

بررسی نحوه‌ی رخداد کانسار چنگرزه (جنوب نطنز) در توالی رسوبی تریاس میانی: نمونه‌ای از ذخایر سرب±نقره تیپ دره‌ی می‌سی‌سی‌پی در کمربند فلززایی ملایر-اصفهان

ابراهیم طالع‌فاضل^{۱*}، انسیه مختاری‌نژاد^۲ و احمد حسین‌خانی^۳

۱- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

۲- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

۳- شرکت معادن سرمک، تهران، ایران

نویسنده مسئول: tale.fazel@gmail.com

دریافت: ۹۹/۷/۱۳ پذیرش: ۹۹/۸/۲۱

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

کانسارهای فلزی با سنگ‌میزبان رسوبی به‌عنوان مهم‌ترین منابع تأمین‌کننده‌ی سرب و روی در ایران هستند که در محدوده‌ی سنی پروتروزوئیک بالایی تا سنوزوئیک تشکیل شده‌اند. کانسار سرب±نقره چنگرزه به میزبانی دولستون‌های گسلی تریاس میانی در فاصله ۷۵ کیلومتری شمال‌خاوری اصفهان و بخش جنوبی کمربند فلززایی ملایر-اصفهان، قرار دارد. کانه‌زایی به دو صورت درون‌زاد سولفیدی و برون‌زاد غیرسولفیدی (اکسیدی، کربناتی و سیلیکاتی)، وجود دارد. کانه‌زایی سولفیدی با ساخت و بافت‌های برشی، پرکننده حفرات، رگه-رگچه‌ای و جان‌شینی به‌طور عمده از گالن و کانه‌های فرعی اسفالریت، پیریت و سری تتراهدردیت-تنانتیت، تشکیل شده است. براساس نتایج شیمی کانی‌ها، محتوای $FeS \text{ mol}\%$ در ترکیب اسفالریت‌ها بین ۱/۱۴ تا ۳/۸۸ درصد مولار، بدست آمد که منطبق با وضعیت سولفیداسیون متوسط ($LogfS_2 \approx -13$)، است. نسبت Co/Ni در ترکیب پیریت نیز بین ۰/۱۲ تا ۰/۲۵، آشکار شد که بر مبنای آن دارای خاستگاه رسوبی تا گرمایی هستند. مقادیر دما و شوری میانبارهای سیال حاکی از تشکیل کانه‌زایی سولفیدی مرتبط با شورابه‌های حوضه‌ای غنی از $FeCl_2-MgCl_2$ (ترکیبی از آب‌های اقیانوسی قدیمی و سیالات به دام افتاده در حفرات سنگ)، هستند که طی مراحل پایانی کانه‌زایی با آب‌های جوی رقیق، مخلوط شده‌اند. با در نظر گرفتن شواهدی نظیر جایگاه تکتونیکی، سنگ‌میزبان دولستون، دگرسانی‌های سیلیسی و دولومیتی، مجموعه کانه‌های فلزی سولفیدی ساده، کنترل‌کننده‌های لیتولوژی-ساختمانی، سولفات‌های دریایی به عنوان منشاء اصلی سولفور و فلزات آزاد شده از پی‌سنگ رسوبی زیرین، می‌توان دریافت که کانسار چنگرزه دارای بیش‌ترین شباهت با کانسارهای تیپ دره‌ی می‌سی‌سی‌پی است.

واژگان کلیدی: دگرسانی دولومیتی، کانه‌زایی، سرب و نقره، چنگرزه

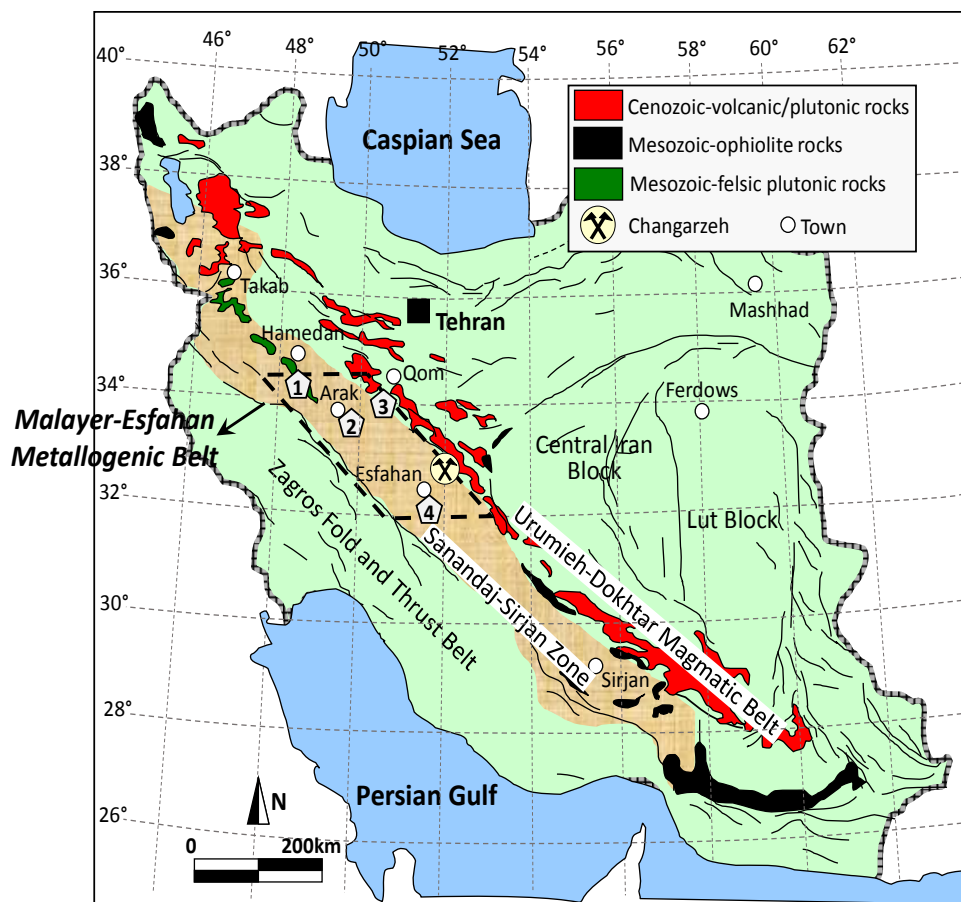
پیشگفتار

کانه‌زایی دره‌ی می‌سی‌سی‌پی، برون‌دمی رسوبی، ایرلندی و غیرسولفیدی، در آن معرفی شده است (دیکسون و پی‌یرا، ۱۹۷۴؛ مومن‌زاده، ۱۹۷۶؛ مشکاتی و همکاران، ۲۰۱۱). کمربند فلززایی ملایر-اصفهان با راستای شمال‌باختری-جنوب‌خاوری، بزرگ‌ترین محدوده فلززایی سرب-روی (نقره) ایران (رجبی و همکاران، ۲۰۱۲؛ معانی‌جو و همکاران، ۲۰۲۰؛ حیاتی و همکاران، ۱۳۹۵)، است. این کمربند در بخش میانی پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان (مرتبط با کوهزاد زاگرس)، واقع شده است (شکل ۱). در این کمربند کانسارهای سرب-روی (نقره) سولفیدی مهمی نظیر آهنگران (۱/۵ تن ذخیره با عیار Pb ، ۴٪، Zn ، ۵٪ و Ag ، ۲۰۰ g/ton)، ایرانکوه (۱۰ میلیون تن ذخیره با عیار Pb ، ۲/۵٪ و Zn ، ۱٪)، راونج (۲

حدود نیمی از سرب و روی دنیا از ذخایر سولفیدی با سنگ‌میزبان‌های رسوبی کربناته و آواری تأمین می‌شود (لیچ و همکاران، ۲۰۰۵). تاکنون بیش از ۳۰۰ کانسار و نشانه معدنی سرب و روی در ایران شناسایی شده است که کمتر از ۶ درصد از این ذخایر به‌صورت فعال استخراج می‌شود (رجبی و همکاران، ۲۰۱۲). در این میان، کانسارهای سرب و روی با میزبان کربناته از مهم‌ترین منابع تأمین‌کننده‌ی سرب و روی در ایران هستند که دارای محدوده‌ی سنی پروتروزوئیک پسین تا سنوزوئیک هستند (قربانی، ۲۰۱۳). مهم‌ترین مناطق فلززایی سرب و روی در ایران شامل پهنه‌های سنندج-سیرجان، ایران مرکزی و البرز است که انواع تیپ‌های

وسیع‌تری در آن انجام شده و در حال حاضر به صورت یک معدن نیمه‌فعال است. کانسار چنگرزه با ذخیره قطعی ۲۵۰ هزار تن، دارای میزان استخراج سالیانه ۱۵۰۰۰ تن با عیار ۱۰/۸ درصد سرب، ۱/۹۹ درصد روی و ۶۹ گرم در تن نقره، است (مجموعه معادن سرمک، ۱۳۸۸). در این پژوهش سعی شده است با استفاده از شواهد کانه‌زایی، کانی‌شناسی و شیمی کانه‌ها، ساخت و بافت ماده معدنی، زمین‌شناسی ساختاری و میانبارهای سیال، نحوه‌ی تشکیل و خاستگاه این کانسار بررسی شود. بدیهی است استفاده از نتایج این پژوهش علاوه بر جنبه‌های تحقیقاتی می‌تواند نقش مفیدی در ارزیابی‌های اکتشافی در منطقه مورد مطالعه داشته باشد.

میلیون تن ذخیره با عیار Pb ۴٪، Zn ۱٪ و Ag $50 g/ton$ و عمارت (۱/۵ میلیون تن ذخیره با عیار Pb ۵٪ و Zn ۲٪)، معرفی شده‌اند (معانی‌جو و همکاران، ۲۰۲۰؛ مشکانی و همکاران، ۲۰۱۱) (شکل ۱). اغلب این کانسارها از لحاظ موقعیت نسبت به سنگ دربرگیرنده دارای ماهیت چینه‌کران تا چینه‌سان هستند (مومن‌زاده، ۱۹۷۶؛ طالع‌فاضل، ۱۳۹۷). کانسار سرب-نقره چنگرزه در فاصله ۷۵ کیلومتری شمال خاور استان اصفهان و فاصله ۲۶ کیلومتری جنوب شهرستان نطنز، در بخش جنوبی کمربند فلززایی ملایر- اصفهان، قرار دارد (شکل ۱). این کانسار از قدیمی‌ترین معادن استان اصفهان بوده که از دیرباز عملیات اکتشافی- استخراجی



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده شده ایران و نمایش موقعیت کانسار چنگرزه در پهنه دگرگونی ساندج- سیرجان و کمربند فلززایی ملایر- اصفهان. مهم‌ترین کانسارهای فلزی با سنگ میزبان کربناته در این کمربند شامل: (۱) آهن‌گران (سرب-نقره و آهن)، (۲) عمارت (سرب و روی)، (۳) راونج (سرب و روی-نقره) و (۴) ایرانکوه (سرب و روی)، هستند (معانی‌جو و همکاران، ۲۰۲۰؛ مشکانی و همکاران، ۲۰۱۱).

چنگرزه در چهارگوش زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ کاشان (زاهدی، ۱۳۷۱) و ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ طرق (زاهدی و رحمتی، ۱۳۸۲)، قرار می‌گیرد. براساس نقشه‌های مذکور و انطباق آن‌ها با مطالعات صحرایی، قدیمی‌ترین سازند

زمین‌شناسی و توالی چینه‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه در تقسیم‌بندی‌های ساختاری ایران توسط نبوی (۱۳۵۵) و اشتوکلین (۱۹۶۸)، به ترتیب در پهنه‌های ایران مرکزی و ساندج- سیرجان، قرار دارد (شکل ۱). منطقه

دولومیت فوزولین‌دار (واحد سنگی $P2$) با ضخامت ۳۵۰ متر است که معادل پرمین‌میانی تا پسین (هم‌ارز سنگ‌آهک و دولستون سازند جمال) در نظر می‌گیرند. این واحد به عنوان سنگ بستر منطقه در نظر گرفته می‌شود که عمدتاً در جنوب محدوده‌ی معدنی چنگرزه رخمون دارد. پس از آن، واحد سنگی $T1$ با ضخامت ۵۰ متر متشکل از ماسه‌سنگ‌های قرمز رنگ بوکسیتی و شیل‌های سیاه حاوی ماده آلی (معادل سازند سرخ شیل در ایران مرکزی) به‌صورت هم‌شیب بر روی افق‌های پرمین تشکیل شده است. رخمون‌هایی از این شیل‌ها در تونل‌های زیرزمینی منطقه مشاهده شد (شکل ۳ پ). پس از آن، واحد دولستون زرد رنگ (واحد سنگی $T2$) با ضخامت ۶۱۰ متر همراه میان لایه‌های آهک سفید رنگ و سن تریاس میانی (معادل سازند شتری در ایران مرکزی) با یک ناپیوستگی هم‌شیب بر روی واحد ماسه‌سنگ و شیلی $T1$ نهشته شده است. واحد دولستون $T2$ مهم‌ترین میزبان کانه‌زایی سرب (±نقره) سولفیدی و غیرسولفیدی (کربنات، سیلیکات و اکسید)، در منطقه چنگرزه است (شکل ۳ ت). واحد سنگی شیل با بین لایه‌های ماسه‌سنگ و آهک آمونیت‌دار (واحد سنگی $T3$) با ضخامت ۵۴۰ متر و سن تریاس پسین به‌صورت هم‌شیب بر روی دولستون‌های تریاس میانی قرار گرفته است. طبق شواهد صحرایی به‌نظر می‌رسد این واحد سنگی در اثر فعالیت فاز کوهزایی سیمین پیشین و پسروی تدریجی پس از تریاس میانی شکل گرفته است (زاهدی و رحمتی، ۱۳۸۲). پس از این واحد، لایه‌های متناوب ماسه‌سنگ و شیل با میان لایه آهک آمونیت‌دار (واحد سنگی $I1$) و ضخامت ۹۸۰ متر متعلق به لیاس (معادل سازند شمشک) تشکیل شده‌اند. سنگ‌آهک اوربیتولین‌دار به‌همراه شیل‌های سیلتی و مارن (واحد سنگی $K2$) با ضخامت ۳۵۰ تا ۵۰۰ متر و سن کرتاسه پیشین بر روی واحدهای ژوراسیک قرار گرفته است. این واحد سنگی در شمال محدوده معدنی چنگرزه رخمون دارد. واحد رسوبات کواترنری (Q^{III}) به‌صورت نهشته‌های آبرفتی به‌ویژه در راستای گسل اصلی منطقه تشکیل شده است.

