترش فراوانی در معدن زیرزمینی کانسار می‌باشند. ضخامت ریز لایه‌های سیلیسی از کمتر از یک سانتی‌متر تا بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر (و در مواردی نیز بسیار بیشتر) متغیر است. این ریز لایه‌ها به‌ویژه از کمربلایین ماده معدنی شروع شده و تا افق‌های میانی کانسنگ مشاهده می‌شوند. باین حال رخداد آنها در کمربلای ماده معدنی کمتر مشهود است اگرچه رگه‌ها و رگچه‌های سیلیسی در این بخش از کانسار نیز حضور دارند. برخی از افق‌های شیلی در بخش اصلی کانسنگ، شیل کربناتی هستند و در بخش‌هایی نیز لایه‌های سیلیسی



شکل ۴. الف) حضور لایه سیلیسی (و کربناتی) در سنگ میزبان شیل، ب) حضور ریزلایه سیلیسی در بخش پرعبار کانسنگ، ج) حضور ریزلایه سیلیسی در سنگ میزبان شیل‌های سیاه زیر افق‌های معدنی، د) حضور لایه سیلیسی در سنگ میزبان شیل با آثار نفوذ سیلیس در شیل زیر لایه و عدم نفوذ آن در لایه فوقانی

دو بر صیقل از لایه‌های سیلیسی که هم‌رند با لایه‌بندی و دارای روابط پارائنتیک با فاز اصلی کانه‌زایی سولفیدی می‌باشند، تهیه شده است. سیلیس به‌صورت نازک لایه و هم‌رند با لایه‌های شیلی در درون توالی کانه‌دار حضور چشمگیری دارد (شکل ۵). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که منشأ لایه‌های سیلیسی و منشأ ماده معدنی، از نزدیکی قابل توجهی برخوردار است. گفتنی است که زایش سیلیس در کانسار کوشک به دو صورت غالب دیده می‌شود؛ یکی نازک لایه‌های سیلیس که به‌صورت هم‌زاد با لایه‌های شیلی و بین این لایه‌ها تشکیل شده‌اند و دیگری رگه‌های سیلیس که در برخی از موارد پس از تشکیل کانسنگ، تزریق شده و به‌وضوح جوان‌تر از لایه‌های شیلی و کانه‌زایی روی و سرب می‌باشند.

رخساره‌های دیستال به سمت حاشیه در این کانسارها به‌طور معمول شیل‌های سیاه غنی از سولفید و مواد آلی، چرت و شیل می‌باشند (Emsbo et al., 2016). اگرچه غنی‌شدگی از کوارتز در کانسنگ‌های چینه‌سان به‌صورت چرت و شیل‌های سیلیسی معمول هستند اما ارتباط پدیده‌های مؤثر در تشکیل کوارتز و سامانه‌های کانه‌زا به‌طور معمول دارای ابهام است (Leach et al., 2005)؛ با این حال این مسئله را نباید از نظر دور داشت که تشکیل سینترتیک کانسنگ و هر لایه دیگری در یک سنگ میزبان نیازمند تأمین سیال یا عوامل زمین‌شناختی دیگری با منشأ یکسان می‌باشد. به‌منظور شناخت ماهیت فیزیکوشیمیایی سیالات کانه‌ساز و بررسی روند تغییرات شیمیایی-دمایی این سیالات در زمان تشکیل کانسار کوشک، در مجموع هفت مقطع

روش و ابزارهای آزمایشگاهی

Heating: Cesium nitrate, melting point: +414°C

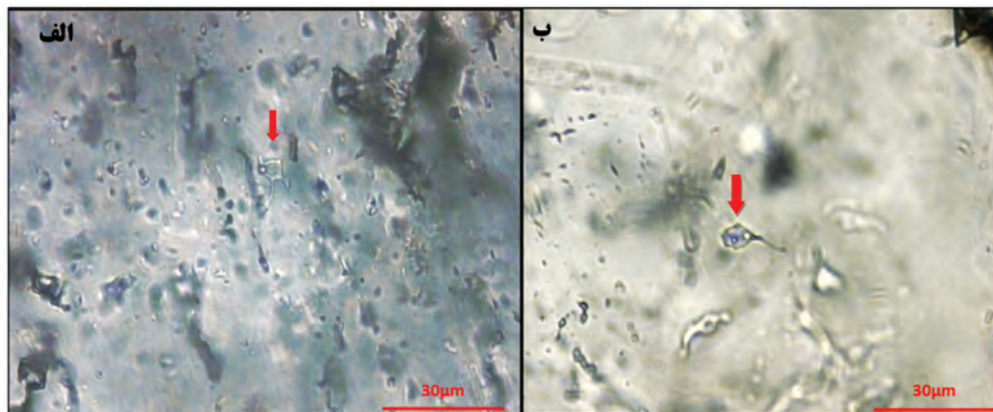
Freezing: n-Hexane, melting point: -94.3°C

بررسی میکروسکوپی و پتروگرافی میانبارهای سیال

در مطالعه پتروگرافی، مشخصات نوری از قبیل شکل و اندازه میانبارهای سیال، رده‌بندی ژنتیکی (اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب)، محتویات میانبارهای سیال (L+V+S) و نسبت V/L و نوع کانی‌های نوزاد (با توجه به شکل بلورین و ریخت‌شناسی ظاهری)، مورد بررسی قرار گرفت. در برخی از موارد، وجود پدیده‌هایی مانند باریک‌شدگی^۳ (شکل ۵-الف) و نشت^۴ یا تراوش (شکل ۵-ب) منجر به ایجاد عدم اعتماد به داده‌ها و نتایج میانبارهای سیال شده بنابراین از بررسی این نوع از میانبارها در حرارت‌سنجی صرف‌نظر شده است.

بررسی‌های میکروسکوپی بر روی میانبارهای سیال در نمونه‌های دوبرصیقل^۱ انجام شد. اندازه‌گیری پارامترهای دمایی در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران به کمک استیج (Stage: THMS600) گرم‌کننده و منجمدکننده با مدل Linkam که بر روی میکروسکوپ Zeiss نصب شده است، صورت گرفت. دامنه حرارتی دستگاه ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد است؛ همچنین این دستگاه مجهز به دو کنترل‌گر، گرمایش و سرمایش (LNP^۲)، مخزن ازل (برای انجماد) و مخزن آب (برای خنک کردن دستگاه در دمای بالا) است. برای کالیبراسیون دستگاه از استانداردهای زیر استفاده گردید (کالیبراسیون دستگاه با تلورانس):

Heating : ±0.6, Freezing: ±0.2



شکل ۵. پدیده الف) باریک‌شدگی، ب) نشت در برخی از میانبارهای سیال از کانسار کوشک

ریزدماسنجی^۵ از میانبارهای اولیه استفاده شده است زیرا میانبارهای ثانویه، نماینده‌ی سیالات پسین بوده که همواره بی‌ارتباط با رشد اولیه هستند. به‌طور کلی میانبارهای سیال دو تا ۲۰ میکرون قطر دارند (Shepherd et al., 1985). اندازه میانبارهای سیال مورد بررسی، از ۵ تا ۲۴ میکرون متغیر است اگرچه میانبارهای بزرگ‌تری نیز مشاهده شد که به علت پدیده باریک‌شدگی مورد بررسی قرار نگرفتند.

