

## زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری، کانی‌شناسی مدرن و بررسی تشکیل کانی‌ها و کانه‌های ذخیره مس (طلا) قره تپه (شرق ماکو، شمالغرب ایران)

محمد رضا حسین‌زاده<sup>۱\*</sup>، علی اسدی<sup>۱</sup>، یلدا واحد<sup>۱</sup>، وارطان سیمونز<sup>۱</sup>

۱- گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، آذربایجان شرقی، ایران

۲- گروه گوه‌رشناسی، پژوهشکده زمین‌شناسی پزشکی و محیط‌زیست، دانشگاه تبریز، تبریز، آذربایجان شرقی، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۷/۳۰، نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۹/۲۶)

**چکیده:** منطقه معدنی قره‌تپه در شرق ماکو از سنگ‌های کربناتی پرمین با دولومیت‌های غنی از مواد آلی و واحدهای تبخیری تشکیل شده است. کانه‌زایی مس به صورت‌های رگه-رگج‌های شامل کالکوسیت، کوولیت، پیریت و کالکوپیریت رخ داده و اکسایش آنها منجر به تشکیل مالاکیت، آزوریت و گوتیت شده است. سیل‌های میکرودیوریتی منبع احتمالی مس و گسل‌ها مسیر اصلی مهاجرت سیال‌ها هستند. داده‌های پراش پرتوی ایکس (XRD)، طیف‌سنجی تبدیلی فوریه فروسرخ (FTIR) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بیانگر کانه‌زایی چندمرحله‌ای و روزادی هستند؛ کانی‌های اصلی کالکوسیت و دولومیت با همراهی پیریت، هماتیت و کوارتز، اثر چند رویداد گرمایی با ترکیب‌های متفاوت را نشان می‌دهند. تغییرهای ساختاری دولومیت بسته به شدت دگرسانی تأیید شده و طلا به صورت پراکنده در دولومیت و در ارتباط با سولفیدهای مس شناسایی شده است. در مجموع، سنگ دولومیت میزبان و کنترل‌کننده اصلی سیال‌ها بوده و کانه‌زایی مس-طلا در اثر جنس سنگ، ساختارهای گسلی و فعالیت گرمایی شکل گرفته و پتانسیل اکتشافی بالایی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** کانی‌زایی مس (طلا)؛ سیال‌های گرمایی؛ دولومیت؛ پراش پرتو ایکس؛ میکروسکوپ الکترونی؛ ماکو.

### مقدمه

آلی در سنگ میزبان ضروری است [۴]. واحدهای رسوبی دولومیتی یا سیلیسی‌آواری، فراوان‌ترین نوع سنگ‌های میزبان در این ذخایر محسوب می‌شوند [۵]. این نوع ذخایر از نظر شکل چینه‌سان هستند و به صورت توده‌های موازی با لایه‌بندی، صفحه‌ای، پراکنده، و سولفیدهای کنترل‌شده با رگه‌ها و رگچه‌ها ظاهر می‌شوند. این کانی‌سازی در نزدیکی مرز وضعیت اکسایش-کاهش واحد رسوبی میزبان شکل می‌گیرد [۶، ۱]. ذخایر نوع کوپرشیفر و نوع سازند سرخ دو دسته کلی از این ذخایر هستند که به ترتیب در افق‌های پلیتی کربن‌دار و در تماس بین افق‌های آواری قرمز و خاکستری یافت می‌شوند. ذخایر مس چینه‌سان میزبان رسوبی در گستره وسیعی از

ذخایر مس در واحدهای میزبان رسوبی حدود ۲۰ درصد از نیاز جهانی مس را تأمین می‌کنند [۱، ۲]. این ذخایر همچنین شامل برخی فلزهای پایه دیگر چون سرب، روی، نقره، نیکل، باریوم و مولیبدن هستند [۳]. هیتزمن و همکاران [۱] بیان کردند که چنین ذخایری طی تکامل سیال‌ها در سامانه‌هایی با مقیاس حوضه تشکیل می‌شوند. این فرآیند شامل وجود خاستگاه گوگرد، فلز، و سیال‌های در دسترس برای انتقال آن‌ها، به همراه یک پمپ گرمایی یا آبی به درون محیط‌های زیرسطحی است. افزون بر این، برای ته‌نشینی گوگرد و فلزها، وجود شرایط فیزیکوشیمیایی ویژه‌ای چون نفوذپذیری و مواد

\*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۴۳۰۶۵۸۷۲، پست الکترونیکی: [mr-hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir](mailto:mr-hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir)



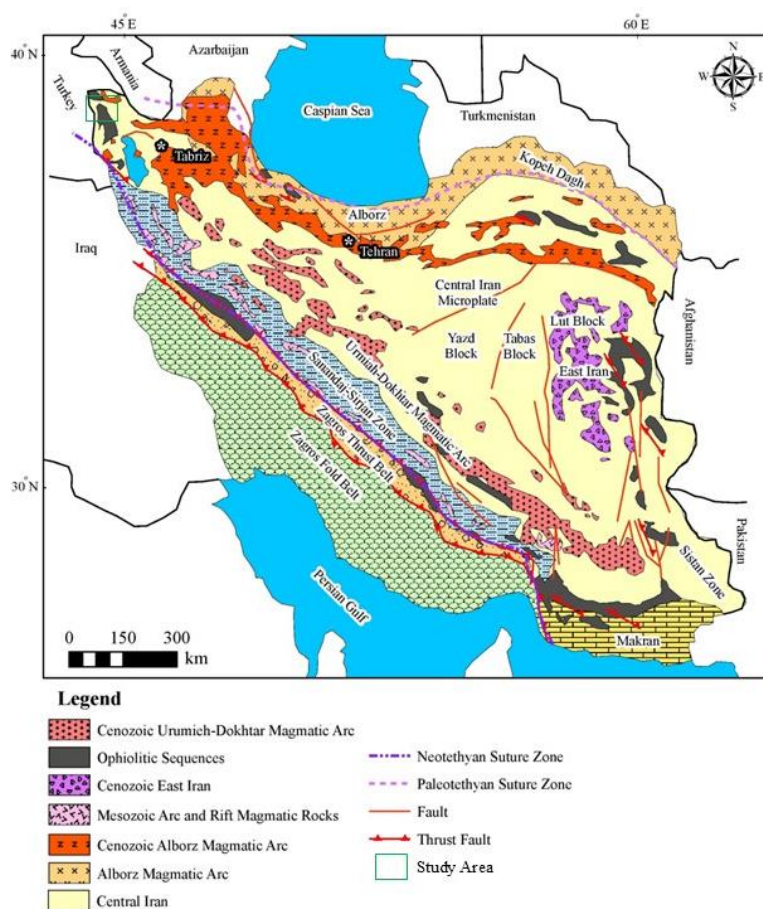
و شرایط احيایی قرار دارد و از نظر ویژگی‌ها شبیه کانی‌سازی نوع مس-روی کیپوشی در کمربند مس آفریقای مرکزی است [۱۰].

#### زمین‌شناسی منطقه‌ای

منطقه قره‌تپه در شمال غربی ایران واقع است (شکل ۱). نقشه زمین‌شناسی این ناحیه بر اساس برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ماکو [۱۱] که جزئی از کمربند چین‌خورده آلپ-همالیا به شمار می‌آید، تنظیم شده است. این ناحیه در برخوردگاه سامانه‌های آلپ-همالیا قرار دارد، که شامل سینتاکس پامیر در شرق و سینتاکس ترکیه در غرب است [۹، ۱۲]. اقیانوس پالئوتتیس بین دو قاره اصلی گندوانا و یک قطعه کشیده شامل قطعه‌های چین، هندوچین و تاریم در شمال ایران قابل شناسایی است (شکل ۱). همچنین، اقیانوس نئوتتیس به واسطه کافتش قاره‌های سیمیرین (شامل ایران، ترکیه، افغانستان، شان-تای، تبت و شبه‌جزیره مالایا) از گندوانا آغاز به شکل‌گیری کرد و در دوره‌های کرتاسه-سنوزوئیک بسته شد [۱۳]، که این فرآیند در بخش جنوب شرقی ایران قابل پیگیری است.

سن‌های زمین‌شناسی، شامل (۱) پروتروزوئیک اولیه (مانند اودوکان در روسیه)، (۲) پروتروزوئیک پسین (مانند کمربند مس آفریقا) و (۳) پرمین (مانند کوپرشیر در آلمان) در حوضه‌های درون‌کراتونی تشکیل می‌شوند [۷] که با نهشته‌های دریاچه‌ای یا دریایی پوشیده شده‌اند [۸]. با این حال، خاستگاه میزبان رسوبی در محیط‌های حوضه‌ای قاره‌ای است و بیشتر مرحله گذار از کافت قاره‌ای به مرحله فرونشست گرمایی برای این ذخایر گزارش شده است [۹].

