

## کانه‌سازی و چگونگی پیدایش کانسنگ غیرسولفیدی سرب-روی (ـمس) چاه میله (شمال شرق انارک)، ایران مرکزی

بهزاد مهرابی<sup>۱</sup>، نفیسه چقانه<sup>\*</sup><sup>۱</sup>، ابراهیم طالع فاضل<sup>۲</sup>

۱- گروه زمین شیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعینی سینا، همدان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۵/۱۰، نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۸/۱۱)

**چکیده:** کانسار سرب-روی (ـمس) چاه میله با تناظر تقریبی یک میلیون تن و عیار ۲/۱۵ درصد سرب و روی در کمرنند فلزیابی یزد- انارک پهنه ایران مرکزی، واقع است. کانه‌سازی سولفیدی اولیه شامل گالن، اسفالریت، کالکوپیریت و پیریت در واحد مرمر دولومیتی مجموعه چاه‌گربه به سن تریاک میانی رخ داده است. ماده معدنی اغلب با بافت‌های برشی، پرکننده فضای خالی، پراکنده و جانشینی شکل گرفته است. کانسنگ غیرسولفیدی کانسار چاه میله در اثر اکسایش برونزاد کانی‌های سولفیدی اولیه طی برهم‌کنش‌های پیچیده چون راندگی زمین‌ساختی، گسترش کارست، تغییرات سطح ایستابی و هوازدگی، در شرایط آب هوای گرم و خشک تشکیل شده است. مهمترین کانی‌های غیرسولفیدی کانسار چاه میله سروزیت، همی‌مورفیت، ولفنتی، اسمیت‌زونیت، مالاکیت و اکسی-هیدروکسیدهای آهن هستند. در کانسار چاه میله، تشکیل اسیدسولفوریک و در نتیجه کاهش pH با اکسایش پیریت و سایر کانی‌های سولفیدی، افزایش فشار دی اکسید کربن ( $P_{CO_2}$ ) سیال‌ها در اثر خنثی‌سازی سیال‌های اسیدی با سنگ میزان کربناتی، آزادشدن یون‌های سولفاتی و تنهشینی اکسی-هیدروکسیدهای آهن نقش مهمی در تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی دارند. در شرایط اسیدی موجود، فلز روی از منطقه اکسایش مهاجرت کرده و در مناطق دورتر به صورت کانی‌های کربناتی (چون اسمیت‌زونیت و کمتر هیدروزنسیت با توجه به مقادیر  $P_{CO_2(g)}$ ) تنهشین شده، در حالی که فلز سرب اغلب به صورت سروزیت در منطقه اکسایش تنهشین و یا به سطح آهن III اکسیدهای آبدار جذب شده است. براساس یافته‌های زمین‌شناسی، بافتی و کانی‌شناسی، کانسنگ غیرسولفیدی چاه میله را می‌توان از گروه کانسارهای غیرسولفیدی برونزاد، زیرده کانسارهای جانشینی مستقیم (کانسنگ سرخ) در نظر گرفت.

**واژه‌های کلیدی:** کانسارهای سرب و روی؛ غیرسولفیدی؛ برونزاد؛ ایران مرکزی؛ انارک؛ چاه میله.

**ذخایر غیرسولفیدی** به سه زیرده جانشینی مستقیم (کانسنگ سرخ)، جانشینی سنگ دیواره (کانسنگ سفید) و نوع پسماندی و پرکننده کارست تقسیم می‌شوند [۱، ۲، ۱۱]. کانسارهای غیرسولفیدی جانشینی مستقیم با نام کانسنگ سرخ شناخته شده‌اند که در آنها فلزهای آزاد شده، به صورت محلی و به طور مستقیم در بخش بالایی کانسنگ سولفیدی اولیه به دام می-افتدند. این زیرده غنی از اکسی-هیدروکسیدهای آهن (اغلب گوتیت و هماتیت)، همی‌مورفیت، سروزیت و هیدروزنسیت هستند و بیش از ۲۰ درصد روی، بیش از ۷ درصد آهن و مقادیر بالای سرب $\pm$ آرسنیک دارند [۱۲، ۱۳]. کانه‌زایی

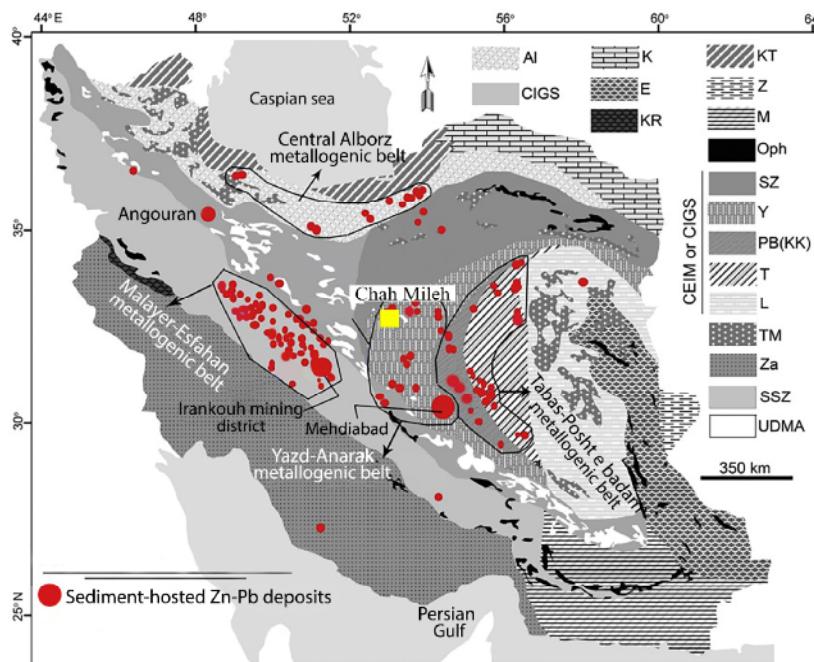
**مقدمه** ذخایر غیرسولفیدی شامل مجموعه‌ای از کانه‌های اکسیدی روی (سرب) هستند که اغلب در ارتباط با تکامل برونزاد کانسنگ سولفیدی اولیه (چون ذخایر نوع دره می‌سی‌سی‌پی (MVT)، جانشینی کربناتی، رسوی-بروندمی (SEDEX)، نوع ایرلندي، رگه-ای و به طور ناچیز ذخایر اسکارن)، تشکیل می‌شوند [۱-۳]. همچنان، کانسارهای غیرسولفیدی در اثر فرایندهای درونزاد به صورت (۱) جانشینی با کنترل کننده ساختاری [۶-۴]، (۲) عدسی‌های چینه‌سان در محیط‌های با درجه دگرگونی بالا [۷، ۸] و (۳) رخدادهای گرمابی [۹، ۱۰]، شکل می‌گیرند. در محیط‌های برونزاد،

\*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۰۰۸۲۸۲۳۵، پست الکترونیکی: na.chaghane@gmail.com

ذخیره غیرسولفیدی، انگوران با ۱۴۶ میلیون تن کانسنگ غیرسولفیدی و ایرانکوه با بیش از ۲۰ میلیون ذخیره سولفیدی و غیرسولفیدی غنی‌ترین ذخایر غیرسولفیدی روی و سرب ایران محسوب می‌شوند [۲۳، ۲۱، ۱۲]. کانسار سرب-روی (مس) چاه-۳۰ میله شامل نهشته‌های مزرعه‌دراز، کوه‌میله و سیلچو در فاصله ۳۰ کیلومتری شمال شرق انارک (ایران مرکزی) واقع است (شکل ۱) [۲۵، ۲۴]. امکان کانی‌سازی فلزهای پایه در کانسار چاه‌میله برای نخستین بار در سال ۱۹۸۴ توسط کارشناسان روسی شرکت تکنواکسپورت (ژومنتال)، شناسایی شد. طی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ فعالیت‌های اکتشافی از جمله تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی ۱۲۵۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ هکتاری انجام شد. حجم ۵۰۶ مترمکعب، حفر ۵ گمانه اکتشافی با عمق‌های ۶۵ تا ۸۵ متر و تجزیه زمین-شیمیایی ۴۵۰ نمونه در منطقه توسط شرکت مهندسین مشاور کان‌آذین انجام شد [۲۷، ۲۶]. در این پژوهش، افزون بر معرفی ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و سنگ‌نگاری کانسنگ غیرسولفیدی چاه‌میله، چگونگی تشکیل کانسنگ ثانویه برونزاد چاه‌میله و عوامل کنترل کننده کانه‌زایی در آن بررسی شده است. توجه به چگونگی پیدایش و کانه‌زایی در این نوع کانسارها می‌تواند نقش مؤثری در معرفی و بی‌جویی ذخایر غیرسولفیدی فلزهای پایه در نواحی مشابه داشته باشد.

غیرسولفیدی نوع جانشینی سنگ دیواره اغلب با نام کانسنگ سفید شناخته می‌شود که در آن فلزها توسط آب‌های زیرزمینی پایین‌رو و شب زمین‌شیمیایی از کانسنگ سولفیدی اولیه به سوی سنگ میزبان حمل می‌شوند [۱، ۲]. این کانسارها دارای اسمیت‌زونیت، هیدروزینیت، به مقدار کم اکسیدهای آهن، کمتر از ۴۰ درصد روی، کمتر از ۷ درصد آهن و دارای تمکز بسیار پایینی از سرب هستند [۹، ۱۲، ۱۴]. این ذخایر ممکن است به نسبت در نزدیکی کانسنگ اولیه و تا چند صد متر دورتر از آن تشکیل شوند. این زیررده به نسبت زیررده کانسنگ سرخ اغلب غنی از روی و فقری از سرب است و از دیدگاه فلزکاری و محیط زیست برتری دارد [۲، ۱۲، ۱۳].

بیش از ۳۰۰ کانسار سرب-روی با سنگ میزبان رسوی در ایران شناسایی شده‌اند که شامل ذخایر رسوی-برونزی (SEDEX)، نوع ایرلندي و می‌سی‌سی‌بی (MVT) هستند [۱۵-۲۰]. در برخی از این کانسارها، کانی‌سازی از نوع برونزاد غیرسولفیدی است که بخش قابل توجهی از ذخایر سرب-روی ایران را تشکیل می‌دهند [۲۱، ۱۲، ۲۲]. مهمترین ایالت‌های فلززایی کانی‌سازی غیرسولفیدی در ایران شامل ایران مرکزی، پهنه سندج-سیرجان و ناحیه البرز با سن پروتروزونیک تا ترشیاری هستند [۲۱]. کانسارهای مهدی آباد با ۴۵/۲ میلیون تن