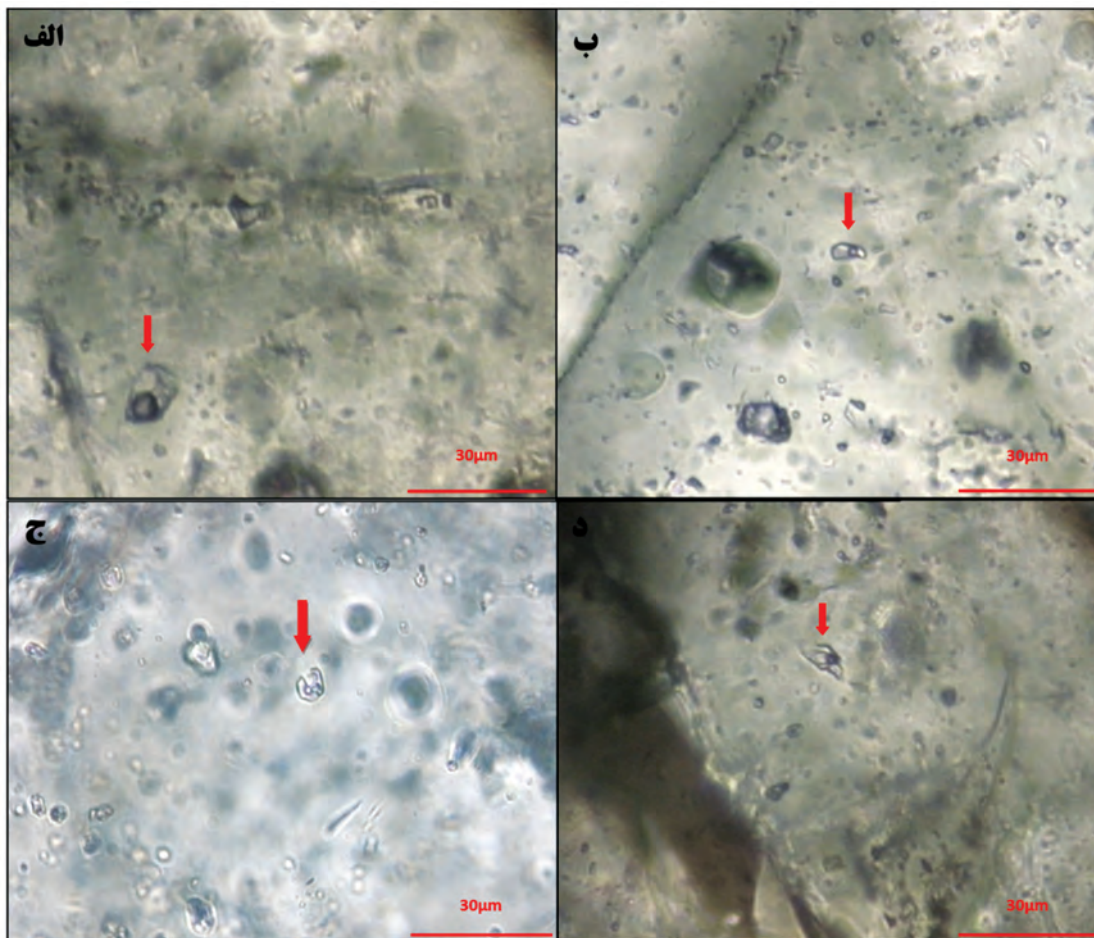
1. Double polished thin section
2. Liquid nanoparticle production
3. Necking down
4. Leakage
5. Microthermometry

تقسیم‌بندی میانبارهای سیال بر اساس شکل و تنوع فاز

از نظر شکل ظاهری، میانبارهای سیال در نمونه‌های انتخابی از ریزلایه‌های سیلیسی در کانسار کوشک را می‌توان به ترتیب فراوانی به‌صورت زیر تقسیم‌بندی کرد:

- ۱- میانبارهای سیال با اشکال منظم (شکل ۶-الف)؛
- ۲- شکل‌های کشیده و باریک (شکل ۶-ب)؛
- ۳- شکل‌های کروی و نامنظم (شکل ۶-ج و د).

توزیع میانبارهای سیال (به‌ویژه میانبارهای ریز و از نوع ثانویه) در نمونه‌ها فراوان بوده و برای مطالعات



شکل ۶. شکل‌های مختلف میانبارهای سیال در نمونه‌های انتخابی، الف) نمایی از یک میانبار سیال با شکل منظم، ب) نمایی از یک میانبار سیال باریک، ج) نمایی از یک میانبار سیال با شکل کروی، د) نمایی از یک میانبار سیال با شکل نامنظم

مطالعات ریزدماسنجی

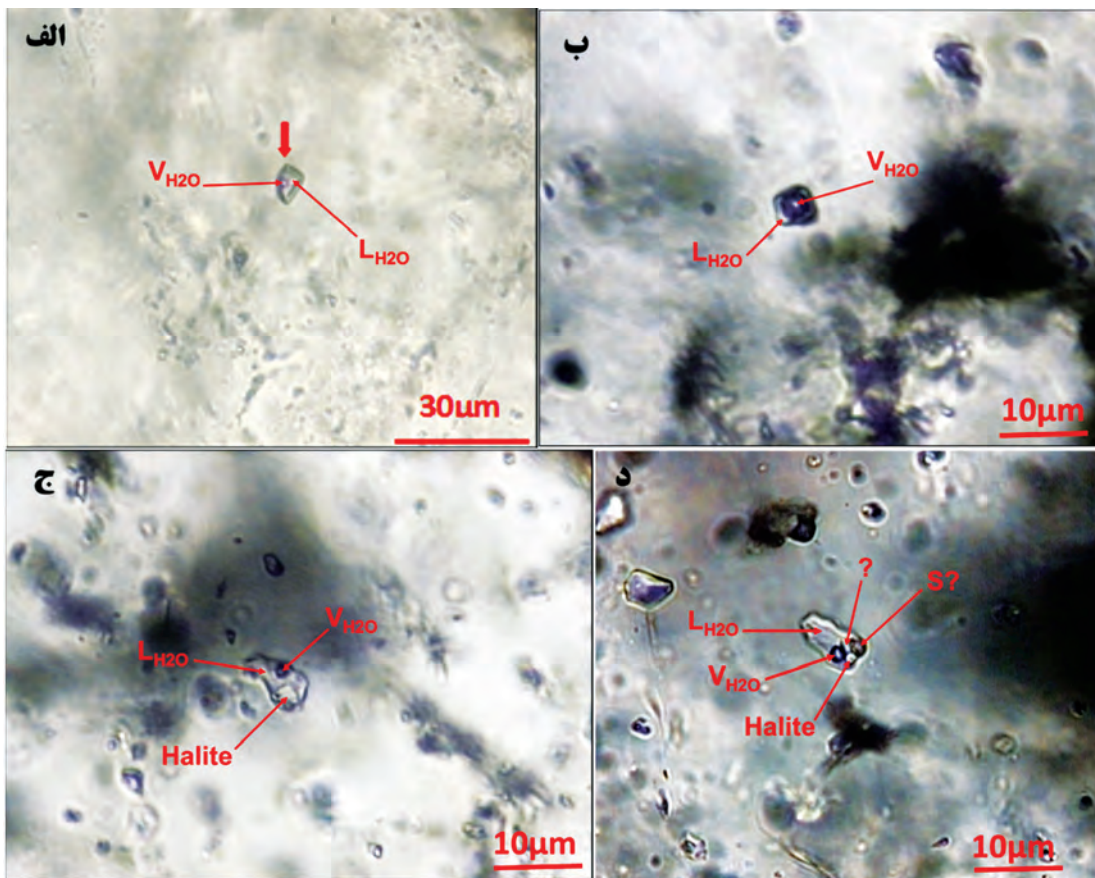
بخش اساسی بررسی‌های تجربی در زمینه اطلاعات به دست آمده از میانبارهای سیال، از طریق اعمال مراحل سرمایش و گرمایش میانبار که به دنبال هم انجام می‌شوند، در محیط و در داخل دستگاه‌های مورد استفاده و در شرایط کنترل شده با حساسیت بالا می‌باشد. در مرحله گرمایش، دمای تشکیل میانبار سیال و درصد نمک‌ها و در مرحله سرمایش، نوع و میزان نمک‌های میانبار سیال را می‌توان مشخص کرد (کریم‌پور و سعادت، ۱۳۸۹). در نمونه‌های

از نظر تنوع فازی نیز میانبارهای موجود در نمونه‌ها شامل انواع زیر هستند:

۱. میانبارهای تک فاز گاز^۱ G (بندرت مشاهده شد)؛
۲. میانبارهای تک فاز مایع^۲ L؛
۳. میانبارهای دو فازی مایع-گاز^۳ L+V (شکل ۷-الف)؛
۴. میانبارهای دو فازی گاز-مایع^۴ V+L (شکل ۷-ب)؛
۵. میانبارهای چند فازی (L+V+Ha+S) ((?) (شکل ۷-ج و د).