نخستین پژوهش انجام‌یافته در منطقه پیرامون زمین‌شناسی و کانی‌سازی مس قره‌تپه توسط داره در سال ۱۳۹۳ به عنوان پایان‌نامه کارشناسی ارشد در دانشگاه تبریز بوده است [۱۰]. این منطقه در ۱۴ کیلومتری شمال‌شرق ماکو قرار دارد و سه نهشته معدنی دارد. کانی‌سازی مس به‌صورت رگه‌ای در آهک‌های بیتومینه رخ داده است و کانی‌های اصلی شامل کالکوسیت، کوولیت و کالکوپیریت هستند؛ ملاکیت و آزوریت نیز در سطح دیده می‌شوند. توده‌های نفوذی به احتمال بسیار منبع مس هستند و خاستگاه رسوبی و انتقال شورایی نیز محتمل است. کانی‌سازی در معرض زمین ساخت، چینه‌شناسی



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی و ساختاری ایران [۱۴-۱۷].

ترکیب‌های کلسیمی-قلیایی شناسایی می‌شوند [۱۱]. رسوب‌های جدیدتر از آبرفت‌های پی‌دمونت قدیمی و جوان بیشتر در بخش‌های مرکزی و شمال غربی منطقه قرار دارند (Qf1 و Qf2).

#### زمین‌شناسی منطقه

نقشه زمین‌شناسی اصلاح‌شده ۱:۱۰۰۰۰ معدن مس قره‌تپه که توسط داره [۱۰] تهیه شده است، در شکل ۲ ارائه شده است. در این نقشه، سازند قم (سنگ آهک) روی سازندهای پرمین دورود و روتیه قرار دارد. سازند قم شامل یک سنگ آهک مارنی ماسه‌ای پایه‌ای با ضخامت ۵ تا ۱۵ متر است که در پی آن لایه‌ای متناوب از سنگ آهک با ضخامت متغیر بین ۱۵۰ تا ۳۵۰ متر قرار دارد (شکل ۳ الف). واحد دولومیتی در بخش مرکزی در معرض گسل‌ها و پهنه برشی قرار دارد (شکل ۳ ب). همچنین، سازند روتیه به‌طور هم‌فرسای روی سازند دورود با لای سنگ دولومیتی و با ضخامت ۲۵۰ تا ۳۵۰ متر واقع است [۹]. وجود مواد آلی در این واحد تأیید شده است (شکل ۳ پ). گفتنی است که سازند روتیه در ناحیه‌ای محدود در بخش جنوبی با یک سیل میکرو دیوریت قطع شده است [۱۰] (شکل ۳ ت).

#### روش انجام پژوهش

عملیات میدانی در منطقه قره‌تپه در پاییز ۱۴۰۲ آغاز گردید و طی پنج روز، نمونه‌برداری اصولی از موقعیت کانه‌زایی و سنگ‌های میزبان انجام شد. در مجموع، ۷۵ نمونه از موقعیت کانه‌زایی و ۴۵ نمونه از سنگ‌های میزبان جمع‌آوری گردید. از میان آنها، ۷ نمونه سنگ میزبان برای تهیه مقطع نازک به منظور بررسی سنگ‌نگاری و ۱۰ نمونه کانه‌زایی‌شده برای تهیه مقاطع صیقلی به منظور بررسی کانه‌نگاری به دانشگاه تبریز ارسال شدند. پس از آماده‌سازی مقاطع در آزمایشگاه سنگبری دانشکده علوم طبیعی دانشگاه تبریز، همه بررسی‌های میکروسکوپی با میکروسکوپ قطبشی الپوس BX60 و دوربین دیجیتال نیکون مدل DXM1200 در آزمایشگاه زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه تبریز انجام شد.

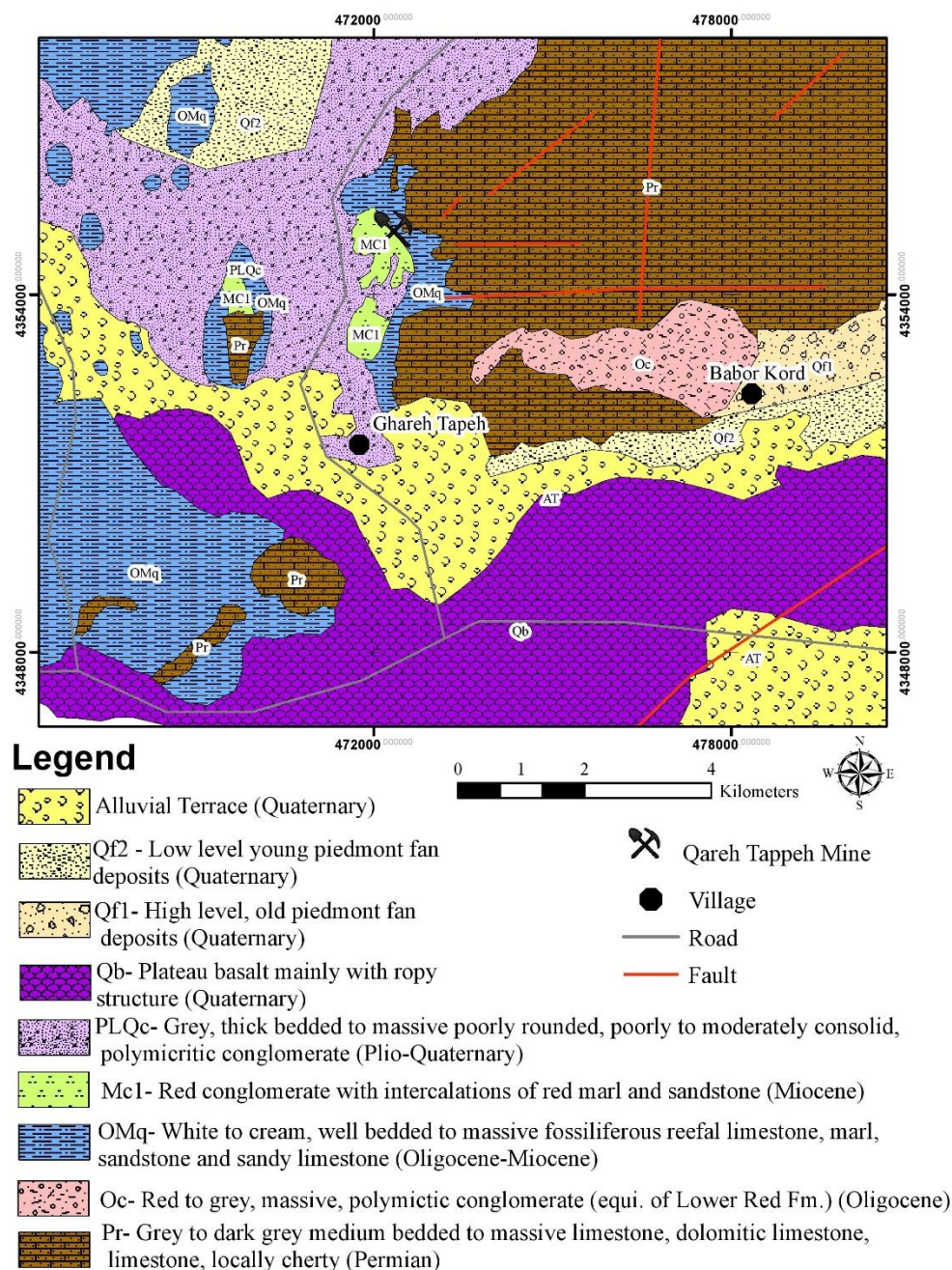
پراش پرتوی ایکس (XRD) یک روش مؤثر و غیر تخریبی است که برای شناسایی و تعیین ساختار بلوری مواد معدنی و سنگ‌ها به کار می‌رود. در این پژوهش، XRD برای کالکوسیت،  $\text{Cu}_2\text{S}$ ، و سنگ میزبان دولومیتی،  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ، انجام شد. کالکوسیت به عنوان یک ماده معدنی کلیدی در صنعت مس

