

بررسی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمیایی و زمین‌فیزیکی کانسار سرب- روی چاه خربزه، شمال شرق انارک، ایران مرکزی

پرستو قلی‌زاده^۱، علی عابدینی^۱، فرهنگ علی‌یاری^{۲*}

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

۲- گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۴/۱۰، نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۷/۱۴)

چکیده: کانسار سرب - روی چاه خربزه در پهنه ساختاری قطعه یزد- انارک (پهنه ایران مرکزی) و در فاصله ۲۵ کیلومتری شمال شرق شهر انارک، استان اصفهان واقع است. واحد گنگومرای آهنکی به سن کرتاسه پسین، سنگ میزبان اصلی کانه‌زایی بوده و ماده معدنی به صورت برشی، رگه - رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی، جانیشینی و دانه پراکنده در آن شکل گرفته است. بررسی‌های کانی‌شناسی نشان می‌دهند که گالن، اسفالریت، ویلمایت، همی‌مورفیت و سروریت در کانسنگ‌ها با کانی‌های باطله کلسیت، دولومیت، کوارتز، کائولینیت، مسکویت - ایلیت و لیمونیت همراهی می‌شوند. دگرسانی‌های گرمایی غالب در ارتباط با کانه‌زایی شامل دولومیتی شدن و لیمونیتی شدن هستند. عیار سرب و روی در کانسنگ‌ها به ترتیب در گستره ۰/۴ تا ۱۹/۱۰ و ۰/۱ تا ۱۰/۹۹ درصد وزنی است. ضرایب همبستگی محاسبه شده به روش رتبه‌ای اسپیرمن نشان می‌دهند که Pb همبستگی مثبت قوی با عناصر Zn, As, Sb, Cu, Cd و Ag دارد. بررسی شبه مقاطع بارپذیری القائی و مقاومت ویژه ظاهری نیمرخ‌های زمین‌فیزیکی، افزایش بارپذیری و احتمال وجود کانه‌زایی در راستای پهنه‌های گسلی را نشان می‌دهد. بر اساس شواهدی چون ترکیب سنگ میزبان، هندسه چینه‌کران، ساخت و بافت کانسنگ، ماهیت دیرزاد کانه‌زایی، نبود ارتباط زایشی بین فعالیت‌های آذرین و کانه‌زایی، دگرسانی‌های دولومیتی و لیمونیتی و مجموعه کانیایی ساده، کانسار سرب - روی چاه خربزه را می‌توان در رده کانسارهای سرب - روی با سنگ میزبان کربناتی یا نوع دره می‌سی‌سی پی قرار داد.

واژه‌های کلیدی: کانه‌زایی سرب - روی؛ زمین‌شیمی؛ بارپذیری القائی - مقاومت ویژه؛ چاه خربزه؛ نوع دره می‌سی‌سی‌پی؛ ایران مرکزی.

مقدمه

طبس - پشت بادام و یزد - انارک گسترش دارند. در پهنه یزد- انارک، کانسارها و نشانه‌های معدنی متعددی از مس ± نیکل- طلا) مانند مسکنی، طالسمسی، باقرق، تلخه، چاه‌خونی و کالکافی، ذخایر آهن چون خالو حیدر، بوته علم، چاه سفید، کانسارهای سرب-روی مانند نخلک، چاه خربزه، چاه میله، مرغه، چاه معلا و آنتیموان - طلا چون کانسار پتیار شناسایی شده‌اند. تنوع کانساری و توزیع گسترده سرباره‌های برآمده از

تاکنون در ایران بیش از ۳۰۰ کانسار و نشانه معدنی سرب - روی با سنگ میزبان رسوبی گزارش شده است که بیشتر در سنگ‌های کربناتی و به صورت محدود در سنگ‌های تخریبی، در دوره‌های مختلف زمین‌شناسی از کامبرین پیشین تا کرتاسه پسین شکل گرفته‌اند [۱]. بیشتر ذخایر سرب - روی با سنگ میزبان رسوبی در کمربند فلززایی البرز مرکزی، ملایر- اصفهان،

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۴۴)۳۱۹۸۰۲۷۴)، پست الکترونیکی: F.aliyari@uut.ac.ir

متابورات/تتراپورات ذوب شده و سپس در اسید نیتریک حل شد. افزون بر این، تعداد ۱۰ نمونه برای شناسایی فازهای کانیایی نامشخص در کانسنگ‌ها به روش پراش پرتو X (XRD) انتخاب و در آزمایشگاه شرکت زرآما تجزیه شیمیایی شدند. همچنین، طی پی‌جویی‌های زمین‌فیزیکی، تعداد ۶ نیمرخ با روند شرقی- غربی طراحی و با استفاده از آرایش برداشت‌های الکترودی دوقطبی - دوقطبی قطبش القایی و مقاومت ویژه الکتریکی (IP-RS) آنها اندازه‌گیری شد. داده‌های بدست آمده با نرم‌افزار Surfer به صورت شبه مقاطع بارپذیری القایی - مقاومت ویژه ظاهری رسم و پردازش شدند.

نتایج و بحث

زمین‌شناسی و سنگ‌نگاری واحدهای سنگی

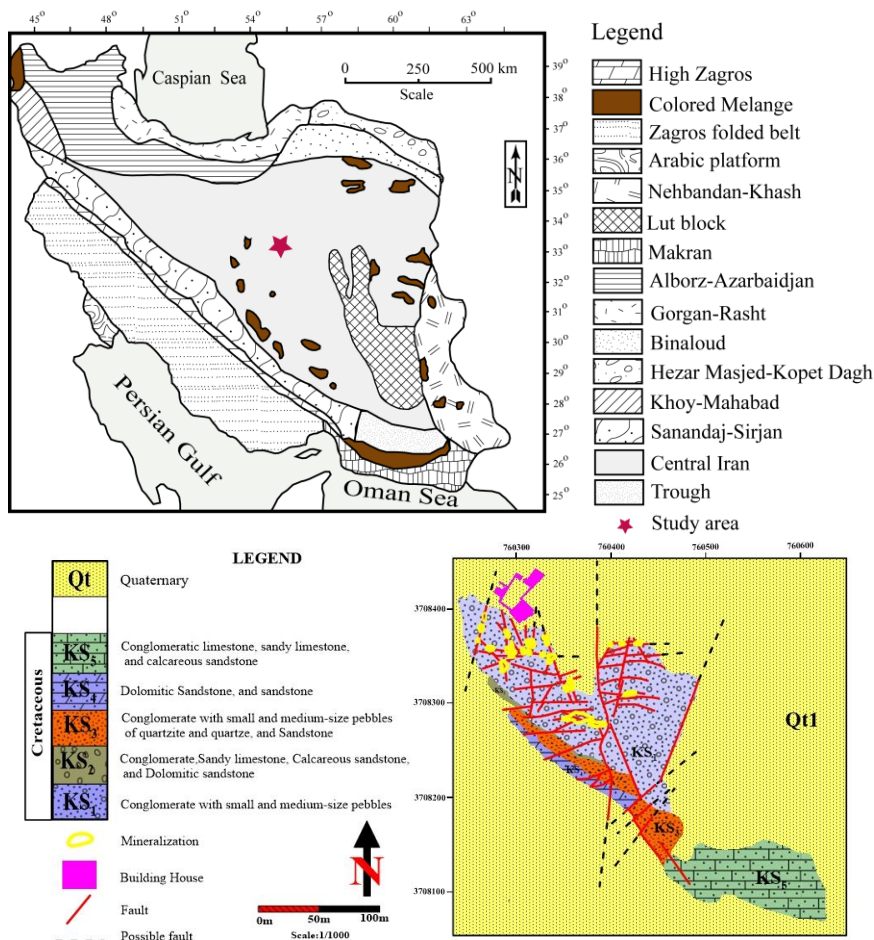
بر اساس تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری - رسوبی ایران [۲]، کانسار چاه خربزه در غرب خرده قاره ایران مرکزی و قطعه یزد- انارک قرار دارد (شکل ۱ الف). واحدهای سنگی کرتاسه و کواترنری به صورت گسترده در این منطقه رخنمون دارند. واحدهای سنگی وابسته به کرتاسه شامل کنگلومرای آهکی، ماسه‌سنگ آهکی، کنگلومرا، سنگ آهک، دولومیت و آهک ماسه‌ای هستند. با توجه به نقشه زمین‌شناسی تهیه شده از منطقه (شکل‌های ۱ ب و ۲) چینه‌شناسی واحدهای سنگی کرتاسه پسین و کواترنری انجام شد که در ادامه بیان می‌شود.

واحد KSI: این واحد شامل کنگلومرای آهکی بوده و افپهنه بر سنگ شناسی غالب منطقه، سنگ میزبان اصلی کانه‌زایی است. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، این واحد با بافت اسپارایت - تخریبی شامل کلسیت، کوارتز، کانی‌های رسی، لیمونیت، قطعه‌های سنگی دارای کوارتز، فلدسپات و میکاست. این واحد از دو بخش کنگلومرا و آهک ماسه‌ای تشکیل شده است. در بخش آهکی، دگرشیمی‌ها شامل زیست آوارها (قطعه‌های فسیلی درشت) و پلوئید هستند که با سیمان کلسیتی ریزبلور تا متوسط بلور به هم متصل شده‌اند. زیست آوارها از جنس اسپارایت و پلوئیدها میکریتی هستند. در این بخش، دانه‌های کوارتز با فراوانی کم و به نسبت زاویه‌دار دیده می‌گردند. در بخش کنگلومرای، خرده سنگ‌های آهکی با همان ترکیب زیست آوار، خرده سنگ‌های کوارتز و فلدسپات و خرده سنگ‌های کوارتزی دیده می‌شوند که با سیمان کلسیتی به هم متصل شده‌اند. در فضای بین خرده سنگ‌های یاد شده و سیمان، انبوه‌های از کانی‌های رسی و لیمونیت نیز دیده می‌شود (شکل ۳ الف).