میانبارهای سیال موجود در نمونه‌ها از نظر فراوانی بیشتر از انواع سه و پنج بوده و اندازه‌گیری پارامترهای دمایی بر روی آن‌ها صورت گرفت. گفتنی است که فاز CO₂ مشاهده نشد.

1. Gas
2. Liquid
3. Liquid rich
4. Gas rich



شکل ۷. الف) نمایی از یک میانبار سیال چند فاززی با نسبت بالای مایع به بخار، ب) نمایی از یک میانبار سیال اولیه دوفازی LV با نسبت بالای بخار به مایع، ج) میانبار سیال با سه فاز مایع آب، بخار آب و نمک، د) میانبار سیال پنج فاززی

دمای ذوب آخرین بلور یخ، دمای نهایی^۲ گفته می‌شود که نشان‌دهنده مقدار شوری (برحسب درصد وزنی NaCl) است.

بعد از رسیدن به دمای اتاق، عملیات گرمایش شروع شد. افزایش دما تا زمانی ادامه می‌یابد که حباب بخار موجود در نمونه همگن شود. به این دما، دمای همگن شدن^۳ می‌گویند. در جدول ۲، نتایج فیزیکوشیمیایی نهایی بررسی میانبارهای سیال ارائه شده است. در شکل ۸ نمودار ترکیبی میزان شوری و دمای همگن‌شدگی به تعداد میانبارها و در شکل ۹ نمودار میله‌ای فراوانی دمای همگن‌شدگی به میانبارهای سیال نشان داده شده است.

مورد بررسی از کانسار کوشک، کمینه دمای مورد استفاده برای میانبارهای سیال، ۱۰۰- درجه در نظر گرفته شد تا انجماد کلیه فازها صورت گیرد. سپس افزایش دما به آرامی صورت پذیرفت تا زمانی که اولین نقطه‌ی ذوب یخ در محدوده‌ی ۳۰- تا ۲۱- درجه سانتی‌گراد آشکار شد. این دما، دمای نقطه اوتکتیک می‌باشد. براساس این دما می‌توان ترکیب نمک‌هایی را که در میانبار سیال موجود است مشخص کرد (جدول ۱). به عبارت دیگر، تغییر در این دما، به مفهوم و متناسب با تغییر در ترکیب نمک‌هایی است که در میانبار سیال وجود دارند و هر نقطه یا محدوده دمای، خاص یک نوع نمک مشخص می‌باشد. براین اساس، ترکیب شیمیایی موجود در میانبارهای سیال در این پژوهش اغلب از نوع ترکیبات با غلبه واضح NaCl می‌باشند. با افزایش دما، یخ‌های موجود در میانبار سیال ذوب شده است. به

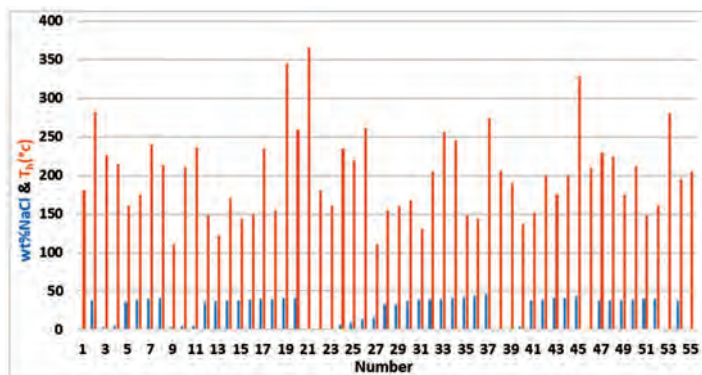
1. T_{fm}
2. T_m
3. T_h

جدول ۱. دمای نقطه اوتکتیک آب و املاح مختلف (کریم پور و سعادت، ۱۳۸۹)

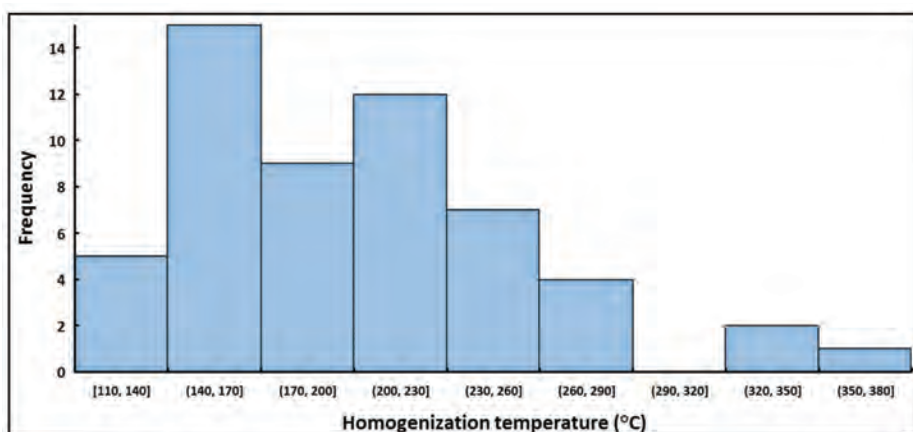
سیستم نمک	درجه اوتکتیک (°C)	فازهای جامد
H ₂ O-MgCl ₂	-۳۳/۶	Ice+MgCl ₂ .12H ₂ O
H ₂ O-NaCl-KCl	-۲۳/۵	Ice+NaCl.2H ₂ O
H ₂ O-NaCl-Na ₂ SO ₄	-۲۱/۷	Ice+NaCl.2H ₂ O+NaSO ₄ .5H ₂ O
H ₂ O-NaCl-NaHCO ₃	-۲۱/۸	Ice+NaCl.2H ₂ O+NaHCO ₃
H ₂ O-NaCl-Na ₂ CO ₃	-۲۱/۴	Ice+NaCl.2H ₂ O+Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O
H ₂ O-NaCl	-۲۱/۲	Ice+NaCl.2H ₂ O
H ₂ O-KCl	-۱۰/۶	Ice
H ₂ O-NaHCO ₃ -Na ₂ CO ₃	-۳/۳	Ice+NaHCO ₃ +Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O
H ₂ O-NaHCO ₃	-۲/۳	Ice+NaHCO ₃
H ₂ O-Na ₂ CO ₃	-۲/۱	Ice+Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O
H ₂ O-Na ₂ SO ₄	-۱/۲	Ice+Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O

جدول ۲. اندازه، نوع فاز، دمای همگن‌شدگی و میزان نمک در تعداد ۵۵ نمونه از میانبرهای سیال