بر اساس رده‌بندی زمین‌ساخت-ماگمایی ایران (شکل ۱)، چند سامانه دربردارنده هشت پهنه زمین‌ساختی اصلی و بقایای توالی‌های افیولیتی وجود دارد، که شامل کمربند راندگی زاگرس، کمربند چین‌خورده زاگرس، کمان ماگمایی ارومیه-دختر، پهنه ماگمایی-دگرگونی سندرچ-سیرجان، قطعه ایران مرکزی، کمربند البرز-کپه‌داغ، پهنه ماگمایی البرز و پهنه شرق ایران/مکران می‌شود (شکل ۱) [۱۸]. بخش جنوب غربی ایران به عنوان پهنه درز برخوردی بین قطعه ایران مرکزی و صفحه عربستان با روند شمال غرب-جنوب شرق شناخته می‌شود [۱۳]. طی فرآیند فروورانش، چندین رویداد چین‌خوردگی، گسل‌خوردگی و بالاآمدگی تدریجی در شمال غرب ایران رخ داد که منجر به تبدیل بیشتر بخش‌ها به خشکی و ایجاد حوضه‌های بین‌کوهی گردید [۱۹]. رسوب‌های کم‌عمق و صفحه‌ای پالئوزوئیک در منطقه ماکو شامل سازندهای باروت، زاگون، لالون و میلا به همراه واحدهای کربناتی-ماسه‌سنگی دوونین میانی، کربناتی در کربنیفر و پرمین هستند. شیل‌های سیاه تریاس میانی و کربناتیای کرتاسه نمایانگر دوره مزوزوئیک هستند و کنگلومراهای ائوسن و الیگوسن به همراه سنگ آهک الیگومیوسن و کنگلومرا و ماسه‌سنگ پالئو-کواترنری از مهم‌ترین واحدهای منطقه به شمار می‌روند [۱۱].

سنگ‌های آهکی، آهک دولومیتی‌شده و دولومیت مربوط به پرمین (Pr) به‌عنوان قدیمی‌ترین واحد در این ناحیه شناخته می‌شوند و شامل چین‌خوردگی‌های میانه با زوایای شیب کم هستند. در این واحد، لایه‌های بین‌دانه‌ای دارای چرت که با مواد دولومیتی و آلی همراه هستند، به‌طور مکرر توزیع شده‌اند. لایه‌بندی‌های میانه تا ضخیم و کلونی‌های مرجانی بر سطوح فرسایش‌یافته دیده می‌شوند. بالای بستر سازند قم، کنگلومرای قرمز انبوهی شناسایی می‌شود که دانه‌هایی با اندازه ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر، جورشده‌گی ضعیف و گردی میانه دارد (Oc) در نقشه. همچنین، سنگ آهک فسیل‌شده به رنگ کرمی با لایه‌بندی خوب و شامل سنگواره‌های جلبک، مرجان و اکیئوئید در بخش شرقی منطقه وجود دارد (OMq). قسمت پایینی میوسن با کنگلومرا، ماسه‌سنگ قرمز و شیل با اندازه‌های بیش از ۲۰ سانتی‌متر مشخص می‌شود (MC1 ه). دوره پالئوسن-کواترنری نیز با کنگلومرای میانه تا انبوه شناسایی می‌شود (PLQC). واحدهای آتشفشانی (Qb) در بخش جنوبی منطقه به‌عنوان ساختارهای افقی، شامل بازالت و آندزیت بازالت، با

یکی از منابع متداول پرتوی ایکس در تحلیل‌های XRD است [۲۱]. برای این بررسی، تعداد ۱۲ نمونه شامل ۶ نمونه کالکوسیت، ۳ نمونه سنگ میزبان دولومیت تیره و ۳ نمونه سنگ میزبان دولومیت روشن بود که پس از خردایش، با میکروسکوپ دوچشمی با دقت ۹۹٪ خالص سازی شده بودند.

شناخته می‌شود و بررسی آن می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره فرآیندهای زمین‌شناسی و تشکیل ذخایر معدنی ارائه دهد [۲۰]. دستگاه مورد استفاده برای این تحلیل، Tongda/TD-3700 XRD در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تبریز بود که با تابش  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$ ) کار می‌کند. تابش  $\text{CuK}\alpha$  به دلیل طول موج مناسب و قدرت تفکیک بالا،



شکل ۲ نقشه منطقه قره تپه [۱۰].



شکل ۳ عکس‌های میدانی از کانسار مس (-طلا) قره‌تپه: الف) سازند دورود و روته، ب) پهنه برشی در سازند روته همراه با رگه-رگچه‌های کلسیتی، پ) مواد آلی در واحدهای کربناتی و ت) نفوذ سیل میکرودیوریتی هوازده‌شده در سنگ‌های آهکی بازمتبلور شده سازند روته.

برای شناسایی و تحلیل ترکیب‌های شیمیایی به کار می‌رود. این روش به دلیل قابلیت ارائه اطلاعات دقیق درباره ساختار مولکولی و ویژگی‌های پیوندی مواد، به ویژه در بررسی مواد معدنی، اهمیت ویژه‌ای دارد. در این پژوهش، طیف‌سنجی FT-IR در گستره  $440$  تا  $3999\text{ cm}^{-1}$  در دمای اتاق با دستگاه Bruker TENSOR 27 در دانشکده شیمی دانشگاه تبریز برای ۶ نمونه کالکوسیت، ۳ نمونه سنگ میزبان دولومیت روشن و ۳ نمونه سنگ میزبان دولومیت تیره رنگ انجام شد. یکی از مزایای اصلی FT-IR، قابلیت استفاده از حالت بازتاب کل تضعیف شده (ATR) است. این روش به ویژه برای نمونه‌های جامد و مایع طراحی شده است و نیازی به آماده‌سازی پیچیده نمونه ندارد. در روش ATR، نور فروسرخ به سطح نمونه تابیده شده و بخشی از آن بازتاب می‌یابد. این فرآیند اطلاعات مربوط به ساختار و ویژگی‌های شیمیایی سطح نمونه را فراهم می‌آورد. از این رو، ATR به عنوان یک روش غیر تخریبی شناخته می‌شود که می‌تواند بدون تغییر در وضعیت فیزیکی یا شیمیایی نمونه، داده‌های مفیدی ارائه دهد [۲۴]. داده‌های FT-IR

رویش‌ها در گستره زاویه‌ای  $2\theta$  از  $5^\circ$  تا  $80^\circ$  با اندازه گام  $0.03^\circ$  و زمان  $5$  ثانیه برای هر گام انجام شد. با این تنظیم‌ها، الگوهای پراش دقیق‌تری اطلاعات بیشتری درباره ساختار بلوری مواد معدنی به دست می‌آیند. انتخاب زوایای مناسب برای روش اثر قابل توجهی بر کیفیت داده‌های به دست آمده دارد [۲۲]. داده‌ها پس از جمع‌آوری با نرم‌افزار RayfleX پردازش شدند تا ثابت بلوری شامل ابعاد شبکه، نوع ساختار بلوری و دیگر ویژگی‌های مواد تعیین شوند [۲۳]. همچنین، داده‌ها با نرم‌افزار Autoquan V. 3.11 تصحیح شدند که این امر به بهبود دقت نتایج کمک می‌کند و خطاهای احتمالی ناشی از شرایط آزمایش را کاهش می‌دهد. این تحلیل پراش پرتوی ایکس می‌تواند درک بهتری از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کالکوسیت و سنگ میزبان دولومیتی فراهم آورد و اطلاعات مفیدی برای بررسی‌های زمین‌شناسی و معدن‌کاوی ارائه دهد.

طیف‌سنجی جذب فروسرخ با تبدیل فوریه (FTIR) یکی از روش‌های مؤثر و پرکاربرد در حوزه شیمی و علم مواد است که

مکانیکی و پوشش‌دهی با لایه نازک طلا (برای افزایش رسانایی سطح و جلوگیری از انباشت بار الکتریکی)، تصویربرداری نانومقیاس انجام شد. در مجموع، ۱۸ تصویر با وضوح بالا در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی تهیه گردید. همه عملیات تصویربرداری و تجزیه در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تبریز صورت گرفت. افزون بر ثبت تصاویر، از قابلیت تجزیه عنصری EDX برای بررسی توزیع عناصر اصلی و ریزساختارهای معدنی در سطح نمونه‌ها استفاده شد تا ارتباط بین ریزساختار و ترکیب شیمیایی بهتر آشکار گردد.