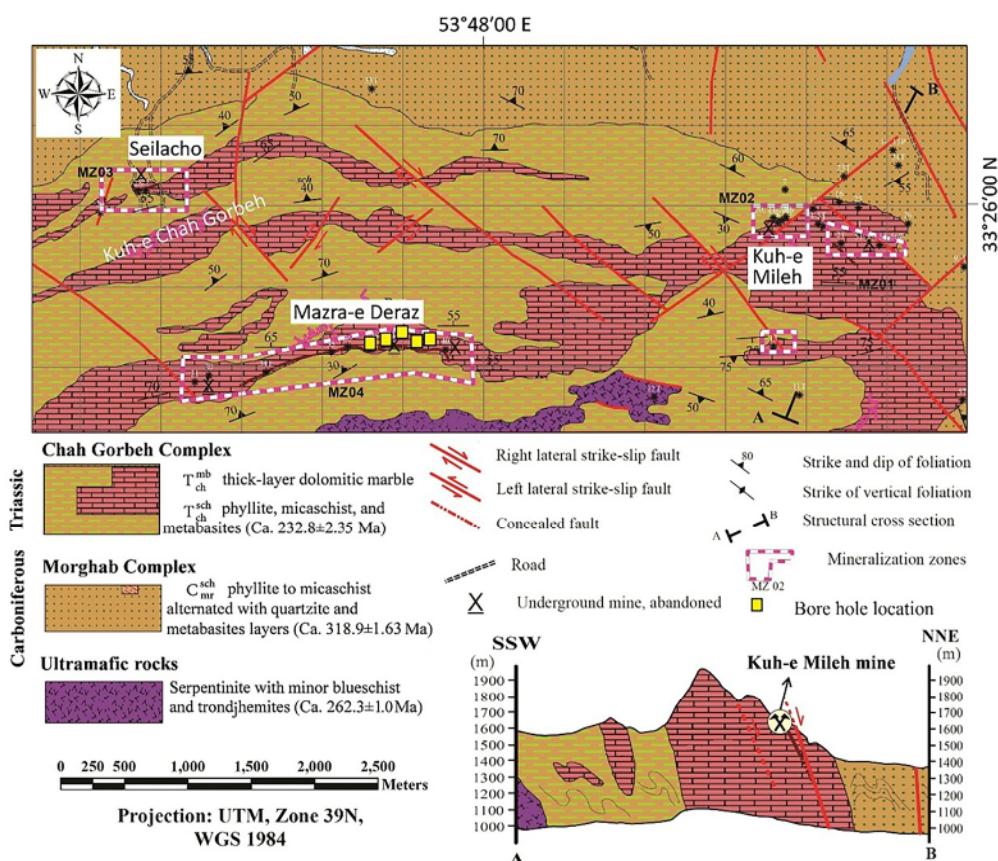


شکل ۱ توزیع ذخایر روی (سرب) با سنگ میزبان رسوی در نقشه ساختاری ایران (برگرفته از مراجع [۲۴، ۲۵] با تغییرات) و موقعیت کانسار چاه‌میله در کمرنده فلززایی یزد-انارک. AI: پهنه البرز، CIGS: پهنه تدریجی زمین‌شناسی و ساختاری ایران مرکزی، E: گستره شرق ایران، KR: کپه‌داغ، KT: کرمانتشاه، Z: پهنه ساختاری خزر-تالش-زیوه، M: پهنه مکران، Oph: کمرنده افیولیتی، PB: قطعه پشت‌بادام، SSZ: پهنه سندج-سیرجان، T: قطعه طبس، TM: سنگ‌های ماسه‌ای ترشیاری، Za: کمان ماسه‌ای ارومیه-دختر، Y: قطعه یزد، Z: منطقه زابل، Za: کمرنده زاگرس).

اساس روش  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  موسکوویت، حدود  $318.9 \pm 1.63$  میلیون سال تعیین شده است [۲۸]. مجموعه چاه‌گربه از دو واحد سنگی شامل ۱) فیلیت‌های غنی از کوارتزیت، سنگ‌های فرامافیک دگرگون شده (متاپارزیت‌ها) و میکاشیست ( $T_{\text{ch}}^{\text{sch}}$ ) و ۲) مرمرهای دولومیتی ضخیم لایه ( $T_{\text{ch}}^{\text{mb}}$ ) تشکیل شده است (شکل‌های ۳ الف و ب). سن شیست‌های مجموعه چاه‌گربه براساس روش  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  بر استیلپنوملان  $232.8 \pm 2.35$  میلیون به‌دست آمده است [۲۸]. واحد مرمر دولومیتی ضخیم لایه، میزبان اصلی کانه‌سازی سولفیدی درونزاد در کانسار چاه‌میله است. از ویژگی‌های واحد مرمر دولومیتی، رخداد مواد آلی به صورت بی‌شكل در برخی از نقاط آن است (شکل ۳ پ). در کانسار چاه‌میله، شواهد عملکرد خطواره گسلی به صورت گسل‌های عادی و راستالغز با روند شمال‌شرقی-جنوب‌غربی، شمال‌غربی-جنوب‌شرقی و شرقی-غربی دیده می‌شوند (شکل ۳ ت). همچنین، در جنوب مزرعه‌دراز، گسل‌های معکوس با راستای شرقی-غربی باعث رانده‌شدن واحدهای فرامافیک بر واحدهای جوان‌تر مجموعه چاه‌گربه شده است.

### چینه‌شناسی و زمین‌شناسی ساختاری

کانسار چاه‌میله به عنوان یکی از قدیمی‌ترین معادن سرب-روی ایران، در فاصله ۳۰ کیلومتری شمال شرق انارک (استان اصفهان) و ۱۲ کیلومتری جنوب معادن سرب-روی نخلک، در رشته کوه‌های کوه‌میله-دم‌سفید-چاه‌گربه واقع است. براساس تقسیم‌بندی پهنه‌های رسوی-ساختاری ایران توسط آقاباتی [۲۴]، منطقه چاه‌میله در غرب خرده قاره‌ی ایران مرکزی و قطعه یزد قرار دارد که بخشی از مجموعه دگرگونی انارک (شامل چند زیرمجموعه با رخدادهای دگرگونی و ساختاری نامگن [۳۱-۲۸]) را تشکیل می‌دهد. مهم‌ترین واحدهای سنگی در منطقه چاه‌میله از قدیم به جدید شامل مجموعه مرغاب، سنگ‌های فرامافیک و مجموعه چاه‌گربه هستند (شکل ۲). سنگ‌های فرامافیک شامل توالی از هارزبورگیت سرپاتینی و الیوین پیروکسنیت لایه‌ای هستند که در آن، توده‌های نفوذی پلاژیوگرانیت، کوارتزدیوریت، ترونجمیت، تونالیت و گابرو نفوذ کرده‌اند [۲۹، ۲۸]. مجموعه مرغاب مجموعه‌ای یکنواخت شامل فیلیت و میکاشیست متناوب با لایه‌های کوارتزیت و مرمرهای نازک لایه ( $C_{\text{mr}}^{\text{sch}}$ ) بوده که سن آن بر



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی ساده شده از کانسار چاه‌میله که در آن موقعیت نهشته‌های کوه‌میله، مزرعه‌دراز و سیلچو در میزبان مرمرهای دولومیتی مجموعه چاه‌گربه نشان داده شده است (برگرفته از مراجع [۲۷، ۲۶] با تغییرات).



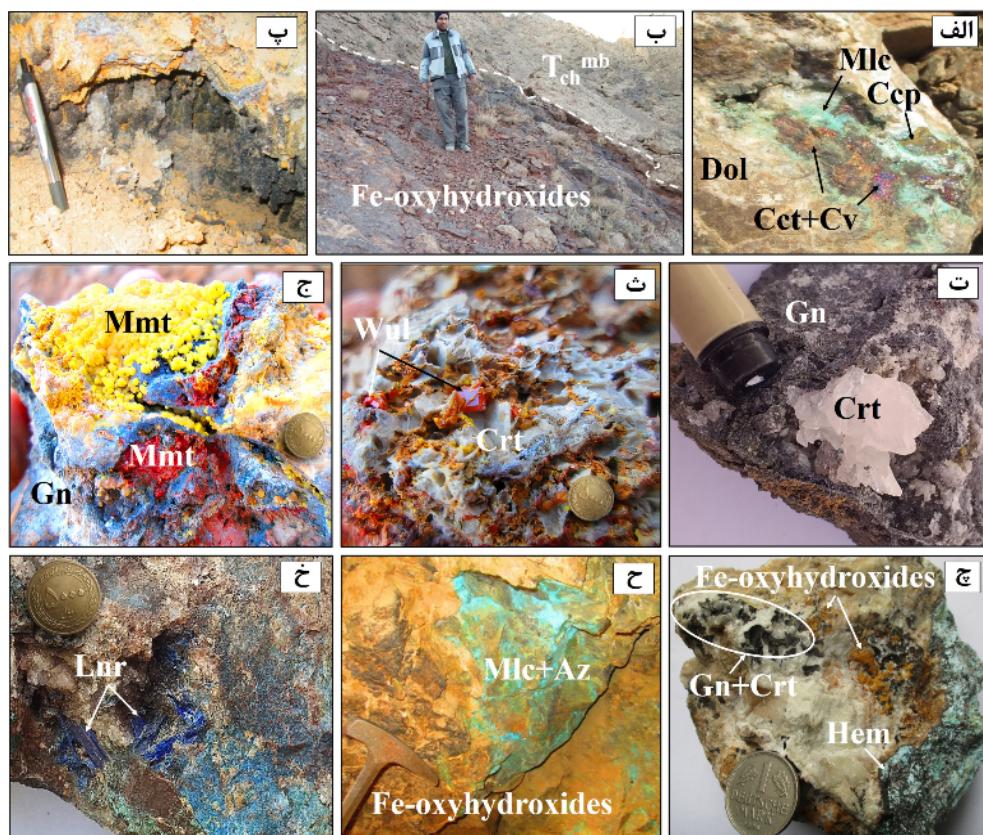
شکل ۳ تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از واحدهای سنگی و گسل‌ها در کانسار چاه‌میله: (الف) دید کلی از کانسار چاه‌میله و واحد سنگی موسکویت شیست (در کنار واحد مرمر دولومیتی ( $T_{ch}^{mb}$ ) مجموعه چاه‌گربه (دید به شمال)، ب) موسکویت کلریت شیست و بافت‌های نماتوبلاستیک و گرانوبلاستیک (در نور قطبیده مقطع، XPL، پ) رخداد ماده آلی در سنگ میزبان کربناتی (XPL)، ت) کانی‌سازی سولفیدی در فرادیواره گسل عادی با روند شمال‌شرق-جنوب‌غرب، ث) نمونه دستی از رگه‌های منقاطع گالن در میزبان مرمر دولومیتی، چ) نمایی از رگه سولفیدی گالن-اسفالرت-پیریت، چ) نمونه دستی از کانسنگ برشی قطعه‌های سنگ میزبان کربناتی در یک سیمان دولومیت-گالن، ح و خ) تونل و گزنهای (استخراج دنبال رگه) حفر شده در واحد مرمر دولومیتی مجموعه چاه‌گربه ( $T_{ch}^{mb}$ ). نشانه‌های اختصاری کانی‌ها عبارتند از Chl: کلریت، Dol: دولومیت، Gn: گالن، Ms: موسکویت، Qz: کوارتز.

فیلیپس مدل Xpert-pro Co K $\alpha$  با پرتوی (طول موج Å ۱۰.۹۶۷۸۹)، ولتاژ ۴۰ kV و شدت جریان ۳۵ mA در بخش کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران (کرج)، بررسی شدند.

#### کانه‌زایی

کانسار سرب-روی (مس) چاهمیله (در سه ذخیره کوه‌میله، مزرعه دراز و سیلچو) با سنگ میزبان مرمر دولومیتی تریاپس میانی دارای کانه‌زایی‌های سولفیدی درون‌زاد و سولفیدی و غیرسولفیدی برون‌زاد است. گسل‌های عادی و راستالغاز با روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی و شمال‌شرقی-جنوب‌غربی کنترل‌کننده‌های اصلی کانه‌زایی در کانسار چاهمیله هستند (شکل ۳). ماده معدنی اغلب با بافت‌های برشی، پرکننده فضای خالی، پراکنده و جانشینی شکل گرفته است (شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶).