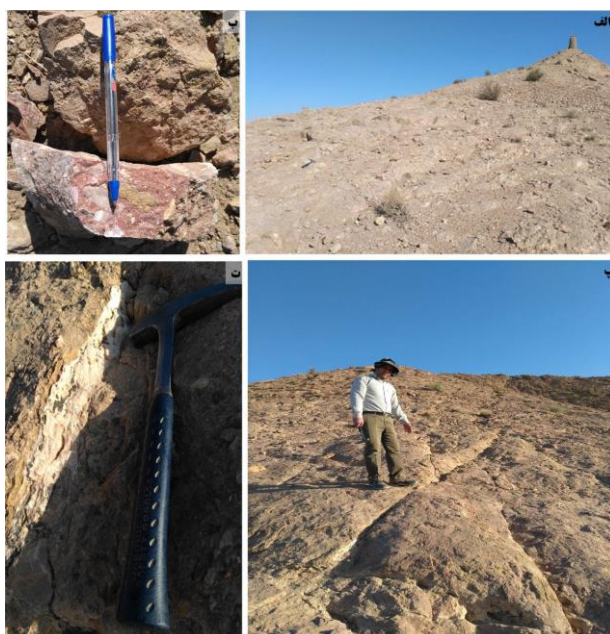
ذوب کانسنگ‌های این معادن، گویای امکان کانه‌زایی و قدمت و رونق معدنکاری از گذشته‌های دور در این منطقه هستند. کانسار سرب - روی چاه خربزه در ۱۰۰ کیلومتری شمال شرق شهر نائین و ۲۵ کیلومتری شمال شرق شهر انارک قرار دارد. این کانسار به دلیل فرارگرفتن در نزدیکی کانسار سرب - روی (نقره) نخلک از دیرباز مورد توجه زمین‌شناسان بوده است. از نظر جغرافیایی، کانسار چاه خربزه در ۱۱ کیلومتری جنوب غرب مجتمع معدنی سرب - روی نخلک واقع است. امکان کانی‌زایی این کانسار نخستین بار در سال ۱۹۷۶ توسط کارشناسان شرکت تکنواسپرت بررسی گردیده و در سال‌های ۱۹۷۹ و ۱۹۸۲، بررسی‌های دقیق زمین‌شناسی و زمین‌فیزیکی نیز توسط همین شرکت در منطقه انارک انجام شده است. کانسار چاه خربزه در گذشته به صورت زیرزمینی استخراج می‌شده ولی اکنون این کانسار غیرفعال است. از آنجا که تاکنون بررسی‌های جامعی پیرامون سنگ میزبان، ساخت و بافت و نوع کانه‌زایی سرب-روی در کانسار چاه خربزه انجام نشده است، در این پژوهش، به طور جامع و کامل از نظر ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمیایی و زمین‌فیزیکی بررسی گردیده است.

روش بررسی

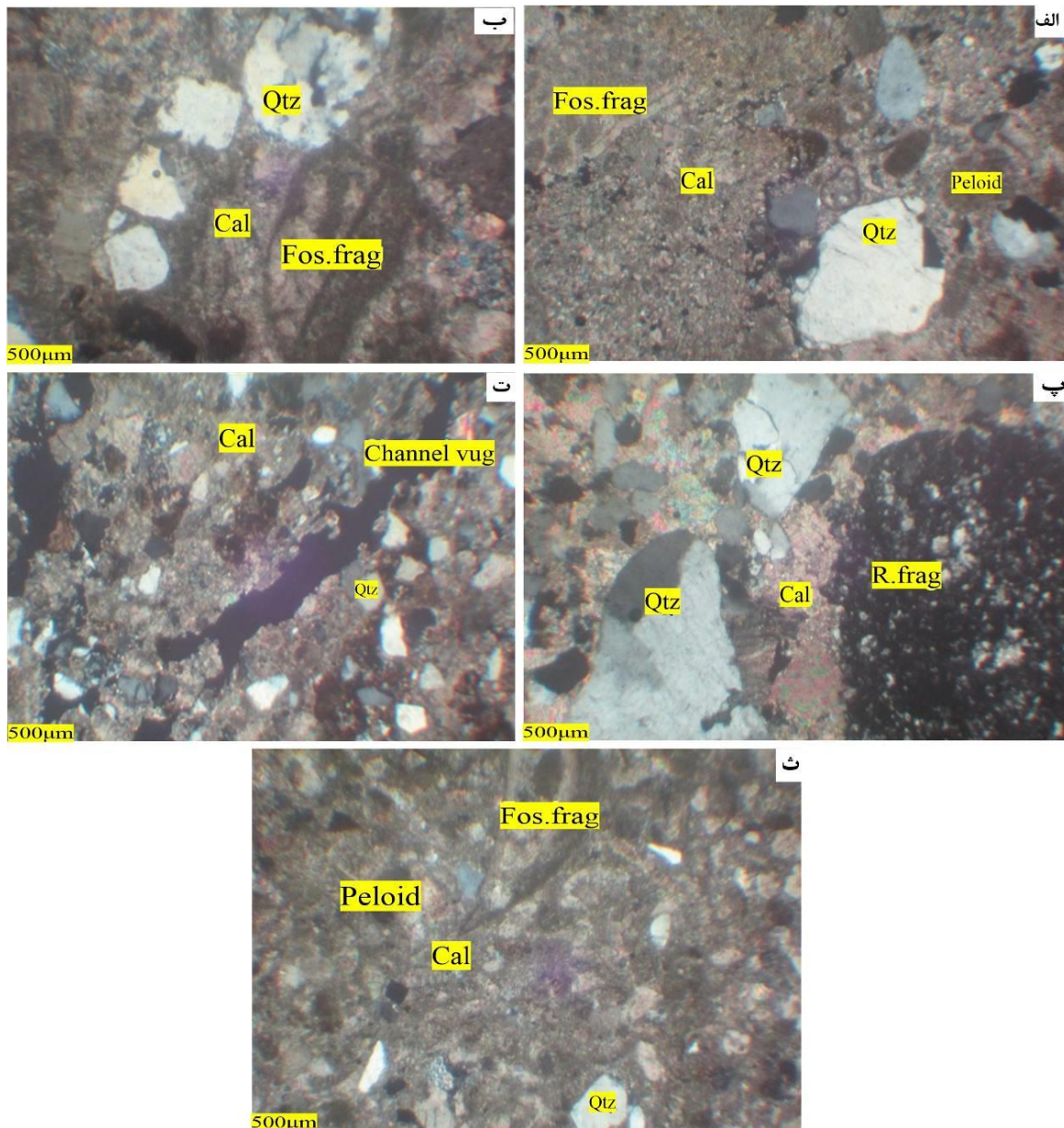
در این پژوهش، پس از بازدیدهای صحرائی، از واحدهای سنگی و ماده معدنی در رخنمون‌های سطحی، مغزه‌های حفاری و تونل‌ها، نمونه‌برداری گردید. از بین ۷۳ نمونه برداشت شده برای بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری، ۲۷ نمونه برای تهیه مقطع نازک - صیقلی انتخاب و به آزمایشگاه دانشگاه فردوسی مشهد ارسال شد. این مقاطع با میکروسکوپ دو منظوره در گروه زمین‌شناسی دانشگاه ارومیه بررسی شدند. به منظور بررسی‌های زمین‌شیمیایی، ۲۱ نمونه از بین نمونه‌های برداشت شده از پهنه‌های کانه‌زایی انتخاب و پس از خردایش برای تعیین مقادیر عناصر اصلی، فرعی، جزئی و خاکی نادر به روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) به آزمایشگاه شرکت زرآما ارسال گردید. به این منظور، نخست نمونه‌ها با دستگاه سنگ‌شکن فکی فولادی تا اندازه حدود ۴ میلی‌متر خرد شده و سپس به کمک هاون آگاتی تا اندازه ۲۰۰ مش (۷۴ میکرون) پودر شدند. مقدار افت گرمایی (LOI) نمونه‌ها با فرارگیری حدود ۲ گرم پودر سنگ در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۲ ساعت تعیین گردید. در تجزیه به روش ICP-MS، برای تعیین عناصر جزئی و خاکی نادر، حدود ۰/۲ گرم از هر نمونه در ترکیب لیتیم



شکل ۱ الف) نقشه پهنه‌های ساختاری ایران و موقعیت منطقه مورد بررسی بر آن [۲]. ب) نقشه زمین‌شناسی ساده شده کانسار سرب-روی چاه خربزه.



شکل ۲ الف) نمای کلی از کانسار چاه خربزه، ب) کنگلومرای قرمز که میزان ماده معدنی کانسار چاه خربزه است، پ) نمایی از گسل‌ها و درز و شکستگی‌های منطقه (دید به شمال‌غرب)، ت) رخنمون کانه‌رایی در راستای گسل و شکستگی‌ها.



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از واحدهای سنگی کانسار چاه خریزه. الف) واحد کنگلومرای آهکی (KS1) شامل کوارتز، کلسیت، قطعه‌های فسیل و پلوئید، ب) واحد آهک ماسه‌ای، ماسه سنگ آهکی با میان‌لایه کنگلومرا (KS2) دربردارنده انبوهه‌های کوارتز و قطعه‌های فسیل در کلسیت اسپارایتی، پ) واحد کنگلومرا (KS3) شامل قطعه‌های سنگی، کوارتز و کلسیت، ت) واحد ماسه‌سنگ دولومیتی (KS4) دارای کوارتز، کلسیت و حفره کانالی، ث) واحد آهک ماسه‌ای و آهک کنگلومرای (KS5) شامل کوارتز، کلسیت، پلوئید و قطعه‌های فسیلی. (کلسیت = Cal، کوارتز = Qtz، قطعه‌های فسیلی = Fos.Frag، خرده سنگ = R.Frag، پلوئید = Peloid) همه تصاویر در نور شکستی به صورت قطبیده متقاطع (XPL) تهیه شده‌اند.

است. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، این واحد دارای بافت اسپارایتی بوده و شامل کانی‌های کلسیت، کوارتز، فلدسپات و گوتیت است. کوارتز بیشتر به صورت گرد تا زاویه‌دار تا با اندازه ۳ میلی‌متر دیده می‌شود. اکسیدها و

واحد KS2: این واحد از تناوب سنگ آهک ماسه‌ای، ماسه‌سنگ آهکی، دولومیت ماسه‌ای، سنگ آهک چرتی، سنگ آهک ماسه‌ای چرتی، ماسه‌سنگ دولومیتی، سنگ آهک پرفسیل و سنگ آهک ریفی خاکستری روشن نازک تا ضخیم‌لایه با میان‌لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و کنگلومرای قهوه‌ای رنگ تشکیل شده

های آبرفتی است. قلوه سنگ‌های مارن، شیست و سنگ‌های فرامافیک و کوارتزهایی به اندازه ۱۰ تا ۱۲ سانتی‌متر، ترکیب سنگ‌شناسی غالب این نهشته‌ها را تشکیل می‌دهند. تخته سنگ‌های منفرد مرمر با اندازه ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر نیز در راستای این نهشته‌ها دیده می‌شوند.

زمین‌شناسی ساختاری

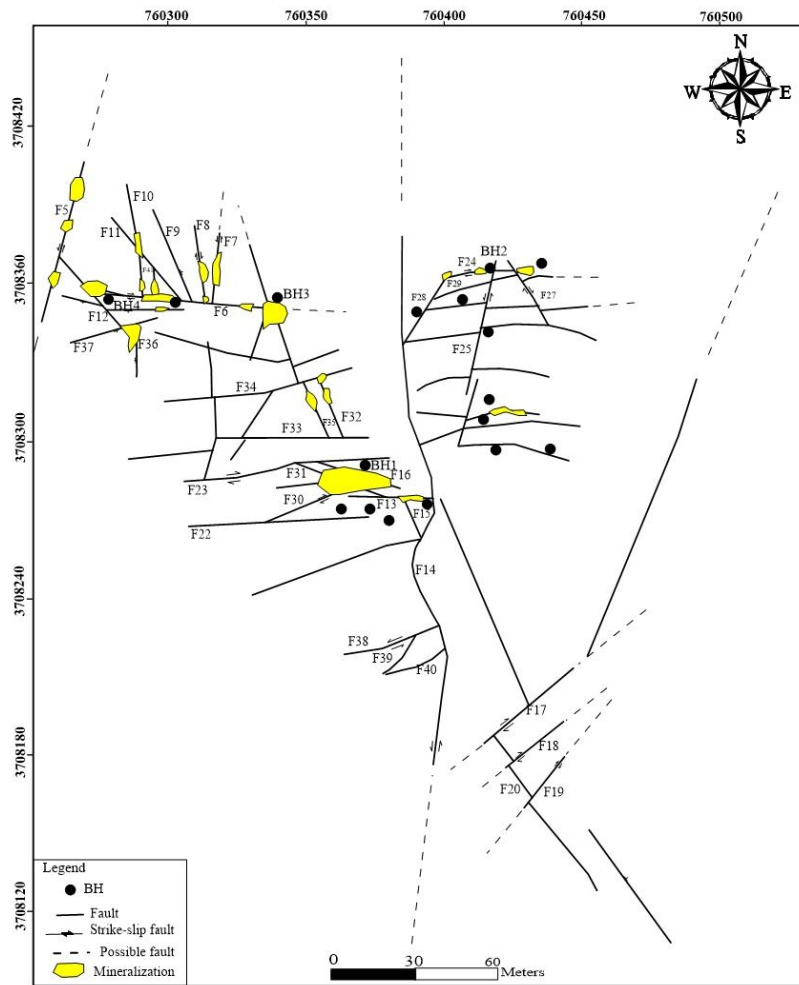
عوامل ساختاری از مهم‌ترین کنترل‌کننده‌های کانی‌سازی در کانسار چاه خربزه هستند. بخش عمده ماده معدنی درون گسل‌ها، شکستگی‌ها و درز و شکاف‌ها تمرکز یافته است. گسل‌ها و شکستگی‌ها مهم‌ترین مؤلفه ساختاری کانسار مورد بررسی با دو عملکرد عمده تمرکز دهنده و محصور کننده کانی‌سازی هستند [۳]. کانسار نخلک و کانسار چاه خربزه بین گسل چپ‌گرد درونه در شمال‌غرب، گسل چپ‌گرد بیابانک در جنوب شرق و گسل راست‌گرد نائین در جنوب‌غرب محصور است. در کانسار چاه خربزه، گسل‌های راستالغز راست‌گرد و راستالغز چپ‌گرد با روند شمال‌غربی - جنوب‌شرقی، شمالی - جنوبی، شمال‌شرقی - جنوب‌غربی و شرقی - غربی شناسایی شده‌اند که در کانی‌سازی نقش به‌سزایی دارند (شکل ۴). کانی‌زایی بیشتر در راستای گسل‌های راستالغز F13 و فضای بین گسل‌های F24 و F29 رخ داده است. گسل‌های F24 و F29 با گسل‌های جوان‌تر با روند شمالی - جنوبی (F27, F25, F28) قطع شده‌اند. افزون بر این، کانی‌سازی در راستای گسل F13 با گسل F15 بصورت راست‌گرد جابجا شده است. در گستره جنوبی چاه خربزه، رخنمون واحدهای سنگی و فراوانی گسل‌ها نسبت به گستره شمالی بیشتر است. رخنمون گستره جنوبی چاه خربزه شبیه نعل اسبی بوده که گسل F14 با سازوکار راستایی چپ‌گرد بیشترین نقش را در جابجایی واحدهای سنگی بویژه تغییر راستا و شیب واحدهای سنگی داشته است. واحدهای سنگی که در بخش شرقی گسل F14 قرار دارند، نخست با گسل‌های شرقی - غربی جابجا شده‌اند، سپس گسل‌های شمالی - جنوبی باعث جابجایی گسل‌های قدیمی‌تر شرقی - غربی شده‌اند. چنان‌که نمودار گلسرخی (شکل ۵) نشان می‌دهد، گسل‌هایی با راستای ۶۵ تا ۱۰۰ درجه بیشترین فراوانی را دارند؛ سپس گسل‌های با راستای ۱۳۵ تا ۱۹۵ درجه در رتبه دوم فراوانی قرار داشته و سایر راستاهای ساختاری فراوانی کمی دارند.

هیدروکسیدهای آهن به صورت آغشتگی‌هایی در فضای بین کلسیت‌ها با فراوانی کمتر از ۵٪ دیده می‌شوند (شکل ۳ ب). واحد KS3: این واحد با ضخامت ۵ تا ۱۰ متر زیر واحد KS2 قرار دارد. سنگ‌شناسی غالب آن کنگلومرا است. قطعه‌های آواری تشکیل دهنده آن به طور عمده سیلیس با اندازه ۲ میلی‌متر تا ۳ سانتی‌متر هستند. رنگ این واحد به دلیل وجود مواد آلی، خاکستری تیره تا سیاه است. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، واحد یاد شده از کانی‌های کلسیت، کوارتز، قطعه‌های خرده سنگی و هیدروکسید آهن تشکیل شده است. قطعه‌های سنگی شامل خرده‌سنگ‌های آهکی، آراگونیتی، کوارتزیتی، دانه‌های کوارتز و قطعه‌های ماسه‌سنگی با فراوانی ۵۰٪ به صورت نیمه زاویه‌دار تا گرد دیده می‌شوند. سیمان این واحد از کلسیت ریزبلور تا متوسط بلور تشکیل گردیده است. هیدروکسید آهن در سیمان کلسیتی و قطعه‌های سنگی با فراوانی حدود ۵٪ نمایان است (شکل ۳ پ).

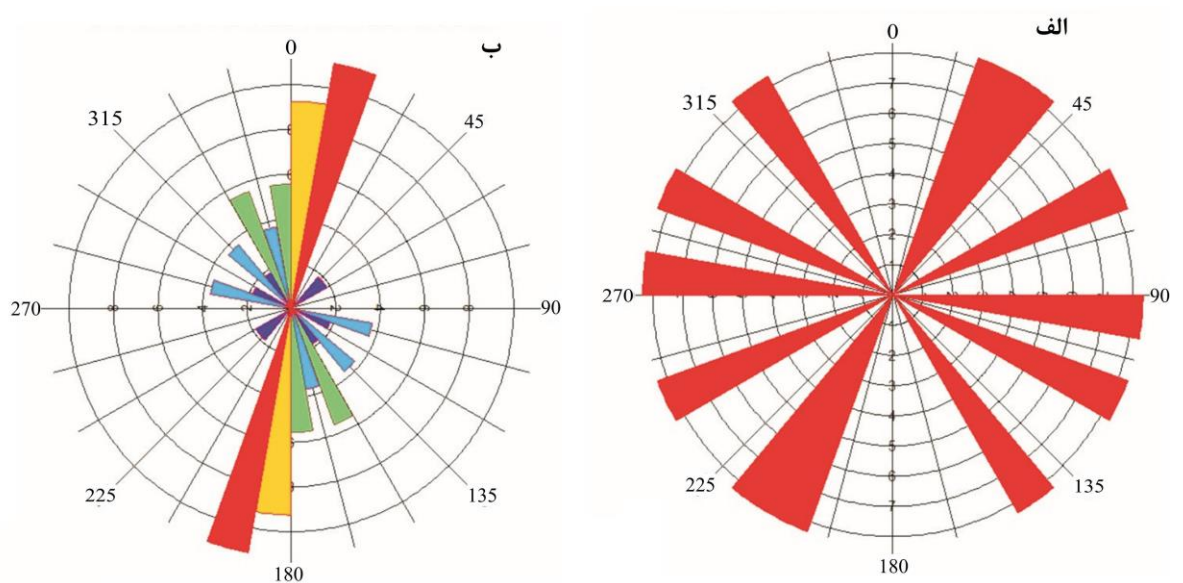
واحد KS4: این واحد از نظر ترکیب سنگ‌شناسی شامل کلسیت، کوارتز و میکاست. زمینه این واحد از جنس کلسیت (ریز بلور تا متوسط بلور) است و قطعه‌های کوارتز نیمه زاویه‌دار با فراوانی حدود ۳۰٪ و به ندرت کانی میکا با اندازه حدود ۱۰۰ میکرون دیده می‌گردند. این واحد سنگی در دو راستای تقریباً عمود بر هم دارای شکستگی بوده که باعث تشکیل و گسترش تخلخل کانالی در آن گردیده است (شکل ۳ ت).