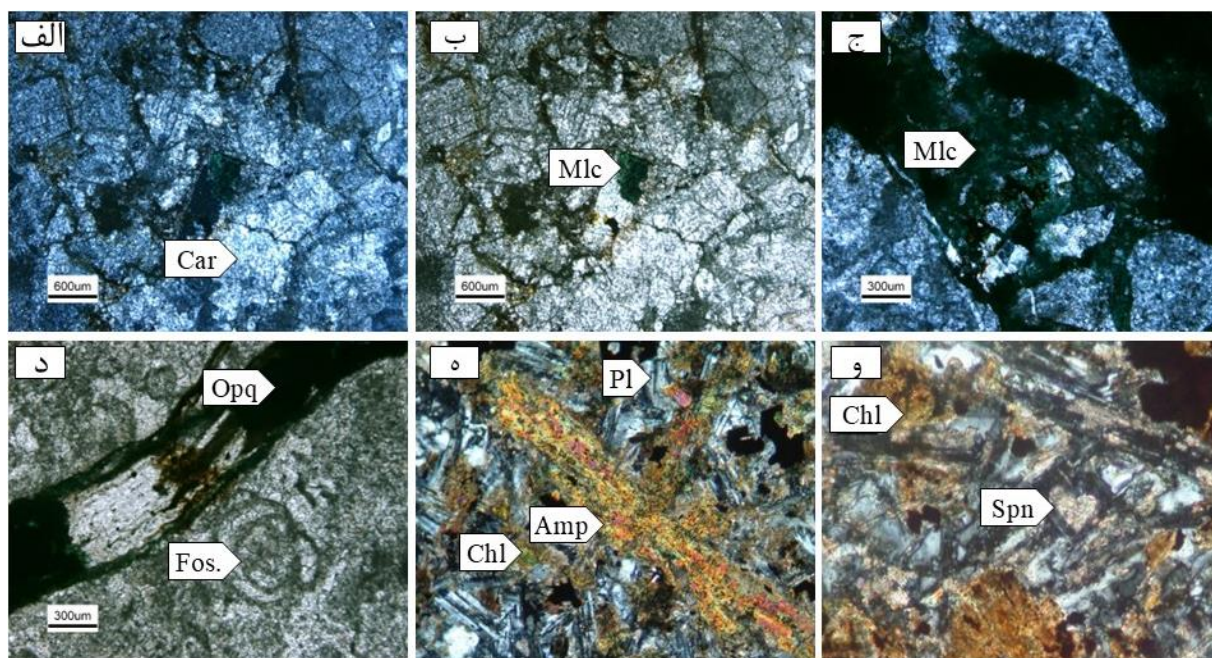
### نتایج

#### سنگ‌نگاری

واحد آهکی، آهکی-دولومیتی و دولومیتی سازند روته شامل بلورهای کربناتی با قطر تا ۱ میلی‌متر است (شکل‌های ۴ الف، ب). تخلخل و شکستگی‌ها با کانی‌های کدر و مواد معدنی دربردارنده مس، چون کالکوسیت و مالاکیت، پر شده‌اند (شکل-های ۴ پ و ت). بلورهای کلسیت به صورت بی‌شکل دیده می‌شوند و در فرآیند دگرگونی در تماس با سیل میکرودیوریتی به مرمر تبدیل شده‌اند [۱۰]. مالاکیت در پهنه برشی نمونه‌های زیرسطحی به همراه کانی‌های کدر شکل می‌گیرد (شکل ۴ پ).

می‌توانند بینش‌های مهمی درباره ویژگی‌های مختلف مواد معدنی، از جمله درجه تبلور، وضعیت هیدراسیون و نظم ساختاری در فازهای سیلیس ارائه دهند. بررسی این ویژگی‌ها می‌تواند به درک بهتر رفتار فیزیکی و شیمیایی مواد کمک کند. برای مثال، درجه تبلور می‌تواند نشان‌دهنده کیفیت و خلوص ماده باشد، در حالی که وضعیت هیدراسیون اطلاعاتی درباره تعامل بین مولکول‌ها و ساختارهای مختلف را فراهم می‌کند. این نوع تحلیل‌ها می‌توانند در زمینه‌های مختلف از جمله علم مواد، زمین‌شناسی و مهندسی شیمی کاربرد داشته باشند. از این رو، استفاده از FT-IR به عنوان یک ابزار تحلیلی در پژوهش‌های علمی و صنعتی اهمیت بسیاری دارد و به پژوهشگران این امکان را می‌دهد که به نتایج دقیق‌تری دست یابند و دانش خود را درباره مواد مختلف گسترش دهند [۲۵].

تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (SEM-FE) با دستگاه Tescan/MIRA3 مجهز به طیف-سنج پراکندگی انرژی پرتوی ایکس (EDX) انجام شد. این دستگاه توانایی تصویربرداری با بزرگنمایی تا ۵۰,۰۰۰ برابر و دقت تفکیک‌پذیری تا حدود ۱ نانومتر را داراست. برای این پژوهش، تعداد ۳ نمونه از کالکوسیت‌ها انتخاب و آماده شدند. از هر نمونه، پس از آماده‌سازی سطحی شامل برش، پرداخت



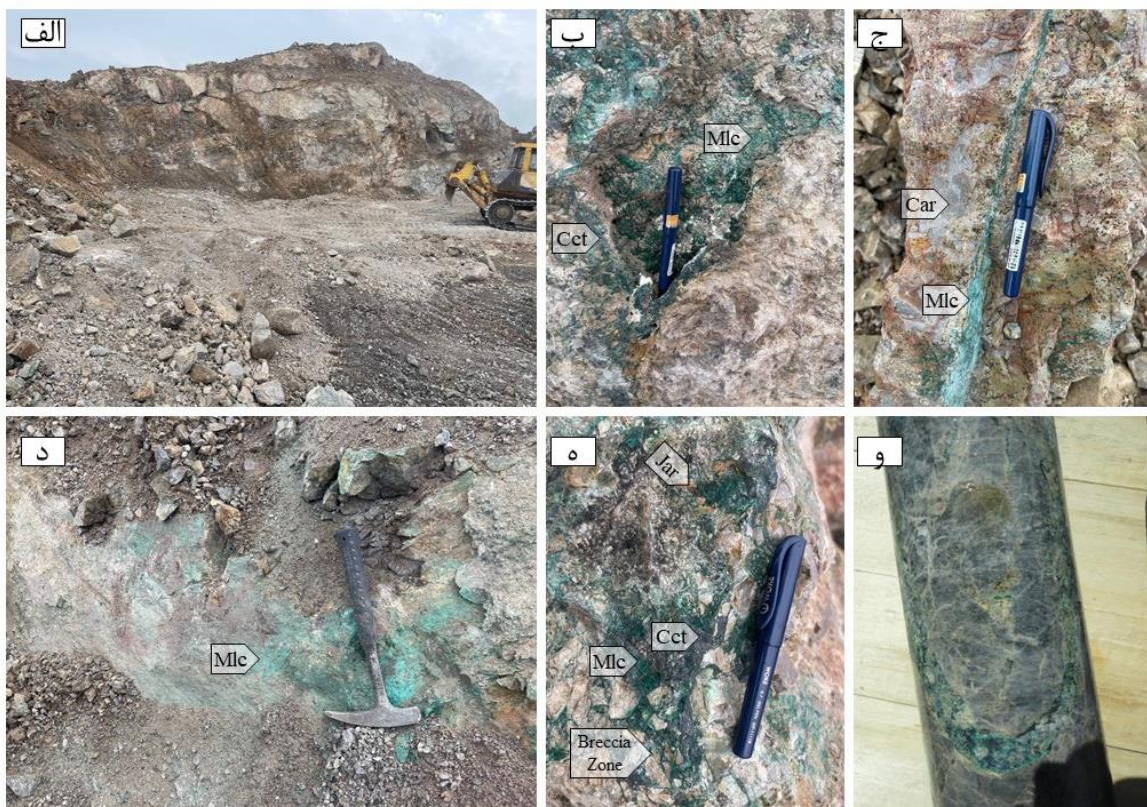
شکل ۴ (الف) بازتبلور بلورهای کلسیت با اندازه متوسط به همراه پرشدگی مالاکیت در تخلخل‌ها، (ب) تصویر الف در نور معمولی، (پ) کانی‌های کدر و مالاکیت در پهنه برشی، (ت) فسفیل فورامینفرا میلیولید در سازند روته، (ث) بلور آمفیبول با شکل شش‌ضلعی در سیل نفوذی که در لبه‌ها به کلریت تغییر یافته است، (ج) تشکیل اسفن در سیل (نشانه‌های اختصاری برگرفته از مرجع [۲۶] هستند).

تماس آن به صورت رگه-رگچه‌ای شکل می‌گیرد (شکل ۵ ب). این کانه زایی ترک‌ها و رگچه‌های کوچک را قطع کرده و بر لایه‌های رسوبی سنگ‌های دولومیتی اثر می‌گذارد (شکل ۵ پ). بیشتر مواد معدنی دارای مس در نزدیکی ترک‌ها و گسل‌های با راستای شمال‌شرقی-جنوب‌غربی توزیع شده‌اند (شکل ۵ ت) [۹]. ضخامت رگچه‌های معدنی در گستره‌ای از یک میلی‌متر تا ۱۵ سانتی‌متر متغیر است (شکل‌های ۵ ب و ث). رخداد کانه زایی سولفیدی در حفره‌های کارستی، تخلخل ثانویه و برشی‌های حل شده کربناتی در منطقه معدنی قره‌تپه شایع است (شکل ۵ ج) بر اساس پژوهش‌های پیشین داره [۱۰]، فراوانی بالای مواد معدنی اکسید شده است در سطح شناسایی شده و به دلیل آتش‌باری‌های اخیر، مواد معدنی بیشتری دارای سولفید شناسایی گردیده‌اند [۹].