روش مطالعه

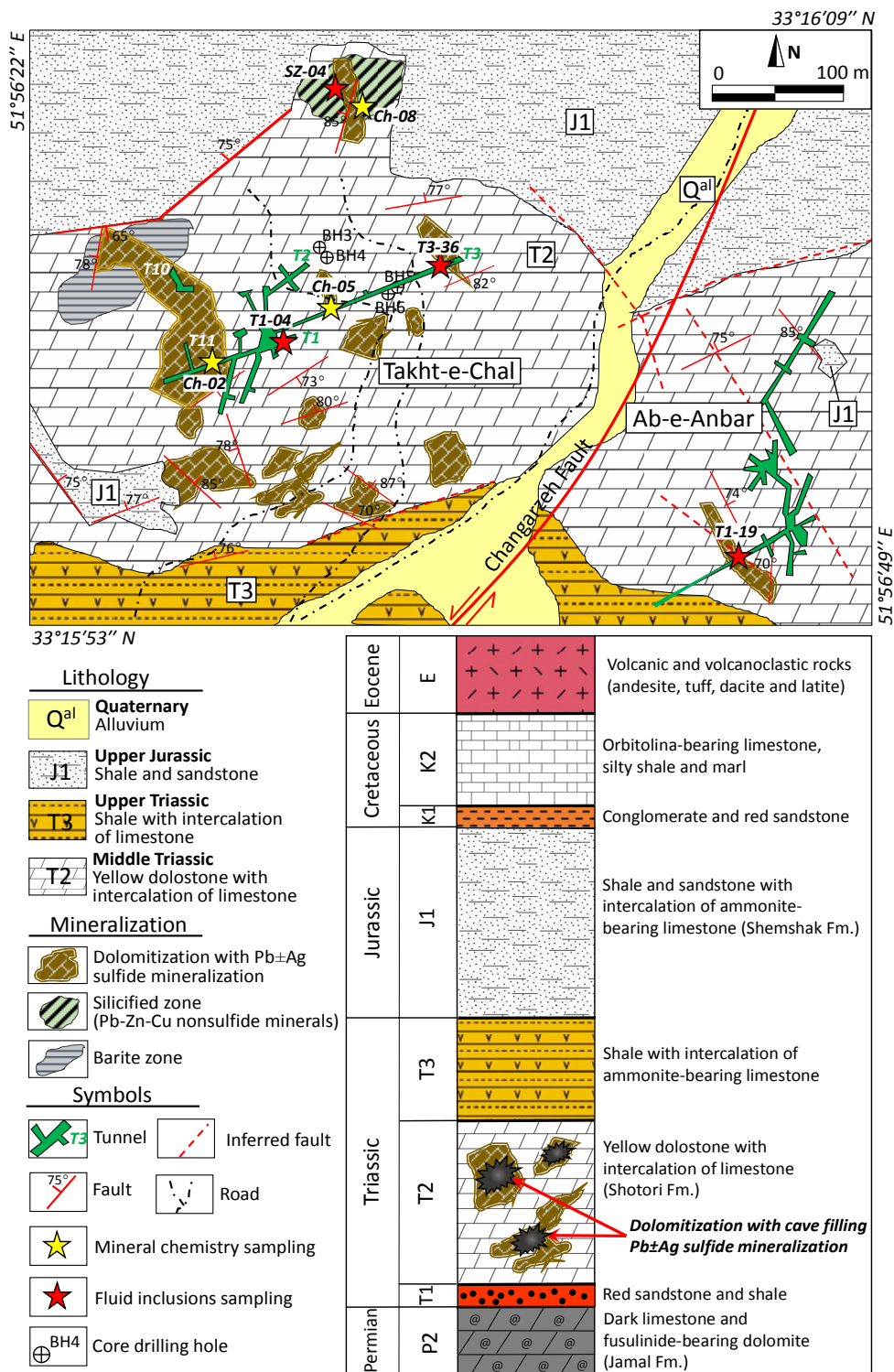
به‌منظور دستیابی به اهداف تعیین شده، مطالعات صحرایی شامل بررسی گسترش جانبی و قائم واحدهای سنگی در منطقه انجام شده است. پس از آن، تعداد ۵۳ نمونه سنگی از بخش‌های مختلف کانسار چنگرزه شامل واحدهای کربناته سنگ میزبان، کانسنگ فلزی و دگرسانی همراه، از تونل‌ها و

رخمون یافته در منطقه چنگرزه متعلق به سازند جمال با سن پرمین بوده که از دولستون و آهک‌های دولومیتی زرد تا خاکستری رنگ تشکیل شده است. توالی‌های سنگی تریاس بیش‌ترین گسترش را در منطقه دارند که به‌طور عمده شامل دولومیت‌های زرد و قهوه‌ای سازند شتری و آهک‌های شیلی و سیلتی سازند نایبند هستند. پس از واحدهای تریاس، شیل‌های زیتونی و خاکستری ژوراسیک پیشین (هم‌ارز سازند شمشک) بر روی سازندهای قبلی قرار گرفته‌اند. پس از آن، توالی آهک و آهک‌مانری کرتاسه پیشین به‌صورت دگرشیب بر روی سازندهای تریاس و ژوراسیک تشکیل شده است. هم‌چنین، در فاصله ۵ کیلومتری شمال‌خاوری معدن چنگرزه رخمونی از سنگ‌های آتشفشانی و پیروکلاستیک وجود دارد که متعلق به ائوسن بوده و ارتباط زمانی-مکانی با رخداد کانه‌زایی در کانسار چنگرزه ندارند. طبق شواهد زمین‌شناسی ساختاری، واحدهای سنگی رخمون یافته در منطقه چنگرزه اغلب در یک گستره‌ی جغرافیایی با راستای $NW-SE$ و هم‌راستا با واحدهای سنگی سامانه بزرگ کوهزاد زاگرس شکل گرفته‌اند. علاوه بر این، سامانه‌های گسلی ناحیه‌ای متعدد با عملکرد عادی و راستای $E-W$ و $NW-SE$ در ناحیه مورد بررسی وجود دارند که نقش مهمی در شکل‌گیری توپوگرافی، کنترل همبری لایه‌های رسوبی و ایجاد شرایط مناسب برای تکوین کانه‌زایی در منطقه ایفا کرده‌اند. گسل اصلی چنگرزه با راستای $NE-SW$ از انشعابات فرعی گسل‌های خاوری-باختری ناحیه‌ای از مهم‌ترین پدیده‌های تکتونیکی منطقه چنگرزه بوده که با ایجاد دره‌ی گسلی دو محدوده‌ی معدنی کوه آب انبار (زون خاوری) و تخت چال (زون باختری) را از یکدیگر تفکیک کرده است (شکل ۲). گسل اصلی چنگرزه با راستای NNE مهم‌ترین عارضه تکتونیکی موثر بر رخداد کانه‌سازی در منطقه چنگرزه است که گسل‌های فرعی زیادی به‌صورت رانده‌گی‌های میان‌بر^۱ از این گسل اصلی منشعب شده‌اند. در محدوده‌ی کوه تخت‌چال، راستای گسل‌ها $N40-60W$ با شیب NE و در محدوده‌ی کوه آب انبار راستای گسل‌ها $N17-62W$ با دو شیب NE و SW است. طبق مطالعات ساختاری، گسل‌هایی با راستای $NW-SE$ و شیب NE مهم‌ترین گسل‌های فرعی مرتبط با شکل‌گیری ماده‌ی معدنی در منطقه چنگرزه هستند (شکل ۳ الف و ب). بر اساس پیمایش‌های صحرایی و نقشه‌های زمین‌شناسی محلی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ (مجموعه معادن سرمک، ۱۳۸۸)، قدیمی‌ترین واحد سنگی رخمون یافته در منطقه چنگرزه متعلق به واحد آهک تیره و

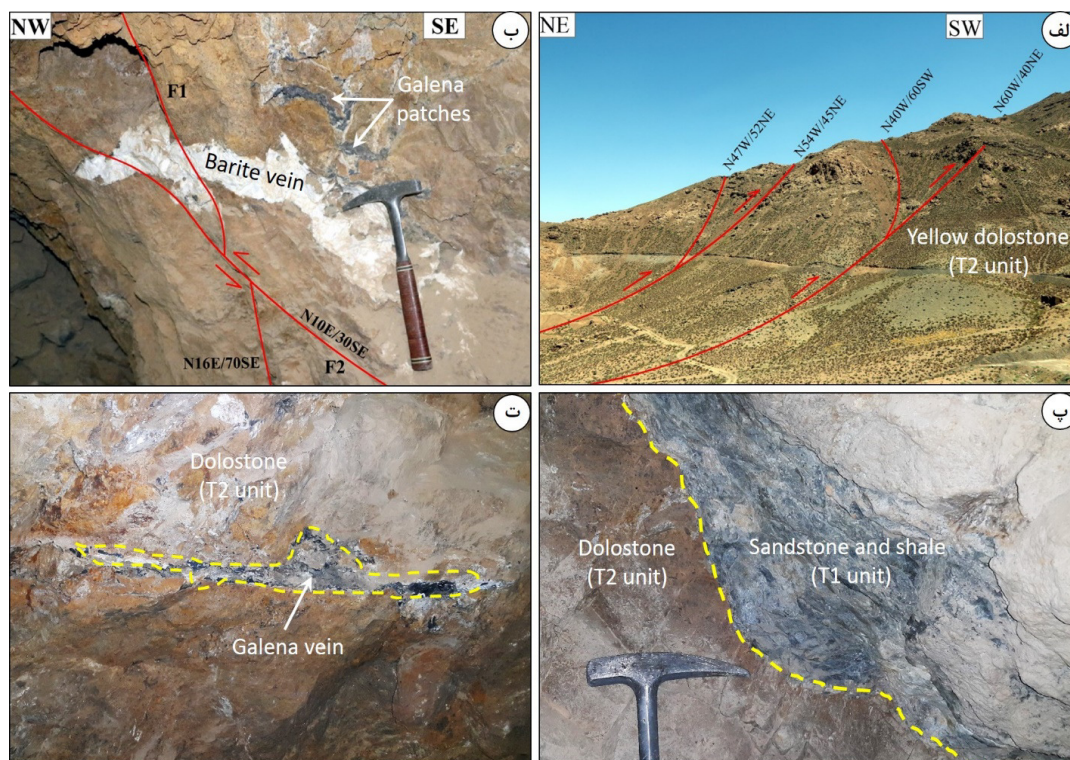
¹ Shortcut thrust

مدل Axioplan2 در آزمایشگاه سنگ‌شناسی دانشگاه بوعلی سینا (همدان)، انجام شد.

رخنمون‌های صحرایی، برداشت شد. مطالعات پتروگرافی بر روی ۳۳ برش نازک، ۱۳ مقطع صیقلی و ۷ مقطع نازک‌صیقلی با استفاده از میکروسکوپ‌های عبوری-بازتابی پلاریزان زایس



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ساده شده کانسار چنگرزه (با تغییرات از مجموعه معادن سرمک، ۱۳۸۸) به همراه ستون چینه‌شناسی ناحیه‌ای (برگرفته از زاهدی و رحمتی، ۱۳۸۲).



شکل ۳. تصاویر صحرایی از رخنمون واحدهای سنگی و گسل‌های کانسار چنگرزه. الف) انشعاب گسل‌های فرعی در غالب راندگی‌های میان بر (shortcut thrust) از گسل اصلی چنگرزه (دید به سمت جنوب‌باختر). ب) نمایی از قطع گسل $F1$ ($N10E/30SE$) توسط $F2$ ($N10E/30SE$) و کنترل کانه‌زایی باریت و گالن توسط آن‌ها (تونل سه). پ) رخنمون ماسه‌سنگ و شیل واحد $T1$ در کنار دولستون (واحد $T2$) (تونل یک). ت) رگه گالن در دولستون (واحد $T2$) (تونل سه)

مطالعه میانبارهای سیال به‌منظور تعیین پارامترهای دما ($^{\circ}C$)، شوری ($wt\% NaCl eq.$)، چگالی (g/cm^3) و فشار ($Kbar$)، بر روی کانه اسفالریت و باطله‌های کوارتز و کلسیت همراه کانه‌زایی، انجام شد. بدین منظور با در نظر گرفتن استانداردهای آزمایشگاهی، تعداد ۴ مقطع دو برصیقل با ضخامت ۱۲۰ تا ۱۵۰ میکرون، از کانی‌های ذکر شده تهیه شد. پس از مطالعه پتروگرافی میانبارهای سیال و تهیه تصاویر مناسب از آن‌ها، بررسی میکروترمومتری میانبارها توسط سکوی گرمایش-سرمایش لینکام مدل $THMS600$ با دامنه حرارتی بین ۱۹۶- تا $600^{\circ}C$ در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران (کرج)، انجام شد. کالیبراسیون سکو در مرحله گرمایش با دقت $0.6^{\circ}C \pm$ توسط نیترات سزیم (با نقطه ذوب $414^{\circ}C$) و در مرحله انجماد با دقت $0.2^{\circ}C \pm$ توسط ماده استاندارد $n-Hexane$ (با نقطه ذوب $94.3^{\circ}C$ -) انجام شده است. در نهایت پارامترهای شوری، چگالی و فشار توسط نرم‌افزارهای تخصصی $FLINCOR$ (براون، ۱۹۸۹) و $Fluid Package$ (بیکر، ۲۰۰۳)، محاسبه شدند. محاسبه فشار (برحسب بار) و دمای به دام افتادن میانبارها با استفاده از نرم‌افزار تحت اکسل

پس از مطالعه میکروسکوپی مقاطع، به منظور شناسایی کانی‌های دگرسان و ثانویه سرب و روی (کربناتی-اکسیدی)، تعداد ۱۰ نمونه پودر سنگ (با ابعاد ۷۵ میکرون) توسط فناوری پراش پرتو ایکس^۱ مدل فیلیپس $X'pert$ (مدت زمان جریان الکترونی ۳۰ دقیقه و لامپ کبالت)، در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران (کرج)، مورد طیف‌سنجی قرار گرفت. همچنین، پس از انجام مطالعات میکروسکوپی نوری و نسل‌بندی کانه‌های فلزی، تعداد ۳ مقطع نازک صیقلی پس از انجام اندود کربنی (با ضخامت تقریبی ۲۰۰ آنگستروم)، در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران (کرج) مورد تجزیه ریزکاو الکترونی^۲، قرار گرفت. فناوری ریزکاو الکترونی توسط دستگاه $Cameca SX100$ با جریان ۲۰ نانوآمپر (nA)، ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ تا ۲۵ کیلوولت، قطر باریکه‌ی الکترونی ۵ میکرون و زمان شمارش ۲۰ تا ۳۰ ثانیه، انجام شد. زاویه جهش ژئومتری پرتو ایکس دستگاه بین ۴۰ تا ۵۲ درجه و خطای تجزیه تقریباً ۰/۰۰۲ درصد وزنی، گزارش شده است.

¹ XRD
² EPMA

HOKIEFLINCS-H₂O-NaCl (استیله مک اینز و همکاران، ۲۰۱۱)، انجام شد.

کانه‌زایی و مراحل رخداد کانسار

همان‌طور که اشاره شد، کانسار سرب (± نقره) چنگرزه قدیمی‌ترین کانسار سرب ایران به روش‌های سنتی زیرزمینی و روباز مورد استخراج قرار گرفته است. سنگ میزبان کانسار شامل دولستون‌های گسلی منتسب به سازند شتری با سن تریاس میانی (واحد سنگی T2) می‌باشد که در دو محدوده‌ی خاوری (کوه آب انبار) و باختری (کوه تخت‌چال)، رخنمون دارد. این دو محدوده توسط گسل اصلی چنگرزه با راستای NNE و مولفه چپگرد از یکدیگر جدا شده‌اند (شکل ۲). کانه‌زایی در کانسار چنگرزه به دو صورت درون‌زاد (کانه‌زایی سولفیدی) و برون‌زاد (کانه‌زایی اکسیدی، کربناتی و سیلیکاتی)، وجود دارد. کانه‌زایی بخش درون‌زاد سولفیدی اغلب در بخش‌های زیرزمینی و تونل‌های منطقه مشاهده شد که شامل کانه اصلی گالن و کانه‌های فرعی اسفالریت، پیریت و سولفوسالت (سری تتراهدريت- تنانتیت)، هستند. کانه‌زایی برون‌زاد غیرسولفیدی نیز به‌طور وسیع به‌ویژه در بخش‌های سطحی کانسار مشاهده شد که شامل کانه‌های اکسیدی (هماتیت و گوتیت)، کربناتی (مالاکیت، اسمیت‌زونیت و سرروزیت) و سیلیکاتی (همی‌مورفیت)، هستند. کانی‌های آپاتیت، زیرکن و روتیل نیز به‌صورت کمیاب (کمتر از ۲ درصد) در نمونه‌ها مشاهده شد. کانی‌های کلسیت، دولومیت، کوارتز، باریت، ژپس و آراگونیت به‌عنوان مهم‌ترین باطله‌های همراه کانه‌زایی هستند. در کانسار چنگرزه سه تیپ کانسنگ دولومیتی، سیلیکاتی و باریتی به صورت عدسی شکل تا توده‌ای در بخش‌های مختلف رخنمون دارد (شکل ۲) که کانه‌زایی درون‌زاد سولفیدی اغلب با کانسنگ دولومیتی و باریتی و کانه‌زایی برون‌زاد غیرسولفیدی در بخش سیلیکاتی متمرکز است. دگرسانی‌های دولومیتی، سیلیسی و کلریتی مهم‌ترین دگرسانی‌های مشاهده شده در منطقه چنگرزه هستند. ساخت و بافت‌های برشی، پرکننده حفرات، رگه-رگچه‌ای و جان‌شینی به‌طور وسیع در بخش‌های زیرزمینی و تونل‌های استخراجی منطقه مشاهده شد.