واحد KS5: ترکیب سنگ‌شناسی این واحد آهک ماسه‌ای است. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، این واحد دارای بافت اسپارایتی، میکریتی و زیست‌آواری است. کلسیت کانی اصلی تشکیل دهنده این واحد است که به صورت اسپارایت و میکریت در نمونه‌های بررسی شده دیده می‌شود. سیمان نمونه‌ها از جنس اسپارایتی بوده و حفره‌های خالی آنها با کلسیت درشت دانه پر شده است. دگرشیمی‌ها شامل قطعه‌های فسیلی از جنس اسپارایت و گاهی میکریت و همچنین پلوئیدهای میکریتی هستند. دانه‌های کوارتز با اندازه حدود ۶۰ میکرون، به صورت زاویه‌دار و با فراوانی کم در نمونه‌ها وجود دارند. کانی‌های رسی و هیدروکسید آهن در فضای بین بلور-های کلسیت انباشته شده‌اند (شکل ۳ ث).

واحد کواترنری (Qt₁): ضخامت این واحد از ۳۲ تا ۵۹ متر متغیر است. این واحد شامل قطعه‌های آواری با اندازه ریگ و رسوب



شکل ۴ الف) نقشه ساختاری نشاندهنده موقعیت و روند گسل‌های عمده و محدوده کنده کانه‌زایی در کانسار چاه خربزه.

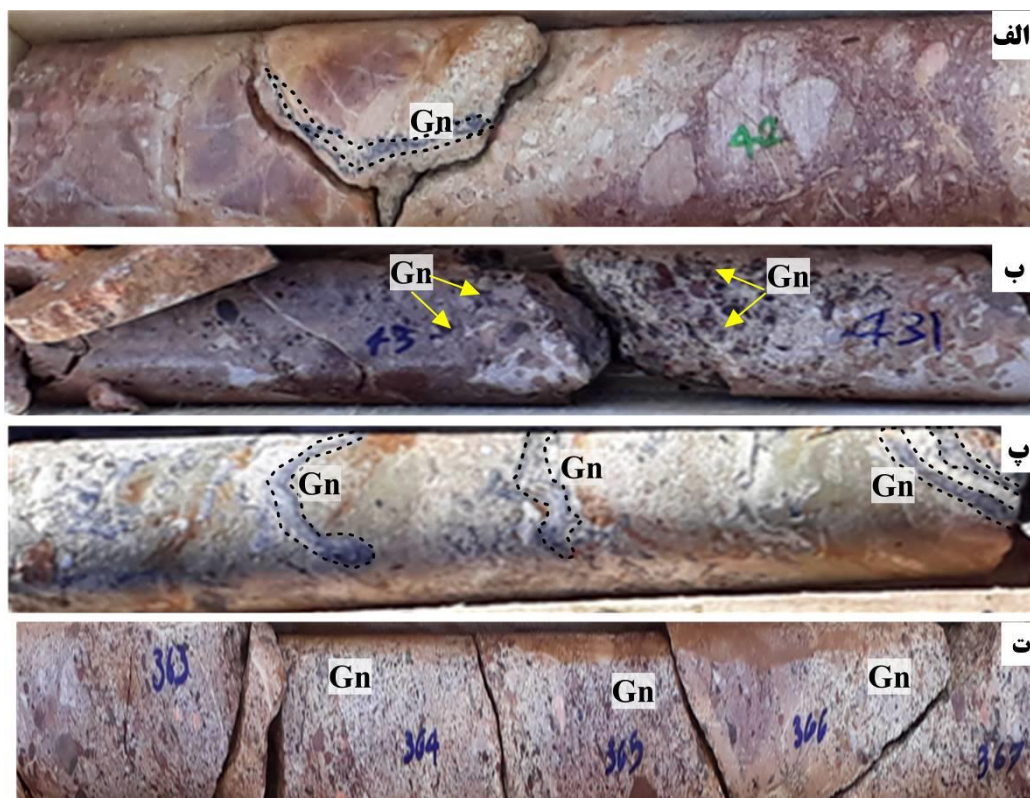


شکل ۵ نمودارهای گلسرخی الف) راستای غالب گسل‌های کانه‌دار و ب) راستای غالب گسل‌های جابجاکننده کانی‌سازی در کانسار چاه خربزه.

کانی‌شناسی و کانه‌زایی

کانه‌زایی سرب - روی در کانسار چاه‌خریزه در واحد میزبان کنگلومرای کرتاسه پسین رخ داده است. کانه‌زایی اغلب با بافت‌های برشی، رگه- رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی، دانه پراکنده و جانیشینی شکل گرفته است (شکل ۶). دگرسانی گرمابی غالب در گستره کانسار شامل دگرسانی‌های دولومیتی و لیمونیتی است که دگرسانی دولومیتی با شدت و گسترش بیشتری بر واحدهای میزبان کانه‌زایی اثر داشته است. بر اساس

بررسی‌های میکروسکوپی و نتایج XRD، کانی‌شناسی کانسنگ شامل گالن، اسفالریت، ویلمایت، همی‌مورفیت و سروزیت همراه با کانی‌های باطله کلسیت، دولومیت، کوارتز، کائولینیت، مسکویت - ایلیت و لیمونیت است (جدول ۱). بر این اساس، انباشت کانیایی کانسار چاه‌خریزه را می‌توان به کانه‌های سولفیدی درونزاد (گالن و اسفالریت) و کانه‌های غیرسولفیدی برونزاد چون سروزیت (با ماهیت کربناتی)، همی‌مورفیت و ویلمایت (با ماهیت سیلیکاتی) تفکیک نمود.



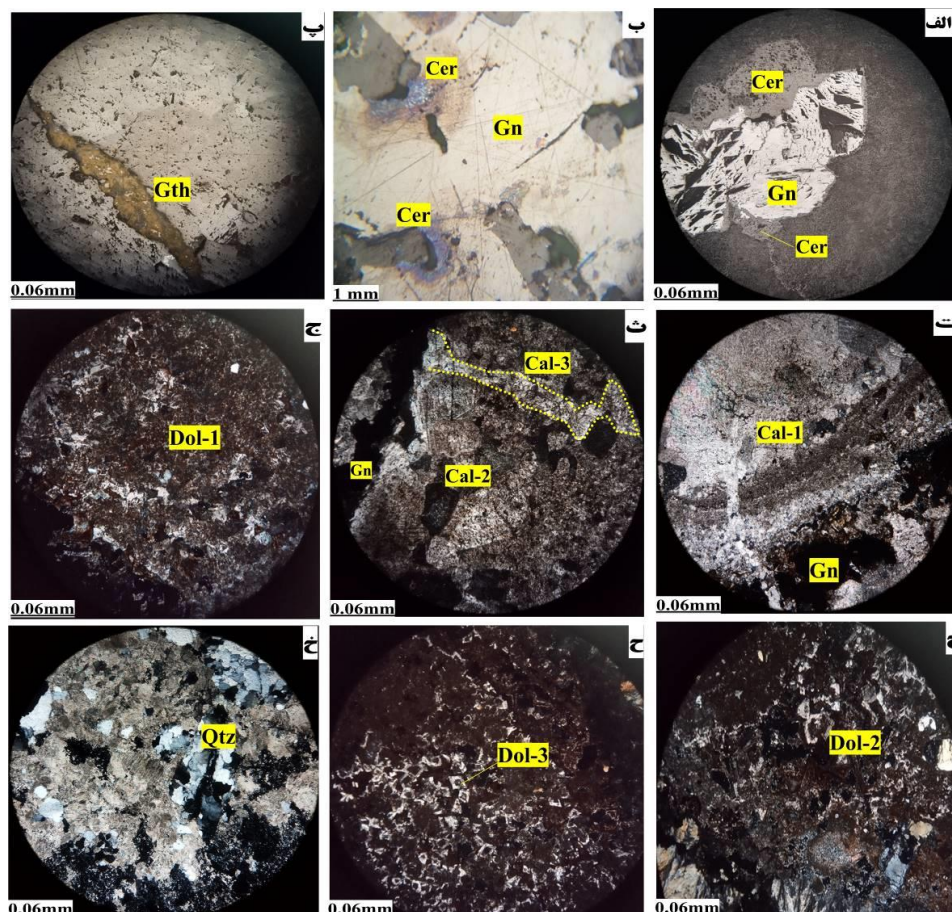
شکل ۶ تصاویر مغزه‌های حفاری نشاندهنده بافت‌های کانه‌زایی در کانسار چاه‌خریزه: الف) گالن با بافت رگچه‌ای در سنگ میزبان کنگلومرای، ب) بافت برشی گالن در سنگ میزبان کنگلومرای، پ) بافت شکافه پرکن گالن در سنگ میزبان کنگلومرای، ت) بافت دانه پراکنده گالن در سنگ میزبان کنگلومرای. (Gn = گالن).

جدول ۱ نتایج XRD کانسنگ‌های بررسی شده از کانسار چاه‌خریزه.