Point No	Size(μm)	Type	Thv-I (C)	Halite wt%NaCl (I)	Point No	Size(μm)	Type	Thv-I (C)	Halite wt%NaCl (I)
1	5	LV	180	1.74	29	8	LVHa	160	32.49
2	5	LVHa	282	38.16	30	8	LVHa	168	36.68
3	6	LV	226	3.06	31	8	LVHa	130	38.32
4	6	LV	215	4.96	32	8	LVHa	205	38.87
5	6	LVHa	160	35.99	33	8	LVHa	256	39.76
6	6	LVHa	175	38.95	34	8	LVHa	245	40.61
7	6	LVHa	240	39.35	35	8	LVHa	149	41.49
8	6	LVHa	214	41.05	36	8	LVHaS	143	43.35
9	7	LV	110	2.57	37	8	LVHa	274	46.37
10	7	LV	210	4.49	38	9	LV	206	1.57
11	7	LV	236	4.49	39	10	LV	190	1
12	7	LVHa	148	35.99	40	10	LV	137	3.97
13	7	LVHa	122	36.68	41	10	LVHa	152	37.86
14	7	LVHa	170	37.56	42	10	LVHa	199.5	38.95
15	7	LVHa	143	38.01	43	10	LVHa	175	40.52
16	7	LVHa	150	38.95	44	11	LVHaS	200	40.61
17	7	LVHa	235	39.35	45	11	LVHa	329	42.87
18	7	LVHa	155	39.52	46	12	LV	209	1.22
19	7	LVHa	345	40.7	47	12	LVHa	230	36.68
20	7	LVHa	259	41.22	48	12	LVHa	224	37.41
21	7	VL	366	49	12	LVHa	175	37.78
22	7	LVHa	180	50	12	LVHa	211	38.95
23	8	LV	160	1.05	51	12	LVHa	148	39.76
24	8	LV	235	5.26	52	12	LVHa	161	39.76
25	8	LV	220	8.9	53	14	LV	281	1.74
26	8	LV	261	12.84	54	14	LVHa	195	36.82
27	8	LV	110	15.47	55	24	LV	205	1.59
28	8	LVHa	155	32.49					



شکل ۸. نمودار فراوانی میزان شوری و دمای همگن شدگی به تعداد میانبارها



شکل ۹. نمودار ستونی فراوانی دمای همگن شدگی به میانبارهای سیال

و ریخت‌شناسی ظاهری قابل شناسایی است. فاز جامد اپک شاید از نوع هماتیت (؟) و همچنین یک فاز ناشناخته (S?) است. بیشتر اندازه‌گیری‌های حرارت‌سنجی در میانبارهای چندفازی (به‌ویژه سه‌فازی) صورت گرفته است. در مشاهدات پتروگرافی بیشینه فازهای مشاهده شده شامل پنج یا شش فاز است اما در مواردی، در مطالعات حرارت‌سنجی، تعیین دقیق تعداد فازها به دلیل اندازه کوچک ابعاد انکلوژیون‌ها و واضح نبودن فازها امکان‌پذیر نشد.

تعیین منشأ میانبارهای سیال و نوع کانه‌زایی

براساس داده‌های به‌دست‌آمده در این پژوهش، اغلب داده‌های میانبارهای سیال در کانسار کوشک به‌طور میانگین دارای ۲۷/۸ درصد وزنی معادل نمک طعام و متوسط درجه حرارت همگن‌شدگی ۱۹۷/۶۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

در تمام موارد، همگن‌شدن فاز بخار به فاز مایع رخ داد ($L+V \rightarrow V$). این دمای همگن‌شدن، حداقل دمای تشکیل کانی میزان میانبار را نشان می‌دهد. همچنین در مواردی، تعداد معدودی از انکلوژیون‌های با حباب بخار بزرگ (VL) نیز تعیین دما شدند. با این حال به علت بزرگ بودن حباب بخار (با درجه پرشدگی ۰/۱ تا ۰/۲)، تنها دمای همگن‌شدن (به فاز مایع) ذکر شده است و محاسبه شوری امکان‌پذیر نشد (به‌علت بزرگ بودن حباب بخار، مشاهده تغییرات انجماد به‌سختی امکان‌پذیر بوده و یا مقدور نمی‌باشد). هیدروهالیت نیز در تعداد اندکی از انکلوژیون‌ها مشاهده شد. در مطالعه چندفازی‌ها، تنها عملیات گرمایش صورت گرفت که دمای همگن‌شدن حباب بخار و انحلال فاز (یا فازهای) نوزاد ثبت شد. در بیشتر موارد، فاز نمک هالیت است (از روی نقطه اوتکتیت نیز مشخص شد) که از مشخصات نوری

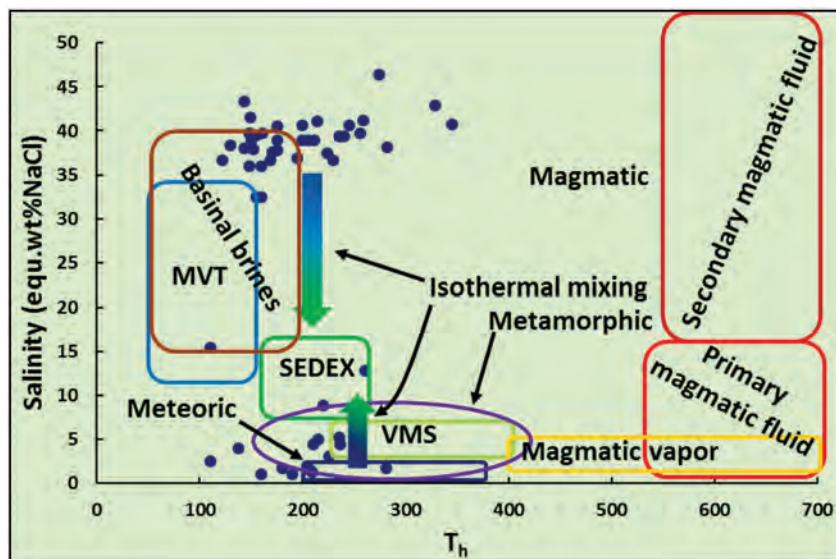
روی و سرب تیپ سدکس، و همچنین موقعیت ترکیبی-دمایی شورابه‌های ماگمایی، دگرگونی و سطحی تفکیک شده‌اند. بر روی این نمودار، نمونه‌های مورد بررسی در دو موقعیت جداگانه قرار گرفته‌اند که همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، دارای اختلاف قابل توجه در شوری می‌باشند بی‌آنکه دامنه دمای همگن‌شدگی در هر دو گروه از میانبارهای سیال، تغییر چندانی کرده باشد. به عبارت دیگر، تغییرات عمده در مقدار و در نتیجه در محور شوری اتفاق افتاده است. بررسی شکل ۱۰ به‌وضوح نشان می‌دهد که عامل اصلی در همراهی دو نوع میانبار سیال با شرایط دمایی و شوری متفاوت، اختلاط دو سیال می‌باشد یعنی پدیده‌ای که به‌عنوان عامل اصلی و بالقوه در تشکیل ریزلایه‌های سیلیسی و در نتیجه کانسنگ سولفیدی همراه با ریزلایه‌های سیلیسی می‌توان در نظر گرفت.