طبق شواهد صحرایی و آزمایشگاهی، تشکیل کانسار چنگرزه طی چهار مرحله به شرح زیر صورت گرفته است (مراجعه شود به شکل‌های ۴ و ۵):

- **مرحله پیش از کانه‌زایی:** در این مرحله، پیریت‌های ریزبلور افشان به‌صورت آزاد یا ادخال (*Py-1*) در میزبان گالن (*Gn-1*)

تشکیل شدند (شکل ۴ الف و ب). دگرسانی دولومیتی با حضور دولومیت‌های میکریتی ریزبلور (*Dol-1*)، در این مرحله رخ داده است (شکل ۴ پ).

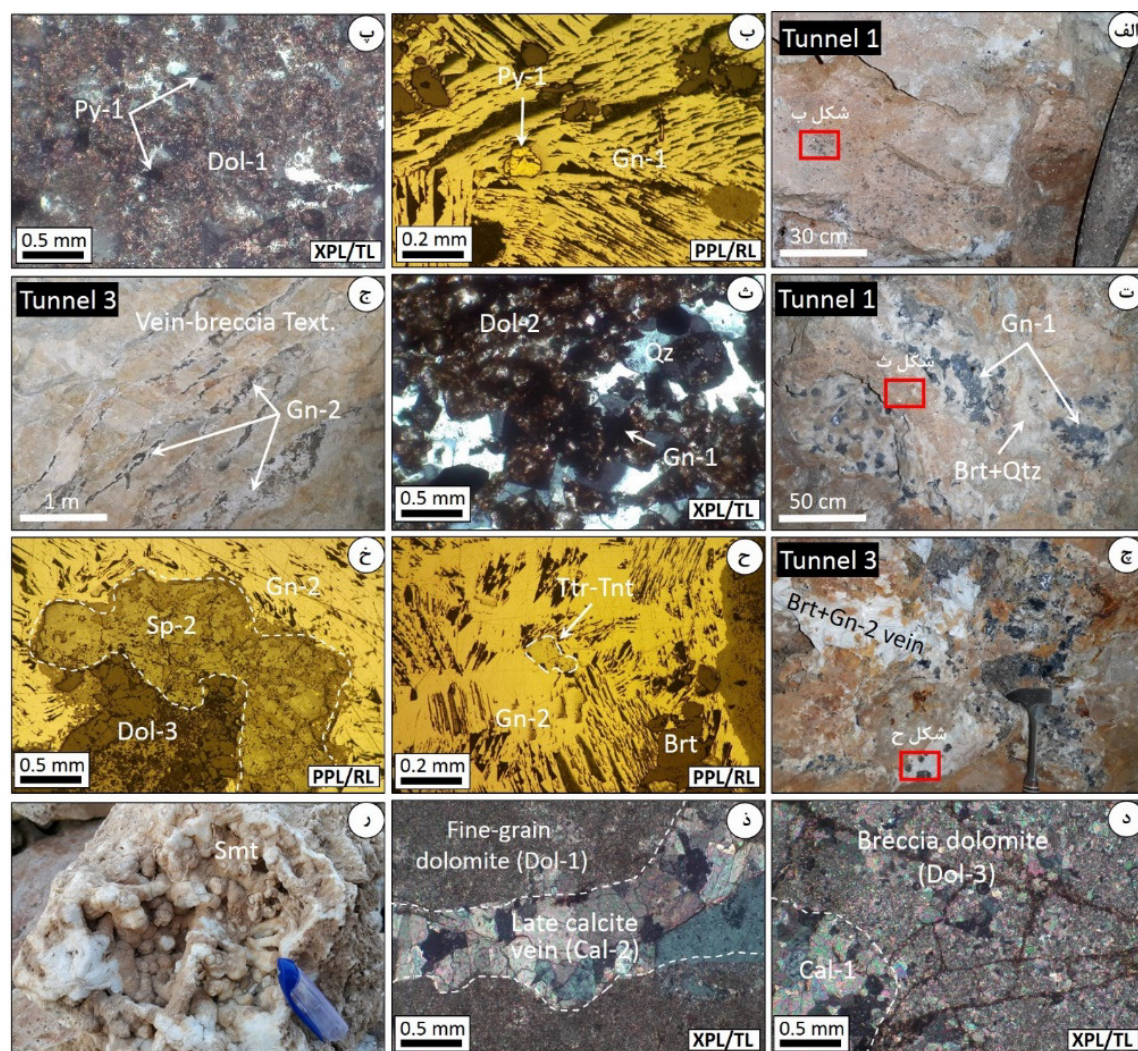
- **مرحله کانه‌زایی اصلی:** با دو زیر مرحله (*I*) کانه‌زایی افشان گالن نسل اول (*Gn-1*) (شکل ۴ ت) همراه ادخال‌های ریز اسفالریت (*Sp-1*) در میزبان باطله‌های باریت، کوارتز و دولومیت متوسط بلور (*Dol-2*) (شکل ۴ ث) و (*II*) کانه‌زایی رگه‌ای-برشی متشکل از گالن رگه‌ای نسل دوم (*Gn-2*) حاوی ادخال‌های میکرونی سولفوسالت‌های گروه فلهور (سری تتراهدريت- تنانتیت)، پیریت‌های خوش‌وجه (*Py-2*) و اسفالریت‌های درشت‌بلور (*Sp-2*)، به همراه باطله‌های کلسیت اولیه (*Cal-1*) و دولومیت برشی (*Dol-3*)، شکل گرفته است (شکل ۴ ج-د). دگرسانی سیلیسی در این مرحله همراه کانه‌زایی رخ داده است. کانی باطله ژپس به مقدار ناچیز در این مرحله شناسایی شدند.

- **مرحله پس از کانه‌زایی:** پس از تشکیل کانسنگ سولفیدی و مرحله اصلی کانه‌زایی، رگه‌های کلسیت تأخیری (*Cal-2*) به صورت فضا پرکن، مراحل کانه‌زایی قبلی را قطع کرده‌اند (شکل ۴ ذ). کانه‌های سولفیدی در این مرحله مشاهده نشد و به همراه رگه‌های کلسیت، کانی‌های باطله آراگونیت و کوارتز نیز مشاهده شد. دگرسانی کلریتی در این مرحله رخ داده است.

- **مرحله کانه‌زایی برون‌زاد یا غیرسولفیدی:** با حضور مجموعه کانی‌های غیرسولفیدی هماتیت، همی‌مورفیت، اسمیت‌زونیت، مالاکیت، گوتیت و سرروزیت، مشخص می‌شود (شکل ۴ ر) که به‌ویژه در سینه کارهای استخراجی روباز و رخنمون‌های سطحی منطقه قابل مشاهده است. بر اساس شواهد کانه‌زایی ارایه شده از قبیل مطالعات صحرایی، ساخت و بافت کانه‌زایی، روابط متقاطع میان کانه‌ها و شواهد میکروسکوپی، مراحل رخداد کانه‌زایی در کانسار چنگرزه به صورت توالی پاراژنتیک شکل ۵ نشان داده شده است.

کانی‌شناسی و شیمی کانه‌ها

طبق مطالعات کانه‌نگاری میکروسکوپی، گالن فراوان‌ترین کانه سولفیدی کانسار چنگرزه است که به همراه آن کانه‌های سولفیدی فرعی اسفالریت، پیریت و سولفوسالت‌های گروه فلهور (سری تتراهدريت- تنانتیت)، وجود دارد. همان‌طور که اشاره شد این کانه‌ها با نسل‌های مختلف در مرحله کانه‌زایی اصلی (شکل ۵) تشکیل شدند که خصوصیات پتروگرافی و شیمیایی آن‌ها در ادامه ذکر شده است:



شکل ۴. تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از مراحل مختلف کانه‌زایی و ساخت و بافت ماده معدنی در کانسار چنگرزه. الف) پیریت‌های افشان و گالن در دیواره تونل ۱، ب) ادخال ۰/۱ میلی‌متری پیریت (Py-1) در میزبان گالن (Gn-1)، پ) ذرات پیریت افشان (Py-1) در زمینه دولومیت‌های ریزبلور (Dol-1)، ت) گالن‌های افشان (Gn-1) همراه باطله‌های کوارتز و باریت در تونل ۱، ث) کانه‌زایی گالن افشان (Gn-1) همراه دولومیت متوسط بلور (Dol-2) و کوارتز، ج و چ) کانه‌زایی رگه‌ای - برشی در تونل ۳، ح) ادخال‌های تتراهدریت - تنانیت در میزبان گالن (Gn-2)، خ) همراهی گالن و اسفالریت در کنار دولومیت برشی (Dol-3)، د) دولومیت برشی همراه کلسیت‌های اولیه (Cal-1)، ذ) رگه کلسیت تأخیری (Cal-2) در زمینه دولومیت ریزبلور (Dol-1) و ر) نمونه صحرایی از بافت کلوform یا قله‌های شکل اسمیت‌زونیت. علامه اختصاری کانی‌ها (اقتباس از ویتنی و اونز، ۲۰۱۰) شامل: گالن Gn، پیریت Py، اسفالریت Sp، باریت Brt سری تتراهدریت - تنانیت Tr-Tnt، دولومیت Dol، کلسیت Cal، اسمیت‌زونیت Smt، کوارتز Qz. تصاویر میکروسکوپی (XPL - نور پلاریزه متقاطع، PPL - نور پلاریزه عادی، RL - نور بازتابی و TL - نور عبوری).

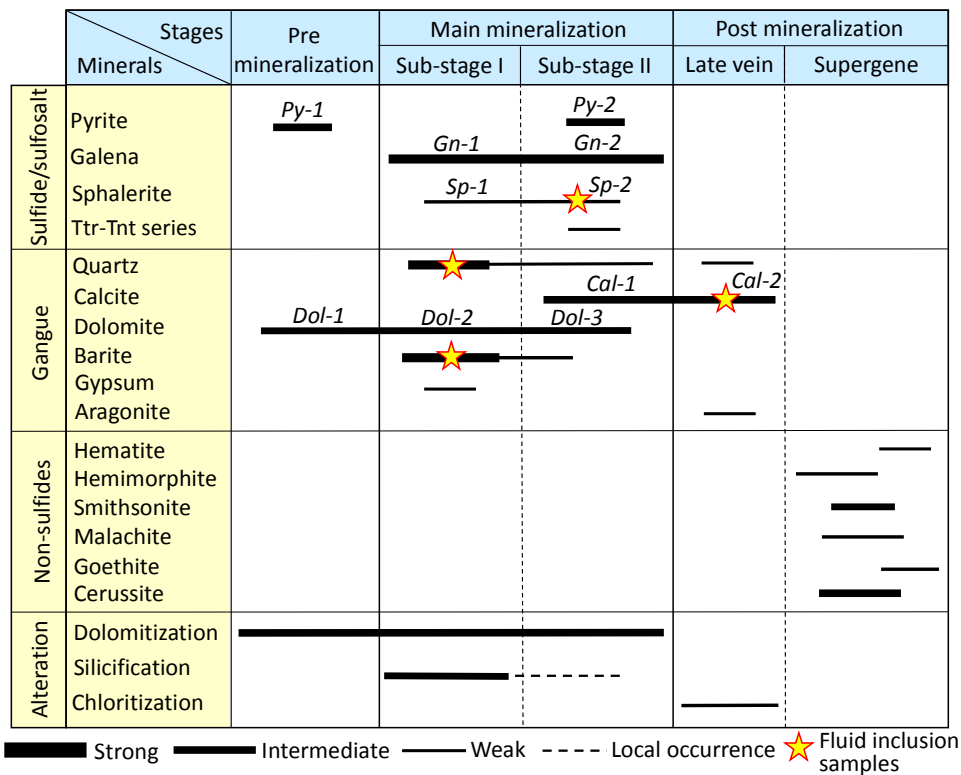
درصدوزنی در ۱۰ نقطه، در تغییر است. به این ترتیب در ترکیب *Gn-1* مقادیر بیسموت (بین ۰/۲۳ تا ۰/۴۶ درصد وزنی)، روی (بین ۰/۰۹ تا ۰/۵۲ درصد وزنی)، نقره (بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۸ درصد وزنی)، کادمیوم (زیر حد تشخیص تا ۰/۱۲ درصد وزنی) و آهن (بین ۰/۰۸ تا ۰/۲۱ درصد وزنی)، آشکار شد (جدول ۱). هم‌چنین، در ترکیب *Gn-2* مقادیر بیسموت (بین ۰/۳۲ تا ۰/۵۵ درصد وزنی)، مس (زیر حد تشخیص تا ۰/۶۲ درصد وزنی)، نیکل (زیر حد تشخیص تا ۰/۳۵ درصد

گالن: با رنگ بازتابی سفید متمایل به خاکستری روشن، به صورت نیمه‌شکل‌دار تا خوش‌وجه و دارای رخ مثلثی در مطالعات میکروسکوپی مشاهده شد. گالن در کانسار چنگرزه طی دونسل شامل گالن‌های افشان نسل اول (*Gn-1*) با ابعاد ۰/۵ تا ۱۰ میلی‌متر و گالن‌های رگه‌ای نسل دوم (*Gn-2*) در مرحله کانه‌زایی اصلی، شناسایی شد (شکل ۴ الف و ج). بر اساس نتایج *EPMA* مقادیر سرب در ترکیب گالن‌های کانسار چنگرزه بین ۸۴/۲۰ تا ۸۶/۶۴ درصدوزنی (متوسط ۸۵/۴۲

(متوسط ۱/۲۶ درصد وزنی)، آشکار شد. به این ترتیب در ترکیب *Sp-1* مقادیر بیسموت (بین ۰/۰۳ تا ۰/۱۷ درصد وزنی)، سرب (زیر حد تشخیص تا ۱/۰۲ درصد وزنی)، نقره (زیر حد تشخیص تا ۱/۶۵ درصد وزنی)، مس (زیر حد تشخیص تا ۱/۷۸ درصد وزنی)، کادمیوم (۰/۲۸ تا ۱/۱۱ درصد وزنی) و آهن (بین ۰/۶۶ تا ۱/۱۶ درصد وزنی)، آشکار شد (جدول ۱). علاوه بر این، در ترکیب *Sp-2* مقادیر بیسموت (بین ۰/۰۳ تا ۰/۲۱ درصد وزنی)، سرب (زیر حد تشخیص تا ۰/۱۲ درصد وزنی)، کادمیوم (۰/۴۳ تا ۰/۸۷ درصد وزنی)، نقره (زیر حد تشخیص تا ۰/۰۹ درصد وزنی) و آهن (بین ۱/۱۳ تا ۲/۳۲ درصد وزنی)، آشکار شد (جدول ۱). همچنین، نسبت *Zn/Cd* بین ۵۹/۳ تا ۲۲۳/۹ و محتوای *FeS mol%* بین ۱/۱۴ تا ۳/۸۸ درصد مولار، در ترکیب اسفالریت‌های کانسار چنگرزه بدست آمد.

وزنی)، نقره (بین ۰/۳۵ تا ۱/۴۱ درصد وزنی) و آهن (بین ۰/۰۸ تا ۰/۳۵ درصد وزنی)، آشکار شد (جدول ۱). همانطور که مشاهده می‌شود وجود ادخال‌های اسفالریت و سولفوسالت‌های گروه فهلور نقش موثری در ترکیب شیمیایی گالن‌های نسل اول و دوم داشته‌اند.