شماره نمونه	کانی‌های اصلی	کانی‌های فرعی
CHK-T20	گالن، سروزیت	ویلیمایت، کلسیت، کوارتز
CHK-T26	گالن، ویلمایت	همی‌مورفیت، کائولینیت، ژیبس
ChK-T27	گالن، سروزیت	ویلیمایت، همی‌مورفیت، کلسیت
CHK-T33	گالن، سروزیت	همی‌مورفیت، کلسیت، کوارتز
CHK-T39	گالن، سروزیت	ویلیمایت، مسکویت-ایلیت
CHK-T67	گالن، سروزیت	کلسیت، کوارتز

ب). کانی گوتیت نیز در مقاطع بررسی شده دیده می‌گردد (شکل ۷ پ) که به احتمال بسیار از تجزیه کانی اولیه پیریت طی فرآیندهای اکسایش شکل گرفته است [۶]. سایر کانی‌ها چون همی‌مورفیت و ویلمایت نیز به صورت میانبار درون گالن دیده می‌شوند که بیانگر شکل‌گیری آنها پیش از تشکیل گالن است. کلسیت به عنوان فراوان‌ترین کانی باطله به صورت ریز بلور (کلسیت شفاف بلور)، درشت بلور و رگه‌ای دیده می‌شود (شکل‌های ۷ ت و ث). براساس بررسی‌های میکروسکوپی، ۳ نوع دولومیت شامل دولومیت ریز بلور، متوسط و درشت بلور شناسایی شد (شکل‌های ۷ ج، چ و ح). کوارتز نیز به صورت دانه‌های ریز و پراکنده تخریبی در زمینه سنگ میزبان دیده می‌شود (شکل ۷ خ). توالی همبری کانی‌ها و کانه‌های کانسار چاه‌خرزبه در شکل ۸ برآورده شده است.

فراوان‌ترین کانه‌های سرب در منطقه مورد بررسی گالن و سروزیت هستند. گالن بیشتر نیمه شکل‌دار است و به صورت دانه ریز تا دانه درشت با رخ‌های مثلثی دیده می‌شود (شکل ۷ الف). اسفالریت اغلب به صورت میانبارهای ریز و بی‌شکل درون گالن نمایان است. سروزیت فراوان‌ترین کانی ثانویه در کانسار چاه‌خرزبه بوده که در اثر عملکرد فرآیندهای ثانویه برونزاد شکل گرفته است. در شرایطی که گالن در معرض شرایط اکسایشی (نفوذ آب‌های جوی و اکسیژن) قرار گرفته، کانی سروزیت تشکیل شده است [۴]. به بیان دیگر، سروزیت ناشی از اکسایش گالن در محیط قلیایی است [۵]. بر اساس بررسی‌های کانه‌نگاری، سروزیت در کناره‌های گالن، راستای رخ‌ها و شکستگی‌های آن جانشین شده و به تدریج به درون گالن پیشروی کرده و بلورهایی از گالن را در بر گرفته است (شکل ۷



شکل ۷ تصاویر میکروسکوپی با نور قطبیده مقاطع از کانی‌های و کانه‌ها در کانسار چاه‌خرزبه، الف) کانه گالن با رخ‌های مثلثی و بافت جزیره‌ای که از کناره‌ها به سروزیت تبدیل شده است، ب) جانشینی سروزیت در رخ‌ها و لبه‌های کانه گالن، پ) حضور کانی ثانویه گوتیت که طی فرآیندهای برونزاد شکل گرفته است، ت) کلسیت نسل اول (شفاف بلور)، ث) کلسیت نسل دوم (درشت بلور) و نسل سوم (رگه‌ای) همراه گالن، ج) دولومیت ریز بلور (نوع اول)، چ) دولومیت متوسط بلور (نوع دوم)، ح) دولومیت درشت بلور (نوع سوم) و خ) حضور کوارتز در زمینه سنگ. (کلسیت = Cal، دولومیت = Dol، کوارتز = Qtz، گالن = Gn، سروزیت = Cer، گوتیت = Gth).

Minerals	Sedimentary to Diagenetic stage	Hydrothermal stage		Supergene/oxidation stage
		Stage I	Stage II	
Calcite	██████████	-----		
Dolomite	██████████	-----		
Quartz	██████████			
Kaolinite	██████████			
Muscovite- illite	██████████			
Galena	-----	██████████		
Sphalerite		-----		
Cerussite				██████████
Hemimorphite				██████████
Willemite				██████████
Hematite /Limonite				██████████
Disseminated	██████████	-----		
Brecciated		██████████		
Vein-Veinlet		██████████		
Replacement				██████████
Strong ██████████	Intermediate ██████████	Weak -----		

شکل ۸ توالی همبری کانی‌ها و کانه‌ها به همراه بافت کانستگ‌ها در کانسار سرب- روی چاه خربزه.

زمین‌شیمی

نتایج تجزیه شیمیایی کانستگ کانسار چاه خربزه نشان می‌دهد که در نمونه‌های مورد بررسی، مقادیر سرب از ۴۳۴ تا ۱۲۶۱۱ گرم در تن و مقادیر روی از ۱۱۹ تا ۲۹۵۹۳ گرم در تن متغیر است. نقره و کادمیم نیز افزون بر سرب و روی، به عنوان عناصر فرعی ارزشمند و مهم در کانستگ حضور دارند. بسیاری از عناصر کمیاب می‌توانند در شبکه‌های بلوری گالن و سولفیدهای وابسته به آن وارد شوند یا به عنوان ریز میانبار در ذخایر فلزهای پایه رخ دهند [۷-۱۱]. به طور کلی، Bi، Sb، Ag، Se، Tl و Te ترجیحاً در گالن گنجانده می‌شوند، و عناصر Cd، Fe، Mn، Ge، Ga، Cu و In اغلب در اسفالریت تمرکز می‌یابند [۱۲-۱۴]. میزان تمرکز عناصر در شبکه بلوری کانی میزبان سولفیدی (گالن و اسفالریت) به عوامل ذاتی یا درونی (از جمله حالت اکسایش و شعاع یونی) و عوامل خارجی (سنگ میزبان، منبع فلز، سولفیدهای همزیست، دما، فشار و

شرایط اکسایش - کاهش) بستگی دارد [۱۵-۲۲]. سازوکار جانشینی ساده عنصری یا دو عنصری به جای Pb برای عناصر Bi، Hg، Cd، Ag و Sb به صورت $Pb^{2+} \leftrightarrow (Cd, Hg)^{2+}$ یا $Pb^{2+} \leftrightarrow Ag^{+} + (Bi, Sb)^{3+}$ مطرح شده است [۲۳، ۲۴]. ضرایب همبستگی پیرسون بین عناصر کانه‌ساز و جزئی در کانستگ مورد بررسی محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۲ آمده است.

Sb با بیشترین غلظت در گالن‌های مورد بررسی بالاترین ضرایب همبستگی را با عناصر Ag، As، Cd، Pb و Cu نشان می‌دهد. با توجه به همبستگی قوی بین Sb و As ($r = 0.92$) و همبستگی مثبت Pb با Cu ($r = 0.84$)، Sb ($r = 0.82$) و As ($r = 0.85$) می‌توان حضور میانبارهای میکروسکوپی سولفوسالت‌های سری تنانتیت - تتراهدریت درون گالن را توجیه کرد. جانشینی دو عنصری $Ag^{+} \leftrightarrow 2Pb^{2+}Sb^{3+}$ سازوکار مهمی برای غنی‌سازی Sb و Ag در گالن است که

بیانگر حضور میانبرهای اسفالریت درون گالن است. همچنین جانشینی عنصری Cd به جای Pb در شبکه گالن نیز از دیگر شواهد حضور Cd در گالن مطرح شده است [۲۴]. حضور فلزهای کمیاب در گالن به صورت (۱) جانشینی عنصری فلز کمیاب به جای سرب در ساختار بلوری گالن و یا به صورت محلول جامد، (۲) میانبار جامد یا ترکیب کانی‌شناسی ویژه آن عنصر کمیاب و (۳) همراهی فلز کمیاب با میانبرهای کانی بیگانه حامل این عناصر چون اسفالریت، تتراهدریت و کالکوپیریت (به صورت میانبار یا محلول جامد) در شبکه بلوری گالن مطرح شده است [۲۵-۳۰].

همبستگی مثبت Ag با Sb ($r = 0.98$) نشان می‌دهد که این جانشینی دو عنصری در گالن‌های مورد بررسی کانسار چاه خربزه نیز رخ داده است. وجود همبستگی مثبت و قوی بین Pb و Ag ($r = 0.96$) را می‌توان به جانشینی ساده Ag با Pb (به دلیل نزدیک بودن شعاع یونی آنها به هم) نسبت داد. همبستگی مثبت Cu و As ($r = 0.90$) جانشینی دو عنصری $As^{3+} + Cu^{+} \leftrightarrow 2Pb^{2+}$ در گالن‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. همبستگی مثبت و قوی Cd با Zn ($r = 0.94$) نشان می‌دهد که Cd در شبکه بلوری اسفالریت جای گرفته است. همبستگی مثبت Pb با Zn ($r = 0.87$) و Cd ($r = 0.96$) نیز

جدول ۲ ترکیب شیمیایی نمونه‌های کانسنگ برداشت شده از کانسار چاه خربزه (همه مقادیر بر اساس گرم در تن است).