بحث

کانسارهای رسوبی-متصاعدی روی و سرب شامل کانسارهای تشکیل‌شده در محیط‌های رسوبی می‌باشند که میزبان اسفالریت و گالن به‌عنوان کانه‌های اصلی می‌باشند. بررسی منشأ کانه‌زایی روی و سرب در سامانه‌های نوع سدکس، موضوع مورد بحث در بسیاری از نوشته‌های علمی در سال‌های اخیر بوده است (Emsbo et al., 2016; Manning and Emsbo., 2018). منشأ کانه‌زایی در کانسار کوشک بر پایه اطلاعات به‌دست‌آمده از میانبارهای سیال در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که پیش‌تر مورد اشاره قرار گرفت، میزان شوری میانبارهای سیال پیوستگی ثابت ندارد و با وجود دمای همگن‌شدگی کم‌وبیش مشابه، دارای دو گستره شوری بسیار متفاوت می‌باشد. این مسئله به‌وضوح دو منشأ مختلف را برای کانسار حداقل در زمانی که ریزلایه‌های سیلیسی در حال تشکیل بوده‌اند، ارائه می‌دهد. اندازه‌گیری شوری ابزاری بسیار کارآمد در استنباط حضور دو سیال و تخمین میزان اختلاط بین آنهاست (Wilkinson, 2001). گفتنی است که ریزلایه‌های سیلیسی در همه جای کانسار حضور یکنواخت ندارند و بیشتر از کم‌رایی کانسار

باین‌حال دامنه دمایی بسیار گسترده است و دارای گستره‌ای از ۱۱۰ تا ۳۴۵ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۱۰). باین‌حال نوعی دو دستگی در میزان شوری میانبارهای سیال در این سامانه کانه‌زایی به‌خوبی مشخص می‌باشد. به عبارت دیگر دو جمعیت مشخص با یک گستره ناپیوسته از نظر شوری برای داده‌های به‌دست‌آمده، قابل تشخیص است. براساس داده‌های موجود، تنها فرایند دخیل در رخداد این پدیده، اختلاط دو سیال با شوری‌های متفاوت در شرایط (کم‌وبیش) هم‌دما می‌باشد. باین‌حال به‌منظور بررسی دقیق‌تر موضوع، دو جمعیت آماری به‌صورت جداگانه نیز مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، این دو جمعیت داده‌ای به‌صورت دو جمعیت به‌طور کامل منفک در نظر گرفته شدند. جمعیت یا دسته اول شامل میانبارهایی است که کمتر از ۱۵/۴۸ (متوسط ۴/۴۶) درصد وزنی معادل نمک طعام شوری دارند و دسته دوم مربوط به میانبارهایی است که بیشتر از ۳۲/۴۸ (متوسط ۳۸/۸) درصد وزنی معادل نمک طعام شوری نشان می‌دهند و هیچ میانباری، شوری بین دو عدد مزبور را نشان نمی‌دهد. ارتباط موقعیت دم-شوری برای دو گروه مذکور نشان می‌دهد که با وجود تغییر در میزان شوری دو مجموعه، تغییری در دمای همگن‌شدگی نیز مشاهده می‌شود. این روند در بعضی از موارد در سامانه‌های متأثر از پدیده جوشش مشاهده می‌شود؛ باین‌حال، انفکاک دو دسته میانبار سیال در دو محدوده به‌طور کامل مجزا و از طرف دیگر نبود (یا رخداد بسیار محدود) میانبار با فاز گازی بزرگ از شواهد دیگری است که رخداد پدیده جوشش حداقل در این بخش از کانسار کوشک را بسیار کم‌اهمیت جلوه می‌دهد. مطالعه میانبارهای سیال در دهه‌های اخیر به یکی از ابزارهای بنیادین برای درک منشأ کانسارهای گرمایی تبدیل شده است. این مسئله بدان علت است که میانبارها تنها ابزار دستیابی به خصوصیات محلول‌های کانه‌زا هستند و در بسیاری از موارد دقیق‌ترین زمین‌دماسنج‌ها و زمین‌فشارسنج‌های در دسترس هستند (Wilkinson, 2001). بر روی نمودار مورد استفاده برای تعیین منشأ میانبارهای سیال (شکل ۱۰) موقعیت کانسارهای تیپ دره می‌سی‌سی‌پی، کانسارهای تیپ سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد، کانسارهای

1. Isothermal mixing



شکل ۱۰. موقعیت میانبره‌های سیال از کانسار کوشک بر روی نمودار شوری در برابر دمای همگن‌شدگی و موقعیت کانسارهای مختلف بر روی این نمودار (Roeder, 1984; Wilkinson, 2001; غارسی و دیگران, ۱۳۹۷).

سولفیدی، این واحدها به‌عنوان منشأ احتمالی سیالات در بخشی (نه کامل) از میانبره‌های سیال با درجه شوری بالا می‌توانند مطرح باشند؛ اگرچه به‌طور سنتی، نقش حوضه رسوبی در تأمین بخش اعظم سیالات شور، بی‌بدیل دانسته می‌شود. نحوه تغذیه این سیالات می‌توانسته ساختارهای گسلی پلکانی در کف حوضه در حال فرونشست باشد. با آنکه سیلیس بیشتر حالت ریزلایه دارد اما در برخی از نقاط نیز حضور لایه‌های سیلیس با ضخامت بیشتر، حاکی از وجود یک منبع (شاید) مرتبط با سامانه‌های آتشفشانی است. بخصوص که در دوره‌های جوان‌تر، رگه‌ها و رگچه‌هایی از سیلیس در کانسنگ تزریق شده‌اند. به‌طور کلی رگه‌ها از تجمع کانی‌هایی تشکیل می‌شوند که از محلول‌های آبگین داغ‌ته‌نشین شده‌اند (Robb, 2005). کانسار کوشک همان‌طور که اشاره شد در سنگ میزبان شیل و ماسه‌سنگ قرار دارد. بیشترین احتمال در تأمین این سیالات را می‌توان به فرایندهایی نسبت داد که در ارتباط با واحدهای آتشفشانی تشکیل شده در محیط‌های قبل از تشکیل سامانه کانه‌زای کوشک یعنی سنگ‌های ریولیتی بوده‌اند. به‌عبارت‌دیگر اگرچه کانسار کوشک در محیط رسوبی تشکیل شده است اما این رسوبات، بر روی بستر ریولیتی تشکیل شده‌اند که در زمان‌های پیش‌تر، بخشی از یک سیستم آتشفشانی ناحیه‌ای