واحد فسیل‌شده سازند روته شامل چند سنگواره از جمله ور بکی‌نا، لانتزلا، گینتزینا، بریوزوا و میلیولیناست که از زیرراسته‌های فورامینفرا هستند (شکل ۴ ت). سیلی که به درون سازند روته نفوذ کرده، شامل پلاژیوکلازهای نیمه‌شکلدار تا شکلدار، آمفیبول، کلریت و اسفن با بافت تراکیتی است (شکل ۴ ث، ج). پروپیلیتی‌شدن به عنوان مهم‌ترین نوع دگرسانی در این واحد شناخته می‌شود و چند رگچه کلسیتی با دو شکستگی بالا نیز تشکیل شده است.

### کانه‌زایی

کانه‌زایی در منطقه معدنی قره‌تپه وابسته به ویژگی‌های ساختاری چون شکستگی‌ها و گسل‌ها است (شکل ۵). سنگ میزبان بیشتر دولومیت است که در پایه سازند روته قرار دارد و به سمت بالا در همه سازند روته گسترش یافته است (شکل ۵ الف). فرآیند کانه زایی سولفیدها در طول یک گسل عادی و در



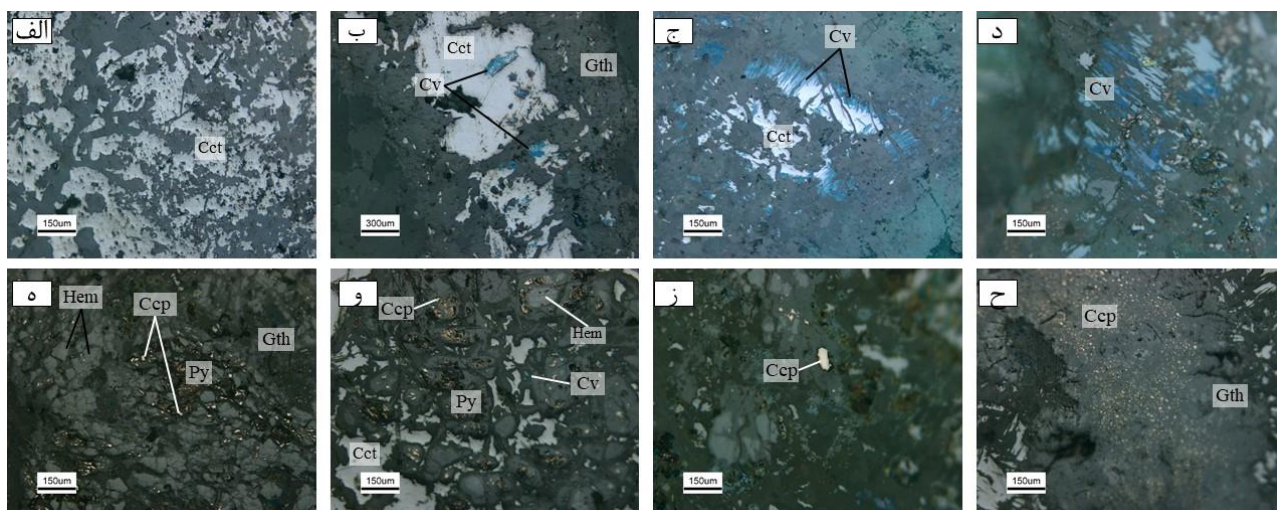
**شکل ۵** تصاویری از اکتشاف میدانی در ذخیره مس قره‌تپه. الف) سازند روته و محل معدن، ب) شکل‌گیری مواد معدنی سولفیدی در ترک‌ها و شکستگی‌ها، پ) تشکیل ماده معدنی با بافت رگه-رگچه‌ای در سنگ میزبان کربناتی (ت) گسل تشکیل‌دهنده ماده معدنی با روند شمال‌شرقی-جنوب‌غربی، ث) کالکوسیت، مالاکیت و جاروسیت در رگچه‌ها و حفره‌ها، ج) شکل‌گیری ماده معدنی در پهنه برشی، حفره‌های کارستی و نواحی کربناتی سازند روته - مغزه حفاری از عمق ۴۳ متر از [۱۵] (نشانه‌های اختصاری برگرفته از مرجع [۲۶]).

## کانی‌شناسی، بافت و توالی همبری

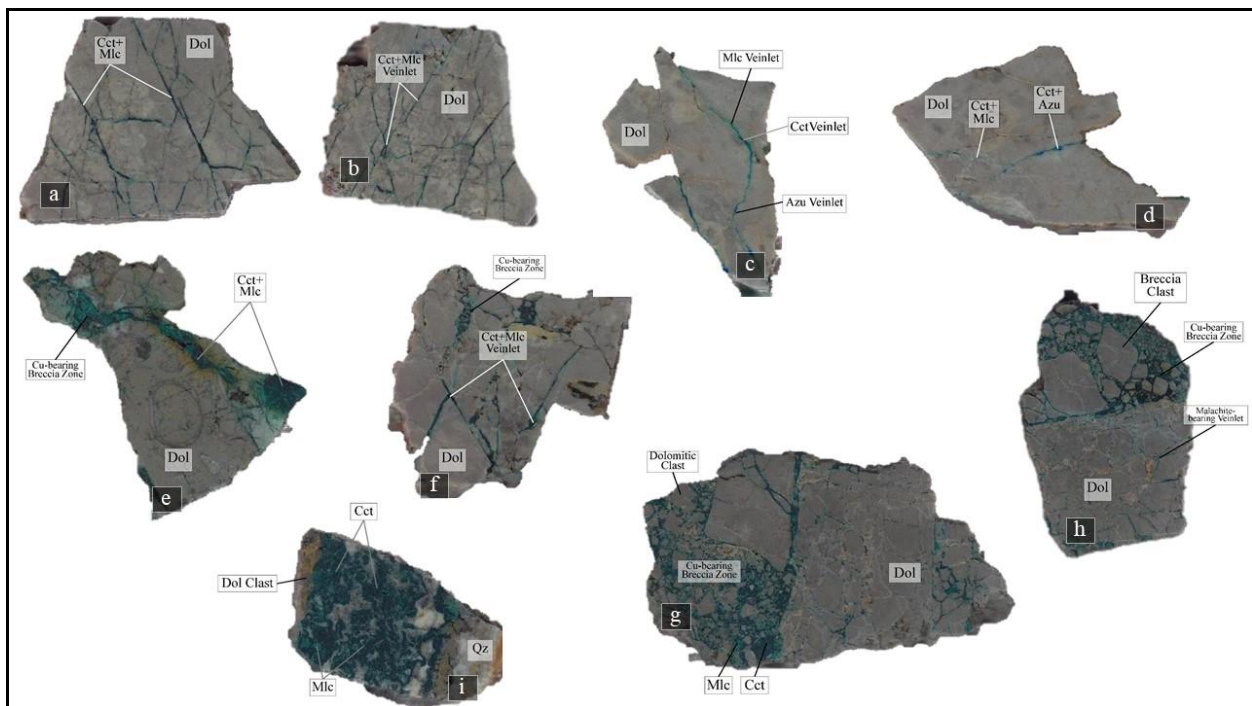
مقاطع صیقلی نشانگر حضور کالکوسیت، کوولیت، پیریت و کالکوپیریت به عنوان مواد معدنی اصلی سولفیدی هستند (شکل ۶). کالکوسیت با رنگ سیاه و درخشش فلزی، به همراه مالاکیت در منافذ و شکستگی‌های سنگ میزبان کربناتی شناسایی می‌شود. این ماده معدنی حدود ۹۰٪ از رگچه‌ها را تشکیل می‌دهد و در برخی نواحی با کوولیت همراه است (شکل‌های ۶ الف - ت). کالکوسیت به عنوان یک ماده پرکننده منافذ، پس از برشی، زمینه سنگ میزبان را پر می‌کند (شکل ۶ الف). وجود مواد آلی در سنگ‌های آهکی بیتومینی موجب تسهیل تمرکز سولفیدها در بخش‌های ویژه‌ای از این سنگ‌ها شده است [۱۰]. جایگزینی کالکوسیت با کوولیت در رگچه‌های سولفیدی، شامل بافت‌های پراکنده و جایگزینی، امری رایج است (شکل ۶ ب). با کاهش عمق، مقدار کوولیت در نمونه‌های سطحی به ۵٪ وزنی افزایش می‌یابد (شکل ۶ پ). بر اساس بررسی‌های تصویری، تعیین ترکیب دقیق کوولیت در یک محلول جامد دشوار بوده و شامل ترکیب‌هایی چون ژورلایت، دیژنیت، آنیلایت، اسپینوکوپیت و یارویت است (شکل ۶ ت). پیریت در بخش‌های عمیق‌تر کمتر از ۴٪ به صورت دانه‌های ریز تا متوسط، نیمه‌شکلدار و با بافت پراکنده قابل شناسایی است (شکل ۶ ث). پیریت تقریباً به طور کامل با همتایت و گوتیت جایگزین شده است (شکل ۶ ج). بلورهای بسیار کوچک