	Ag	As	Cd	Sc	Cu	Mo	Mn	Sb	Pb	Zn
CHK-1	۰.۶۱	۲۰.۴	۵.۷	۲.۴	۲۹	۱.۳۷	۲۰.۳	۱.۳۳	۱۴۸۶	۱۹۸۲
CHK-2	۰.۵۶	۱۲.۹	۶.۵	۱.۵	۱۹	۰.۹۳	۲۸.۶	۱.۱	۱۱۱۲	۵۷۵
CHK-3	۰.۳۶	۱۶.۳	۳.۷	۲.۱	۱۳	۰.۹۴	۲۰.۰	۱.۱۷	۶۶۵	۴۱۱
CHK-4	۱.۱	۲۰	۱۰.۸	۲	۱۷	۰.۹۱	۲۲.۸	۱.۳۶	۱۹۲۳	۱۰۵۷
CHK-5	۰.۳۹	۴.۵	۴.۶	۱	۸	۰.۷۶	۲۳.۶	۰.۸۹	۱۰۷۲	۴۲۰
CHK-6	۰.۹	۹.۳	۲.۱۵	۰.۹	۱۱	۱.۱۹	۳۶.۵	۱.۱	۵۷۴	۱۰۴۰
CHK-7	۰.۵۲	۳۶.۴	۲.۲	۲.۴	۴۱	۱.۵۲	۶۶.۶	۱.۹۹	۱۸۲۸	۲۷۸۶
CHK-8	۰.۴	۳	۱.۸۵	۰.۸	۳	۰.۶۳	۱۵.۹	۰.۹۵	۴۳۴	۱۱۹
CHK-9	۰.۴۳	۴.۸	۳.۸	۱.۱	۶	۱.۱۴	۲۷.۷	۱.۰۶	۹۶۶	۲۷۶
CHK-10	۰.۴۳	۹.۷	۱۶.۹	۰.۹	۱۵	۱.۰۲	۴۱.۱	۱.۲۲	۲۷۲۷	۲۱۶۲
CHK-11	۰.۴۸	۳.۱	۱.۳۵	۱.۳	۴	۰.۵۹	۱۶.۶	۰.۸۸	۹۳۷	۱۶۸
CHK-12	۰.۲۴	۳.۲	۱.۷۶	۱	۳	۰.۶۷	۲۱.۲	۰.۹۶	۵۰.۵	۲۰.۸
CHK-13	۰.۲۵	۳۴.۷	۲.۵	۰.۸	۳	۰.۵۷	۲۰.۵	۰.۸۸	۱۱۰.۸	۱۹۰
CHK-14	۰.۶	۱۲.۳	۸.۷	۰.۸	۸	۱.۱۴	۲۹.۸	۱.۱۶	۲۶۳۷	۹۵۹
CHK-15	۰.۳۲	۳۸.۴	۷.۲	۱.۱	۹	۰.۷۹	۳۲.۴	۱.۱۲	۱۵۷۱	۹۷۳
CHK-16	۰.۴۸	۱۰.۲	۸.۱	۱	۱۳	۱.۶۵	۴۰.۶	۱.۰۹	۱۰۲۶	۱۳۲۲
CHK-17	۰.۴۴	۳۳.۸	۲۲.۸	۱	۱۳	۰.۷۳	۴۸.۷	۱.۱۴	۹۹۰	۴۵۵۹
CHK-18	۳۰.۶	۲۷.۱	۴۶.۳	۰.۹	۱۹	۱۳.۸	۲۹.۲	۱.۲۷	%۳>	۱۸۷۲۴
CHK-19	۴۶.۳	۶۴	۱۲.۱	۱.۲	۳۴	۴۸.۸	۲۸.۴	۱.۸۴	۱۲۶۱۱	۲۹۵۹۳
CHK-20	۲۵۰	۲۹۲	۱۹۳	۱.۲	۱۰۳	۵۷.۴	۴۱.۳	۳۴.۳	%۳>	%۳>
CHK-21	۷.۶	۸۳.۲	۳۱.۲	۱.۱	۲۲	۱.۵۲	۴۴.۵	۱.۶۱	۱۳۹۲	۱۵۵۷۳

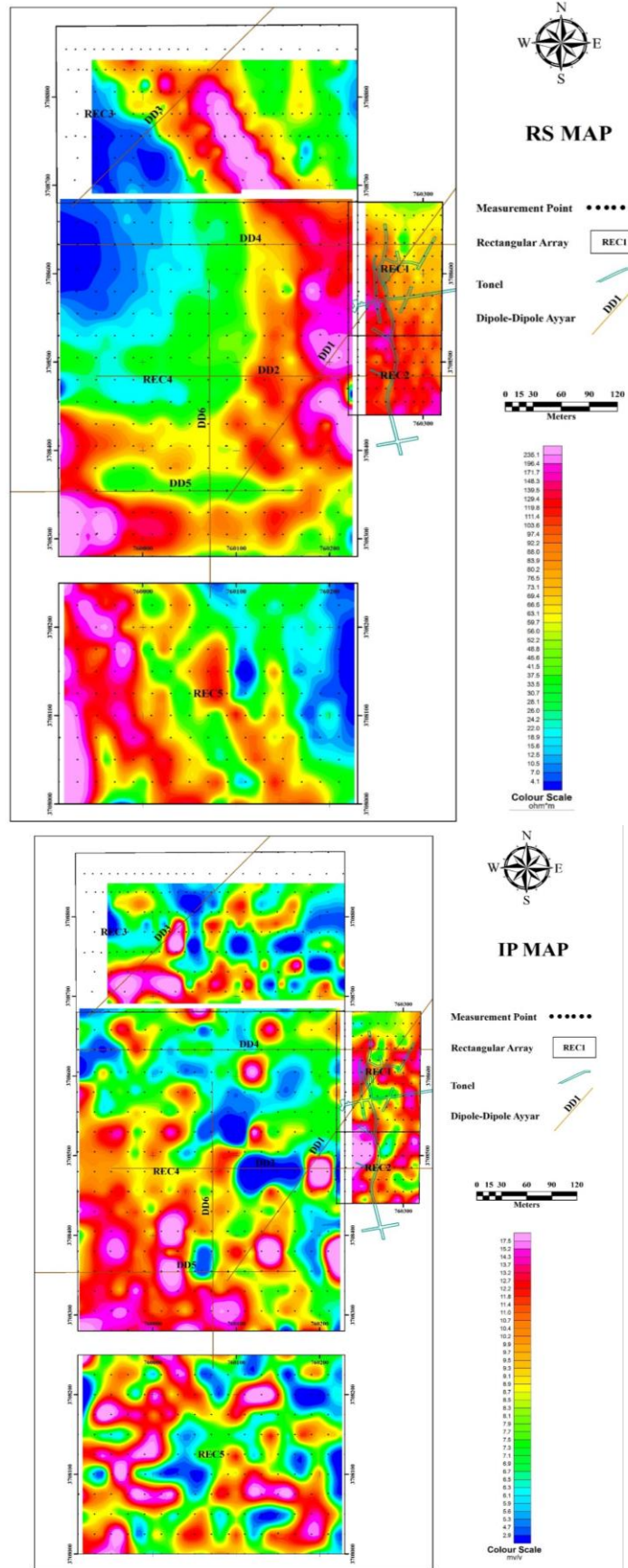
بررسی‌های زمین‌فیزیکی

هدف از انجام بررسی‌های زمین‌فیزیکی به دو روش برداشت‌های مستطیلی و نیمرخ‌های بارپذیری - مقاومت ویژه ظاهری، شناسایی پهنه‌های کانه‌زایی احتمالی و تعیین گسترش عمقی آنها، تشخیص همبری واحدهای سنگی و گسل‌های احتمالی و نیز تعیین نقاط مناسب برای حفاری گمانه‌های اکتشافی است [۳۱-۳۴]. با توجه به وجود رخنمون کانه‌زایی و آثار شدادی قدیمی زیاد و پراکنده در منطقه، بررسی ارتباط این رخنمون‌ها در عمق و تعیین عوامل زمین‌شناسی مختلف چون تعیین همبری‌ها و گسل‌ها به روش پتانسیل القایی و مقاومت ویژه ظاهری (IP/RS) از اهداف بررسی‌های زمین‌فیزیکی در کانسار چاه خربزه بوده است. در این پژوهش، از یک سامانه اندازه‌گیری بارپذیری و مقاومت‌سنجی ساخت شرکت GDD کانادا شامل یک دستگاه فرستنده جریان مدل TX III با توان ۱۸۰۰ وات و یک دستگاه گیرنده مدل GRX8-32 و یک دستگاه مولد جریان الکتریسیته ژاپنی با توان ۵۰۰۰ وات استفاده شده است. تعداد ۵ شبکه مستطیلی با روند خطوط شرقی - غربی (دو شبکه با فاصله الکترودی $AB=300$ و سه شبکه با $AB=800$) برداشت شد. سپس برای بررسی عمقی گستره، تعداد ۶ نیمرخ با آرایش دوقطبی - دو قطبی ($DD1$ و $DD4$ به صورت تلفیقی با فاصله‌های الکترودی $AB=20$ و $AB=40$ متر، $DD2$ با $AB=40$ و $DD3$ با فاصله الکترودی $AB=20$ متر) طراحی و برداشت شدند. پردازش نتایج بدست آمده از برداشت‌های بارپذیری - مقاومت ویژه به صورت شبه‌مقاطع نشان می‌دهد که در کل گستره کانسار، مقدار مقاومت ویژه ظاهری کمتر از ۵۰ اهم‌متر و مقدار پتانسیل القایی نیز تا حدود ۲۰ میلی‌ولت بر ولت است. نتایج اندازه‌گیری مقاومت ویژه ظاهری در گستره مستطیل‌های شماره ۱، ۲ و ۳ نشان دهنده وجود یک پهنه به نسبت مقاوم با مقاومت الکتریکی بالای ۱۵۰ اهم‌متر است که بر کرانه غربی محل تونل‌های استخراجی منطبق است و در ادامه با روند شمال‌غربی - جنوب‌شرقی در مستطیل شماره ۳ همچنان حضور دارد. مقادیر پتانسیل القایی اندازه‌گیری شده متغیر است و به صورت پهنه‌های مجزا و بدون روند ویژه‌ای در کل گستره برداشت مستطیل‌های طراحی شده دیده می‌شود. در بخش غربی مستطیل شماره ۴ بی‌هنجاری پتانسیل القایی دارای یک پیوستگی و راستا است. در بخش غربی مستطیل‌های