اسفالریت: با رنگ بازتابی خاکستری روشن و بازتابش داخلی قرمز تا قهوه‌ای اغلب به‌صورت بی‌شکل در دونسل شامل ادخال‌های ریزبلور اسفالریت (*Sp-1*) (ابعاد کمتر از ۰/۲ میلی‌متر) در میزبان گالن (*Gn-1*) و اسفالریت‌های درشت بلور (*Sp-2*) (ابعاد ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر)، در مرحله کانه‌زایی اصلی، شناسایی شد (شکل‌های ۴ و ۵). براساس نتایج *EPMA* بر روی تعداد ۹ نقطه، مقادیر روی در ترکیب اسفالریت‌های کانسار چنگرزه بین ۶۲/۶۱ تا ۶۷/۷۷ درصد وزنی (متوسط ۶۵/۳۴ درصد وزنی) و آهن بین ۰/۶۶ تا ۲/۳۲ درصد وزنی



شکل ۵. توالی پاراژنتیک و مراحل کانه‌زایی در کانسار چنگرزه. حروف اختصاری کانی‌ها مشابه شکل ۴ است.

پیریت‌های ریزبلور در مرحله پیش از کانه‌زایی و پیریت‌های خوش‌وجه در مرحله کانه‌زایی اصلی، مشاهده شد (شکل ۵). بر اساس نتایج *EPMA* بر روی تعداد ۱۰ نقطه، مقادیر آهن در ترکیب پیریت‌های کانسار چنگرزه بین ۴۴/۱۴ تا ۴۶/۲۳ درصدوزنی (متوسط ۴۵/۳۰ درصدوزنی)، ثبت شد. به این

پیریت: با رنگ بازتابی زرد روشن و برجستگی بالا در دو نسل شامل، (۱) پیریت‌های ریزبلور افشان به‌صورت آزاد یا ادخال *Py-1* (با ابعاد کمتر از ۰/۲ میلی‌متر در میزبان گالن (*Gn-1*) (شکل ۴ب و پ) و (۲) پیریت‌های خوش‌وجه (*Py-2*) با ابعاد ۰/۳ تا ۰/۶ میلی‌متر، در مطالعات میکروسکوپی شناسایی شد.

۰/۳۱ درصدوزنی)، آرسنیک (۰/۲۳ تا ۰/۵۴ درصدوزنی) و مس (بین ۰/۲۳ تا ۰/۵۲ درصدوزنی)، آشکار شد (جدول ۱). همچنین، مقادیر نیکل بین ۸۰۰ تا ۲۴۰۰ گرم در تن و کبالت بین ۱۰۰ تا ۶۰۰ گرم در تن در ترکیب پیریت‌های کانسار چنگرزه آشکار شد که بر این اساس، نسبت Co/Ni در آن‌ها بین ۰/۱۲ تا ۰/۲۵، بدست آمد (جدول ۱).

ترتیب در ترکیب Py-1 مقادیر بیسموت (زیرحد تشخیص تا ۰/۲۱ درصدوزنی)، سرب (بین ۰/۲۴ تا ۰/۵۷ درصدوزنی)، آنتیموان (زیرحدتشخیص تا ۰/۶۸ درصدوزنی)، مس (بین ۰/۴۱ تا ۱/۸۳ درصدوزنی) و آرسنیک (۰/۳۴ تا ۰/۷۱ درصدوزنی)، آشکار شد (جدول ۱). در ترکیب Py-2 نیز مقادیر سرب (بین ۰/۰۸ تا ۰/۳۱ درصدوزنی)، روی (بین ۰/۰۹ تا

جدول ۱. تمرکز عناصر مختلف در ترکیب کانه‌های سولفیدی گالن، پیریت، اسفالریت و سری تتراهدریت-تنانتیت در کانسار چنگرزه توسط EPMA مقادیر بر حسب درصد وزنی (wt%) برای مشاهده موقعیت کانی‌ها به توالی پارازنتیک شکل ۵ مراجعه شود.

Samples	Stage	Mineral	Zn	S	Fe	Co	Ni	Cu	Ga	As	Ag	Cd	Sb	Pb	Bi	Total
Ch-02	Pre-mineralization	Py-1	0.03	52.62	45.16	0.06	0.12	0.43	0.01	0.71	bdl	0.05	bdl	0.57	0.16	99.92
		Py-1	0.01	52.15	45.27	0.02	0.15	0.41	bdl	0.43	bdl	bdl	bdl	0.33	0.21	98.98
		Py-1	0.02	52.78	45.69	0.02	0.24	0.42	0.03	0.34	0.04	0.02	bdl	0.48	0.21	100.29
		Py-1	bdl	51.38	44.14	0.01	0.08	1.83	bdl	0.55	bdl	bdl	0.68	0.35	0.08	99.10
		Py-1	bdl	53.11	44.45	0.03	0.15	0.54	0.01	0.63	0.02	0.02	0.28	0.24	bdl	99.48
Ch-08	Main mineralization (sub-stage I)	Gn-1	0.52	13.23	0.08	bdl	0.13	0.01	bdl	0.02	0.04	0.03	bdl	84.92	0.45	99.43
		Gn-1	0.13	12.23	0.21	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.02	0.12	0.20	86.64	0.36	99.94
		Gn-1	0.09	13.47	0.08	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	0.01	0.07	bdl	85.47	0.23	99.45
		Gn-1	0.28	13.25	0.11	bdl	0.05	bdl	bdl	0.22	0.02	bdl	bdl	85.41	0.46	99.58
		Gn-1	0.36	12.42	0.08	bdl	0.03	bdl	bdl	0.43	0.08	0.08	bdl	85.13	0.37	98.55
		Sp-1	66.77	31.61	0.75	bdl	bdl	bdl	0.02	0.04	0.05	0.82	0.02	0.18	0.03	100.29
		Sp-1	65.84	31.85	1.16	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	1.11	bdl	0.15	0.15	100.29
		Sp-1	66.12	32.72	1.07	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	0.03	0.44	bdl	0.18	0.17	100.76
		Sp-1	62.68	32.63	0.66	bdl	bdl	1.78	bdl	bdl	1.65	0.28	bdl	1.02	0.05	100.75
		Sp-1	65.84	32.04	0.95	bdl	bdl	0.08	bdl	bdl	bdl	0.64	bdl	bdl	0.12	99.67
Ch-05	Main mineralization (sub-stage II)	Gn-2	0.07	12.90	0.15	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	1.08	0.05	bdl	84.55	0.41	99.21
		Gn-2	bdl	12.82	0.35	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	0.51	0.02	bdl	86.03	0.33	100.07
		Gn-2	0.02	12.96	0.21	bdl	0.26	bdl	bdl	bdl	1.03	bdl	0.04	84.20	0.41	99.13
		Gn-2	0.04	12.60	0.08	bdl	0.35	bdl	bdl	bdl	0.35	bdl	bdl	86.05	0.55	100.02
		Gn-2	bdl	10.81	0.10	bdl	0.13	0.62	bdl	bdl	1.41	bdl	bdl	85.88	0.32	99.27
		Py-2	0.31	52.23	45.47	0.03	0.13	0.31	0.04	0.33	bdl	bdl	bdl	0.23	0.01	99.09
		Py-2	0.28	52.42	45.74	0.02	0.17	0.52	0.03	0.54	bdl	bdl	bdl	0.28	bdl	100.00
		Py-2	0.09	53.02	46.12	0.01	0.09	0.23	bdl	0.47	bdl	bdl	bdl	0.31	0.03	100.37
		Py-2	0.21	52.32	46.23	0.04	0.11	0.33	0.02	0.23	bdl	bdl	bdl	0.08	0.02	99.59
		Sp-2	65.44	31.54	1.32	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	0.03	0.87	bdl	0.11	0.10	99.44
		Sp-2	65.05	32.12	1.54	0.01	0.05	bdl	bdl	bdl	0.03	0.43	bdl	0.12	0.08	99.43
		Sp-2	62.61	32.87	2.32	0.01	0.02	bdl	bdl	0.04	0.09	0.54	bdl	0.08	0.03	98.61
		Sp-2	67.77	31.40	1.13	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	0.55	0.01	bdl	0.21	101.08
		Tr-Tnt	8.26	51.81	1.43	bdl	bdl	21.98	bdl	7.51	4.38	0.03	4.46	0.23	0.11	100.20
		Tr-Tnt	3.50	52.49	2.56	bdl	bdl	22.83	bdl	8.57	5.13	0.17	4.80	0.29	0.09	100.43
		Tr-Tnt	4.23	51.19	1.09	bdl	bdl	23.88	0.03	9.31	2.06	0.10	4.02	3.32	0.05	99.28
		Tr-Tnt	5.08	53.42	1.32	bdl	bdl	22.84	bdl	9.42	3.51	0.09	4.13	0.20	0.10	100.11
		Tr-Tnt	5.39	53.20	0.81	bdl	bdl	22.82	0.01	9.41	4.04	0.12	4.11	0.26	0.10	100.27
		Tr-Tnt	4.21	52.65	0.91	bdl	bdl	22.17	0.04	9.08	5.32	0.04	5.39	0.09	0.07	99.97
		Tr-Tnt	3.09	52.52	2.34	bdl	bdl	23.29	bdl	8.54	5.87	0.08	4.11	0.31	0.14	100.29
Tr-Tnt	4.78	54.17	1.13	bdl	bdl	22.82	bdl	7.72	5.39	0.01	3.32	0.38	0.29	100.01		
Tr-Tnt	6.47	54.62	0.76	bdl	bdl	23.56	0.02	2.49	4.14	0.10	8.40	0.21	0.15	100.92		
Tr-Tnt	4.33	52.31	0.98	bdl	bdl	24.11	bdl	2.63	6.11	0.03	9.01	0.30	0.05	99.86		
Tr-Tnt	5.69	51.27	1.04	bdl	bdl	26.38	0.01	2.51	6.16	0.04	7.37	0.43	bdl	100.90		
Tr-Tnt	4.88	52.19	1.21	bdl	bdl	23.18	bdl	3.16	7.08	0.01	7.72	0.30	0.17	99.90		

Abbreviations: Gn-1= disseminated galena, Gn-2= galena late vein, Tr-Tnt= tetrahedrite-tennantite series, Py-1= pyrite inclusion in galena, Py-2= euhedral pyrite, Sp-1= sphalerite inclusion in galena, Sp-2= coarse-grain sphalerite. bdl= below detection limit.

B= عناصر نقره و مس، C= عناصر آهن و روی و بطور ناچیز سرب، جیوه، کادمیوم و منگنز، X= عناصر آنتیموان و آرسنیک و به‌ندرت بیسموت و تلور، Y= عناصر گوگرد و سلنیوم در ظرفیت چهارگانه و Z= عناصر گوگرد و سلنیوم در ظرفیت هشت‌گانه، شناخته می‌شود؛ همانند

سری تتراهدریت-تنانتیت: به عنوان کانه سولفیدی کمیاب به‌صورت ادخال (ابعاد کمتر از ۰/۲ میلی‌متر) در میزبان گالن رگه‌ای (Gn-2)، مرتبط با کانه‌زایی مرحله اصلی، شناسایی شد (شکل ۴). این سری کانیایی با فرمول عمومی $A_6(B,C)_6X_4Y_{12}Z$ (جایگاه A= عناصر نقره و مس،

گرفتند. میانبرهای مشاهده شده اغلب دارای ظاهر دوکی شکل، کشیده، بی‌شکل و کروی هستند. هم‌چنین، پدیده‌های باریک‌شدگی^۴ و نشت^۵ نیز طی مطالعات پتروگرافی مشاهده شد که مورد دماسنجی قرار نگرفت. بر پایه رده‌بندی شفرد و همکاران (شفرد و همکاران، ۱۹۸۵)، میانبرهای سیال در کانسار چنگرزه به ترتیب فراوانی شامل دوفازی غنی از مایع (LV-type)، تک فازی مایع (L-type)، دوفازی غنی از بخار (VL-type) و تک فازی بخار (V-type) هستند. علاوه بر این، شواهدی از وجود میانبرهای دارای فاز جامد هالیت یا حاوی فاز کربنیک مشاهده نشد. میانبرهای دوفازی غنی از مایع اغلب از لحاظ تجمعی همراه با میانبرهای تک فاز مایع مشاهده شدند (شکل ۶).

ریزدماسنجی

مطالعات ریزدماسنجی در کانسار چنگرزه با هدف دستیابی به پارامترهای دمای همگن‌شدن نهایی، شوری، چگالی و فشار در میانبرهای سیال به دام افتاده در مراحل مختلف کانه‌زایی انجام شده که نتایج آن در جدول ۲ و نمودارهای هیستوگرام شکل ۷ ارائه شده است. در ادامه خصوصیات ریزدماسنجی مراحل کانه‌زایی در کانی‌های مختلف به تفکیک ارائه شده است:

کانه‌زایی افشان مرحله اصلی (Sub-stage I)

کوارتز (نمونه Ch-TI-04 از تونل T1): طبق شواهد پتروگرافی، سه نوع میانبر LV-type، VL-type و L-type در نمونه‌های کوارتز کانسار چنگرزه تشخیص داده شد. بر اساس نتایج ریزدماسنجی، مقادیر $T_{m_{ice}}$ و $T_{m_{LV}}$ در میانبرهای LV-type (تعداد ۱۳ اندازه‌گیری) به ترتیب بین ۱۴۶ تا ۱۷۴ °C (متوسط ۱۶۰ °C) و ۱۰۷- تا ۱۴۲ °C- بدست آمد. این مقادیر معادل شوری بین ۱۴/۷ تا ۱۸/۰ (متوسط ۱۶/۴) درصد معادل نمک‌طعام و چگالی ۱/۰۲ تا ۱/۰۴ g/cm³ است (شکل ۷ الف). مقادیر $T_{m_{VL}}$ میانبرهای سیال VL-type (تعداد ۷ اندازه‌گیری) نیز بین ۱۸۲ تا ۱۹۵ °C (متوسط ۱۸۸ °C) و تغییرات $T_{m_{ice}}$ در آن‌ها بین ۹/۲- تا ۱۲/۵ °C- معادل شوری ۱۳/۱ تا ۱۶/۴ (متوسط ۱۵/۰) درصد معادل نمک‌طعام، بدست آمد (جدول ۲). چگالی این میانبرها حدود ۰/۹۹ g/cm³ است. میانبرهای L-type به دلیل تک فازی

(Cu,Ag)₆(Cu,Ag,Fe,Zn,Pb, etc.)₆(Sb,As,Bi,Te)₄(S,Se)₁₃ (مولو و همکاران، ۲۰۰۸؛ جورج و همکاران، ۲۰۱۷). بر اساس نتایج EPMA بر روی تعداد ۱۲ نقطه از این سری در کانسار چنگرزه، دو قطب غنی از آرسنیک یا تنانتیت (با فرمول تجربی $Cu_{5.7}[Cu_{3.8}(Fe,Zn)_{2.2}]As_{3.8}S_{13.3}$) و غنی از آنتیموان یا تتراهدريت (با فرمول تجربی $Cu_{5.7}[Cu_{4.04}(Fe,Zn)_{2.2}]Sb_{4.1}S_{13.1}$)، با احتساب مقادیر عنصری میانگین، شناسایی شد. به‌طور کلی، مقادیر مس در ترکیب سری تتراهدريت-تنانتیت کانسار چنگرزه، بین ۲۲/۰ تا ۲۶/۳۸ درصد وزنی (متوسط ۲۳/۳۲ درصد وزنی)، در تغییر است. علاوه بر این، مقادیر بیسموت (زیرحد تشخیص تا ۰/۲۹ درصد وزنی)، سرب (بین ۰/۰۹ تا ۳/۳۲ درصد وزنی)، آنتیموان (بین ۳/۳۲ تا ۹/۰۱ درصد وزنی)، نقره (بین ۲/۰۶ تا ۷/۰۸ درصد وزنی)، آرسنیک (بین ۲/۵۰ تا ۹/۴۲ درصد وزنی)، روی (بین ۳/۰۹ تا ۸/۲۶ درصد وزنی) و آهن (۰/۷۶ تا ۲/۵۶ درصد وزنی)، در آن آشکار شد (جدول ۱). نسبت $Sb/(Sb + As)$ بین ۰/۳۰ تا ۰/۷۷ و نسبت $Fe/(Fe + Zn)$ بین ۰/۱۱ تا ۰/۴۳ در کانی‌های سری تتراهدريت-تنانتیت کانسار چنگرزه بدست آمد.