**روش بررسی**  
پس از بازدیدهای صحرایی و نمونه‌برداری از بخش‌های مختلف کانسار (واحدهای کربناتی سنگ میزبان، کانسنگ فلزی و دگرسانی‌های همراه در رخمنون‌های سطحی، تونل‌ها، ترانشه‌ها و گمانه‌های اکتشافی)، در مجموع ۱۲۰ مقطع نازک، صیقلی و نازک-صیقلی برای سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری تهیه و با میکروسکوپ قطبی نور بازتابی و عبوری زایس (مدل Axioplan2) در دانشگاه خوارزمی تهران، بررسی شدند. برای تکمیل بررسی‌های کانه‌نگاری و شناسایی کانی‌های غیرسولفیدی کمیاب، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) زایس همراه الگوی EDS در آزمایشگاه SEM دانشگاه خوارزمی تهران، استفاده شد. افرون بر آن، برای شناسایی کانی‌های غیرسولفیدی کمیاب و دگرسانی همراه، تعداد ۲۰ نمونه تا اندازه ریزتر از ۶۰ میکرون یودر شده و با طیف‌سنج پراش پرتو ایکس (XRD) میکرون یودر شده و با طیف‌سنج پراش پرتو ایکس (XRD)

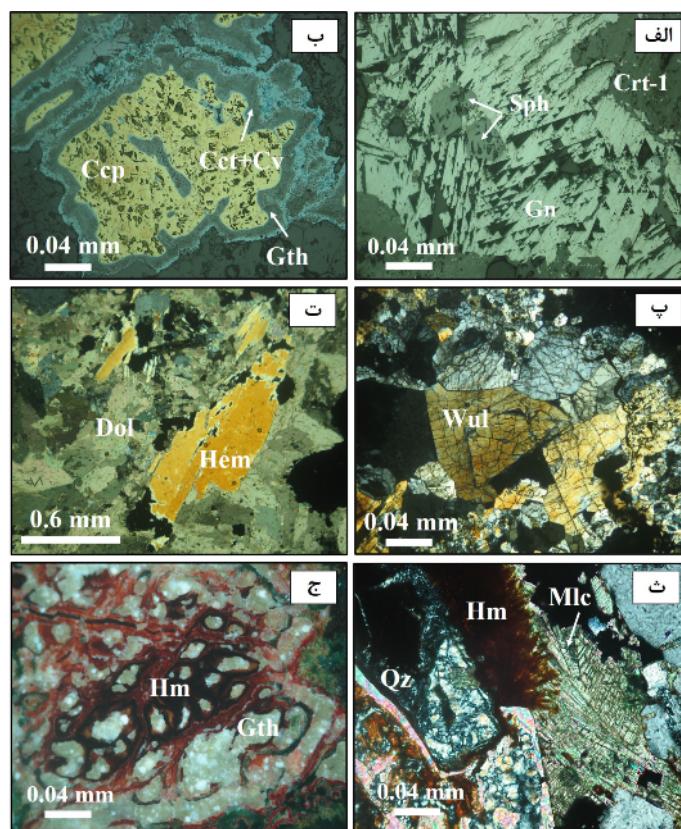


شکل ۴ تصاویر صحرایی و نمونه دستی از کانی‌های سولفیدی و غیرسولفیدی هدف در کانسار چاهمیله: (الف) بافت جانشینی در کالکوپیریت با رخداد کالکوسبیت، کوولیت و مالاکیت، (ب) مرز سنگ میزبان دولومیتی با کانی‌سازی غیرسولفیدی اکسی-هیدروکسیدهای آهن، (پ) رخمنون‌های زرد تا صورتی از اکسایش گالن ناشی از تبدیل کانسنگ سولفیدی اولیه به کانسنگ غیرسولفیدی، (ت) بلور آزاد سروزیت ناشی از اکسایش گالن، (ث) بلور چاروجهی ولفنیت نارنجی همراه سروزیت، (ج) بلورهای کمیاب میمتیت زرد و قرمز در سطح گالن اکسیده، (چ) مجموعه درهمرشدی کانی‌های غیرسولفیدی همی-مورفیت، سروزیت و اکسی-هیدروکسیدهای آهن، (ح) مالاکیت و آزوریت همراه با اکسی-هیدروکسیدهای آهن، (خ) بلورهای درشت و آبی رنگ لیناریت. (آ: آزویت، Cr: سروزیت، M: میمتیت، Wul: ولفنیت، Mmt: مالاکیت، Gn: گالن، Dol: دولومیت، Cet: کالکوپیریت، Cv: کالکوسبیت، Cep: کالکوپیریت، Mlc: مورفیت، Hem: همی-مورفیت، Lnr: لیناریت).

بر کانسنگ سولفیدی درون زاد و غنی شده بروزن زاد اثر گذاشته است؛ سرانجام کانسنگ بروزن زاد اکسیدی- هیدروکسیدی با مجموعه‌ای از کانی‌های کربناتی (سروزیت، مالاکیت، آزوپریت و اسمیت‌زونیت)، سیلیکاتی (همی‌مورفیت، ولیمیت و کربزوکلا)، کلریدی (میمتیت و آتاکامیت)، سولفاتی (ليناریت) و اکسی- هیدروکسیدی (لینتر، پلاتریت، ولفنتیت، کوپریت، هماتیت، گوتیت، مگنتیت و لیمونیت)، تشکیل شده است (شکل‌های ۴-خ و ۵-پ-ج). تشکیل کانی‌های سولفیدی روی و سرب همراه با کانسنگ بروزن زاد در بیشتر ذخایر کشور مراکش رایج است [۳۲]. همچنین در کانسراهای غیرسولفیدی روی (سرب) در ایران، زامبیا [۳۴، ۳۳] و نامبیا [۳۵]، کانی‌های سولفیدی ثانویه گزارش شده‌اند. دولومیت و کوارتز فراوان- ترین کانی‌های باطله در کانسرا چاممیله هستند که به‌طور فرعی کلسیت، باریت، سیدریت و آنکریت را همراهی می‌کنند.

دولومیتی و سیلیسی‌شدن از دگرسانی‌های اصلی در کانسرا چاممیله بوده که اغلب با بافت برشی همراه هستند. کانه‌زایی بخش سولفیدی در روزن زاد مشابه با ذخایر نوع دره می‌سی‌سی‌بی (MVT) اغلب در بخش‌های زیرزمینی و تونل‌های منطقه دیده می‌شود (شکل‌های ۳-ح و خ) که شامل گالن، اسفالریت، پیریت و کالکوپیریت هستند (شکل‌های ۵-الف و ب)، پس از تشکیل کانسنگ بروزن زاد، در نتیجه انحلال سولفیدهای دانه پراکنده موجود با آبهای جوی، در شرایط اسیدی و نفوذ این آبهای از طریق گسل‌ها و شکستگی‌ها به ترازهای عمقی تا زیر سطح ایستابی (محیط احیاء)، فرایند غنی‌سازی بروزن زاد با تشکیل کانی‌های کالکوسیت و کولولیت رخ داده است (شکل‌های ۴-الف و ۵-ب).

پس از تشکیل پهنه غنی‌سازی بروزن زاد، در نتیجه فعالیت‌های زمین‌ساختی و بالآمدگی منطقه، سیال جوی کم‌دما پس از مهاجرت از سامانه‌های شکستگی و واکنش‌های شیمیایی جانشینی،

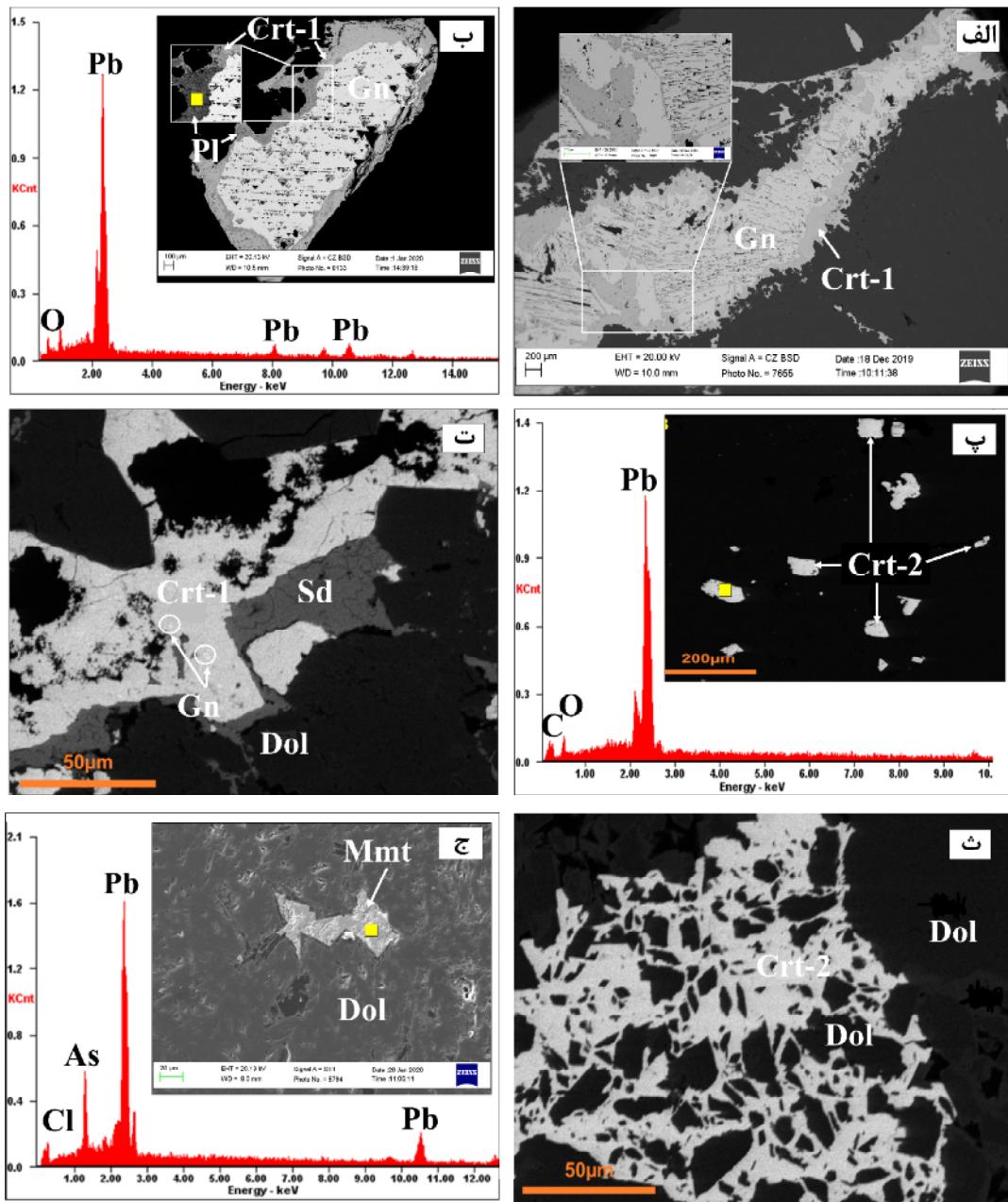


شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی از کانی‌های سولفیدی و غیرسولفیدی هدف در کانسرا چاممیله: (الف) میانبار اسفالریت در گالن و رخداد سروزیت نوع اول در لبه گالن (در نور قطبیده صفحه‌ای، PPL)، (ب) رخدادهای کانی‌های ثانویه کالکوسیت، کولولیت و مالاکیت در لبه کالکوپیریت (XPL)، (پ) بلورهای خودشکل (XPL)، (ت) رخداد بلورهای خودشکل همی‌مورفیت در سنگ میزان دولومیتی (XPL)، (ث) رخداد مالاکیت هرمی با بافت پرکنده فضای خالی و ولفنتی (XPL)، (ج) بافت مشبک هماتیت و جانشینی آن با گوتیت (PPL). نشانه‌های اختصاری کانی‌ها عبارتند از: Crt: سروزیت، Ccp: کالکوپیریت، Cct: کالکوسیت، Cv: کولولیت، Dol: دولومیت، Gn: گالن، Gn: دولومیت، Hem: گوتیت، Hm: هماتیت، Mlc: مالاکیت، Qz: کوارتز، Sph: سولفیدهای کانی‌های ثانویه گزارش شده بروزن زاد از ایران، Zn: زنگن.