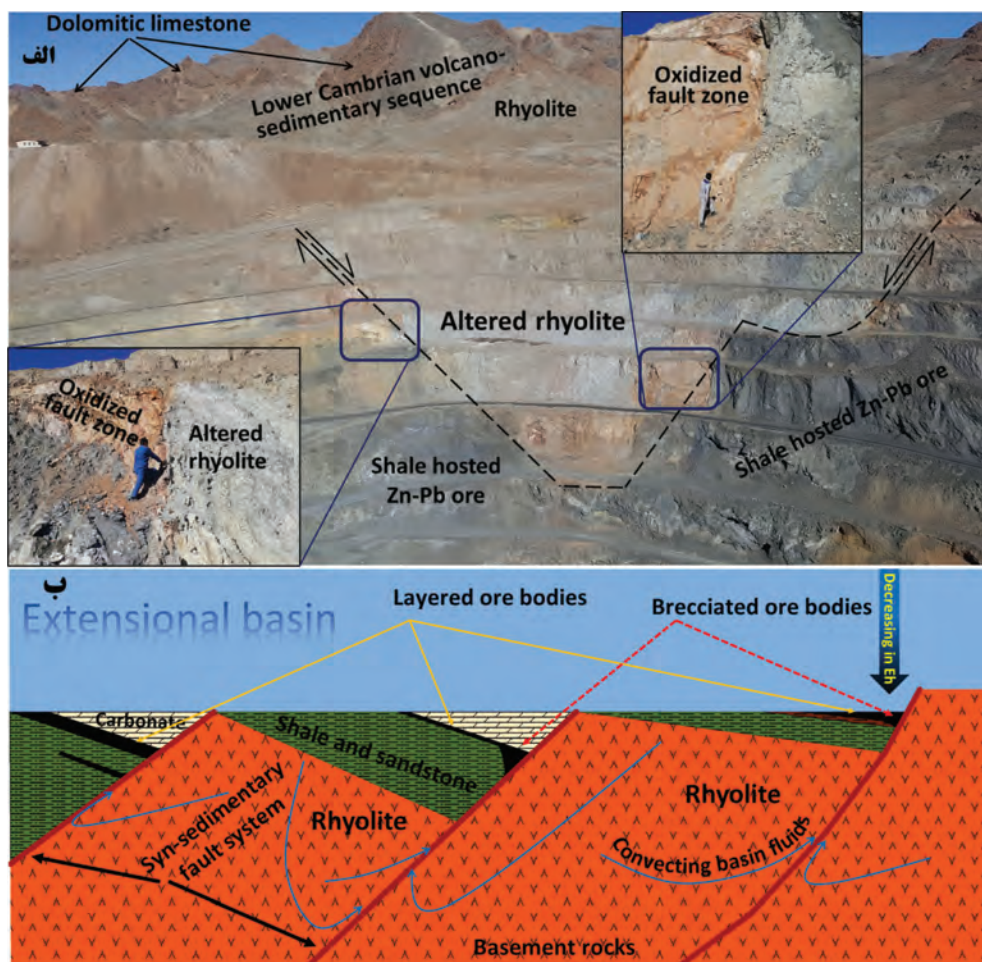
شروع شده و تا بخش‌هایی از ماده معدنی اصلی و به‌صورت سینزنتیک با لایه‌های دارای اسفالریت و گالن ادامه می‌یابند و به سمت کم‌ربالای کانسار و عبور از واحدهای دولومیتی کاهش کم‌وبیش محسوسی می‌یابند. این پدیده نشان می‌دهد که زایش سیلیس می‌تواند یا در ارتباط ژنتیکی با توده‌های آذرین باشد که در اعماق و در زیر سنگ میزبان کانسار کوشک و به‌صورت توده‌های ریولیتی حضور دارند و یا آنکه حاصل تزریق محلول‌های سیلیس‌دار با منشأ مکانی نامعلوم از اعماق حوضه و هدایت‌شده توسط راهروهای گسلی باشد. دمای پایین همگن‌شدگی در حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است که نسبت به دماهای همگن‌شدگی در میانبره‌های سیال در سامانه‌های ماگمایی حداقل ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد کمتر است. این مسئله نشان می‌دهد که اگرچه منشأ این میانبره‌های سیال ممکن است با منابع ماگمایی ارتباط داشته باشد اما فاصله مکانی زیادی بین منبع سیال و محل ته‌نشینی آن یعنی کانسار روی و سرب تشکیل شده در سنگ میزبان شیلی وجود داشته است. در هر صورت شواهد کمی در تأیید اهمیت سنگ‌های آتشفشانی در تشکیل کانسارهای نوع سدکس وجود دارد. با این حال، نظر به حضور واحدهای ریولیتی در ستون چینه‌شناسی منطقه و قرارگیری این ریولیت‌ها در زیر واحدهای میزبان کانسنگ

غلظت لیگاند همراه است و در برخی از سامانه‌های کانه‌زایی منجر به کاهش دما نیز می‌شود. این پدیده‌ها در نهایت منجر به تشکیل کانسنگ می‌شوند. بررسی‌های نظری نشان داده است که احتمال انتقال مقادیر قابل توجهی از فلزات و سولفید توسط یک سیال واحد، مشکل است (Sverjensky, 2001; Wilkinson, 1984). نقش بی‌بدیل کمپلکس‌های کلریدی به‌عنوان حامل اصلی عناصر کالکوفیل در کانسارهای سدکس و سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد شناخته شده است. این لیگاند به‌طور طبیعی در سیال شورتر، غلظت بالاتری دارد و می‌تواند نقش حامل مقادیر قابل توجهی از روی، سرب و حتی آهن را ایفا کند. سیال با شوری کمتر اغلب در ارتباط با محیط کف حوضه است که با توجه به دمای مشابهی که نسبت به سیال با شوری کمتر دارد، ممکن است خود به‌طور محلی در تماس کمی با آب دریا بوده باشد. با این حال منشأ گوگرد در بسیاری از سامانه‌های مشهور در زمین، آب دریا دانسته شده است. از آنجایی که هم لایه‌های کوارتز میزبان میانبارهای سیال با شوری زیاد و هم لایه‌های کوارتز میزبان میانبارهای با شوری کم دارای روابط تشکیل هم‌زمانی با کانی‌های سولفیدی متعلق به فاز اصلی کانه‌زایی در کانسار کوشک هستند می‌توان نتیجه گرفت که اختلاط سیال به‌عنوان یکی از عوامل بنیادین در تشکیل کانسنگ سولفیدی مطرح می‌باشد. از شواهد دیگر مبنی بر اختلاط می‌توان به حضور بافت برشی و عیار بالای کانسنگ در نقاطی اشاره کرد که دارای ارتباط مکانی با صفحات گسلی هستند که تنها آثاری از آنها (گسل‌ها) در تونل‌های اکتشافی در کانسار کوشک دیده می‌شود. در معدن روباز این کانسار نیز آثاری از ساختارهای شبیه به هورست و گرابن‌های کوچک تشکیل شده در محیط‌های کشتی مشاهده می‌شود که در یک مورد بارز (شکل ۱۱-الف) رخداد واحدهای ریولیتی (کلریتی و رسی‌شده) زیرین به‌صورت هورست با گسل‌های پلکانی مشاهده می‌شود و لایه‌های شیلی-سیلتی میزبان کانسنگ روی و سرب نیز در محیط گرابنی شکل مشاهده می‌شوند (اگرچه این گستره تاریخ زمین‌شناسی ساختاری پیچیده‌ای در طول زمان داشته است). از خصوصیات قابل ذکر می‌توان به رخداد کانه‌زایی

را تشکیل می‌داده‌اند. این ریولیت‌ها در واحدهای آتشفشانی رسوبی کامبرین زیرین در ایران مرکزی قرار دارند و در این واحدها، لایه‌های تبخیری نیز حضور دارند که بررسی نقش احتمالی این واحدهای تبخیری در تأمین سیالات شور در کانسار کوشک در زمان تشکیل، نیاز به بررسی‌های مجزایی دارد. در هر صورت عدم تکرار حضور سنگ‌های ریولیتی در حوضه کوشک نشان‌دهنده حاکمیت یک رژیم زمین‌ساختی در حال افول در این ناحیه است که با گسلش ناحیه‌ای و کانه‌زایی نوع سدکس دنبال شده است. بنابراین سنگ‌های آتشفشانی ریولیتی قابلیت پیشنهاد برای منشأ میانبارهای سیال (در کنار واحدهای تبخیری) با شوری بالا را دارند. در این حالت توده‌های سنگی ریولیتی می‌توانسته‌اند نقش موتور حرارتی را نیز برای چرخش آب‌های درون حوضه‌ای ایفا کنند. گروه دیگر میانبارها دارای شوری پایین می‌باشند. دمای همگن‌شدگی در این نوع بسیار نزدیک به دمای همگن‌شدگی در میانبارهای سیال با شوری بالاست که ذکر شد. ضمن آنکه لایه‌ها و ریزلایه‌های کوارتزی میزبان این نوع میانبارها نیز به‌طور کامل و مانند گروه اول دارای روابط سینژنتیکی با کانسنگ سولفیدی می‌باشند. بنابراین تنها عامل جدایش این دو نوع میانبارهای سیال، میزان شوری است. اختلاط سیال عاملی است که به‌عنوان فرایند اصلی در رخداد این پدیده در کانسار کوشک مطرح می‌باشد که در آن یک سیال با شوری زیاد حاوی کلریدهای فلزی و با منشأ عمیق و درون حوضه هدایت‌شده توسط گسل‌های عمقی با یک سیال با شوری کمتر مانند آب‌های دریا و یا آب‌های سطحی مخلوط شده و منجر به تشکیل سولفیدهای فلزی شده است. در بسیاری از کانسارها، فرایندهای فیزیکی به‌ویژه جدایش فازی و اختلاط سیال، به‌عنوان مهم‌ترین سازوکارها در تشکیل تمرکزهای اقتصادی مطرح می‌باشند (Skinner, 2017; Faure et al., 2002; Zhong et al., 1997). پدیده اختلاط بدون شک باعث تغییر هر دو سیال هم از نظر فیزیکی یعنی دما و هم از نظر شیمیایی یعنی ترکیب نمک‌ها و میزان شوری می‌شود. کاهش دما منجر به کاهش پایداری و در نهایت ناپایداری کمپلکس‌های کلریدی عناصر کالکوفیل می‌شود (Richards, 2011). اختلاط نیز اغلب با کاهش