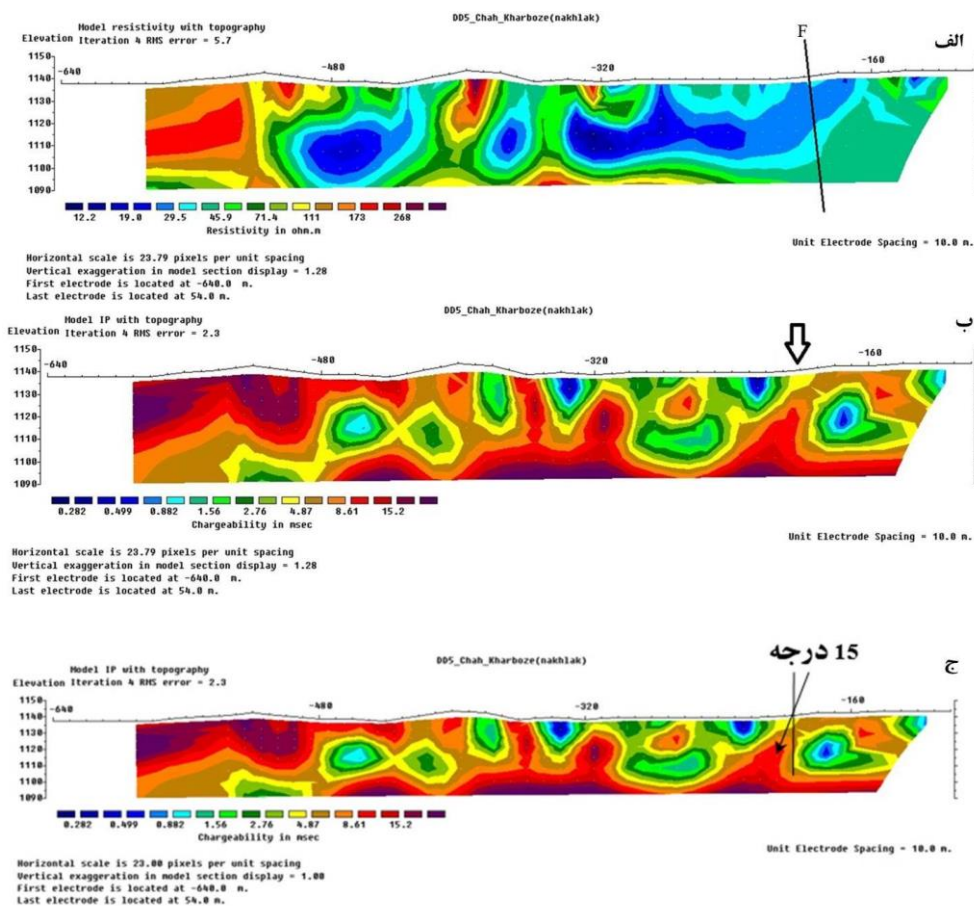
شماره ۱ و ۲ نیز گستره بی‌هنجاری پتانسیل القایی در بخش غربی تونل‌های استخراجی دیده می‌شود. با مقایسه مقادیر پتانسیل القایی و مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده با مقادیر گستره تونل استخراجی می‌توان نتیجه گرفت که بخش‌های دارای مقاومت الکتریکی به نسبت بالا و منطبق بر پهنه‌های پتانسیل القایی در منطقه مورد بررسی می‌تواند دارای اهمیت اکتشافی باشد [۳۵] با توجه به بررسی‌های زمین‌شناسی انجام شده که احتمال وجود کانی‌سازی را در پهنه‌های گسلی تشخیص داده است، می‌توان گفت که این گستره در غرب مستطیل شماره ۴ می‌تواند از نظر اکتشافی دارای اهمیت باشد (شکل‌های ۹ و ۱۰). شبیه‌سازی مقاطع نشان می‌دهد که منطقه مورد بررسی کاملاً زمین ساخته بوده و دارای گسل‌های احتمالی فراوان در کنار بخش‌های ناهنجار و کانه‌دار بوده که به احتمال بسیار نشان دهنده نقش ساختارهای گسلی عادی و کشتی به عنوان عامل کنترل کننده کانه‌زایی است.

بررسی‌های چاه‌پیمایی و مغزه‌های حفاری

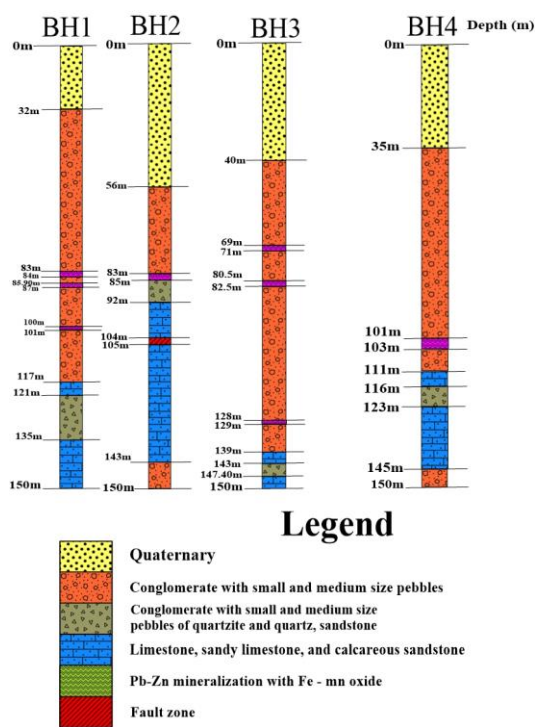
بر اساس بررسی‌های سطحی و برداشت‌های زمین‌فیزیکی در منطقه، ۷ نقطه برای حفاری پیشنهاد گردید [۳۵] (جدول ۳). پس از بررسی دقیق مغزه‌ها در منطقه، نمودار چاه‌نگاری آنها رسم شد که نتایج آن در شکل ۱۱ آورده شده است. بر این اساس، سنگ شناسی غالب مغزه‌ها در گستره کانسار چاه خربزه شامل کنگلومراست که بیشترین سطح رخنمون‌ها را شامل می‌شود و بخش‌هایی نیز از سنگ آهک، آهک ماسه‌ای، ماسه سنگ و ماسه سنگ آهکی تشکیل شده اند. بخش عمده کانه‌زایی نیز درون کنگلومراها رخ داده است. در گمانه شماره ۱ دو گستره ۸۳ تا ۸۴ متری و ۱۰۰ تا ۱۰۱ متری دارای کانه‌زایی رگه-رگچه‌ای سرب - روی همراه با اکسیدهای آهن و منگنز هستند. در گمانه شماره ۲ در گستره ۱۰۴ تا ۱۰۵ متری پهنه گسلی قرار دارد. در گمانه شماره ۳ در گستره-های ۶۹ تا ۷۱ متری، ۸۰/۵ تا ۸۲/۵ متری و ۱۲۸/۴۰ تا ۱۲۹/۴۰ متری کانه‌زایی رخ داده است. در گمانه شماره ۴، کانه‌زایی در گستره ۱۰۱ تا ۱۰۳ قرار دارد و دیگر گمانه‌ها بدون کانه‌زایی هستند. بیشترین تراکم رگه، رگچه‌ها در مغزه‌ها بر مناطق دارای بیشترین گسترش دگرسانی منطبق است. دگرسانی غالب دیده شده در مغزه‌ها دگرسانی لیمونیتی است.



شکل ۹ الف) نقشه مقاومت ویژه ظاهری، ب) نقشه بارپذیری القائی بدست آمده از روش برداشت مستطیلی در کانسار چاه خربزه.



شکل ۱۰ الف) شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری و ب) شبه مقطع بارپذیری القائی و پ) موقعیت نقطه حفاری مقطع DD5 در کانسار چاه خربزه.



شکل ۱۱ ستون چینه‌شناسی گمانه‌های BH1، BH2، BH3، BH4 در کانسار چاه خربزه.

برداشت

مهم‌ترین نتایج این پژوهش عبارتند از:

- ۱- کانسار چاه خربزه در واحد میزبان کنگلومرای به سن کرتاسه پسین به صورت دیرزاد و چینه‌کران رخ داده است.
- ۲- ماده معدنی اغلب با بافت‌های برشی، رگه - رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی و دانه‌پراکنده درون سنگ میزبان شکل گرفته است.
- ۳- کانی‌شناسی کانسنگ‌ها ساده بوده و شامل کانی‌های سولفیدی گالن و اسفالریت، کانی‌های ثانویه ویلمایت، همی-مورفیت و سروزیت، کانی‌های باطله کلسیت، دولومیت، کوارتز، کائولینیت، مسکویت - ایلیت و لیمونیت است.
- ۴- مهم‌ترین عوامل کنترل کننده کانی‌سازی کانسار چاه خربزه گسل‌ها، درزه و شکاف و شکستگی‌ها هستند. در شمال منطقه مورد بررسی، گسل‌های با راستای ۴۵ تا ۶۰ درجه بیشترین جابجایی را در واحد کنگلومرای ایجاد کرده‌اند. در این بین، گسل F2 بیشترین نقش را داشته است. در جنوب منطقه مورد بررسی، گسل F14 با سازوکار راستایی چپگرد بیشترین نقش را در جابجایی واحدهای سنگی بویژه تغییر راستا و شیب واحدهای سنگی داشته است.
- ۵- طی بررسی‌های زمین‌فیزیکی انجام شده در گستره کانسار، با مقایسه مقادیر پتانسیل القایی و مقاومت ویژه ظاهری اندازه-گیری شده با مقادیر گستره تونل استخراجی می‌توان نتیجه گرفت که بخش‌های دارای مقاومت الکتریکی به نسبت بالا و منطبق بر پهنه‌های پتانسیل القایی در منطقه می‌تواند دارای اهمیت اکتشافی باشند.
- ۶- نتایج برآمده از حفاری ۷ حلقه گمانه‌های اکتشافی و بررسی‌های انجام شده بر مغزه‌های حفاری نشان می‌دهد که بیشترین کانه‌زایی در گمانه‌های شماره ۱ و ۳ قرار دارد که همخوانی خوبی با گسترش اکسیدهای آهن و منگنز و دگرسانی لیمونیتی دارند.
- ۷- با ترکیب شواهدی از جمله شکل چینه‌کران و دیرزاد ماده معدنی، ساخت و بافت کانسنگ‌ها، نبود ارتباط بین کانه‌زایی و فعالیت‌های آذرین، سنگ میزبان کربناتی و دگرسانی دولومیتی، می‌توان کانسار چاه خربزه را در گروه کانسارهای سرب-روی با میزبان کربناتی (MVT) رده‌بندی نمود.