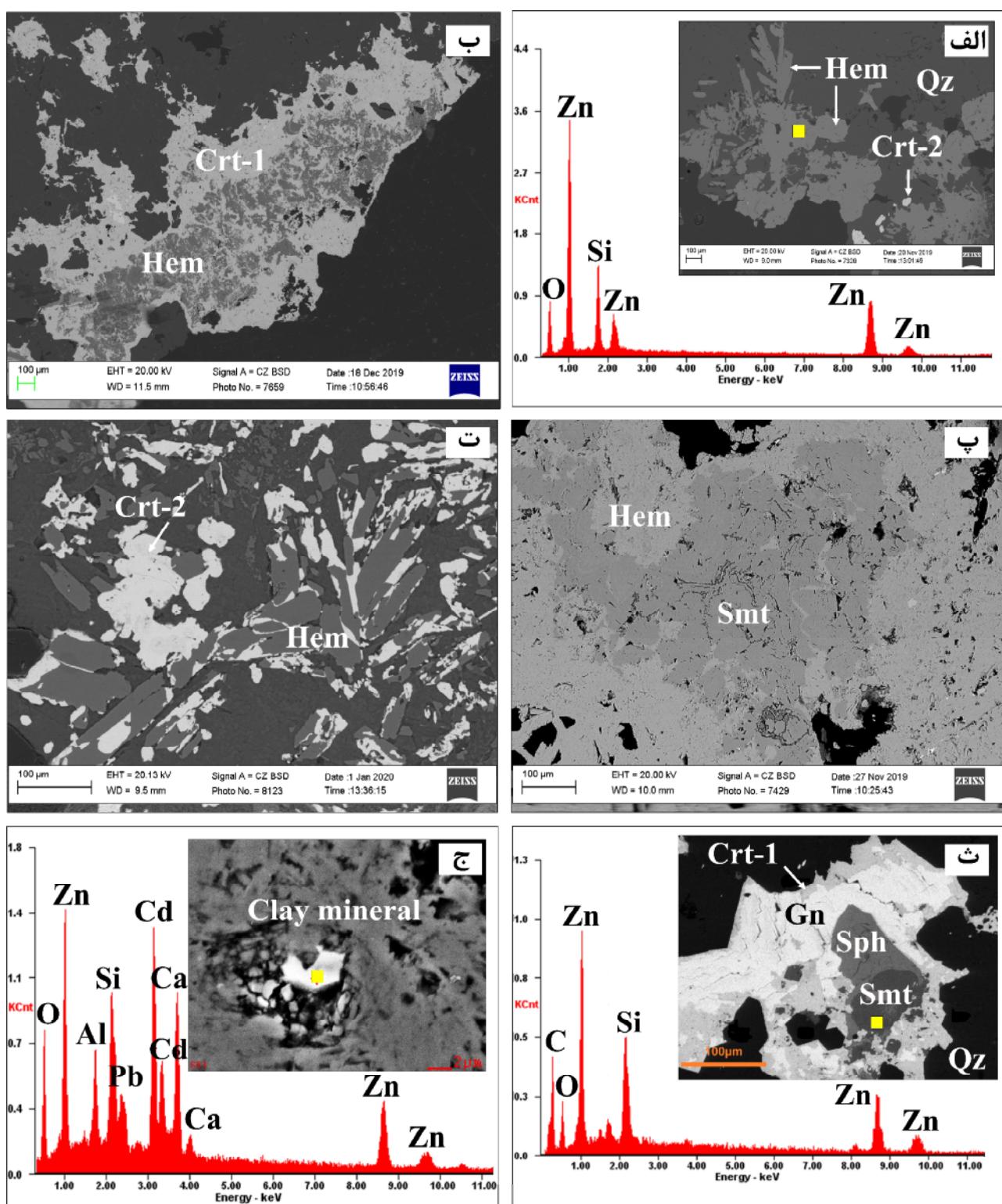
خالی و شکستگی‌ها در سنگ میزبان کربناته وجود دارد (شکل‌های ۶ پ و ث، شکل ۷ الف و ت و شکل ۸ ت). جانشینی گالن با سروزیت منجر به بافت‌های جانشینی متنوعی چون جانشینی خوردگی، کناره‌ای، در راستای رخ، جزیره‌ای و اسکلتی شده است (شکل‌های ۶ الف، ب و ت و ۷ ث).

### سنگ نگاری کانسنگ غیرسولفیدی

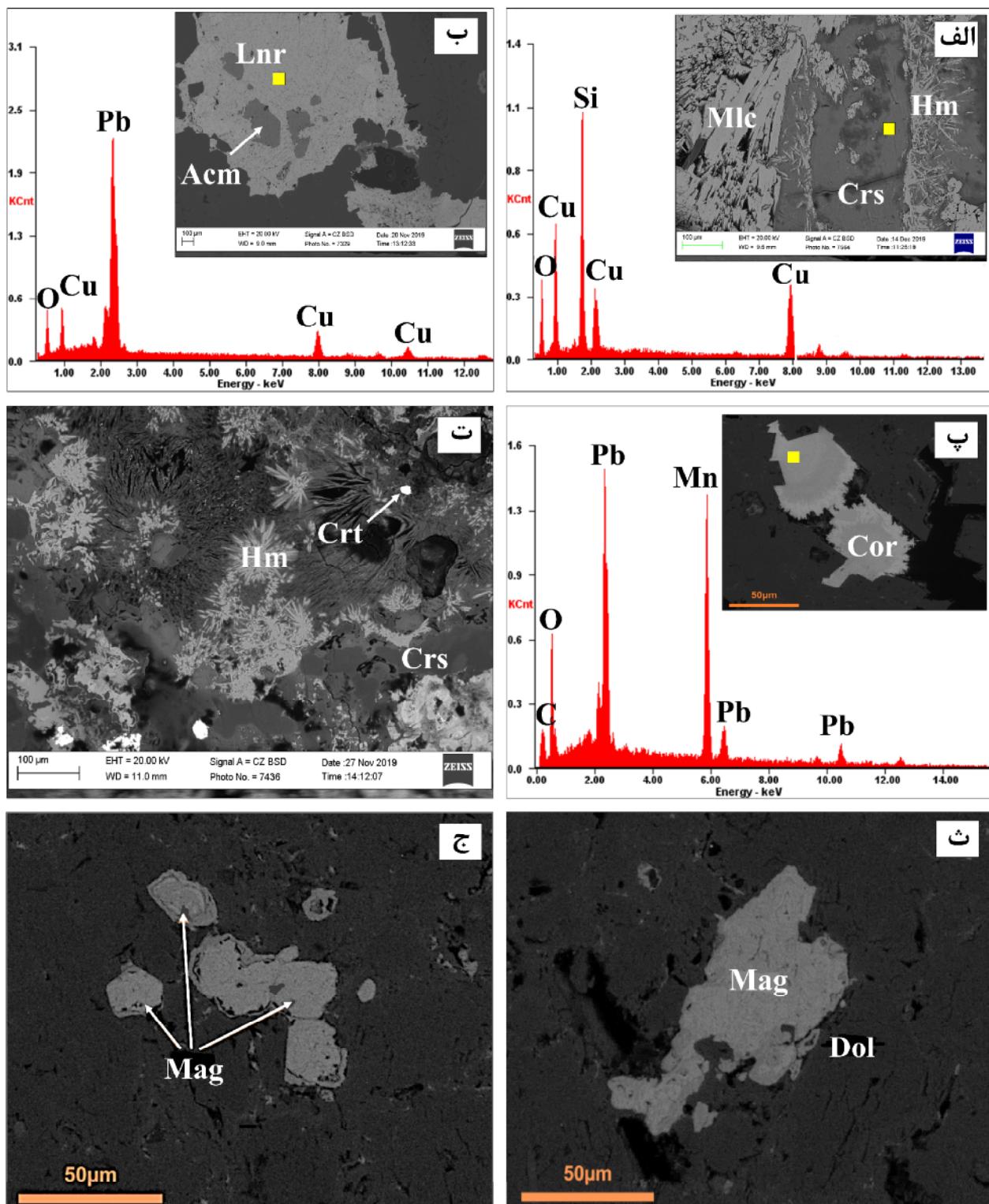
سروزیت ( $PbCO_3$ ) فراوانترین کانی غیرسولفیدی سرب در کانسار چاممیله است که در دو نسل شامل بلورهای ریز و رشتاهای (Crt-1) با بافت جانشینی در گالن (شکل‌های ۵ الف، ۶ الف، ب و ت، ۷ ب و ث) و بلورهای درشت و اغلب منشوری (Crt-2) با بافت پرکننده فضای



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با الگوی EDS از کانی‌های سولفیدی و غیرسولفیدی هدف در کانسار چاممیله: (الف) سروزیت نوع اول با بافت جانشینی در راستای شکستگی‌ها و رخ‌های گالن، (ب) سروزیت نوع اول جانشینی همراه پلاتنتریت (الگوی EDS) در لبه گالن، (پ) سروزیت درشت بلور نوع دوم با بافت افسان، (ت) همراهی سیدریت و سروزیت نوع اول با آثاری باقیمانده از گالن، (ث) بافت برشی شامل از سیمان سروزیت نوع دوم دربرگیرنده قطعه‌های دولومیت زاویدار، (ج) میمتیت حفره پرکن در میزبان دولومیت. (Crt: سروزیت، Gn: گالن، Mmt: میمتیت، Dol: دولومیت، Pl: پلاتنتریت، Sd: سیدریت).



شکل ۷ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با الگوی EDS از کانی‌های سولفیدی و غیرسولفیدی هدف در کاسار چاممیله. (الف) بلورهای خودشکل تیغه‌ای و صفحه‌ای همی‌مورفیت همراه سروزیت نوع دوم، (ب) همی‌مورفیت همراه سروزیت نوع اول، (پ) همی‌مورفیت و اسمیت‌زونیت در کنار هم، (ت) درهمرشدی سروزیت نوع دوم و همی‌مورفیت، (ث) اسمیت‌زونیت (الگوی EDS) با بافت جانشینی در اسفالریت همراه با بافت جانشینی سروزیت نوع اول در گالن، (ج) کانی‌های رسی غنی از روی و کادمیوم (Crt: سروزیت، Gn: گالن، Hem: همی‌مورفیت، Qz: کوارتز، Smt: اسمیت‌زونیت، Sph: اسفالریت).



شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با الگوی EDS از کانی‌های سولفیدی و غیرسولفیدی هدف در کانسار چاممیله: (الف) رخداد مالاکیت تیغه‌ای همراه کریزوکلا (الگوی EDS) و هماتیت سوزنی، (ب) میانبارهای آتاکامیت در لیناریت، (پ) بلورهای نیمه‌شکل دار کرونادیت، (ت) رخداد هماتیت سوزنی و سروزیت نوع دوم، (ث) بلور منفرد مگنتیت، (ج) بلورهای مگنتیت به صورت انباشتی. (Acm: آتاکامیت، Crt: سروزیت، Crs: کریزوکلا، Cor: کرونادیت، Dol: دولومیت، Hm: هماتیت، Mag: مگنتیت، Mlc: مالاکیت، Lnr: لیناریت).

شده در کانسار چاممیله شامل هماتیت، گوتیت و لیمونیت هستند. هماتیت به عنوان فراوان ترین کانی اکسیدی آهن در منطقه با بافت نواری، داربستی، افshan، مشبك (شکل ۵ ج)، سوزنی و شعاعی (شکل های ۵ ث و ۸ الف و ت) تشکیل شده است. مگنتیت به دو صورت افshan و انبوههای بلوری با بافت پیوستگاه سهگانه در مقاطع میکروسکوپی دیده شد (شکل های ۸ ث و ج).