کالکوپیریت با فراوانی کمتر از ۱٪ به شکل‌های دانه‌ریز و پراکنده شناسایی می‌شوند (شکل ۶ چ). کالکوپیریت به طور معمول از لبه‌ها، مرکز و ترک‌ها با گوتیت جایگزین می‌شود (شکل ۶ ح). مالاکیت و آزوریت دو ماده معدنی کربناتی-اکسیدی هستند که در مرحله برونزایی به عنوان بافت‌های پرکننده منافذ همراه با کالکوسیت و کوولیت در شکستگی‌ها تشکیل می‌شوند. مالاکیت نسبت به آزوریت فراوان‌تر است و در برخی مقاطع ساختار کلافی را نشان می‌دهد.

در نمونه‌های سطحی، دولومیت با چند رگچه دربردارنده کالکوسیت و مالاکیت قطع شده و در ترک‌ها پر شده است (شکل‌های ۷ الف و ب). آزوریت نیز در نمونه‌های با عمق متوسط به همراه کالکوسیت و مالاکیت دیده می‌شود (شکل-های ۷ پ و ت). با افزایش عمق، پهنه برشی در نمونه‌های زیرسطحی نمایان می‌شود که شامل مواد معدنی دارای مس است (شکل ۷ ث). همچنین، روابط بین پهنه برشی و فرآیند کانه زایی به شکل رگه-رگچه در عمق متوسط آشکار است (شکل ۷ ج). با ادامه افزایش عمق در سازند روته، قطعه‌های برشی بزرگ‌تر، ضخیم‌تر و قابل شناسایی‌تری ظاهر می‌شوند که با کالکوسیت، مالاکیت و سایر مواد معدنی مس‌دار پر شده‌اند (شکل‌های ۷ چ و ح). افزون بر این، رگه‌ها در نواحی عمیق‌تر نسبت به نمونه‌های سطحی دارای ضخامت بیشتری هستند که نشان‌دهنده ظهور یک منبع جدید برای مس است (شکل ۷ خ).



شکل ۶ تصاویر مقاطع صیقلی از ذخیره مس قره تپه: الف) وجود انبوهی از کالکوسیت در زمینه سازند روته، ب) جایگزینی کالکوسیت با کوولیت، پ) افزایش کوولیت در نمونه‌های سطحی، ت) تشکیل محلول جامد کوولیت، ث) تشکیل پیریت، کالکوپیریت، گوتیت و همتایت در نمونه‌های زیرسطحی، ج) جایگزینی پیریت با همتایت، چ) وجود کالکوپیریت در مقادیر کم، ح) تغییر شکل کالکوپیریت به گوتیت (نشانه‌های اختصاری بر گرفته از مرجع [۲۶] هستند).



شکل ۷ بررسی بافت و روابط بین رگچه‌ها در ذخیره مس قره‌تپه: الف) رخدادهای رگچه‌های کالکوسیت و مالاکیت در نمونه‌های سطحی، ب) رگچه‌های کالکوسیت و مالاکیت در سنگ میزبان دولومیتی، پ) ظهور آزوریت به همراه کالکوسیت و مالاکیت با افزایش عمق، ت) رگچه‌های آزوریت در سنگ میزبان دولومیتی، ث) نخستین شواهد بافت برشی در نمونه‌های با عمق متوسط شامل مواد معدنی مس‌دار، ج) روابط بین پهنه برشی و کانه زایی نوع رگه-رگچه، چ) پهنه برشی مس‌دار در بخش‌های عمیق‌تر سازند روته، ح) افزایش اندازه قطعه‌های در پهنه برشی با افزایش عمق، خ) کانه زایی نوع برشی و رگه-رگچه شامل کوارتز در منطقه معدنی قره‌تپه (نشانه‌های اختصاری برگرفته از مرجع [۲۶] هستند).

طور کامل در مرحله درونزاد و کانه‌زایی شکل گرفته‌اند.

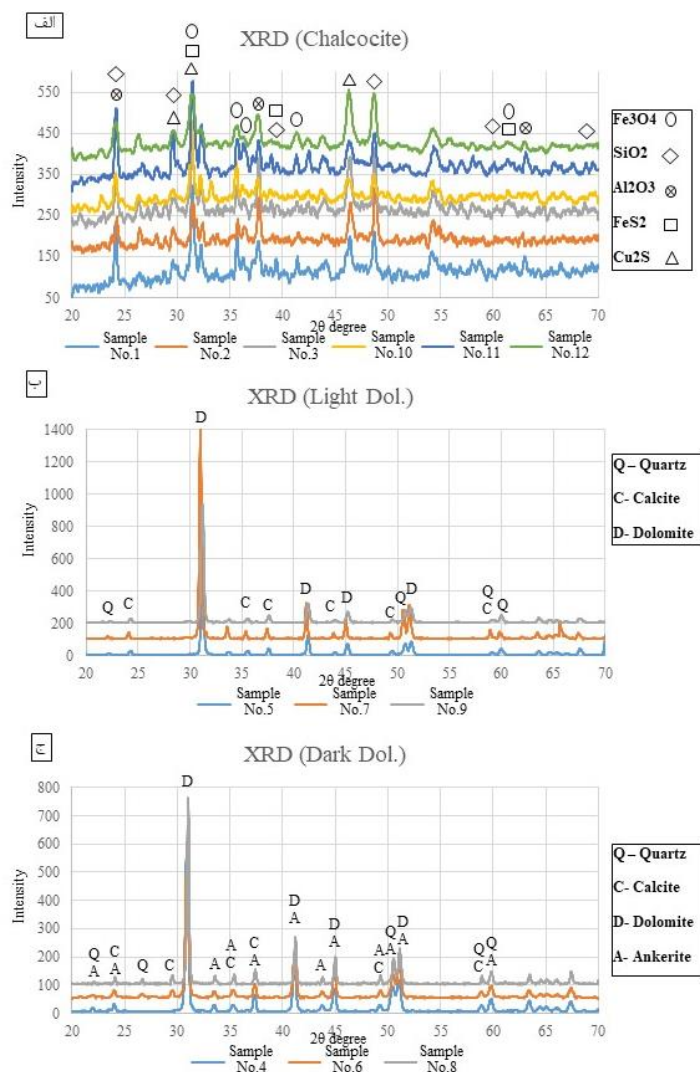
#### پراش پرتوی ایکس

الگوهای XRD شش نمونه کالکوسیت (نمونه‌های شماره ۱، ۲، ۳، ۱۰، ۱۱ و ۱۲) در شکل ۹ الف، سه نمونه دولومیت روشن رنگ (نمونه‌های شماره ۵، ۷ و ۹ در شکل ۹ ب و سه نمونه دولومیت تیره رنگ (نمونه‌های شماره ۴، ۶ و ۸) در شکل ۹ پ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های کالکوسیت دارای مقادیر قابل توجهی از اکسید آهن، سیلیس، اکسید آلومینیوم و سولفید آهن به همراه سولفید مس هستند (شکل ۹ الف). قله‌های مربوط به اکسید آهن در زوایای ۲۰ برابر با ۳۲٫۲، ۳۵٫۴، ۳۵٫۶، ۴۱٫۸ و ۶۱٫۳ دیده می‌شود. همچنین، قله‌های مربوط به سیلیس در ۲۰ برابر با ۲۴٫۴، ۲۹٫۴، ۳۹٫۱، ۴۸٫۱ و ۶۰٫۱ هستند. برای اکسید آلومینیوم، مقادیر ۲۴٫۴، ۳۷٫۱ و ۶۳٫۱ ثبت شده‌اند. قله‌های مربوط به سولفید آهن در ۲۰ برابر با ۳۲٫۲، ۳۹٫۱ و ۶۱٫۳ و برای سولفیدهای مس در ۲۹٫۴، ۳۲٫۲ و ۴۶٫۱ هستند [۲۷].