قدردانی

نگارندگان از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه ارومیه برخوردار بوده‌اند، که به این وسیله تشکر خود را از مسئولین مربوطه اعلام می‌دارند. نویسندگان از مدیریت محترم شرکت کیمیاگوهران آقای مهندس جوکار و نیز کارشناسان محترم آن شرکت بویژه آقایان مهندس موقر و بابازاده برای کمک به انجام بازدیدهای معدنی و نمونه‌برداری از مغزه‌های حفاری و تونل-های استخراجی قدردانی می‌نمایند. همچنین از نظر و پیشنهادهای سازنده داوران محترم مجله سپاسگزاری می‌گردد.

مراجع

- [1] Rajabi A., Rastad E., Canet C., "Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted Zn-Pb deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral exploration", *International Geology Review* 54 (2012) 1649-1672.
- [2] Aghanabati A., "Geology of Iran", Geological Survey of Iran, Tehran, (2004) 586 p.
- [3] Turner E. C., "Structural and stratigraphic controls on carbonate-hosted base metal mineralization in the Mesoproterozoic Borden Basin (Nanisivik District), Nunavut", *Economic Geology* 106 (2011) 1197-1223.
- [4] Keim M. F., Markl G., "Weathering of galena: Mineralogical processes, hydrogeochemical fluid path modeling, and estimation of the growth rate of pyromorphite", *American Mineralogist* 100 (2015) 1584-1594.
- [5] Dunham K. C., "The paragenesis and color of fluorite in the English Pennines", *American Mineralogist* 22 (1937) 468-478.
- [6] Awadh S. M., Habib R. H., Al-Bassam K. S., "Upper Cretaceous carbonate hosted zinc-lead-barite deposits in Northern Thrust Zone, northern Iraq: Petrography and geochemistry", *Arabian Journal of Geoscience* 1 (2008) 75-85.
- [7] Cook N. J., Ciobanu C. L., Pring A., Skinner W., Shimizu M., Danyushevsky L., Saini-Eidukat B., Melcher F., "Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study", *Geochim. Cosmochim. Acta* (2009) 73, 4761-4791.
- [8] Ye L., Cook N. J., Ciobanu C. L., Yuping L., Qian Z., Tiegeng L., Wei G., Yulong Y., Danyushevskiy L., "Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South

- [17] Wind S. C., Schneider D. A., Hannington M. D., McFarlane C. R. M., "Regional similarities in lead isotopes and trace elements in galena of the Cyclades Mineral District, Greece with implications for the underlying basement", *Lithos* (2020) 366–367.
- [18] Qi Y., Hu R., Gao, J., Leng C., Gao W., Gong H., "Trace and minor elements in sulfides from the Lengshuikeng Ag–Pb–Zn deposit, South China: A LA–ICP–MS study", *Ore Geol. Rev.* 141 (2022). 104663.
- [19] Liu S., Zhang Y., Ai G., Xue X., Li H., Shah SA., Wang N., "LA-ICP-MS trace element geochemistry of sphalerite: Metallogenic constraints on the Qingshuitang Pb–Zn deposit in the Qinhang Ore Belt, South China", *Ore Geol. Rev.* 141 (2022) 104659.
- [20] Wang K., Zhai D., Liu J., Wu H., "LA-ICP-MS trace element analysis of pyrite from the Dafang gold deposit, South China: Implications for ore genesis", *Ore Geol. Rev.* 139 (2021) 104507.
- [21] Wu T., Huang Z., He Y., yang M., Fan H., Wei C., Ye L., Hu Y., Xiang Z., Lai C., "Metal source and ore-forming process of the Maoping carbonate-hosted Pb-Zn deposit in Yunnan, SW China: evidence from deposit geology and sphalerite Pb-Zn-Cd isotopes", *Ore Geol. Rev.* 135 (2021) 104214.
- [22] George L., Cook N. J., Ciobanu C. L., Wade B. P., "Trace and minor elements in galena: A reconnaissance LA-ICP-MS study", *American Mineralogist* 100 (2015) 548–569.
- [23] George L. L., Cook N. J., Ciobanu C. L., "Partitioning of trace elements in co-crystallized sphalerite-galena-chalcopyrite hydrothermal ores", *Ore Geology Reviews* 77 (2016) 97–116.
- [24] Tauson V.L., Parkhomenko I.Y., Babkin D.N., Men'shikov V.I., Lustenberg E.E., "Cadmium and mercury uptake by galena crystals under hydrothermal growth: A spectroscopic and element thermo-release atomic absorption study", *European Journal of Mineralogy*, 17(4) (2005) 599–610.
- [25] Lueth V. W., Megaw P. K., Pingitore N. E., Goodell P. C., "Systematic variation in galena solid-solution compositions at Santa Eulalia, Chihuahua, Mexico", *Economic Geology* 95 (2000) 1673–1687.
- China: A LA-ICPMS study*", *Ore Geology Reviews* 39 (2011) 188–217.
- [9] Ye L., Li Z. L., Hu Y. S., Huang Z. L., Zhou J. X., Fan H. F., Danyushevskiy L., "Trace elements in sulfide from the Tianbaoshan Pb-Zn deposit, Sichuan Province, China: A LA-ICPMS study", *Acta Petrol Sin* 32 (11) (2016) 3377–3393.
- [10] Zhou L. L., Zeng Q. D., Liu J. M., Duan X. X., Sun G. T., Wang Y. B., Chen P. W., "Tracing mineralization history from the compositional textures of sulfide association: A case study of the Zhenzigou stratiform Zn-Pb deposit", *Ore Geol. Rev.* 126 (2020).
- [11] Wei C., Ye L., Hu Y., Huang Z., Danyushevsky L., Wang H., "LA-ICP-MS analyses of trace elements in base metal sulfides from carbonate-hosted Zn-Pb deposits, South China: A case study of the Maoping deposit", *Ore Geol. Rev.* 130 (2021).
- [12] Yang Q., Zhang X., Ulrich T., Zhang J., Wang J., "Trace element compositions of sulfides from Pb-Zn deposits in the Northeast Yunnan and northwest Guizhou Provinces, SW China: Insights from LA-ICP-MS analyses of sphalerite and pyrite", *Ore Geol. Rev.* 141 (2022) 104639.
- [13] Hu Y., Wei C., Ye L., Huang Z., Danyushevsky L., Wang H., "LA-ICP-MS sphalerite and galena trace element chemistry and mineralization-style fingerprinting for carbonate-hosted Pb-Zn deposits: Perspective from early Devonian Huodehong deposit in Yunnan, South China", *Ore Geology Reviews* 136 (2021) 104253.
- [14] Zhang WD., you HT., Li B., Zhao KD., Chen XD., Zhu L., "Ore-forming processes of the Qixiashan carbonate-hosted Pb-Zn deposit, South China: constraints from sulfide trace elements and sulfur isotopes", *Ore Geol. Rev.* 143 (2022) 104786.
- [15] Yang Q., Zhang X. j., Ulrich T., Zhang J., Wang J., "Trace element compositions of sulfides from Pb-Zn deposits in the Northeast Yunnan and Northwest Guizhou Provinces, SW China: Insights from LA-ICP-MS analyses of sphalerite and pyrite", *Ore Geol. Rev.* (2021) 104639.
- [16] Cave B., Lilly R., Barovich K., "Textural and geochemical analysis of chalcopyrite, galena and sphalerite across the Mount Isa Cu to Pb-Zn transition: Implications for a zoned Cu-Pb-Zn system", *Ore Geol Rev* 124 (2020) 104568.

- [30] Renock D., Becker U., "A first principles study of coupled substitution in galena", *Ore Geology Reviews* 42 (2011) 71–83.
- [31] Sadifi A. H., Hafizi M. K., "Application of induced polarization method for the exploration of polymetallic mines", *Geosciences*, 19 (2012) 81–97.
- [32] Norouzi G. H., "Electrical methods in exploration geochemistry", University of Tehran Publications, Tehran, (2013) 376 p.
- [33] Telford W. M., Geldart L. P., Sheriff R. E., Keys, D., "Applied Geophysics", Cambridge University Press, New York (1976) 1–770.
- [34] Gorabjeiri Pour, A. Mobasheri, M., "Compiling data from geological, mineralogical and geophysical (IPRS) studies on Mahour deposit, northwest of Dehsalm, Lut Block", *Journal of Economic Geology* 7 (2044) 307–325.
- [35] Report of "the exploration operation of the Chah harbozeh deposit", Kimia Goharan Pb-Zn Mining Company, (2018) 138 p.
- [26] Li G. M., Zhao Z. X., Wei J. H, Ulrich T., "Trace element compositions of galena in an MVT deposit from the Sichuan-Yunnan-Guizhou metallogenic province, SW China: Constraints from LA-ICP-MS spot analysis and elemental mapping", *Ore Geology Reviews* 150 (2022) 105123.
- [27] Chutas N. I., Kress V. C., Ghiorso M. S., Sack R. O., "A solution model for high-temperature PbS - $AgSbS_2$ - $AgBiS_2$ galena", *American Mineralogist* 93 (2008) 1630–1640.
- [28] Bethke, P. M., Barton, P. B., "Distribution of some minor elements between coexisting sulfide minerals", *Economic Geology* 66 (1971) 140–163.
- [29] Foord E. E., Shawe D. R., Conklin, N. M., "Coexisting galena, $PbS_{1-x}S_x$ and sulfosalts: evidence for multiple episodes of mineralization in the Round Mountain and Manhattan gold districts, Nevada", *The Canadian Mineralogist* 26 (1988) 355–376.