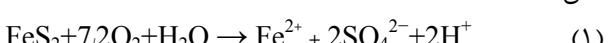
### بحث

#### کنترل کننده‌های اصلی کانی‌سازی غیرسولفیدی

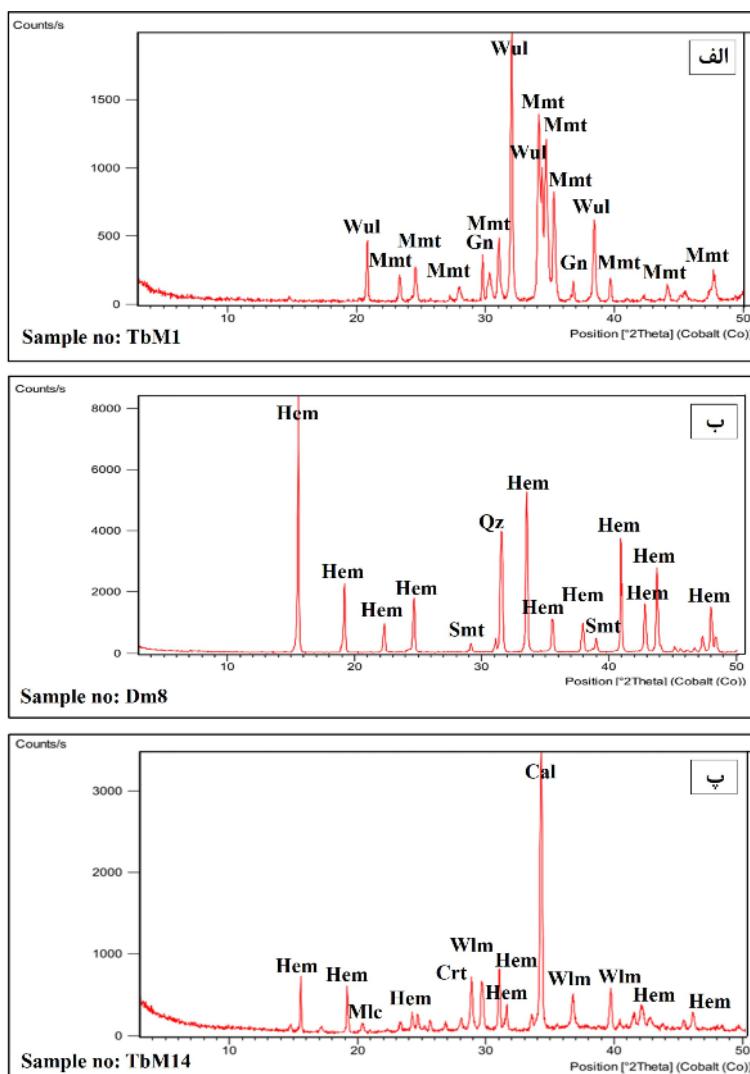
نقش کنترل کننده‌های ساختاری، زمین‌شیمیایی و سنگ-شناسی در شکل‌گیری کانی‌سازی غیرسولفیدی برونزاد روی (سرب) توسط بسیاری از پژوهشگران گزارش شده است [۱۱، ۱۲، ۱۳-۳۶]. تشکیل کانسارهای غیرسولفیدی روی (سرب) با میزبان کربناتی اغلب با عوامل مختلفی از جمله ترکیب کانسنس اولیه، سنگ میزبان، فرایندهای تفریق فلز و جدایش و آب و هوا کنترل می‌شود که در ادامه اثر هر یک از آنها در شکل-گیری کانسنس غیرسولفیدی کانسار چاممیله بررسی شده است.

#### نقش پیریت و سایر سولفیدها در فرایندهای برونزاد

در حضور اکسیژن مولکولی و آهن سه ظرفیتی (به عنوان عامل اکسایش)، آمیزه‌های از کانی‌های سولفیدی چون گالن، اسفالریت، پیریت و کالکوپیریت اکسید می‌شوند [۳۹، ۴۰]. فرایند اکسایش منجر به تخریب سولفید اولیه و تولید ترکیب‌های  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  و  $\text{H}^+$  و سرانجام تشکیل محلول‌های سولفات‌دار در یک محیط اسیدی می‌شود [۴۱، ۴۲]. در pH پایین (کمتر از ۴,۵)، آهن سه ظرفیتی، کانه پیریت را سریعتر از اکسیژن مولکولی اکسید می‌کند و بنابراین ممکن است عاملی مهم برای فرایندهای اکسایش سطح عمیق اشتعان نشده از اکسیژن در کانسنس‌های سولفیدی اولیه باشد. در صورتی که اکسیژن مولکولی در برخورد به پوشش غنی از مواد آلی با تنفس میکروبی و اکسایش مواد آلی مصرف شود [۴۳]، اکسایش سولفیدها محدود به فعالیت میکروبی بی‌اکسیژن یا اکسایش پیریت با آهن سه ظرفیتی می‌شود. اکسایش پیریت توسط اکسیژن و آهن سه ظرفیتی به ترتیب با واکنش‌های زیر نشان داده شده است [۴۳]:



گالن همراه با کربنات‌های آهن دار از جمله سیدیریت (شکل ۶ ت) و یا اکسی-هیدروکسیدهای آهن و نیز همراه سروزیت در بافت برشی دولومیت دیده می‌شود (شکل ۶ ث). ولفنت (PbMoO<sub>4</sub>) در بررسی‌های صحرایی به همراه سروزیت و یا میمتیت با بافت پرکننده فضای خالی به صورت پولک‌های نارنجی و چاروچهی و در بررسی‌های میکروسکوپی با اندازه ۵۰ تا ۴۰۰ میکرون به صورت بلورهای تخته‌ای در برش طولی و به صورت شعاعی در برش عرضی دیده می‌شود (شکل های ۴ ث و ۵ پ). میمتیت (Pb<sub>5</sub>[Cl(AsO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>]) با رنگ‌های قرمز و یا زرد با شکل‌های شعاعی و تیغه‌ای، اغلب به صورت انباشتی در کانسنس غیرسولفیدی برونزاد تشکیل شده است (شکل های ۴ ج و ۶ ج). همی‌مورفیت (Zn<sub>4</sub>[(OH)<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>]<sub>2</sub>) فراوان ترین کانی غیرسولفیدی و سیلیکاتی آبدار روی در کانسار چاه میله است که به صورت بلورهای خودشکل صفحه‌ای یا تیغه‌ای با اندازه ۲۰ تا ۲۰۰ میکرون (شکل های ۴ چ، ۵ ت، ۷ الف و ت)، میانبارهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل دار در گالن (شکل ۷ ب) و با بافت پوسته‌ای که در آن پوسته‌های همی‌مورفیت متناوب با پوسته‌های اسمیت‌زونیت هستند (شکل ۷ پ)، شناسایی شد. در برخی از مقاطع، سروزیت نوع دوم به صورت همرشدی در همی‌مورفیت‌های تیغه‌ای دیده می‌شود (شکل ۷ ت). اسمیت‌زونیت (ZnCO<sub>3</sub>) به عنوان کانی رایج گاهی به صورت پرکننده و اغلب با بافت جانشینی در لبه اسفالریت تشکیل شده است (شکل های ۷ پ و ث). کانی‌های رسی غنی از روی به صورت پرکننده فضای خالی دون حفره‌های همی‌مورفیت و اسمیت‌زونیت قرار دارد (شکل ۷ ج). ملاکیت (Cu<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>) و سپس آزوریت (Cu<sub>3</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>) فراوانترین کانی‌های ثانویه اکسیدی مس در کانسار چاممیله هستند که رخداد ملاکیت اغلب با بافت پرکننده فضای خالی به صورت رگه-رگچه‌ای و شعاعی همراه با کانی‌های باطله و اکسی-هیدروکسیدهای آهن است (شکل های ۴ ح، ۵ ث و ۸ الف). افرون بر کانی‌های نام برده، کانی‌های غیرسولفیدی کمیاب سرب-روی-مس چون لیتلر (PbO)، پلاتریت (PbO<sub>2</sub>، شکل ۶ ب)، لیناریت ([PbCu(OH)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>]<sub>n</sub>، شکل های ۴ خ و ۸ ب)، مندیپیت (Pb(Mn<sup>4+</sup>)<sub>6</sub>Mn<sup>3+</sup><sub>2</sub>O<sub>16</sub>، کرونا دیت (Pb<sub>3</sub>Cl<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)، هیدروزونسیت (Zn<sub>5</sub>[(OH)<sub>3</sub>-CO<sub>3</sub>]<sub>2</sub>، ویلمیت (Zn<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>]<sub>2</sub>، کریزوکلا (CuSiO<sub>3</sub>+nH<sub>2</sub>O)، شکل های ۸ الف و ت)، آتاکامیت (Cu<sub>2</sub>Cl(OH)<sub>3</sub>، شکل ۸ ب) و کوپریت (Cu<sub>2</sub>O) نیز در بررسی‌های میکروسکوپی و الگوهای پراش پرتو ایکس (شکل ۹) در کانسار چاه میله شناسایی شدند. مجموعه اکسی-هیدروکسیدهای آهن دیده



شکل ۹ الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) از کانی‌های غیرسولفیدی کانی‌ها شامل Cal: کلسیت، Smt: سروزیت، Hem: همی‌مورفیت، Qz: کوارتر، Smt: اسمیت‌زونیت، Mlc: مالاکیت، Mmt: میمتیت، Wul: ولمنیت.

میزان کربناتی، سبب افزایش نفوذپذیری و سهولت تحرک سیال اکسایشی فلزدار تولیدشده در کانسار چاممیله شده‌اند. گفتئی است که زره‌دارشدن (Armouring) سنگ میزان کربناتی با سنگ گچ و یا اکسید آهن آبدار (در کانسار چاممیله) می‌تواند واکنش‌های سریع خنثی‌سازی محلول‌های اسیدی را مهار کند که در ادامه توضیح داده شده است. واکنش اسید تولید شده با سنگ‌های میزان کربناتی (واکنش‌های خنثی‌سازی) منجر به آزاد شدن یون‌های  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{CO}_3^{-2}$  و  $\text{HCO}_3^{-}$  در محلول می‌شود. این کاتیون‌ها و یون بی $^-$  کربناتی با یون‌های فلزی چون  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$  پیوند داده و آنها را در کانی‌های ثانویه رسوب می‌دهند [۴۴، ۴۵]. ته‌نشینی کانی‌های کربناتی و سولفاتی ثانویه به تحرک گونه‌های سرب  $P_{\text{CO}_2(\text{g})}$  در محلول و همچنین شرایط محیطی چون pH و

در یک همبرزایی کانی‌ای شامل پیریت- اسفالریت- گالن، پیریت بیشترین میل به اکسایش و گالن کمترین میل را دارد. آهن می‌تواند تا ۱۵ درصد مولی جایگزین روی در ترکیب اسفالریت شود، این اسفالریت آهن‌دار به دلیل واکنش‌های آبکافت می‌تواند اسید اضافی تولید کند [۱۲]. حضور پیریت و اکسایش سریع آن در کانسار چاه-میله و در پی آن تشکیل اکسی- هیدروکسیدهای آهن، بهدلیل تولید اسید، نقش مهمی در گسترش کانی‌سازی برونزاد دارد. اسیدهای تولید شده می‌توانند عناصر را انتقال داده و با کانی‌های کربناتی و سیلیکاتی واکنش دهند. از این میان، کلسیت و دولومیت مهم‌ترین کانی‌ها برای خنثی‌سازی اسیدها در کانسارهای سرب- روی با سنگ میزان کربناتی چون کانسار چاممیله هستند. حفره‌های انحلالی و قطعه‌های برشی برآمده از این فرایند در سنگ

[۱۲]. در کانسار چاممیله، این عامل نیز بهدلیل وجود مواد آلی (شکل ۳ پ)، در سنگ میزبان کانسار، ممکن است. تشکیل همی-مورفیت در پایان واکنش بین سیال‌های در گردش و سنگ میزبان کربناتی [۱۴] به تحرک بالای  $\text{SiO}_2$  [۴۹] و یا احیای ظرفیت بافرکننده ناشی از انحلال سنگ میزبان کربناتی وابسته است [۲، ۳۲]. مقدار بالای همی-مورفیت در بخش غیرسولفیدی کانسار چاممیله نشانگر منبعی برای سیلیکات بوده که برای تأمین این مقادیر کافی است. در مجموعه چاهگره و مرغاب دو منبع سیلیس احتمالی برای تأمین این مقادیر وجود دارد: کانی‌های فیلوسیلیکاتی چون موسکویت و کلریت در سنگ بستر دگرگون شده (شکل‌های ۳ الف و ب) و نوارهای کوارتز و رسوب‌های دانه‌ریز سیلیسی چون کلسدونی در توالی میزبان و سنگ بستر دگرگون شده (شکل ۵ ث).