ترتیب هم‌برزایی در ذخایر مس قره تپه به سه مرحله اصلی تقسیم می‌شود (شکل ۸). مرحله پیش از کانه زایی شامل سازند روته بوده که به‌طور عمده شامل رگه‌های کلسیتی و کوارتزی به همراه پیریت‌های پراکنده است. مرحله کانه‌زایی با استمرار حضور پیریت در مقادیر کم و تشکیل کالکوسیت و کالکوپیریت مشخص می‌شود، که این فرآیند با رگه‌های کلسیتی در مرحله پایانی معدنی همراه است. این مرحله کانه-زایی از کالکوپیریت آغاز شده، سپس با کالکوسیت ادامه یافته و در پایان با تزریق کلسیت به پایان می‌رسد. مرحله پس از کانه زایی نیز با جایگزینی کالکوسیت به وسیله کوولیت و گوتیت، و همچنین جایگزینی پیریت با هماتیت شناسایی می‌شود. در این مرحله، دگرسانی کالکوسیت به مالاکیت و آزوریت نیز دیده می‌گردد. افزون بر این، جاروسیت در نتیجه اکسایش مواد معدنی سولفیدی-اکسیدی پیشین در این مرحله تشکیل می‌شود. با توجه به بافت توده‌ای کالکوسیت (نه رگه‌ای برونزاد)، این کانه در مرحله پس از کانه‌زایی تشکیل نشده است و به

| مرحله قبل از کانی‌زایی | مرحله کانی‌زایی | مرحله پس از کانی‌زایی | کانی       |           |
|------------------------|-----------------|-----------------------|------------|-----------|
|                        |                 |                       | پیریت      | سولفیدها  |
|                        |                 |                       | کالکوپیریت |           |
|                        |                 |                       | کالکوسیت   |           |
|                        |                 |                       | کوولیت     |           |
|                        |                 |                       | هماتیت     | اکسیدها   |
|                        |                 |                       | گوتیت      |           |
|                        |                 |                       | آزوریت     | کربنات‌ها |
|                        |                 |                       | مالاکیت    |           |
|                        |                 |                       | کلسیت      |           |
|                        |                 |                       | کوارتز     | سیلیس‌ها  |
|                        |                 |                       | جاسپر      |           |
|                        |                 |                       | طلا        | عنصر      |

شکل ۸. توالی همبری کانی‌ها در ذخیره مس قره تپه.



شکل ۹. الگوهای پراش پرتوی ایکس نمونه‌های الف) کالکوسیت (نقاط مرجع برگرفته از مرجع [۲۸])، ب) دولومیت روشن رنگ (نقاط مرجع برگرفته از مرجع [۲۷]) و پ) دولومیت تیره رنگ (نقاط مرجع برگرفته از مرجع [۲۷]).

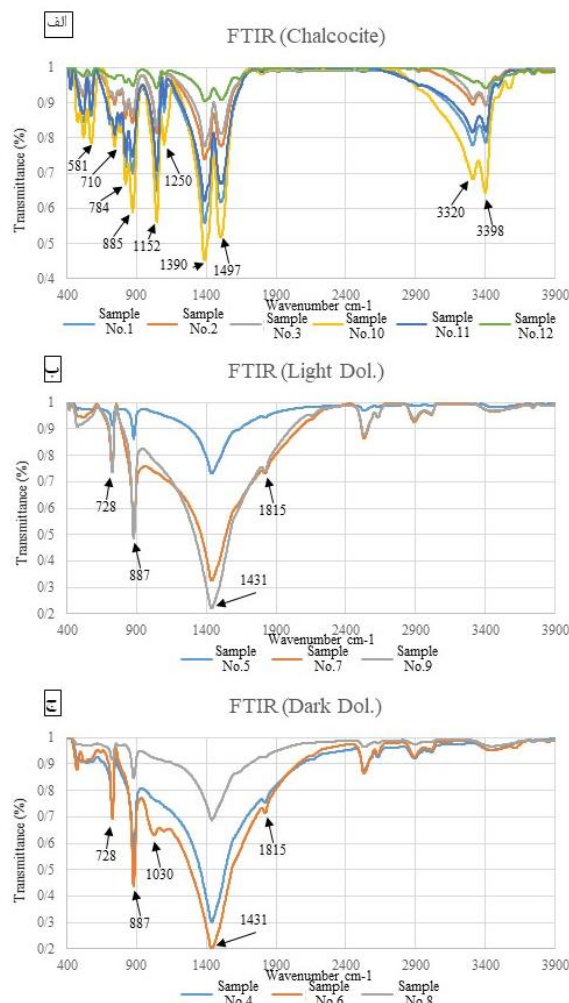
## طیف سنجی تبدیل فوریه فروسرخ

طیف‌های FTIR شش نمونه کالکوسیت (نمونه‌های شماره ۱، ۲، ۳، ۱۰، ۱۱ و ۱۲)، سه نمونه دولومیت روشن رنگ (نمونه‌های شماره ۵، ۷ و ۹) و سه نمونه دولومیت تیره رنگ (نمونه‌های شماره ۴، ۶ و ۸) در شکل ۱۰ ارائه شده است. در نمونه‌های کالکوسیت، کمترین شدت عبور نور در طول موج‌های ۸۸۵، ۱۱۵۲، ۱۳۹۰، ۱۴۹۷، ۳۳۲۰ و  $3398\text{ cm}^{-1}$  دیده گردید. همچنین، قله‌های مربوط به کمترین عبور نور در طول موج‌های ۵۸۱، ۷۱۰، ۷۸۴ و  $1250\text{ cm}^{-1}$  نیز ثبت شدند (شکل ۱۰ الف). در نمونه‌های دولومیت روشن رنگ، کمترین عبور نور در طول موج‌های ۸۸۷ و  $1431\text{ cm}^{-1}$  دیده شد که پس از آن، اعداد موج ۷۲۸ و  $1815\text{ cm}^{-1}$  نیز کمترین عبور نور را داشتند (شکل ۱۰ ب). این الگو برای دولومیت‌های تیره رنگ نیز برقرار بود، با این تفاوت که یک جذب نور اضافی در عدد

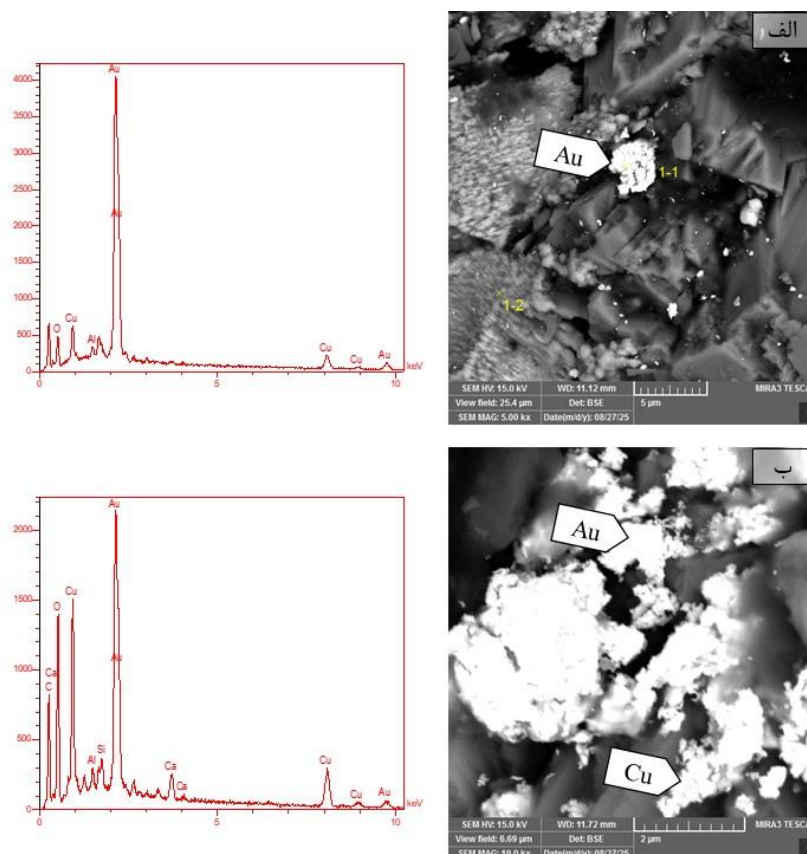
## میکروسکوپ الکترونی

بررسی‌های انجام‌شده با میکروسکوپ الکترونی نشان داد که طلا در منطقه قره‌تپه در دو محیط اصلی متمرکز شده است که در ادامه بیان می‌شود.