محل تماس با محیط ته‌نشینی شیل در حوضه رسوبی کف دریا می‌شود (شکل ۱۱-ب). با این حال در مورد زمان تشکیل حوضه‌های کشتی در ایران مرکزی، اتفاق نظر وجود ندارد به‌عنوان مثال Kargarbanafghi et al. (2012) پیشنهاد کرده‌اند که تشکیل حوضه‌های مزبور در نتیجه کشتش مرتبط با ارتباط با بالآمدگی^۱ (پسافر سایشی) مجموعه دگرگونی چاپدونسی به‌عنوان یکی از کمپلکس‌های با گسترش زیاد در منطقه ایران مرکزی می‌باشد. با این حال وابستگی محرز تشکیل کانسنگ کوشک به عوامل ساختاری و سن بالای کانسار (کامبرین زیرین) از این قاعده حمایت نمی‌کند.

روی و سرب به‌صورت اکسیدی با عیار بالا (حدود ۱۰ درصد روی) در این بخش‌های گسلیده اشاره کرد که بسیار بیشتر از عیار این عناصر در کانسنگ لایه‌ای با فاصله از این گسل‌ها است (در حدود چهار درصد روی) که می‌تواند حاکی از نقش این ساختارهای گسلی در تأمین مسیر عبور سیال در زمان تشکیل کانسنگ باشد که امکان برخورد دو سیال مورد نظر (در این پژوهش) را فراهم می‌آورد. مستعدترین محل برخورد دو سیال مذکور، محل برخورد گسل‌های پلکانی خاص محیط‌های کشتی (مانند حوضه‌های کشتی پشت قوسی) است که با ایجاد راهروهای عمیق، محل عبور سیال شور از عمق به سطح را ایجاد کرده و منجر به اختلاط دو سیال در



شکل ۱۱. الف) وضعیت ماده معدنی و سنگ بستر ریولیتی و همچنین وضعیت ساختاری در بخش شمالی کانسار کوشک به همراه موقعیت زون‌های کانه‌زایی اکسیدانی در محل گسل بین واحد ریولیتی و کانسنگ، ب) مدل ساده‌شده منشأ احتمالی سیال با شوری زیاد و اختلاط آن با آب کف حوضه در کانسار کوشک

1. Exhumation

نتیجه‌گیری

بررسی شرایط فیزیکوشیمیایی به دست آمده از میانبارهای سیال برگرفته از ریزلایه‌های سیلیسی در کانسار کوشک در منطقه ایران مرکزی نشان می‌دهد که دو نوع سیال در تشکیل کانسنگ سولفیدی نقش داشته است. یکی سیال با شوری زیاد که منشأ آن، آب‌های حوضه‌ای عمیق می‌باشند که دارای مقادیر بالای کلرید سدیم هستند و شاید از اعماق و متأثر از توده‌های ریولیتی عمیق، گرم شده و در یک جریان همرفتی به سمت بالا و اعماق کم حرکت کرده و بهنگام خروج از ساختارهای گسلی و در برخورد با رسوبات عمیق مانند شیل (و ماسه‌سنگ) و در اثر کاهش غلظت کمپلکس کلریدی و کاهش حرارت، محتوای فلزی خود را رها می‌سازند. سیال دیگر نیز با محتوای شوری پایین می‌باشد که در کف حوضه حضور دارد و دارای محتوای بالای گوگرد حاصل از آب دریاست. این سیال نیز دارای دمایی مشابه در هنگام برخورد با سیال قبلی است که شوری بالایی داشته است. بنابراین و براساس مشاهدات به دست آمده از این پژوهش، اختلاط سیال یکی از عوامل اصلی در تشکیل بخش اصلی کانسنگ سولفیدی در کانسار کوشک می‌باشد. این اختلاط به احتمال زیاد در محل گسل‌های پلکانی خاص محیط‌های کششی و در محل برخورد سطوح این گسل‌ها با محیط ته‌نشینی شیل در کف دریا اتفاق افتاده است. اگرچه دمای کانسار براساس اطلاعات به دست آمده از میانبارهای سیال بیشتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد اما فراوانی اسفالریت و وجود شواهد بافتی از جمله بافت فرامبوئیدال و کلوفرم به همراه آثار گرمی‌شکل در کانسنگ سولفیدی حاکی از حاکمیت دماهای پایین‌تر در دوره‌های محدود و مساعد بودن شرایط برای فعالیت باکتری‌هاست که اجازه زیست در این محیط را به آنها داده است و با نرخ تولید مقادیر بالایی از گوگرد احیایی مورد نیاز برای کانه‌زایی روی و سرب همراه بوده است.

سپاسگزاری

بدین وسیله از زحمات هیئت تحریریه فصلنامه زمین‌شناسی ایران و داوران محترم مقاله حاضر که با نقد سازنده خود، نویسندگان را در جهت بهبود رسایی مطالب،

از ویژگی‌های دیگر میانبارهای سیال در این پژوهش آن است که در هیچ‌کدام از آنها، فاز CO_2 ، مشاهده نشد. کانسار کوشک گرایش زیادی به سامانه‌های کانه‌زای نوع سدکس (Aftabi et al., 2009) و یا سولفید توده‌ای با میزبان شیل (Rajabi et al., 2020) دارد (اگرچه تعریف سولفید توده‌ای با میزبان شیل در اساس همان تعریف کانه‌زایی نوع سدکس است) و با آنکه کانسنگ سولفیدی با فاصله از سنگ‌های ریولیتی و آذرآواری‌ها در ستون چینه‌شناسی قرار گرفته است اما در مرحله افول فعالیت آتشفشانی و دوره گسترش حوضه‌های رسوبی تشکیل شده است. از شواهد دیگر مبنی بر عدم فعالیت آتشفشانی مؤثر می‌توان به وجود فعالیت‌های ریزیاختگی و نقش عوامل زیست‌شناختی در کانه‌زایی روی و سرب در کانسار کوشک اشاره کرد اگرچه این فعالیت‌ها امروزه در نزدیکی مناطق فعال آتشفشانی و در محیط‌های با دماهای بالا نیز گزارش شده‌اند. وجود بافت‌های متعدد حاصل از فعالیت‌های باکتریایی بویژه آثار ریز گرمی‌شکل و همچنین بافت‌های کلوفرم و فرامبوئیدال نشان می‌دهد که در بخش‌هایی از کانسار کوشک شرایط دمایی به حدی مساعد بوده که امکان زیست باکتری‌ها را فراهم ساخته است.

مطالعه نسبت‌های ایزوتوپی پایدار گوگرد، نشان می‌دهد که فرامبوئیدهای پیریتی تشکیل شده در محیط‌های واجد باکتری‌های شناور در رسوبات، منشأ زیست‌زادی دارند و خصوصیات فرامبوئیدهای پیریتی مانند هسته‌زایی، رشد و وراثت شکل طی جانشینی گریجیت کروی دارد (Popa et al., 2003). همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، گستره دمایی تشکیل کانسنگ سولفیدی در کانسار کوشک در این پژوهش در حدود ۱۱۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمده است. نزدیک به حد پایینی این گستره دمایی برای برخی از گونه‌های باکتریایی قابل تحمل بوده و امکان فعالیت آن‌ها در این شرایط وجود دارد (Druschel et al., 2002). گسترش بافت‌های کلوفرم و فرامبوئیدال نشان می‌دهد که دما در برخی از شرایط می‌توانسته به پایین‌تر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز برسد که حاصل برخورد پالس‌های مختلف سیال کانه‌زا با آب دریای سرد بوده است.