#### اهمیت فرایندهای تفیریق فلز و جدایش

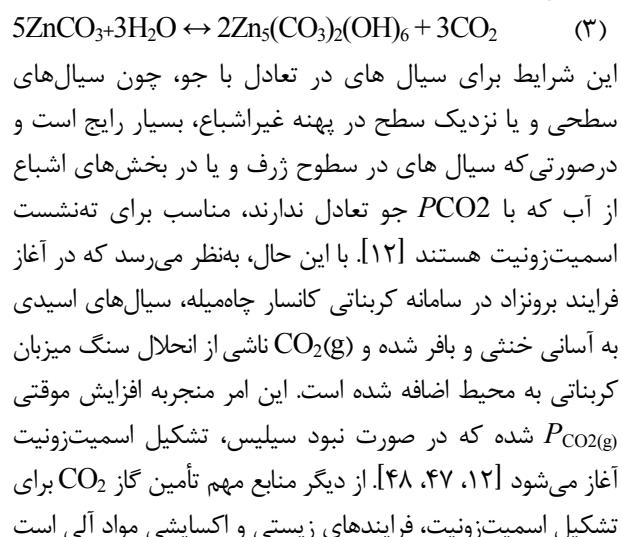
از قابل توجه‌ترین ویژگی‌های شکل‌گیری کانسارهای غیرسولفیدی سرخ و سفید روی، فرایند بسیار کارآمد جزبه-جزشگی فلز یعنی جدایش است. فرایندهایی که به طور همزمان طی تشکیل انواع این کانسنگ‌ها رخ می‌دهند عبارتند از (۱) انحلال پذیری و پایداری کانی‌های مختلف سرب-روی، (۲) زره‌دارشدن کانی‌های کلسیت و گالن و (۳) جذب فلز به‌وسیله اکسید آهن سه ظرفیتی آبدار (HFO) [۱۲]. در مقایسه با گالن، سولفیدهای دیگر در مراحل پیشرفت‌های اکسایش در پهنه اکسایش کانسنگ سولفیدی کمتر رایج هستند.

زره‌دارشدن گالن: نتایج کانی‌شناسی و زمین‌شیمیابی در کانسار چاممیله خوردگی و اکسایش ترجیحی پیریت و سپس اسفالریت را در مقایسه با گالن نشان می‌دهند. واکنش‌پذیری واقعی گالن نسبت به مقدار نظری زمین‌شیمیابی آن (گالن در مقایسه با اسفالریت پنج برابر واکنش پذیرتر است)، بسیار کمتر است [۱۵۰]. در سامانه‌های بروزنزاد، نوار نازکی از انگلزیت پیرامون گالن تشکیل می‌شود که دربردارنده میانبارهای فراوان گالن با اندازه کمتر از میلی‌متر است. انگلزیت در حضور یون‌های سولفات و در  $\text{pH}$  پایین تهنشین می‌شود و حلالیت پایینی به-ویژه در محلول‌های آبی دارای یون  $\text{SO}_4^{2-}$  دارد [۵۱]. انگلزیت یک لبه واکنشی (زره) روی گالن تشکیل می‌دهد که آن را از تماس مستقیم با محلول‌های اکسیدکننده محافظت می‌کند. تشکیل چنین لبه واکنشی نامحلول با تهنشینی انگلزیت در مقادیر  $\text{pH}$  پایین (اسیدی) شروع و با کربنات‌های سرب نامحلول چون سروزیت (به صورت سروزیت نوع اول در کانسار چاممیله، شکل‌های ۵ الف، ۶ الف، ب و ت، شکل ۷ ب و ث) یا

بستگی دارد [۳۷، ۳۶]. در کانسار چاممیله، عامل مهم دیگر در این مرحله وجود لایه نفوذناپذیر شیستی مجموعه چاهگره و مرغاب در بخش کمرپایین کانسار چاممیله است (شکل ۳ الف) که سبب جلوگیری از فرار سیال‌های اکسایشی کانه‌دار از محیط می‌شود. چنین شیستشوی کاملی منجر به تشکیل گوسان با اکسی-هیدروکسیدهای آهن (به‌ویژه گوتیت و هماتیت)، سروزیت، مقادیر کمتری از کانی‌های غیرسولفیدی روی بهترین فراوانی همی-مورفیت، اسمیت‌زونیت، هیدروزنسیت و کربنات‌های مس در کانسار چاممیله شده است. سازوکارهای جدایش و تشکیل دو نوع متمایز کانسنگ غیرسولفیدی روی (کانسنگ سفید و سرخ) به مقدار آهن یا حضور پیریت در کانسنگ اولیه سولفیدی بستگی دارد [۳۲]. کانسنگ سولفیدی بدون پیریت در اثر انحلال پیجیده، تحرک دوباره و فرایند بازتهنشینی روی اغلب منجر به تشکیل کانسنگ سفید روی می‌شود. از سوی دیگر، کانسنگ سولفیدی شامل پیریت و اسفالریت که دستخوش فرایند اکسایش آهسته با آب فراوانی شده است منجر به گسترش پهنه کانسنگ سرخ روی می‌شود [۲۲]. بنابراین، فراوانی بالای اکسی-هیدروکسیدهای آهن (به‌ویژه هماتیت و گوتیت) نسبت به کانی‌های کربناتی و یا سیلیکاتی روی در کانسنگ غیرسولفیدی چاممیله می‌تواند بیانگر حضور پیریت در کانسنگ سولفیدی اولیه و تشکیل کانسنگ سرخ در کانسار چاممیله باشد.

#### $\text{SiO}_2$ و $P_{\text{CO}_2}$ نقش سنگ میزبان کربناتی،

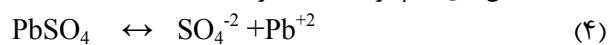
پایداری اسمیت‌زونیت را بهدلیل فعالیت یون‌های  $\text{CO}_2^+$  و  $\text{CO}_3^{2-}$  در سیال‌های اکسیدشده افزایش می‌دهد. کمترین مقدار  $P_{\text{CO}_{2(g)}}$  برای تشکیل اسمیت‌زونیت حدود  $0.4 \text{ kPa}$  بالاتر از  $P_{\text{CO}_{2(g)}}$  جو است [۱۲، ۴۶]. در  $P_{\text{CO}_{2(g)}} = 0.4 \text{ kPa}$ ، هیدروزنسیت به جای اسمیت‌زونیت تشکیل می‌شود (واکنش ۳) [۳۶].



سرب و روی فری هیدرات‌ها متفاوت است. چسبندگی کمی  $Pb^{2+}$  به فری هیدرات در  $pH$  برابر با  $5/5$  به بیشترین مقدار خود می‌رسد [۵۹]. درحالی که جذب کمی فلز روی در  $pH$  بالاتر در گستره  $5/5$  تا  $7/5$  شروع می‌شود [۶۰]. در شرایط اسیدی یکسان، فلز سرب به صورت انگلزیت در منطقه اکسایش تهنشین و یا به سطح اکسیدهای آهن سه ظرفیتی آبدار جذب می‌شود، درصورتی که در همین شرایط، فلز روی در محلول آبگین متحرک باقی‌مانده و به مناطق دورتر مهاجرت می‌کند. بنابراین، محلول آبگین پایانی که پنهان اکسایش را ترک می‌کند، هنوز غنی از فلز روی (تا  $80\%$  در  $pH=6$  و  $97\%$  در  $pH=5$ ) و تهی از فلز سرب است. در ادامه، با مهار واکنش‌های خنثی-سازی اسیدها توسط زرهدار شدن سنگ میزبان کربناتی با سنگ گچ و یا اکسی-هیدروکسیدهای آهن  $pH$  کمی افزایش یافته و در نتیجه فلز روی در بخش‌های عمیق‌تر سامانه برونزاد که اغلب بدون آهن سه ظرفیتی آبدار و هرگونه انبوهه قابل توجه فلز سرب است، تهنشین می‌شود [۱۲]. گفتنی است که افزایش  $pH$  موجب ناپایداری انگلزیت می‌گردد و بنابراین انگلزیت حل شده و یا با سروزیت جایگزین می‌شود. از این‌رو، جذب سطحی سرب و روی به‌وسیله اکسیدهای آهن سه ظرفیتی آبدار می‌تواند فرایند کلیدی برای جدایش و جزء‌جز-شدگی سرب و روی در کانسنگ غیرسولفیدی غنی از آهن در کانسار چاه‌میله باشد.

اثر شرایط اقلیم بر رخداد کانسنگ غیرسولفیدی اکسایش کانی‌های سولفیدی اغلب در محیط نزدیک به سطح زمین و در اثر شرایط آب و هوایی رخ می‌دهد [۱۲]. گفتنی است که شرایط آب و هوایی و وضعیت ساختاری و زمین‌ساختی منطقه چون خردشدن و کارستی‌شدن بر غلاظت گازهای  $O_2$  و  $CO_2$  در نتیجه تغییرات  $pH$  سیال برای حل کردن سنگ میزبان کربناتی اثر دارد. آب و هوایی، اغلب اکسایش و انتقال فلز را با مقدار آب جوی و در دسترس بودن اکسیژن کنترل می‌کند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این نوع ذخایر در جهان در طیف گسترده‌ای از شرایط آب و هوایی شکل گرفته‌اند. مطلوب‌ترین شرایط برای تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی برونزاد آب و هوای گرم و خشک (مانند کانسار چاه-میله) با کمترین فعالیت زیستی در خاک است که در آن، بیشترین مقدار فلز برای انتقال توسط محلول‌های برونزاد در دسترس باشد [۱۲]. در محیط‌های خشک مانند چاه‌میله، گاز  $O_2$  حل شده در سیال‌های جوی به بیشترین غلاظت خود در مقایسه با سایر اقلیم‌ها می‌رسد و با فعالیت‌های زیستی درون خاک مصرف نمی‌شود [۱۲، ۲۱، ۲۲]. سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی در آب و هوای خشک

هیدروسروزیت که در کنترل  $P_{CO2(g)}$  است، دنبال می‌شود [۱۲]. در شرایط قلیایی ضعیف، انگلزیت ناپایدار گردیده و  $Pb^{2+}$  آزاد شده است [۱۲] که در کانسار چاه‌میله پس از مهاجرت در حفره‌های سنگ میزبان به صورت سروزیت نوع دوم تهنشین شده‌اند (شکل‌های ۶ پ و ث، ۷ الف و ت، ۸ ت) [۱۲، ۵۱]:



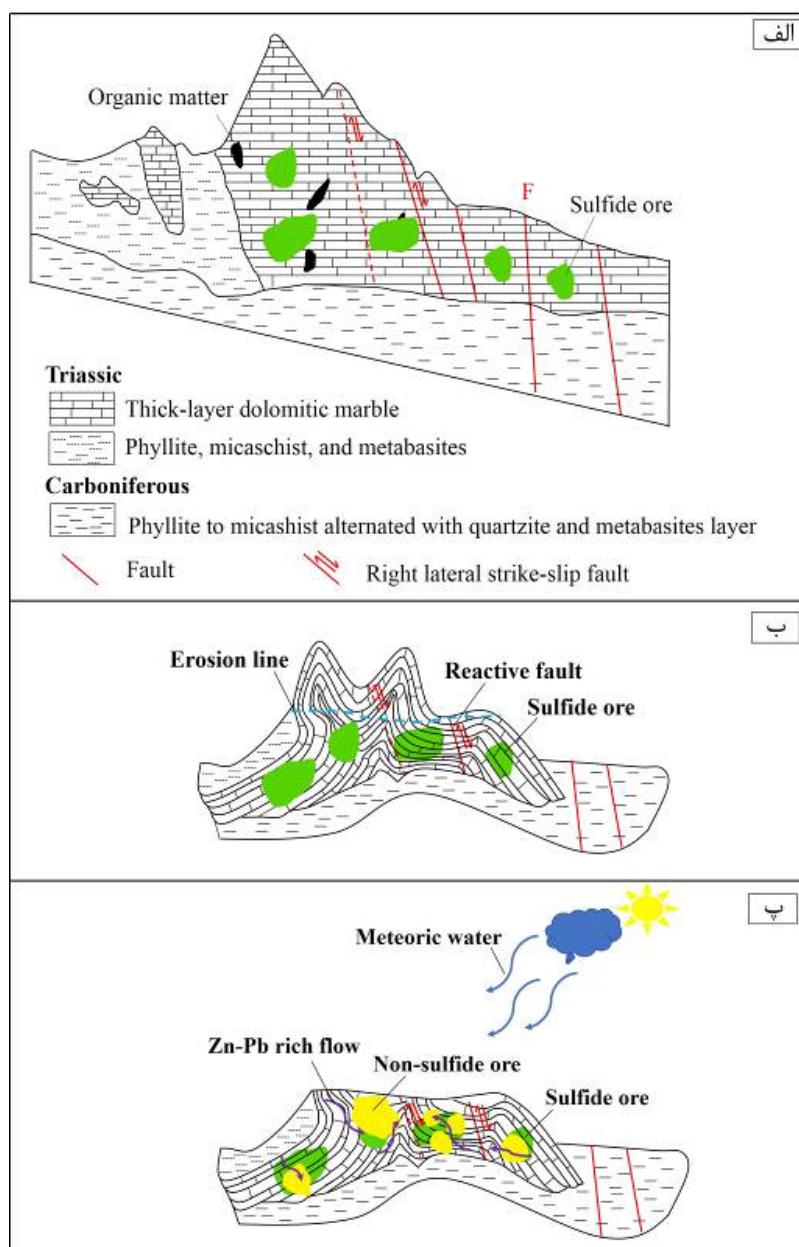
بنابراین، نبود انگلزیت در کانسنگ غیرسولفیدی برونزاد چاه-میله ممکن است با احلال انگلزیت و یا جانشینی کامل انگلزیت با سروزیت توضیح داده شود. این فرایند زرهدارشدن حضور (بقایای) گالن در کانسنگ‌های سولفیدی اکسید شده و همچنین در گوسان‌ها را توضیح می‌دهد [۵۲]. در کانسار چاه-میله، کانی و یا بقایای گالن همراه با کانسنگ غیرسولفیدی برونزاد به فراوانی دیده می‌شوند (شکل‌های ۴ پ-ج).

زرهدارشدن کلسیت: اکسایش سولفیدها و زرهدارشدن کلسیت منجر به ظهور یک منطقه اکسایش با  $pH$  پایین پایدار در گستره  $4$  تا  $6$  شده و واکنش خنثی‌سازی سریع سیال‌های اسیدی را در کربنات‌های میزبان مهار می‌کند [۱۳]. در سال-های اخیر بسیاری از پژوهشگران واکنش بین اسیدسولفوریک و کربنات‌ها و آثار پوشش‌های گچین بر سطح کلسیت را بررسی کرده‌اند [۵۳-۵۵]. افزون براین، سازوکار دیگر زرهدارشدن کلسیت تهنشینی اکسی-هیدروکسیدهای آهن بر سطح آن بوده که هنوز به خوبی روش نشده است. تفاوت در اثربخشی برای زرهدارشدن کانی‌های کربناتی با پوشش‌های گچین یا اکسید آهن آبدار ناشی از خاستگاه زمین‌شیمیایی و چگونگی تشکیل هر دو نوع پوشش است. در اثر یک واکنش خنثی‌سازی، گچ نزدیک یا درست روی کربنات‌ها رسوب می‌کند، در حالی که اکسید آهن آبدار باید به صورت ذرات نامحلول به سمت کلسیت منتقل شده تا برای زرهدارشدن در دسترس باشد [۱۲]. در کانسنگ غیرسولفیدی چاه‌میله به دلیل نبود سنگ گچ، ممکن است مهار واکنش خنثی‌سازی در کربنات‌های سنگ میزبان ناشی از زرهدارشدن کلسیت با اکسی-هیدروکسیدهای آهن باشد.

جذب فلز توسط اکسید آهن سه ظرفیتی آبدار: مس، کادمیوم، سرب، روی و آرسنیک می‌توانند توسط اکسی-هیدروکسیدهای آهن (گوتیت، فری هیدرات) جذب شوند و این فرایند با  $pH$  محلول آبگین کنترل می‌شود [۵۶، ۵۷]. رفتار شیمیایی و تحرک کاتیون‌های فلزی تا حد زیادی با تعاملشان با این اکسیدهای آهن کنترل می‌شود [۵۸]. میزان جذب سطحی

فرایند اکسایش از روی و سایر فلزها بسیار غنی شده‌اند. این تمرکز بالای فلزها پیش‌نیاز تهذیبی مؤثر کانی‌های فلزها پایه غیرسولفیدی است. برای تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی بروزداد چاه میله مدلی پیشنهاد شده که به‌طور طرحوار در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

اغلب پایین است و این منجر به بازشدن منافذ و درزهای پرشده آب پس از هر رخداد بارندگی شده و بنابراین یک جریان درونی از گازها ( $O_2$  و  $CO_2$ ) را در توده سولفیدی موجود فراهم می‌کند [۲۱، ۲۲، ۳۲]. این سامانه اغلب به‌دلیل فرایندهای انحلال (کارستی) سنگ میزان کربناتی نفوذپذیر می‌شود. باتوجه به محدودیت دسترسی به آب در اقلیم خشک، سیال‌های تولید شده که طی



شکل ۱۰ مدل احتمالی تشکیل ذخیره غیرسولفیدی سرب-روی (مس) کانسار چاه‌میله طی دگرگونی‌های زمین‌شناسی منطقه: (الف) تشکیل ذخیره سولفیدی سرب-روی (مس) چاه‌میله در واحد مرمر دولومیتی تریاس میانی شبیه ذخایر نوع دره می‌سی‌بی (MVT)، (ب) پس از کانی‌سازی سولفیدی، منطقه چاه‌میله شرایط زمین‌ساخت فشاری را ثبت کرده که منجر به چین‌خوردگی، واکنش‌پذیری گسل، بالآمدگی و فرسایش شده است، (پ) نفوذ آب‌های جوی به درون سنگ میزان کربناتی از طریق شکستگی‌ها، هوازدگی کانسنگ سولفیدی با اکسایش بروزداد، مهاجرت محلول‌های فلزدار، شکل‌گیری حفره‌های انحلالی و تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی سرب-روی (مس).

میزبان کربناتی، زیرده جانشینی مستقیم یا کانسنگ سرخ دانست.

#### قدرتانی

نویسنده‌گان از سازمان گسترش و نوسازی معدن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) برای فراهم‌کردن شرایط بازدید و عملیات نمونه-برداری از منطقه و حمایت‌های مالی برای انجام تجزیه کانی‌شناسی در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران سپاسگزارند. همچنین از داوران محترم مجله بطورشناسی و کانی‌شناسی ایران برای ارائه نظرات مفید و سازنده صمیمانه قدردانی می‌شود.

#### مراجع

- [1] Heyl A.V., Bozion C.N., "Oxidized zinc deposits of the United States, part I. General geology", United States Geology Survey Bulletin 1135-A (1962) 52 pp.
- [2] Hitzman M.H., Reynolds N.A., Sangster D.F., Allen C.R., Carman C.E., "Classification, genesis, and exploration guides for nonsulphide zinc deposits", Economic Geology 98 (2003) 685-714.
- [3] Borg G., "Geological and economical significance of supergene nonsulphide zinc deposits in Iran and their exploration potential", In: Geological Survey of Iran (ed.) Mining and Sustainable Development, 20<sup>th</sup> World Mining Congress, Tehran, Iran, (2005) 385-390.
- [4] Appold M.S., Monteiro L.V.S., "Numerical modeling of hydrothermal zinc silicate and sulfide mineralization in the Vazante deposit, Brazil", Geofluids 9 (2009) 96-115.
- [5] Borg G., "The influence of fault structures on the genesis of supergene zinc deposits", Society of Economic Geologists Special Publication 14 (2009) 121-132.
- [6] Slezak P.R., Olivo G.R., Oliveira G.D., Dardenne M.A., "Geology, mineralogy, and geochemistry of the Vazante Northern Extension zinc silicate deposit, Minas Gerais, Brazil", Ore Geology Reviews 56 (2014) 234-257.
- [7] Brugger J., McPhail D.C., Wallace M., Waters J., "Formation of willemite in hydrothermal environments", Economic Geology 98 (2003) 819-835.
- [8] Peck W.H., Volkert R.A., Mansur A.T., Doverspike B.A., "Stable isotope and petrologic evidence for the origin of regional marble-hosted magnetite deposits and the zinc deposits at Franklin and Sterling Hill, New Jersey Highlands, United States", Economic Geology 104 (2009) 1037-1054.

#### برداشت

کانسار سرب-روی (مس) چاهمیله با سنگ میزبان مرمر دولومیتی تربیس میانی دارای کانه‌زایی‌های درون‌زاد (سولفیدی) و برون‌زاد (سولفیدی و غیرسولفیدی) است. کانی‌های سولفیدی درون‌زاد شامل مقادیر زیاد گالن و به مقدار کمتر اسفالریت، کالکوپیریت و پیریت هستند. بافت غالب این بخش سولفیدی پرکننده فضای خالی، برشی و دانه پراکنده است. در کانسار چاه-میله، بالآمدگی زمین‌ساختی به قرار گرفتن سولفیدها در معرض سطح نزدیک اکسایش منجر شده و این امر برخورد سیال‌های جوی اکسایشی با کانی‌های سولفیدی را تسهیل می‌کند. در ادامه، اکسایش و جانشینی در جای (با انتقال محدود، به صورت محلی) سولفیدهای اولیه در اثر عملکرد و چرخش سیالات جوی در سنگ‌های کربناتی، کانی‌سازی غیرسولفیدی را تشکیل می‌دهد.

مهمنترین کانی‌های غیرسولفیدی منطقه چاهمیله سروزیت، همی‌مورفیت، ولفنیت، میمتیت، اسمیت‌زونیت، مالاکیت و اکسی-هیدروکسیدهای آهن (هماتیت و گوتیت) هستند. با توجه به واکنش‌پذیری محدود گالن در پهنه اکسایش و ایجاد پوشش محافظه بوسیله سروزیت پیرامون آن، وجود این کانی سولفیدی در پهنه اکسایش کانسار چاهمیله قبل توجیه است. فراوانی همی‌مورفیت نشان می‌دهد که سیلیس طی دگرسانی برون‌زاد متحرك بوده است و سیال‌های اسیدی ضعیف تولید شده از اکسایش سولفیدها و با فرشده با سنگ‌های کربناتی غنی از سیلیس منجر به تهذیبی همی‌مورفیت در این کانسار شده‌اند. فراوانی بیشتر اسمیت‌زونیت نسبت به هیدروزینسیت نشان‌دهنده فشار بالای CO<sub>2</sub> در زمان تشکیل کانسنگ برون‌زاد غیرسولفیدی است. وجود مواد آلی در سنگ میزبان کانسار چاهمیله از منابع ممکن برای تأمین گاز CO<sub>2</sub> برای تشکیل اسمیت‌زونیت در این کانسار است. نوع سنگ‌شناسی میزبان (کربنات)، وجود کانسنگ سولفیدی اولیه غنی از فلزهای سرب-روی (مس)، وجود سیال‌های جوی اکسیدی، بالآمدگی ساختاری و شکننده پوسته در شرایط آب و هوایی گرم و خشک در چاهمیله، باعث تشکیل مجموعه‌ای از کانی‌های غیرسولفیدی در مقیاس محلی در این کانسار شده است. با توجه به فراوانی بالای اکسی-هیدروکسیدهای آهن (بهویژه هماتیت و گوتیت) نسبت به کانی‌های کربناتی و یا سیلیکاتی روی، مقادیر بالای سرب به صورت سروزیت و وجود آثاری از کانی‌های سولفیدی اولیه از جمله گالن همراه با بخش غیرسولفیدی، می‌توان کانسنگ غیرسولفیدی چاهمیله را از نوع ذخایر برون‌زاد با سنگ