میانبرهای سیال

پتروگرافی و توزیع فضایی میانبرها

مطالعه میانبرهای سیال در کانسار چنگرزه با هدف تعیین خصوصیات فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌ساز و تخمین شرایط فشار-دمای رخداد ذخیره، انجام شده است. به این منظور، مطالعات پتروگرافی و ریزدماسنجی بر روی میانبرهای سیال کانی‌های باریت و کوارتزهای مرتبط با کانه‌زایی افشان^۱، اسفالریت‌های درشت‌بلور مرتبط با کانه‌زایی رگه‌ای-برشی^۲ و کلسیت‌های رگه‌ای مرحله پس از کانه‌زایی، صورت گرفت (موقعیت این کانی‌ها در توالی پاراژنتیک شکل ۵ نشان داده شده است). مطالعه میانبرهای سیال مراحل کانه‌زایی دیگر با توجه به ابعاد بسیار ریز میانبرها یا عدم وجود کانی باطله مناسب میسر نبود. با در نظر گرفتن مفهوم بنیادی اجتماع میانبرهای سیال^۳ توسط رودر (رودر، ۱۹۸۴) که طی آن میانبرها در یک زمان و تحت شرایط مشابه در ساختمان بلور به‌صورت اولیه به دام افتاده‌اند، در کانسار چنگرزه میانبرهایی با ابعاد ۵ تا ۳۰ میکرون مورد آزمایش میکروتومتری قرار

¹ Sub-stage I

² Sub-stage II

³ Fluid Inclusions Assemblage

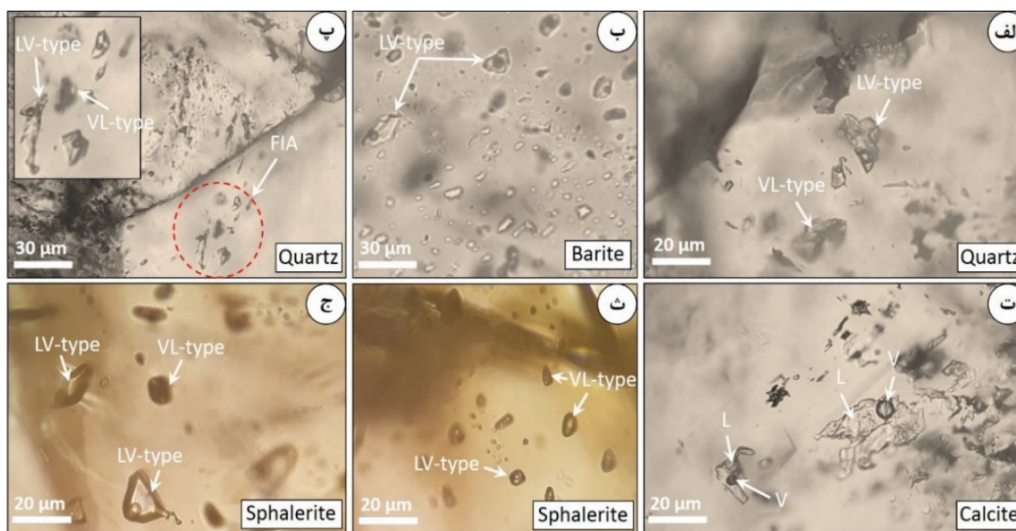
⁴ Necking down

⁵ Leakage

166°C و تغییرات $T_{m_{ice}}$ بین 127 تا 157°C بدست آمد. این مقادیر معادل شوری $16/6$ تا $19/2$ (متوسط $18/0$) درصد معادل نمک‌طعام و چگالی بین $1/02$ تا $1/05\text{ g/cm}^3$ است (شکل ۷ الف). همچنین، میانبرهای L -type و V -type به دلیل تک فازی بودن مورد مطالعات ریزدماسنجی قرار نگرفت. تغییرات دمای یوتکتیک (Te) در میانبرهای باریت بین 34 تا 41°C (متوسط 38°C) ثبت شد که نشان دهنده وجود سیستم $H_2O-KCl-FeCl_2-MgCl_2$ دیرینه است (ون دن کرخوف و هین، ۲۰۰۱). فشار محاسبه شده در میانبرهای میزبان باریت بین $3/8$ تا $9/7$ بار در تغییر است (جدول ۲).

بودن مورد مطالعات ریزدماسنجی قرار نگرفت. تغییرات دمای یوتکتیک (Te) در میانبرهای کوارتز بین 31 تا 38°C (متوسط 35°C) ثبت شد که نشان‌دهنده تشکیل این میانبرها از یک سیستم $H_2O-NaCl-FeCl_2-MgCl_2$ دیرینه است (ون دن کرخوف و هین، ۲۰۰۱). فشار محاسبه شده در میانبرهای میزبان کوارتز بین $4/5$ تا $11/1$ بار در تغییر است (جدول ۲).

باریت (نمونه $Ch-T3-36$ از تونل $T3$): طبق شواهد پتروگرافی، سه نوع میانبر LV -type، L -type و V -type در نمونه‌های باریت کانسار چنگرزه مشاهده شد که بر اساس نتایج ریزدماسنجی، تغییرات Th_{LV} میانبرهای LV -type (تعداد ۱۳ اندازه‌گیری) بین 140 تا 192°C (متوسط



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی میانبرهای سیال در کانی‌های مختلف کانسار چنگرزه. الف) اجتماع میانبرهای LV -type و VL -type در میزبان کوارتز مرتبط با کانه‌زایی افشان (Sub -stage I)، ب) ردیفی از میانبرهای سیال LV -type در میزبان باریت مرتبط با کانه‌زایی افشان (Sub -stage I)، پ) اجتماع میانبرهای سیال LV -type و کمتر VL -type در میزبان کوارتز مرتبط با کانه‌زایی افشان (Sub -stage I)، ت) حضور میانبرهای سیال LV -type در میزبان کلسیت تأخیری (Cal -2)، ث و ج) اجتماع میانبرهای سیال LV -type و VL -type در میزبان اسفالریت مرتبط با کانه‌زایی رگه‌ای-برشی (Sub -stage II). برای افزایش شفافیت، تصاویر پتروگرافی با استفاده از عدسی شیئی $100\times$ در حالت روغنی ($immersion$) تهیه شده است.

$22/2$) درصد معادل نمک‌طعام و چگالی بین $0/98$ تا $1/18\text{ g/cm}^3$ است (شکل ۷ ب). مقادیر Th_{VL} میانبرهای VL -type (تعداد ۶ اندازه‌گیری) نیز بین 195 تا 224°C (متوسط 210°C) و تغییرات $T_{m_{ice}}$ در آن‌ها بین $17/1$ تا $20/2^{\circ}\text{C}$ معادل شوری $20/3$ تا $22/5$ (متوسط $21/4$) درصد معادل نمک‌طعام، بدست آمد (جدول ۲). چگالی این میانبرها نیز بین $1/04$ تا $1/05\text{ g/cm}^3$ در تغییر است. تغییرات دمای یوتکتیک (Te) در میانبرهای اسفالریت بین 45 تا 57°C

کانه‌زایی رگه‌ای-برشی مرحله اصلی (Sub -stage II):

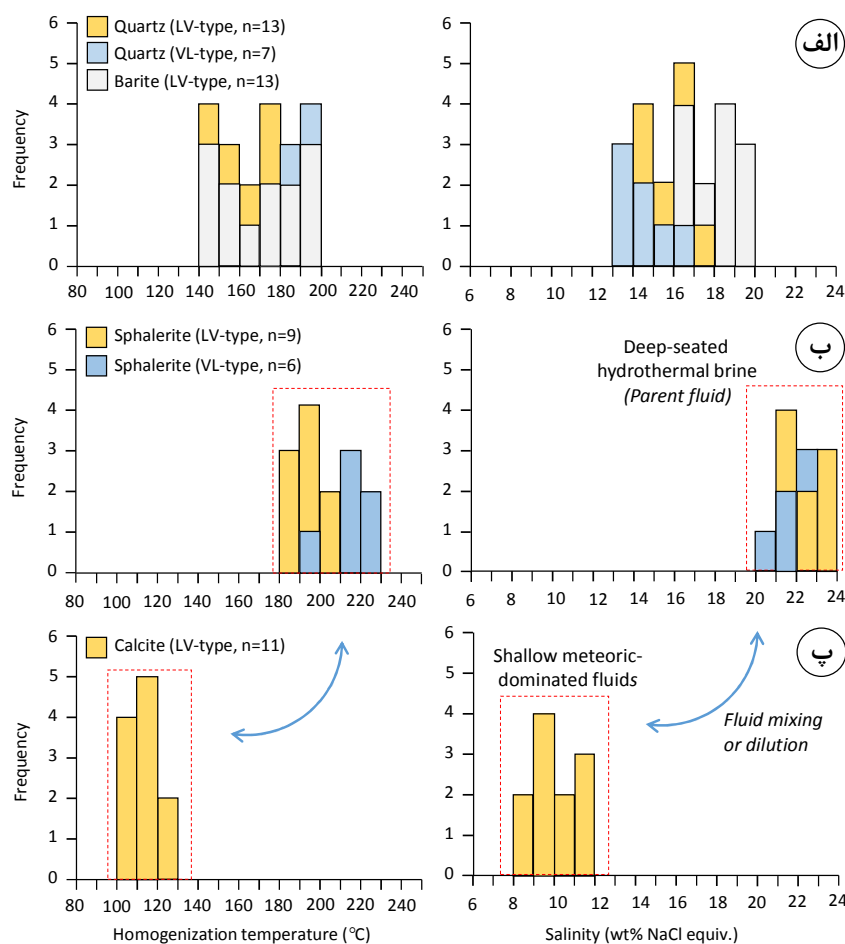
اسفالریت (نمونه $Ch-T1-19$ از تونل $T1$): طبق شواهد پتروگرافی، دو نوع میانبر LV -type و VL -type در میزبان اسفالریت‌های درشت بلور (Sp -2) کانسار چنگرزه مشاهده شد. بر اساس نتایج ریزدماسنجی، تغییرات Th_{LV} و $T_{m_{ice}}$ میانبرهای LV -type (تعداد ۹ اندازه‌گیری) به ترتیب بین 187 تا 208°C (متوسط 198°C) و $18/4$ تا $21/1^{\circ}\text{C}$ بدست آمد. این مقادیر معادل شوری $21/3$ تا $23/1$ (متوسط

مقادیر Tm_{ice} و Th_{LV} در میانبراهای *LV-type* (تعداد ۱۱ اندازه‌گیری) به ترتیب بین ۱۰۵ تا ۱۲۲ °C (متوسط ۱۱۴ °C) و ۵/۷ تا ۸/۲ °C بدست آمد. این مقادیر معادل شوری بین ۸/۸ تا ۱۲/۰ (متوسط ۱۰/۵) درصد معادل نمک طعام و چگالی ۱/۰۱ تا ۱/۰۳ g/cm^3 است (شکل ۷ پ). میانبراهای *L-type* به دلیل تک فازی بودن مورد مطالعات ریزدماسنجی قرار نگرفت. تغییرات دمای یوتکتیک (*Te*) در این میانبراهای بین ۲۰- تا ۲۳ °C (متوسط ۲۱/۵ °C-) بدست آمد که نشان‌دهنده تشکیل کلسیت‌های تأخیری کانسار چنگرزه از یک سیستم $H_2O-NaCl$ بدون حضور کاتیون‌های دیگر است (ون‌دن کرخوف و هین، ۲۰۰۱). فشار محاسبه شده در میانبراهای میزبان کلسیت بین ۱/۴ تا ۱/۸ بار در تغییر است (جدول ۲).

(متوسط ۵۱ °C-) بدست آمد که نشان‌دهنده تشکیل میانبراهای از یک سیستم $H_2O-NaCl-CaCl_2$ دیرینه است (ون‌دن کرخوف و هین، ۲۰۰۱). با وجود آنکه دمای *Te* میانبراهای اسفالریت منطبق با رخداد هیدرومالیت ($NaCl \cdot 2H_2O$) است، با این وجود احتمالاً به دلیل ضریب انعکاس بالای کانی میزبان اسفالریت شواهدی از حضور این فاز نیمه پایدار مشاهده نشد. فشار محاسبه شده در میانبراهای میزبان اسفالریت بین ۱۰/۸ تا ۱۸/۵ بار در تغییر است (جدول ۲).

مرحله پس از کانه‌زایی (*Post mineralization*):

کلسیت‌های تأخیری (نمونه SZ-04-02 از کانسنگ سیلیکاتی): طبق شواهد پتروگرافی، دو نوع میانبر *LV-type* و *L-type* در میزبان کلسیت‌های رگه‌ای تأخیری (*Cal-2*) کانسار چنگرزه مشاهده شد. بر اساس نتایج ریزدماسنجی،



شکل ۷. نمودارهای هیستوگرام دمای همگن‌شدن نهایی و شوری در میانبراهای سیال کانی‌های مختلف کانسار چنگرزه. (الف) کوارتز و باریت کانه‌زایی افشان مرحله اصلی، (ب) اسفالریت کانه‌زایی رگه‌ای - برشی مرحله اصلی و (پ) کلسیت رگه‌ای مرحله پس از کانه‌زایی. n = تعداد میانبراهای مورد اندازه‌گیری

جدول ۲. نتایج ریزدماسنجی میانبارهای سیال در کانی‌ها و مراحل مختلف کانه‌زایی در کانسار چنگرزه

Stages	Minerals (Sample no.)	Type	FIA	Te (°C)	T _{mice} (°C)	Th _{LV} (°C)	T _{mapping} (avg. °C)	Salinity (wt% NaCl eq.)	Density (g/cm ³)	Pressure (avg. bar)
Main mineralization	Quartz (Ch-T1-04)	LV (L)	5	-34 to -37	-13.2 to -14.2	155-166	168	18.0-17.1	1.04	5.48
			3	nd	-10.7 to -12.1	146-158	159	14.7-16.1	1.03	4.49
			3	-31 to -35	-11.8 to -13.1	162-174	176	15.8-17.0	1.02	6.67
		VL (V)	2	-34 to -38	-12.3 to -14.2	152-170	168	16.2-18.0	1.03	5.57
			4	nd	-10.5 to -11.7	182-195	198	14.5-15.7	0.99	10.84
			3	nd	-9.2 to -12.5	188-191	199	13.1-16.4	0.99	11.11
	Barite (Ch-T3-36)	LV (L)	3	-36 to -40	-12.7 to -13.9	156-172	171	16.6-17.7	1.03	6.00
			4	-34 to -38	-13.2 to -15.0	140-154	153	17.1-18.6	1.05	3.83
			2	-37 to -41	-14.1 to -15.7	166-182	182	18.0-19.2	1.03	7.53
		VL (V)	2	nd	-14.0 to -15.3	178-192	194	17.8-19.0	1.02	9.71
			2	nd	-15.2 to -15.7	167-178	180	18.8-19.2	1.04	7.23
			2	nd	-15.2 to -15.7	167-178	180	18.8-19.2	1.04	7.23
	Sphalerite (Ch-T1-19)	LV (L)	5	-49 to -57	-18.4 to -19.3	187-196	201	21.3-22.0	1.04	10.81
			4	-45 to -53	-20.7 to -21.1	195-208	211	22.9-23.1	1.05	13.15
VL (V)		2	nd	-18.3 to -20.2	195-208	211	21.2-22.5	1.04	13.32	
		4	nd	-17.1 to -19.1	211-224	228	20.3-21.8	1.01	18.51	
Late veins	Calcite (SZ-04-02)	LV (L)	2	-22 to -23	-6.7 to -8.2	112-122	122	10.1-12.0	1.02	1.68
			2	nd	-5.7 to -7.2	105-111	113	8.8-10.7	1.02	1.26
			3	-20 to -23	-7.0 to -8.0	109-113	116	10.5-11.7	1.03	1.38
			4	nd	-6.1 to -7.5	115-122	124	9.3-11.1	1.01	1.77

Abbreviations: FIA= fluid inclusion assemblage, Te= eutectic temperature, T_{mice}= final ice melting temperature, Th_{LV}= homogenization temperature, LV= liquid-rich type, VL= vapor-rich type. (L)= homogenization to. nd= not detected. avg.= average.