- Borumandi, H., 1973. Petrographische und Lagerstättenskundli Untersuchungen der Esfordri-Formation Zwischen Mishdovaund Kushk bei Bafq (Zentraliran). Unpublished Ph.D. Thesis, Aachen, Germany, Rheinisch-Westfälische Technisch Hochschule, 174.

- Diersch, H.J.G., 2014. FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Springer Publishing Co., New York, USA.

- Druschel, G.K., Labrenz, M., Thomsen-Ebert, T., Fowle, D.A. and Banfield, J.F., 2002. Geochemical modeling of ZnS in Biofilms: An example of ore depositional processes. *Economic Geology*, 97, 1319-1329.

- Emsbo, P., Seal, R.R., Breit, G.N., Diehl, S.F. and Shah, A.K., 2016. Sedimentary exhalative (sedex) zinc-lead-silver deposit model. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2010-5070-N, 57.

- Faure, K., Matsuhisa, Y., Metsugi, H., Mizota, C. and Hayashi, S., 2002. The Hishikari Au-Ag epithermal deposit, Japan: oxygen and hydrogen isotope evidence in determining the source of paleohydrothermal fluids. *Economic Geology*, 97, 481-498.

- Ho, S.E., 1987. Fluid inclusions: their potential as an exploration tool for Archean gold deposits. Geology department, University of western Australia Publication. 11, 239-263.

- Kargaranbafghi, F., Neubauer, F., Genser, J., Faghhi, A. and Kusky, T., 2012. Mesozoic to Eocene ductile deformation of western Central Iran: From Cimmerian collisional orogeny to Eocene exhumation. *Tectonophysics*, 564-565, 83-100.

- Kozina, N., Reykhard, L., Dara, O. and Gordeev, V., 2018. Framboidal pyrite formation in the bottom sediments of the South Caspian Basin under conditions of hydrogen sulfide contamination. *Russian Journal of Earth Sciences*, doi:10.2205/2018ES000639.

شیوایی بیان و نیز انطباق متن علمی با یافته‌های علمی جدید یاری کردند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

منابع

- آذرایین، ح.، ۱۳۸۲. الگوی کانه‌زایی متصاعدی-رسوبی سرب-روی-آهن در منطقه معدنی کوشک و بافق، یزد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۲۹۳.

- آفتابی، ع.، ۱۳۷۸. کانسارهای رسوبی. دانشگاه شهید باهنر کرمان، جزوه درسی، ۶۵۶.

- آقانباتی، ع.، ۱۳۸۵. زمین‌شناسی ایران. انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶.

- زند، م. م.، ۱۳۹۲. بررسی کنترل‌کننده‌های ساختاری-معدنی بر پایه مطالعات سیالات درگیر و اکتشافات معدنی در منطقه کیل-کوشک در زیر پهنه متالورژی بافق استان یزد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ۲۳۵.

- غارسی، م.، رسا، ا. و یزدی، م.، ۱۳۹۷. بررسی کانی سازی اسکارن مزرعه، شمال اهر، با تکیه بر میانبارهای شاری. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۲۶، ۱، ۲۴۴-۲۲۹.

- فخری‌دودویی، ع. و علی‌پوراصل، مسعود.، ۱۳۹۹. کانی‌شناسی، ژئوشیمی، میانبار سیال و ژنز کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت در جنوب غرب جزیره هرمز، ایران. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۵۶، ۱-۱۹.

- قاسمی‌سیانی، م. و عیسی‌آبادی، ف.، ۱۳۹۹. کانی‌شناسی و شیمی کانی‌ها در ناحیه معدنی سرب-نقره (روی-مس-باریت) راونج، شمال دلیجان. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۵۵، ۱۰۷-۱۲۷.

- کریم‌پور، م. ح. و سعادت، س.، ۱۳۸۹. زمین‌شناسی اقتصادی پیشرفته. انتشارات ارسلان، ۵۳۵.

- نیرومند، ش.، تاج‌الدین، ح. و حقیری قزوینی، س.، ۱۳۹۹. زمین‌شناسی و کانه‌زایی طلا در محدوده غرب کسنزان، جنوب سقز، استان کردستان. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۵۵، ۸۱-۹۴.

- Aftabi, A., Mohseni, S., Babeki, A. and Azaraien, H., 2009. Fluid inclusion and stable isotope study of the esfordri apatite-magnetite deposit-A discussion. *Economic Geology*, 104, 137-143.

- Lattanzi, P., 1991. Applications of fluid inclusions in the study and exploration of mineral deposits. *European Journal of Mineralogy*, 3, 689-701.
- Leach, D.L., Sangster, D.F., Kelley, K.D., Large, R.R., Garven, G., Allen, C.R., Gutzmer, J. and Walters, S., 2005. Sediment-hosted lead-zinc deposits-A global perspective. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richards, J.P. (Eds.), *Economic Geology-One Hundredth Anniversary*. Society of Economic Geologists, Littleton, CO, USA, 561-607.
- Manning, H. M. and Emsbo, P., 2018. Testing the potential role of brine reflux in the formation of sedimentary exhalative (sedex) ore deposits. *Ore Geology Reviews*, 102, 862-874.
- Popa, R., Kinkle, B. K. and Badescu, A., 2003. Pyrite Framboids as Biomarkers for Iron-Sulfur Systems. *Geomicrobiology Journal*, 21(3), 193-206.
- Rajabi, A., Alfonso, P., Canet, C., Rastad, E., Niroomand, S., Modabberi, S. and Mahmoodi, P., 2020. The world-class Koushk Zn-Pb deposit, Central Iran: A genetic model for vent-proximal shale-hosted massive sulfide (SHMS) deposits-Based on paragenesis and stable isotope geochemistry. *Ore Geology Reviews*, 124, 1-23.
- Richards, J.P., 2011. Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins. *Ore Geology Reviews*, 40, 1-26.
- Robb L., 2005. *Introduction to Ore-Forming Processes*, Blackwell Publishing, 373.
- Roedder, E. and Bodnar, R.J., 1997. Fluid inclusion studies of hydrothermal ore deposits. In: Barnes, H.L. (Ed), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Wiley, New York, 657-657.
- Samani, B.A., 1988. Metallogeny of the Precambrian in Iran. *Precambrian Research*, 39, 85-106.
- Shepherd, T.J., Ranbin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. Blackie, Glasgow, 239.
- Skinner, B.J., 1997. Hydrothermal mineral deposits: what we do and don't know. In: Barnes, H.L. (Ed), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. 3rd edn. Wiley, New York, 1-29.
- Spooner, E.T.C., 1981. Fluid inclusion studies of hydrothermal ore deposits. In: Hollister, L.S., Crawford, M.L. _Eds., *Fluid Inclusions: Applications to Petrology*. Mineralogical association of Canada, Short Course Handbook, 6, 209-240.
- Sverjensky, D.A., 1984. Oil field brines as ore-forming solutions. *Economic Geology*, 79, 23-37.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid Inclusions in Hydrothermal Ore Deposits. *Lithos*, 55, 229-272.
- Whitney, D.L. Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*. 95(1), 185-187.
- Zhong, J., Chen, Y., Qi, J., Chen, J., Dai, M. and Li, J., 2017. Geology, fluid inclusion and stable isotope study of the Yueyang Ag-Au-Cu deposit, Zijinshan orefield, Fujian Province, China. *Ore Geology Reviews*, 86, 254-270.