- 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 (2020) 104339.*
- [20] Maghfouri S., Choulet F., "Ore-forming processes, O-C isotopes geochemistry, and fluid inclusions in the Darreh-Zanjir fault control MVT-type Zn-Pb deposit: Iran", Arabian Journal of Geosciences 14 (2021) 2083.
- [21] Maghfouri S., Hosseinzadeh M.R., Rajabi A., Choulet F., "A review of major non-sulfide zinc deposits in Iran", Geoscience Frontiers 9 (2018) 249-272.
- [22] Maghfouri S., Hosseinzadeh M.R. Choulet F., "Supergene nonsulfide Zn-Pb mineralization in the Mehdiabad world-class sub-seafloor replacement SEDEX-type deposit, Iran", International Journal of Earth Sciences 109 (2020) 2531-2555.
- [23] Reichert J., "A Metallogenetic Model for Carbonatehosted Non-sulfide Zinc Deposits Based on Observations of Mehdi Abad and Iran Kouh, Central and Southwestern Iran", Ph.D. Thesis, University of Martin Luther, Shillong, (2007) 129 pp.
- [24] Aghanabati A., "Geology of Iran", Geological Survey of Iran, Tehran, (2004) 586 pp.
- [25] Alavi M., "Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz Mountains system in northern Iran", Journal of Geodynamics 11 (1996) 1-33.
- [26] Kan-Azin Mining Consultant Company., "General exploration report of the iron at Mileh area in Anarak, Isfahan (Scale: 1:25000)", Iranian Mines and Mining Industries Development and Renovation Organization (Imidro), Tehran, Report 1 (2014) 438p.
- [27] Kan-Azin Mining Consultant Company., "General exploration report of the iron at Mileh area in Anarak, Isfahan (Scale: 1:5000)", Iranian Mines and Mining Industries Development and Renovation Organization (Imidro), Tehran, Report 2 (2015) 214p.
- [28] Bagheri S., Stampfli G.M., "The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in central Iran: New geological data, relationships and tectonic implications", Tectonophysics 451 (2008) 123-155.
- [29] Sharkovski M., Susov M., Krivyakin B., "Geology of the Anarak area (Central Iran): Explanatory text of the Anarak Quadrangle Map [9] Boni M., Gilg H.A., Balassone G., Schneider J., Allen C.R., Moore F., "Hypogene Zn carbonate ores in the Angouran deposit, NW Iran", Mineralium Deposita 42 (2007) 799-820.
- [10] Boni M., "Supergene Nonsulfide Zinc Ores :State of the Art", Art Abstract at 21<sup>st</sup> General Meeting of the International Mineralogical Association, Sandton, South Africa, (2014).
- [11] Borg G., "A review of supergene nonsulphide zinc (SNSZ) deposits-the 2014 update", In: Archibald S.M., Piercy S.J., (eds.) "Current Perspectives of Zinc Deposits", Irish Association for Economic Geology, Dublin, (2015) 123-147.
- [12] Reichert J., Borg G., "Numerical simulation and a geochemical model of supergene carbonate-hosted nonsulphide zinc deposits", Ore Geology Reviews 33 (2008) 134-151.
- [13] Reichert J., "A geochemical model of supergene carbonate-hosted nonsulphide zinc deposits", In: Titley S.R., (ed.) "Supergene Environments, Processes, and Products", Society of Economic Geologists, Special Publication 14 (2009) 69-76.
- [14] Boni M., Mondillo N., "The "Calamines" and the "Others": The great family of supergene nonsulfide zinc ores", Ore Geology Reviews 67 (2015) 208-233.
- [15] 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.
- [16] Rajabi A., Rastad E., Canet C., "Metallogeny of Permian-Triassic carbonatehosted Zn-Pb and F deposits of Iran: a review for future mineral exploration", Australian Journal of Earth Sciences 60 (2013) 197-216.
- [17] Maghfouri S., Hosseinzadeh M.R., "The early Cretaceous Mansourabad shale-carbonate hosted Zn-Pb (-Ag) deposit, Central Iran: an example of vent-proximal sub-seafloor replacement SEDEX mineralization", Ore Geology Reviews 95 (2018) 20-39.
- [18] Maghfouri S., Hosseinzadeh M.R., Choulet F., Lentz D.R., Tajeddin H.A., Movahednia M., Sharifi A., "Nature of ore-forming fluids in the Mehdiabad world-class sub-seafloor replacement SEDEX-type Zn-Pb-Ba-(Cu-Ag) deposit, Iran; constraints from geochemistry, fluid inclusions, and O-C-Sr isotopes", Journal of Asian Earth Sciences 207 (2021) 104654.
- [19] Maanijou M., Tale Fazel E., Hayati S., Mohseni H., Vafaei M., "Geology, fluid inclusions,

- Aznalcollar mine (SW Spain)", Chemical Geology 190 (2002) 339-353.*
- [42] Pirajno F., Burlow R., Huston D., "The Magellan Pb deposit, Western Australia; a new category within the class of supergene non-sulfide mineral systems", *Ore Geology Reviews* 37 (2010) 101-113.
- [43] Herbert R.B., "Sulphide oxidation in mine waste deposits, a review with emphasis on dysoxic weathering. Mitigation of the environmental impact from mining waste (MiMi)". MiMi Print, Lulea, Sweden, (1999).
- [44] Pokrovsky O.S., Golubev S.V., Schott J., "Dissolution kinetics of calcite, dolomite, and magnesite at 25 °C and 0 to 50 atm PCO<sub>2</sub>", *Chemical Geology* 217 (2005) 239-255.
- [45] Pokrovsky O.S., Golubev S.V., Schott J., Castillo A., "Calcite, dolomite and magnesite dissolution kinetics in aqueous solutions at acid to circumneutral pH, 25 to 150 °C and 1 to 55 atm PCO<sub>2</sub>: new constraints on CO<sub>2</sub> sequestration in sedimentary basins", *Chemical Geology* 265 (2009) 20-32.
- [46] Kyle J.R., Ahn H., Gilg H.A., "Nature and origin of the nonsulfide zinc deposits in the Sierra Mojada District, Coahuila, Mexico: constraints from regional geology, petrography, and isotope analyses", *Mineralium Deposita* 53 (2018) 1095-1116.
- [47] Arfè G., Mondillo N., Boni M., Balassone G., Joachimski M., Mormone A., Di Palma T., "The Karst-Hosted mina grande nonsulfide zinc deposit, Bongara District (Amazonas Region, Peru)", *Economic Geology* 112 (2017) 1089-1110.
- [48] Arfè G., Mondillo N., Boni M., Joachimski M., Balassone G., Mormone A., Santoro L., Castro Medrano E., "The Cristal Zn prospect (Amazonas region, Northern Peru). Part II: an example of supergene enrichments in tropical areas", *Ore Geology Reviews* 95 (2018) 1076-1105.
- [49] Moore J.M., "Supergene mineral deposits and physiographic development in southwest Sardinia, Italy: Transactions institution mining and metallurgy" Section B: Applied Earth Science 71 (1972) B59-B66.
- [50] Zeman J., "Supergene alteration of sulfides, II. A laboratory electrochemical study", *Scripta Facultatis Scientiarum Naturalium Universitatis Purkynianae Brunensis, Geologia* 15 (1985) 115-136.
- [51] Faure G., "Principles and Applications of Geochemistry, 2nd edition", Prentice-Hall, New Jersey, (1998) 600 pp.
- 1:250000", Geological Survey of Iran, Tehran, Reports 19 (1984) 143 pp.
- [30] Zanchi A., Zanchetta S., Garzanti E., Balini M., Berra F., Mattei M., Muttoni G., "The Cimmerian evolution of the Nakhvak-Anarak area Central Iran and its bearing for the reconstruction of the history of the Eurasian margin", *Geological Society London Special* 312 (2009) 261-286.
- [31] Zanchi A., Malaspina N., Zanchetta S., Berra F., Benciolini L., Bergomi M., Cavallo A., Javadi H.R., Kouhpemaya M., "The Cimmerian accretionary wedge of Anarak, Central Iran", *Journal of Asian Earth Sciences* 102 (2015) 45-72.
- [32] Choulet F., Charles N., Barbanson L., Branquet Y., Sizaret S., Ennaciri A., Badra L., Chen Y., "Non-sulfide zinc deposits of the Moroccan High Atlas: multiscale characterization and origin", *Ore Geology Reviews* 56 (2014) 115-140.
- [33] Taylor J.H., "The formation of supergene galena at Broken Hill, northern Rhodesia", *Mineralogical Magazine* 31 (1958) 908-913.
- [34] Terracciano R., "Willemite mineralization in Namibia and Zambia", Ph.D. Thesis, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italy, (2008) 178 pp.
- [35] Borg G., Kärner K., Buxton M., Armstrong R., Schalk W., "Geology of the Skorpion non-sulphide deposit, southern Namibia", *Economic Geology* 98 (2003) 749-771.
- [36] Takahashi T., "Supergene alteration of zinc and lead deposits in limestone". *Economic Geology* 55 (1960) 1083-1115.
- [37] Sangameswar S.R., Barnes H.L., "Supergene processes in zinc-lead-silver sulfides ores in carbonates", *Economic Geology* 78(1983) 1379-1397.
- [38] Williams P.A., "Oxide Zone Geochemistry", Ellis Horwood Ltd., Chichester, England, (1990) 286 pp.
- [39] Balci N., Mayer B., Shanks III W.C., Mandernack K.W., "Oxygen and sulfur isotope systematics of sulfate produced during abiotic and bacterial oxidation of sphalerite and elemental sulfur", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 77 (2012) 335-351.
- [40] Heidel C., Tichomirowa M., Junghans M., "Oxygen and sulfur isotope investigations of the oxidation of sulfide mixtures containing pyrite, galena and sphalerite", *Chemical Geology* 342 (2013) 29-43.
- [41] Domènech C., De Pablo J., Ayora C., "Oxidative dissolution of pyritic sludge from the

- Student Research Symposium (GSSRS), Blacksburg, Virginia, (2004).
- [56] Dzombak D.A., Morel F.M.M., "Surface Complexation Modeling, Hydrous Ferric Oxide", John Wiley and Sons, New York, (1990) 416 pp.
- [57] Martinez C.E., McBride M.B., "Cd, Cu, And Zn coprecipitates in Fe oxide formed at different pH: aging effects on metal solubility and extractability by citrate", Environmental Toxicology and Chemistry 20 (2001) 122-126.
- [58] Trivedi P., Dyer J.A., Sparks D.L., "Lead sorption onto ferrihydrite. 1. A macroscopic and spectroscopic assessment", Environmental Science and Technology 37 (2003) 908-914.
- [59] Dyer J.A., Trivedi P., Scrivner N.C., Sparks D.L., "Lead sorption onto ferrihydrite. 2. Surface complexation modeling", Environmental Science and Technology 37 (2003) 915-922.
- [52] Jeong G.Y., Lee B.Y., "Secondary mineralogy and microtextures of weathered sulfides and manganese carbonates in mine waste rock dumps, with implications for heavy-metal fixation", American Mineralogist 88 (2003) 1933-1942.
- [53] Yanful E.K., Orlando M.P., "Controlling acid drainage in a pyritic mine waste rock. Part II-Geochemistry of drainage", Water, Air and Soil Pollution Journal 124 (2000) 259-283.
- [54] Wilkins S.J., Compton R.G., Taylor M.A., Viles H.A., "Channel flow cell studies of the inhibiting action of gypsum on the dissolution kinetics of calcite: a laboratory approach with implications for field monitoring", Journal of Colloid and Interface Science 236 (2001) 354-361.
- [55] Huminicki, D.M., "The effect of secondary precipitates on the dissolution rate of calcite in AMD solutions", Abstract, 9<sup>th</sup> Annual Geoscience