بحث

شیمی کانی‌ها

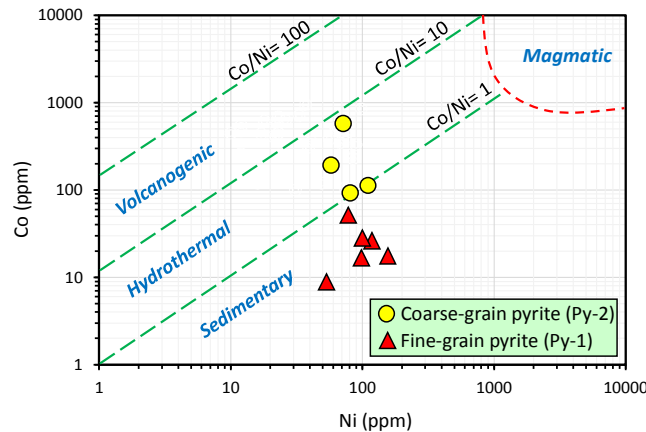
تن (متوسط ۲۱ گرم در تن) و محتوای نیکل بین ۵۳ تا ۱۶۰ گرم در تن (متوسط ۹۵ گرم در تن)، آشکار شد. بر این اساس، نسبت Co/Ni در پیریت‌های نسل اول و دوم به ترتیب کمتر از ۱ و بین ۱ تا ۱۰، بدست آمد که بر اساس آن $Py-1$ در محدوده پیریت‌های رسوبی دما پایین و $Py-2$ در محدوده پیریت‌های گرمایی قرار گرفتند (شکل ۸).

اسفالریت‌ها به دلیل داشتن ساختمان شیمیایی منحصربه فرد قادرند طیف وسیعی از عناصر کمیاب را به صورت جانشینی ساده یون‌های هم بُعد (نظیر $Zn^{2+} \leftarrow Fe^{2+}, Cd^{2+}, Mn^{2+}, Co^{2+}$ یا $S^{2-} \leftarrow Se^{2-}$) و یا جانشینی مرکب دو کاتیون در موقعیت یک کاتیون (نظیر $Zn^{2+} \leftarrow In^{3+}, Cu^{+}$)، در ترکیب خود جای دهند (یه و همکاران، ۲۰۱۱؛ کوک و همکاران، ۲۰۰۹). جانشینی Cd در شبکه اسفالریت اغلب در دمای پایین رخ می‌دهد. علاوه بر دما، حضور کمپلکس‌های Cd ، شوری (غلظت Cl)، تراکم گوگرد احیاء و pH سیال، از عوامل اصلی کنترل‌کننده غلظت Cd در اسفالریت‌ها هستند (اسکات، ۱۹۸۳). با توجه به این موضوع، محتوای Cd و نسبت Zn/Cd در ترکیب اسفالریت برای رده‌بندی ذخایر سرب و روی مورد استفاده قرار گرفته که بر اساس آن ذخایر معدنی به سه گروه دما متوسط - بالا (شامل طیف وسیعی از ذخایر مرتبط با توده نفوذی، پورفیری، اپی‌ترمال، اسکارن و سولفید توده‌ای)، تیپ دره‌ی می‌سی‌سی‌پی و برونومی، تقسیم شده‌اند (ون و

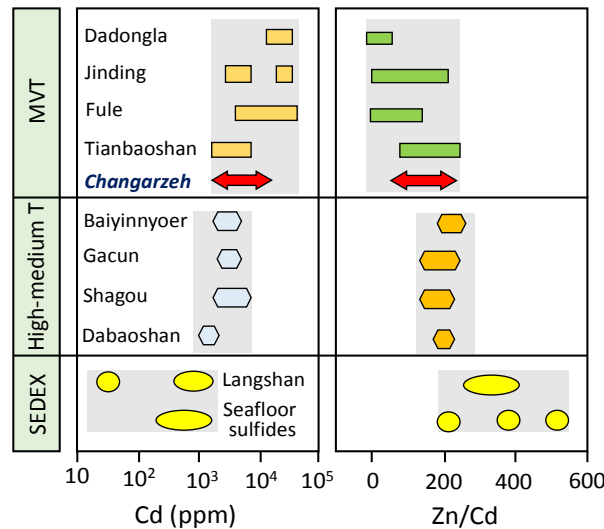
حضور عناصر مختلف در ترکیب شیمیایی پیریت می‌تواند به شکل‌های مختلف شامل: (۱) جانشینی کاتیون‌های دوظرفیتی $Co^{2+}, Ni^{2+}, Mn^{2+}$ و Cu^{2+} در جایگاه Fe^{2+} (۲) مشارکت کاتیون‌های منفرد Cu^{+}, Tl^{+}, Ag^{+} و Au^{+} و در مواردی Sb^{3+} در جایگاه عناصر چهارظرفیتی یا دو کاتیون Fe^{2+} و (۳) جانشینی آنیون‌های Se^{2-} و As^{3-} و در مواردی Te^{2-} در جایگاه گوگرد، انجام گیرد (گرنه و همکاران، ۲۰۱۸؛ جورج و همکاران، ۲۰۱۸). در این میان، عناصر کبالت و نیکل می‌توانند در ترکیب پیریت جایگزین Fe^{2+} شده و طبق آن، نسبت Co/Ni در پیریت شاخصی برای تعیین منشأ ذخایر سولفیدی به‌شمار می‌رود (برالیا و همکاران، ۱۹۷۹). بر این اساس، پیریت با منشأ رسوبی دارای نسبت Co/Ni پایین (متوسط ۰/۶۳)، پیریت با منشأ گرمایی دارای نسبت Co/Ni متوسط (متوسط ۱/۱۷) و پیریت با منشأ آتشفشانی - برونومی، دارای نسبت Co/Ni بالا (متوسط ۸/۷)، است (برالیا و همکاران، ۱۹۷۹). طبق مطالعات کانه‌نگاری، شواهدی از وجود کانی مستقل کبالت در کانسار چنگرزه یافت نشد و داده‌های تجزیه نقطه‌ای حاکی از حضور کبالت تنها به‌صورت جایگزین در ترکیب پیریت است. براساس نتایج تجزیه ریزکاوا الکترونی در ترکیب پیریت‌های کانسار چنگرزه، مقدار کبالت بین ۸ تا ۴۶ گرم در

و همکاران، ۲۰۱۶) طبق نتایج ریزکوالکترونی در اسفالریت‌های کانسار چنگرزه، تغییرات محتوای Cd بین ۲۸۰۰ تا ۱۱۱۰۰ ppm (متوسط ۶۴۲۷ ppm) و نسبت Zn/Cd در آن‌ها بین ۵۹/۳ تا ۲۲۳/۹ (متوسط ۱۲۴/۲) بدست آمد (جدول ۱). با توجه به این شواهد، اسفالریت‌های کانسار سرب± نقره چنگرزه قابل قیاس با کانسارهای تیپ دره‌ی می‌سی‌سی‌پی هستند (شکل ۹).

همکاران، ۲۰۱۶؛ اشمیت و همکاران، ۲۰۰۹). ذخایر دما متوسط- بالا با تغییرات Cd بین ۲۴۱۰ تا ۴۱۲۶ ppm (متوسط ۲۹۳۳ ppm) و نسبت Zn/Cd بین ۱۵۵-۲۲۳ (متوسط ۱۹۵)، ذخایر MVT با محتوای بالای Cd بین ۲۴۱۵-۳۴۹۸۱ ppm (متوسط ۹۳۹۹ ppm) و نسبت Zn/Cd بین ۱۷-۲۰۱ (متوسط ۱۰۱) و ذخایر $SEDEX$ با محتوای ناچیز Cd بین ۵۹۵-۹۹۶ ppm (متوسط ۸۳۲ ppm) و نسبت Zn/Cd بین ۳۱۶-۳۶۸ (متوسط ۳۵۳)، مشخص شده‌اند (ون



شکل ۸. نمودار دوتایی مقادیر کبالت در مقابل نیکل در پیریت‌های نسل اول و دوم کانسار چنگرزه (نمودار پایه از برالیا و همکاران، ۱۹۷۹)



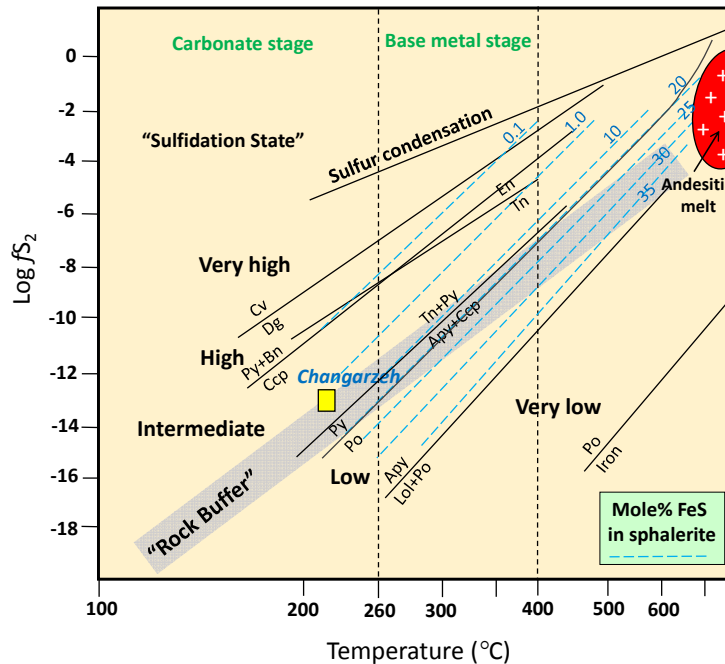
شکل ۹. نمودار تغییرات محتوای Cd و نسبت Zn/Cd در ترکیب اسفالریت‌های کانسار چنگرزه و مقایسه آن با ترکیب اسفالریت‌های ذخایر مختلف چین (بر پایه مطالعات ون و همکاران، ۲۰۱۶). بر اساس این شکل ترکیب شیمیایی اسفالریت در کانسار چنگرزه قابل مقایسه با کانسارهای سرب و روی تیپ دره‌ی می‌سی‌سی‌پی است.

گوگرد (Log aS_2) و فشار محیط دارد (لاسک و کالدر، ۲۰۰۴؛ بارنز، ۱۹۹۷). محتوای FeS در اسفالریت با افزایش دما و ثابت ماندن فشار افزایش می‌یابد و با ثابت ماندن دما، به ازای افزایش فشار این مقدار دچار کاهش می‌شود (بارنز، ۱۹۹۷).

کاتیون Fe^{2+} مهم‌ترین عنصر جایگزین Zn^{2+} در کانی اسفالریت است که محتوای آن می‌تواند معیاری برای تعیین پارامترهای دما و فشار تشکیل ذخیره باشد. مقدار آهن موجود در اسفالریت نسبت مستقیم با دما و نسبت عکس با فعالیت

حدود ۱۳- بدست آمد که منطبق با وضعیت سولفیداسیون متوسط برای این کانسار است (شکل ۱۰). لازم به ذکر است که این محتوای سولفیداسیون منطبق با شرایط تشکیل کانه سولفوسالتی تنانتیت در تعادل با کانه‌های فلزی دیگر نظیر پیریت بوده که در مرحله اصلی کانه‌زایی مشاهده شدند.

طبق تجزیه‌های نقطه‌ای انجام شده، محتوای FeS mol\% در اسفالریت‌های کانسار چنگرزه بین ۱/۱۴ تا ۳/۸۸ درصد مولی در تغییر است. با توجه به دمای به دام افتادن میانبار سیال (T_{trapping}) در اسفالریت‌ها (متوسط 215°C) در مرحله اصلی کانه‌زایی و محتوای FeS mol\% آن‌ها، تغییرات $\text{Log}f_{\text{S}_2}$



شکل ۱۰. تعیین وضعیت سولفیداسیون کانسار چنگرزه با استفاده از FeS mol\% اسفالریت (مربع زرد رنگ) در نمودار دوتایی $\text{Log}f_{\text{S}_2}$ - Temperature (نمودار پایه توسط اینودی و همکاران، ۲۰۰۳). علائم اختصاری کانی‌ها (اقتباس از ویتنی و اونز، ۲۰۱۰) شامل: کوولیت Cv ، دیژنیت Dg ، آرسنوپیریت Apy ، لاینجیت Lol ، تنانتیت Tn ، انارزیت En ، بورنیت Bn ، کالکوپیریت Cpy ، پیریت Py ، پیرویت Po

موجب می‌شود یک روند پیوسته در محتوای کلرینیت سیال میان اعضاء انتهایی سیال رقیق و شور در نمودار دوتایی T_{mice} در مقابل $T_{\text{h}}(\text{total})$ مشاهده شود (شکل ۱۱). در این نمودار یک عضو انتهایی به صورت یک سیال رقیق با مقادیر T_{mice} نزدیک به صفر و عضو دیگر با شوری بالا و مقادیر T_{mice} بسیار پایین قابل تفکیک است. با ترسیم مقادیر $T_{\text{h}}(\text{total})$ و T_{mice} میانبارهای سیال کانسار چنگرزه در نمودار دوتایی شکل ۱۱، می‌توان دریافت که سیال کانه‌ساز در میان دو عضو انتهایی شامل، یک عضو شور دما متوسط (میانبارهای LV-type اسفالریت با مقادیر T_{mice} متوسط $19/5^\circ\text{C}$ - و سیستم H_2O - NaCl-CaCl_2) و یک عضو رقیق کم دما (میانبارهای LV-type رگه‌های کلسیت تأخیری با مقادیر T_{mice} متوسط 7°C - و سیستم $\text{H}_2\text{O-NaCl}$)، تشکیل شده است (شکل ۱۱). بر اساس نقاط پلات شده در این نمودار می‌توان دریافت که ترکیب سیال دیرینه در کانسار چنگرزه دارای ترکیب اصلی

ترکیب سیال دیرینه

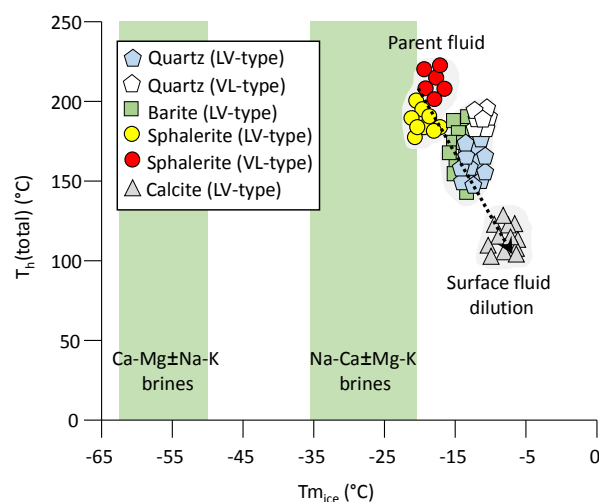
سیالات حوضه‌ای شور با محتوای بالایی از یون‌های K^+ ، Na^+ ، Ca^{2+} ، Mg^{2+} و Fe^{2+} به همراه Cl از مهم‌ترین منابع انتقال دهنده فلزات در کانسارهای سرب و روی با سنگ میزبان کربناته هستند (استافل و همکاران، ۲۰۰۸). طبق مطالعات انجام شده، سیال گرمابی با محتوای کلرینیت بالا قادر است مقادیر بیش‌تری فلز از ساختمان سنگ‌های مجاور شستشو داده و موجب افزایش عیار کانسنگ شود (یاردلی، ۲۰۰۵). بر این اساس، یکی از روش‌های مفید به‌منظور دستیابی به ترکیب سیال دیرینه استفاده از پارامترهای دمای همگن‌شدن نهایی (T_{h}) و دمای آخرین نقطه ذوب یخ (T_{mice}) در مطالعات میکروترمومتری میانبارهای سیال است (بوپرون و همکاران، ۲۰۱۰). همانطور که اشاره شد، از ویژگی‌های شاخص کانسارهای با سنگ میزبان کربناته، محتوای بالای کاتیون‌های سدیم، پتاسیم و کلسیم در ترکیب فاز مایع میانبارهاست که

افق‌های سنگی مدفون (فونتس و ماتری، ۱۹۹۳)، ۴ سیالات ناشی از آزدایی کانی‌ها طی واکنش‌های دگرگونی (سونسن و همکاران، ۱۹۹۹؛ مارک و همکاران، ۱۹۹۸) طبق شواهد میکروترمومتری، مقادیر میانگین دما و شوری میانبارهای سیال در کانسار چنگرزه دارای ارتباط نزدیکی با ترکیب شورابه‌های حوضه‌ای (ترکیبی از آب‌های اقیانوسی قدیمی و سیالات به دام افتاده در حفرات سنگی)، است (شکل ۱۲). با این وجود، برای تفکیک دقیق منشأ سیال کانه‌ساز، انجام آزمایش‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن ضروری است (بارنز، ۱۹۹۷).

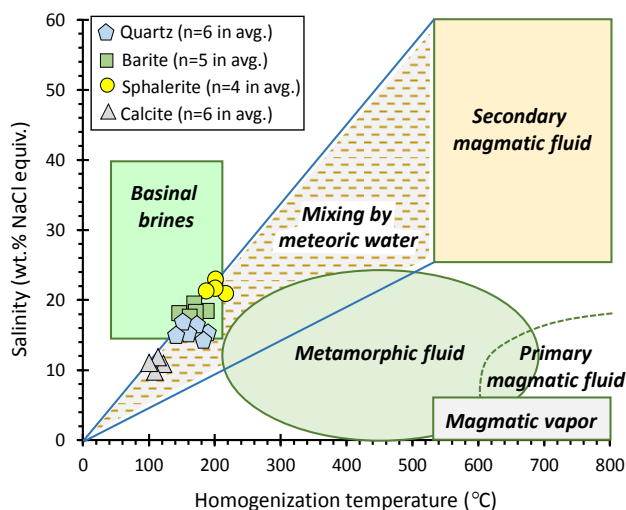
$Na-Ca$ همراه با کاتیون‌های $Mg-K$ است که نقش موثری در تشکیل دگرسانی دولومیتی شدن همراه با کانه‌زایی سولفیدی داشته‌اند.

منشاء احتمالی سیال، فلز و گوگرد

منشاء سیال: طبق مطالعات، چهار منشأ مختلف برای سیالات گرمابی کانه‌دار در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی می‌توان اشاره کرد: (۱) سیالات گرمابی منشأ گرفته از توده‌های گرانیتوئیدی عمیق یا متاسوماتیزم گوشته (بودنار، ۱۹۹۵)، (۲) سیالات منشأ گرفته از آب‌های اقیانوسی دیرینه (هانور، ۱۹۹۴)، (۳) انحلال هالیت و سیالات به دام افتاده در



شکل ۱۱. نمودار دوتایی $T_{m(ice)}$ در مقابل $T_{h(total)}$ و نمایش ترکیب سیال دیرینه تشکیل‌دهنده کانسار (نمودار پایه از بویرون و همکاران، ۲۰۱۰). بر این اساس، ترکیب میانبارهای سیال در منطقه از یک عضو شور دما متوسط (میانبارهای $LV-type$ و $VL-type$ اسفالریت) و یک عضو رقیق کم دما (میانبارهای $LV-type$ رگه‌های کلسیت تأخیری)، تشکیل شده است.



شکل ۱۲. نمایش مقادیر میانگین شوری و دمای همگن‌شدن میانبارهای سیال در کانی‌های کوارتز، باریت، اسفالریت و کلسیت در نمودار دوتایی دما در مقابل شوری. نمودار پایه از بینه (۱۹۸۳) اقتباس شده است. داده‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. (n = تعداد میانبار مورد اندازه‌گیری، $avg.$ = میانگین).

می‌شود. طبق شواهد، گسل اصلی چنگرزه با راستای *NNE* که موجب شده منطقه چنگرزه به دو بخش شرقی (کوه آب انبار) و غربی (کوه تخت چال) تفکیک شود، مهم‌ترین عارضه تکتونیکی موثر بر رخداد کانه‌سازی در منطقه چنگرزه می‌باشد که شرایط مناسبی برای مهاجرت سیال از سنگ بستر رسوبی زیرین فراهم کرده است.

فرآیندهای موثر در نهشت ذخیره و زایش کانسار

وقوع پدیده‌های اختلاط، رقیق‌شدگی سیال، کاهش ناگهانی فشار و جوشش، از عوامل موثر در ناپایداری کمپلکس‌های فلزی به ویژه کلریدهای سرب، روی، مس و اورانیوم در ذخایر معدنی مختلف هستند (هه و همکاران، ۲۰۲۰؛ ژنگ و همکاران، ۲۰۱۹). پدیده اختلاط سیال در کانسارهای سرب و روی با میزبان رسوبی، به‌عنوان مهم‌ترین مکانیسم موثر در نهشت فلزات محسوب می‌شود (ژنگ و همکاران، ۲۰۱۹). طبق مطالعات، پدیده اختلاط دست کم میان دو عضو انتهایی شامل، (۱) شورابه‌های غنی از کلر و فلز منشاء گرفته از لایه‌های زیرین و (۲) سیالات رقیق کم دما با منشاء آب‌های جوی (یا دریایی محلی)، ایجاد می‌شود (یانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ کاتلینه و بوپرون، ۲۰۱۰). بررسی نمودار دمای همگن‌شدن نهایی در مقابل شوری و مقایسه آن با روندهای مختلف تحول سیال توسط ولکینسون (۲۰۰۱)، نشان می‌دهد که کانه‌زایی سرب±نقره در کانسار چنگرزه نتیجه اختلاط غیر هم دما و کاهش تدریجی دمای سیال در نتیجه رقیق‌شدگی سیال والد^۱ با آب‌های جوی، بوده است (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). وقوع چنین پدیده‌ای نیازمند مشارکت گسل‌های پی‌سنگی برای ورود آب‌های رقیق جوی و مواجهه با شورابه‌های درون حوضه‌ای غنی از فلز است. وجود گسل اصلی چنگرزه و گسل‌های فرعی منشعب شده از آن که طی فعالیت کوهزایی‌های بعدی به‌صورت راندگی‌های میان بر از آن جدا شده‌اند (شکل ۳ و ۴) نقش مهمی در فراهم کردن بستر مناسب برای وقوع پدیده اختلاط سیال و نهشت فلز تحت کنترل ساختاری منطقه داشته است. علاوه بر این، شکل‌گیری زون‌های سیلیسی وسیع در یک منطقه از نشانه‌های صعود سیال گرمایی به سطح و اختلاط و رقیق‌شدگی آن‌ها با آب‌های جوی کم دما است (کرار و اندرسون، ۱۹۷۱). مهم‌ترین عامل ته‌نشینی کوارتز در یک ذخیره کاهش انحلال‌پذیری کوارتز طی کاهش دمای محیط

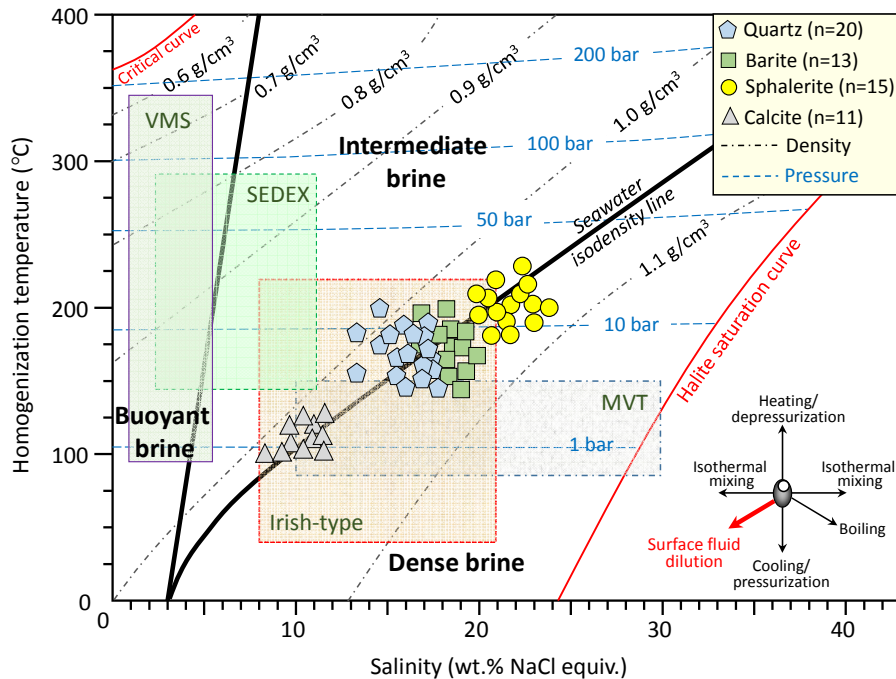
منشاء فلز: همانطور که در بحث زمین‌شناسی و توالی چینه‌شناسی اشاره شد، دولستون‌های آهکی زرد رنگ واحد *T2* به عنوان سنگ میزبان اصلی کانه‌زایی سرب و نقره منطقه چنگرزه هستند. طبق شواهد، این واحد سنگی در نتیجه عملکرد فاز کوهزایی سیمیرین پیشین در پرموتریاس (*Ma* ۲۵۰) همزمان با بسته‌شدن اقیانوس پالئوتتیس در ایران مرکزی بطور ناپیوسته در بخش فوقانی ماسه‌سنگ‌های قرمز بوکسیتی و شیل‌های واحد تریاس زیرین (واحد سنگی *T2*) نهشته شده است. مطالعات انجام شده بر روی خصوصیات حوضه‌های زمین‌شناسی میزبان ذخایر سرب و روی اروپا و شمال آفریقا حاکی از آنست که سطوح فرسایشی و هوازده به ضخامت چندین متر زیر افق‌های ناپیوسته، به عنوان عاملی کلیدی برای تأمین فلز از افق‌های زیرین محسوب می‌شود (هیجلن و همکاران، ۲۰۰۱؛ پیکه و همکاران، ۲۰۰۸؛ بوپرون و همکاران، ۲۰۱۰؛ گلیسون و همکاران، ۲۰۰۱). در این حوضه‌ها پس از رخداد فرسایش، عملکرد فرآیندهای دگرسانی برون‌زاد در افق‌های هوازده رخنمون یافته باعث شکل‌گیری واکنش‌های شیمیایی گسترده‌ای بویژه بر روی کانی‌های فیلولوسیلیکاته و پتاسیم فلدسپار سنگ بستر و در نهایت خروج تدریجی فلز از ساختمان آن‌ها می‌شود. طی این واکنش‌ها، عناصر سرب و باریم از ساختمان کانی پتاسیم فلدسپار موجود در ماسه‌سنگ‌های سنگ بستر تریاس زیرین آزاد شده‌اند که پس از آن توسط کانی‌های رسی و اکسید و هیدروکسیدهای آهن (علت رنگ قرمز واحد سنگی *T1*) جذب می‌شوند. در این میان، وجود محلول‌های غنی از *NaCl* و محتوای کلرینیت به بالای سیال در منطقه چنگرزه به عنوان عامل محرک، موجب تسریع این واکنش‌ها و در نتیجه استحصال هر چه بیش‌تر فلز از ساختمان کانی‌های مختلف می‌شود. طبق مطالعات یاردلی (۲۰۰۵)، شورابه‌های نفوذی در سنگ بستر دگرسان‌شده، شرایط مناسبی برای افزایش انحلال‌پذیری فلزات و تشکیل کمپلکس‌ها فراهم می‌کنند که محتوای کلرینیت و دمای بالای سیال تأثیر فزاینده‌ای بر افزایش این تبادلات خواهد داشت. علاوه بر این، محتوای فلزی بالا (شامل عناصر *Mn, Fe, Zn, Pb, Cu*) در ترکیب شورابه‌های حوضه‌ای مرتبط با ذخایر فلزات پایه با سنگ میزبان کربناته نیز توسط پژوهشگران دیگر (نظیر کوزی و همکاران، ۲۰۰۹) مطرح شده که مهاجرت این شورابه‌ها به سمت بالا اغلب توسط گسل‌های عمیق پی‌سنگی و ریزش‌سنگی‌های موجود در ساختمان سنگ بستر کنترل

¹ Parent fluid

سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد و تیپ ایرلندی، داده‌های کانسار چنگرزه با قرار گرفتن در منحنی هم چگال آب دریا، به‌طور مشترک در گستره‌ی کانسارهای تیپ دره‌ی می‌سی‌سی‌پی و ایرلندی قرار گرفتند (شکل ۱۳). با در نظر گرفتن این موضوع، وجود خصوصیات متعدد دیگر نظیر موقعیت تکنونیک (محیط کوهزایی)، سنگ میزبان (واحد دولستون تریاس میانی)، دگرسانی سنگ میزبان (سیلیسی‌شدن و دولومیتی‌شدن)، مجموعه کانه‌های فلزی ساده (گالن، اسفالریت و پیریت)، باطله‌های کوارتز، کلسیت، دولومیت و باریت، کنترل‌کننده‌های لیتولوژی-ساختاری، سولفات‌های دریایی به‌عنوان منشاء اصلی سولفور و فلزات آزاد شده از پی‌سنگ رسوبی زیرین، حاکی از تشابه کانسار چنگرزه با ذخایر تیپ دره‌ی می‌سی‌سی‌پی است.

است. رخداد دگرسانی سیلیسی همواره به‌عنوان نشانه‌ای از تغییرات دمایی ناشی از رقیق‌شدگی سیال توسط عوامل خارجی محسوب می‌شود که در کانسار چنگرزه نیز قابل مشاهده است. هم‌چنین وجود رگه-رگه‌های کلسیت تأخیری (Cal-2) در مرحله پس از کانه‌زایی و کمترین فشار تشکیل نسبت به سایر کانی‌ها (فشار کمتر از ۲ بار) ناشی از کاهش تدریجی دمای سیال و از شواهد رخداد اختلاط با آب‌های جوی سطحی است.

با توجه به مقادیر دما و شوری بدست آمده از مطالعات میکروترمومتری میانبارهای سیال در مراحل مختلف کانه‌زایی و مقایسه آن با انواع ذخایر سرب و روی با سنگ میزبان رسوبی نظیر کانسارهای رسوبی برون‌دمی، تیپ دره‌ی می‌سی‌سی‌پی،



شکل ۱۳. نمایش موقعیت میانبارهای سیال کانی‌های مختلف کانسار چنگرزه در نمودار دوتایی دمای هم‌گن‌شدن نهایی در مقابل شوری و تفکیک شورابه‌های چگال، حدواسط و کم چگال از یکدیگر توسط سنگستر (۲۰۰۲). همان‌طور که مشاهده می‌شود میانبارهای سیال این کانسار با چگالی 0.98 تا 1.05 g/cm^3 و فشار $1/2$ تا 20 bar بر روی منحنی هم چگال آب دریا و گستره‌ی کانسارهای تیپ دره‌ی می‌سی‌سی‌پی و ایرلندی قرار می‌گیرند. منحنی‌های چگالی و هم فشار به ترتیب با استفاده از معادله ژنگ و فرانتز (۱۹۸۷) و دریزنر و هنریچ (۲۰۰۷)، اقتباس شده است. روندهای مختلف تحول سیال نیز با استفاده از نمودار ولکینسون (۲۰۰۱)، رسم شده است. محدوده کانسارهای تیپ دره‌ی می‌سی‌سی‌پی از لیچ و همکاران (۲۰۰۵)، رسوبی برون‌دمی از کوک و همکاران (۲۰۰۰)، ایرلندی از ولکینسون (۲۰۱۰) و سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد از بودنار و همکاران (۲۰۱۴). n = تعداد میانبارهای مورد اندازه‌گیری

نتیجه‌گیری

سندج-سیرجان، قرار دارند. کانسار سرب-نقره چنگرزه با میزبانی دولستون تریاس میانی دارای کانه‌زایی‌های درون‌زاد سولفیدی و برون‌زاد غیرسولفیدی، است. دگرسانی دولومیتی شدن به‌ویژه طی مرحله کانه‌زایی سولفیدی اصلی تشکیل شده که شواهد میانبارهای سیال نشان می‌دهد ترکیب سیال

کانسارهای فلزی با سنگ میزبان کربناته از مهم‌ترین منابع تأمین‌کننده سرب و روی در ایران هستند که بخش عمده‌ای از آن‌ها با ماهیت چینه‌کران تا چینه‌سان در کمربند فلززایی سرب-روی (نقره) ملایر-اصفهان متعلق به پهنه دگرگونی

- Bakker R. J (2003) *Package FLUIDS 1: Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. Chemical Geology, 194: 3–23.*
- Barnes, H. L (1997) *Geochemistry of hydrothermal ore deposits. Third ed., New York, Wiley, 797p.*
- Bralia, A., Sabatoini, G., and Troja, F (1979) *A revaluation of the Co/Ni ratio in Pyrite as geochemical tool in ore genesis problems. Mineralium Deposita, 14: 352-374.*
- Brown, P. E (1989) *Flincon: a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. American Mineralogist, 74: 1390-1393.*
- Beane, R. E (1983) *The magmatic-meteorite transition. Geothermal Resources Council, Special Report, 13: 245-253.*
- Bodnar, R. J (1995) *Fluid inclusion evidence for a magmatic source for metals in porphyry copper deposits. In: J.F.H. Thompson (Editor), Magmas, fluids, and ore deposits. Mineralogical Association of Canada Short Course Series, Ontario, pp. 139–152.*
- Bodnar, R. J., Lecuemberrri-Sanchez, P., Moncada, D., Steelemacinnis, M (2014) *Fluid Inclusions in Hydrothermal Ore Deposits. Treatise on Geochemistry, 2nd Edition, 13: 119-142.*
- Boiron, M. C., Cathelineau, M., Richard, A (2010) *Fluid flows and metal deposition near basement/cover unconformity: lessons and analogies from Pb–Zn–F–Ba systems for the understanding of Proterozoic U deposits. Geofluids, 10: 270–292.*
- Cathelineau, M., and Boiron M. C (2010) *Downward penetration and mixing of sedimentary brines and dilute hot waters at 5 km depth in the granite basement at Soultz-sous-Forêts (Rhine graben, France). Comptes Rendus Geosciences.*
- Cooke, D.R., Bull, S.W., Large, R. R., McGoldrick, P. J (2000) *The importance of oxidized brines for the formation of Australian Proterozoic stratiform sediment-hosted Pb-Zn (SEDEX) deposits. Economic Geology, 95: 1-18*
- Cook, N. J., Ciobanu, C. L., Pring, A., Skinner, W., Shimizue, M., Danyushevsky, L., Saini-Eidukat, B., Melcher, F (2009) *Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICP-MS study. Geochimica et Cosmochimica Acta 73: 4761-4791.*
- Crerar, D. A., and Anderson, G. M (1971) *Solubility and solvation reactions of quartz in dilute hydrothermal solutions. Chemical Geology, 8: 107-22.*
- Dixon, C. J., and Pereira, J (1974) *Plate tectonics and mineralization in the Tethyan Region. Mineralium Deposita, 9: 185-198.*
- Driesner, T., and Heinrich, C. A (2007) *The system H₂O–NaCl. Part I: Correlation formulae for*
- دیرینه با سیستم $H_2O-KCl\pm FeCl_2\pm MgCl_2$ از اجزاء اصلی $Na-Ca$ همراه با کاتیون‌های $Mg-K$ تشکیل شده است. علاوه بر این، مقادیر میانگین دما و شوری میانبرهای سیال حاکی از شکل‌گیری کانه‌زایی سولفیدی توسط شورابه‌های حوضه‌ای، است که در مراحل پایانی توسط آب‌های جوی با سیستم $H_2O-NaCl$ رقیق شده‌اند. وقوع چنین پدیده‌ای نیازمند مشارکت گسل‌های پی‌سنگی برای ورود آب‌های رقیق جوی و مواجهه با شورابه‌های درون حوضه‌ای غنی از فلز است. وجود گسل اصلی چنگرزه و گسل‌های فرعی منشعب شده از آن به صورت راندگی‌های میان بر، موید این موضوع است. در مجموع با در نظر گرفتن جایگاه تکتونیکی، سنگ میزبان کانه‌زایی، دگرسانی، کانه‌های فلزی ساده و باطله‌های همراه، شرایط دما-شوری و خصوصیات فیزیکوشیمیایی سیال، کانسار چنگرزه دارای بیش‌ترین شباهت با کانسارهای تیپ دره‌ی می‌سی‌سی‌پی است.
- تقدیر و تشکر**
- نویسندگان مقاله از داوران و سردبیر محترم نشریه رسوب‌شناسی کاربردی کمال تشکر و قدردانی را دارند.
- منابع**
- حیاتی، س.، معانی‌جو، م.، طالع‌فاضل، ا.، محسنی، ح (۱۳۹۴) بررسی ارتباط دولومیت‌زایی و کانه‌زایی در کانسار اپی‌ژنتیک آهنگران (جنوب شرق ملایر): شواهد کانی‌شناسی، بافت و ساخت و شیمی کانی‌ها، مجله رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۴، شماره ۷، ص ۱۷-۱.
- زاهدی، م.، رحمتی، م (۱۳۸۲) برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ طوق، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- زاهدی، م (۱۳۷۱) چهارگوش زمین‌شناسی ۱:۲۵۰،۰۰۰ کاشان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- طالع‌فاضل، ا (۱۳۹۷) پتروگرافی و ترکیب شیمیایی دولومیت‌ها در کانسار سرب و روی خان‌سرمه و ارتباط آن با رخداد کانه‌زایی سولفیدی در منطقه واقع در غرب اصفهان. مجله رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۶، شماره ۱۱، ص ۸۱-۶۵.
- مجموعه معادن سرمک (۱۳۸۸) گزارش پایان عملیات اکتشافی در معدن چنگرزه، سازمان صنایع و معادن استان اصفهان، ۵۹ ص.
- نبوی، م. ح (۱۳۵۵) دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۰۹ ص.

- Leach, D., Sangster, D., Kelley, K., Large, R. R., Garven, G., Allen, C., Walters, S. G (2005) Sediment-hosted lead-zinc deposits: A global perspective. *Economic Geology*, 100: 561–607.
- Lusk, J., and Calder, B. O. E (2004) 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: 319–345.
- Maanijou, M., Tale Fazel, E., Hayati, S., Mohseni, H., Vafaei, M (2020) Geology, fluid inclusions, C–O–S–Pb isotopes and genesis of the Ahangaran Pb-Ag (Zn) deposit, Malayer-Esfahan Metallogenic Province, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 195: 104339.
- Markl, G., Ferry, J. and Bucher, E. K (1998) Formation of saline brines and salt in the lower crust by hydration reactions in partially retrogressed granulites from the Lofoten Islands, Norway. *American Journal of Science*, 298: 705–757.
- Meshkani, S. A., Mehrabi, B., Yaghubpur, A., Alghalandis, Y. F (2011) The application of geochemical pattern recognition to regional prospecting: A case study of the Sanandaj-Sirjan metallogenic zone, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 108: 183–195.
- Moëlo, Y., Makovicky, E., Mozgova, N. N., Jambor, J. L. Cook, N. J., Pring, A., Paar, W., Nickel, E. H., Graeser, G., Karup-Møller, S., et al. (2008) Sulfosalt systematics: A review. Report of the sulfosalt sub-committee of the IMA commission on ore mineralogy. *European Journal of Mineralogy*, 20: 7–46.
- Momenzadeh, M (1976) Strata-bound lead zinc ores in the lower Cretaceous and Jurassic sediments in the Malayer-Esfahan District (West Central Iran): Lithology, metal content, zonation and Genesis. Unpublished PhD thesis. University of, Heidelberg, Germany, pp. 300.
- Piqué, A., Canals, A., Grandia, F. and Banks, D. A (2008) Mesozoic fluorite in NE Spain record regional base metal-rich brine circulation through basin and basements during extensional events. *Chemical Geology*, 257: 139-152.
- Rajabi, A., Rastad, E., Canet, C (2012) Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted Zn–Pb deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral exploration. *International Geology Reviews*, 54: 1649–1672.
- Roedder, E (1984) Fluid inclusions. In: Ribbe, R. H. (Ed.), *Review in Mineralogy*, 12. Mineralogical Society of America 646p.
- Sangster, D. F (2002) The role of dense brines in the formation of vent distal sedimentary exhalative (SEDEX) lead-zinc deposits: field phase relations in temperature–pressure–composition space from 0 to 1000 °C, 0 to 5000 bar, and 0 to 1 XNaCl. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 4880-4901.
- Einaudi, M. T., Hedenquist, J. H. and Inan, E. E (2003) Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: transtions from porphyry to epithermal environments. *Society of Economic Geologists Special Publication 10*: 285-313.
- Fontes, J. C., and Matray, J. M (1993) Geochemistry and origin of formation brines from the Paris Basin, France: 1. Brines associated with Triassic salts. *Chemical Geology*, 109: 149-175.
- George, L. L., Biagioni, C., D’Orazio, M., Cook, N. J (2018) Textural and trace element evolution of pyrite during greenschist facies metamorphic recrystallization in the southern Apuan Alps (Tuscany, Italy): influence on the formation of Tl-rich sulfosalt melt. *Ore Geology Reviews*, 102: 59–105.
- George, L. L., Cook, N. J., and Ciobanu, C. L (2017) Minor and Trace Elements in Natural Tetrahedrite-Tennantite: Effects on Element Partitioning among Base Metal Sulphides. *Minerals*, 17: 2-25.
- Ghorbani, M (2013) *Economic Geology Ore Deposits of Iran*. Springer-Verlag, 640p.
- Gleeson, S. A., Wilkinson, J. J., Stuart, F. M., Banks, D. A (2001) The origin and evolution of base metal mineralising brines and hydrothermal fluids, South Cornwall, UK. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65: 2067–2079.
- Grant, H. L. J., Hannington, M. D., Petersen, S., Frische, M., Fuchs, S. H (2018) Constraints on the behavior of trace elements in the actively forming TAG deposit, Mid-Atlantic Ridge, based on LA-ICP-MS analyses of pyrite. *Chemical Geology*, 498: 45–71.
- Hanor, J. S (1994) Origin of saline fluids in sedimentary basins. In *Geofluids: Origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins*. Special Publication Geological Society of London, 78: 151–174.
- He, Y., Wu, T., Huang, Z., Ye, L., Deng, P., Xiang, Z (2020) Genesis of the Maoping carbonate-hosted Pb–Zn deposit, northeastern Yunnan Province, China: evidences from geology and C–O–S–Pb isotopes. *Acta Geochimica*, <https://doi.org/10.1007/s11631-020-00424-4>
- Heijlen, W., Muchez, P. and Banks, D. A (2001) Origin and evolution of high-salinity, Zn-Pb mineralising fluids in the Variscides of Belgium. *Mineralium Deposita*, 36: 165-176.
- Koziy, L., Bull, S., Large, R., Selley, D (2009) Salt as a fluid driver, and basement as a metal source, for stratiform sediment-hosted copper deposits. *Geology*, 37: 1107–10.

- Yang, Q., Liu, W., Zhang, J., Wang, J., Zhang, X (2019) Formation of Pb–Zn deposits in the Sichuan–Yunnan–Guizhou triangle linked to the Youjiang foreland basin: evidence from Rb–Sr age and in situ sulfur isotope analysis of the Maoping Pb–Zn deposit in northeastern Yunnan Province, southeast China. *Ore Geology Reviews*, 107: 780–800.
- Ye, L., Cook, N. J., Ciobanu, C. L., Liu, Y. P., Zhang, Q., Gao, W., Yang, Y. L., and Danyushevsky, L. V (2011) Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: a LA-ICP-MS study. *Ore Geology Reviews*, 39: 188–217.
- Yardley, B. W. D (2005) Metal concentrations in crustal fluids and their relationship to ore formation. *Economic Geology*, 100: 613–32.
- Zhang, Y. G., and Frantz, J. D (1987) Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl–KCl–CaCl₂–H₂O using synthetic fluid inclusions. *Chemical Geology*, 64: 335–350.
- Zhang, H. J., Fan, H. F., Xiao, C. Y., Wen, H. J., Ye, L., Huang, Z. L., Zhou, J. X., Guo, Q. J (2019) The mixing of multi-source fluids in the Wusihe Zn–Pb ore deposit in Sichuan Province, Southwestern China. *Acta Geochimica*, 38: 642–653.
- and laboratory evidence. *Mineralium Deposita*, 37: 149–157.
- Schmitt, A. D., and Galer, S. J. G., and Abouchami, W (2009) High-precision cadmium stable isotope measurements by double spike thermal ionization mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 24: 1079–1088.
- Scott, S. D (1983) Chemical behavior of sphalerite and arsenopyrite in hydrothermal and metamorphic environments. *Mineralogical Magazine*, 47: 427–435.
- Shepherd, T. J., Rankin, A. H., and Alderton, D. H. M (1985) A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie, Glasgow, 239p.
- Stöcklin, J (1968) Structural history and tectonics of Iran: a review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52: 1229–1258.
- Steele-MacInnis, M., Lecumberri-Sanchez, P., Bodnar, R. J (2012) HOKIEFLINCS–H₂O–NaCl: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H₂O–NaCl. *Computers and Geosciences*, 49: 334–337.
- Stoffell, B., Appold, M. S., Wilkinson, J. J., McClean, N. A., Jeffries, T (2008) Geochemistry and evolution of Mississippi Valley-Type mineralizing brines from the Tri-State and Northern Arkansas districts determined by LA-ICP-MS microanalysis of fluid inclusions. *Economic Geology*, 103: 1411–35.
- Svensen, H., Jamtveit, B., Yardley, B., Engvik, A.K., Austrheim, H. and Broman, C (1999) Lead and bromine enrichment in eclogite-facies fluids: extreme fractionation during lower-crustal hydration. *Geology*, 27: 467–470.
- Van Den Kerkhof, A. M., Hein, U. F (2001) Fluid inclusion petrography. In: Andersen T, Frezzotti ML, Burke EAJ ed. *Fluid inclusions: phase relationships – methods applications (special issue)*, *Lithos*, 55: 320p.
- Wen, H., Zhu, C., Zhang, Y., Cloquet, C., Fan, H., Fu, S (2016) Zn/Cd ratios and cadmium isotope evidence for the classification of lead-zinc deposits. *Scientific Report*, 6: 1–8.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95: 185–187.
- Wilkinson, J. J (2001) Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55: 229–272.
- Wilkinson, J. J (2010) A review of fluid inclusion constraints on mineralization in the Irish Orefield and implications for the genesis of sediment-hosted Zn–Pb deposits. *Economic Geology*, 105: 417–442.