سنگ میزبان دولومیتی: بررسی‌های دقیق بر واحدهای سنگی دولومیتی بیانگر حضور مقادیر قابل توجهی از طلا به‌صورت پراکنده در بافت میزبان است (شکل ۱۱ الف). این طلا اغلب درون تخلخل‌ها، شکستگی‌های ریز و گاه به‌صورت میانبراهای میکرومتری در زمینه‌ی دولومیت دیده می‌شود. توزیع طلا در میزبان کربناتی نشان می‌دهد که فرآیندهای سیال‌های گرمایی نقش مهمی در انتقال و رسوب‌گذاری آن داشته‌اند. این پدیده نشان می‌دهد که دولومیت افزون بر ایفای نقش به‌عنوان یک سنگ میزبان مکانیکی، در تمرکز عناصر فلزی نیز سهم بسزایی داشته است.



شکل ۱۰ طیف‌های تبدیل فوریه فروسرخ در نمونه‌های الف) کالکوسیت، ب) دولومیت روشن رنگ و پ) دولومیت تیره رنگ.



شکل ۱۱ تصاویر مربوط به میکروسکوپ الکترونی از منطقه قره تپه: الف) حضور طلای آزاد در کنار سنگ میزبان دولومیتی و ب) حضور طلای آزاد به همراه کانی کالکوسیت.

سن پرمین است [۲۹]. کانه‌زایی مس در این منطقه به صورت کالکوسیت و کوولیت (با احتمال وجود پیریت و کالکوپیریت) در رگه‌ها و رگچه‌هایی که در راستای گسل‌های ساختاری منطقه قرار دارند، دیده شده است. حضور مقادیر قابل توجهی از مالاکیت و گوتیت در سطح، نشان‌دهنده اکسایش سطحی این کانی‌ها از کانی‌های سولفیدی است. واحد زیرین دولومیت، سیل میکرودیوریتی است که به احتمال بسیار منبع مس در منطقه محسوب می‌شود. شرایط غلظت هیدروژن و اکسایش در ته‌نشست این ذخیره نقشی کلیدی داشته و با توجه به وجود سنگ میزبان کربناتی، مواد آلی و گسل‌های متعدد (که شرایط اکسایش سطحی را به سرعت ایجاد می‌کنند)، مس در این منطقه ته‌نشست شده است. برای مس موجود در این منطقه می‌توان دو منبع اصلی را در نظر گرفت: نخست، شستشوی طبقه‌های زیرین توسط شورابه‌های حوضه‌ای در شرایط احیایی و ترسیب آن در شرایط اکسایش، و دوم، حمل مس توسط واحد نفوذی سیل در منطقه.

رگه‌های کانه‌دار سولفیدی: افزون بر میزبان کربناتی، طلا در رگه‌های کانه‌دار دارای سولفیدهای مسی چون کالکوسیت و کالکوپیریت نیز شناسایی گردید (شکل ۱۱ ب). حضور طلا در این رگه‌ها به دو شکل عمده دیده شد: به صورت ذرات ریز و پراکنده در زمینه سولفیدی و به صورت میانبرهای بسیار کوچک درون کانی‌های کالکوسیت و کالکوپیریت.

#### بحث

#### ویژگی‌های زمین‌شناسی

منطقه قره تپه از نظر سنگ‌شناسی سنگی شامل کربناتیای در ارتباط با محیط‌های کم‌عمق بوده که بیشتر شامل دولومیت‌هایی است که با رخساره‌های غنی از مواد آلی همراه هستند. این مواد آلی شامل استروماتولیت‌ها و ساختارهای آنکولیتی به رنگ‌های خاکستری تیره یا مشکی هستند که به صورت لایه‌های نازک درون زمینه کربناتی قرار دارند. وجود دولومیت به همراه مواد آلی پراکنده نشان‌دهنده یک محیط ته‌نشست تبخیری برای سنگ میزبان این ذخیره بوده که دارای

### سنگ‌زایی و کانه‌زایی

با توجه به شواهد سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی موجود در واحد دولومیتی سازند روته، امکان بررسی دقیق‌تر فرآیندهای درون‌زایی، دگرگونی و کانه‌زایی در این واحد وجود دارد. این واحد دولومیتی دارای بلورهای کربناتی به اندازه تقریبی یک میلی‌متر بوده، که نشان‌دهنده بازتبلور گسترده در این بخش از سازند است. اندازه بلورها اغلب ناشی از تبلور ثانویه و رشد دوباره بلورهای اولیه در شرایط دگرگونی ضعیف تا متوسط است [۱۰]. پراش‌دگی تخلخل‌ها و شکستگی‌ها با کانی‌های کدر و کانی‌های مس‌دار چون ملاکیت شواهدی از فعالیت سیال‌های معدنی و وجود کانه‌زایی مس در این واحد را ارائه می‌دهد. این پدیده به‌ویژه در پهنه برشی زیرسطحی آشکار است و هم‌زمانی کانی‌های کدر و ملاکیت می‌تواند بیانگر شرایط اکسایش و مهاجرت دوباره عناصر فلزی در راستای شکستگی‌ها و رگه‌ها باشد. این ویژگی‌ها با مدل‌های کانه‌زایی فراگرمایی نوع اکسایشی-کربناتی همخوانی دارند [۳۰]. دگرگونی کلسیت‌های بی‌شکل به مرمر در تماس با سیل، نقش فرآیندهای گرمایی-دگرگونی در ارتباط با تهاجم دمایی را تأیید می‌کند [۱۰]. نفوذ سیل به درون این واحد و تغییرهای بافتی، به‌ویژه بافت تراکیتی در حضور کانی‌هایی چون پلاژیوکلاز، آمفیبول، کلریت و اسفن، گویای شرایط دمایی به نسبت بالا و محیط آتشفشانی-زیرآتشفشانی است. همچنین، وجود سنگواره‌های متعددی چون *Gintzina*, *Langelia*, *Vervakina* و *Bryozoa* و *Miliolina* sp که بیشتر از گروه فورامینیفرها هستند، به شناسایی دقیق‌تر سن نسبی و محیط رسوبی اولیه کمک می‌کند. این داده‌ها نشان‌دهنده نهشت اولیه در یک محیط دریایی کم‌عمق و گرم با نرخ رسوب‌گذاری متوسط تا بالا هستند که شرایط مناسبی برای رشد این سنگواره‌ها فراهم کرده است [۳۱]. در پایان، دگرسانی پروپلیتی به عنوان مهم‌ترین فاز دگرسانی در این واحد، بیانگر اثرگذاری سیال‌های گرمایی کم‌دمای غنی از  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{O}$  بر سنگ‌های میزبان است. حضور رگچه‌های کلسیتی با شکست مضاعف بالا نیز تأییدی بر وجود تنش‌های دیرینه و نفوذ دوباره سیال‌های معدنی است که می‌تواند در فرآیند کانه‌زایی و بازشدگی دوباره شکستگی‌ها نقش مؤثری داشته باشد. با توجه به شواهد ساختاری و زمین‌شناسی منطقه معدنی قره‌تپه، می‌توان گفت که کنترل ساختاری، به‌ویژه شکستگی‌ها، گسل‌ها و حفره‌های

کارستی، نقش مهم و تعیین‌کننده‌ای در تمرکز و شکل‌گیری کانه‌زایی داشته‌اند. سنگ میزبان این کانه‌زایی بیشتر دولومیت‌های سازند روته است که در پایه این سازند قرار دارد و به سمت بالا گسترش یافته است. گسترش عمودی این سنگ‌ها بستر مناسبی برای نفوذ سیال‌های معدنی فراهم کرده است. کانه‌زایی سولفیدی به‌ویژه در راستای گسل‌های عادی بیشتر به صورت رگچه‌ای و رگچه‌های کوچک رخ می‌دهد که با قطع کردن لایه‌های رسوبی دولومیت‌ها، نفوذ و توزیع سیال‌های معدنی را در این واحد تسهیل کرده‌اند. وجود گسل‌های فراوان و ترک‌های گسترده در راستای شمال‌شرقی-جنوب‌غربی و تمرکز بیشتر کانی‌های مس‌دار در راستای این ساختارها نشان می‌دهد که گسل‌ها نه تنها به عنوان مسیر انتقال سیال‌ها بلکه به عنوان تله‌های ساختاری عمل کرده‌اند [۹]. ضخامت رگچه‌های معدنی بین ۱ میلی‌متر تا ۱۵ سانتی‌متر متغیر است، که به پویایی و چندمرحله‌ای بودن جریان سیال‌های گرمایی در منطقه اشاره دارد. افزون بر این، رخداد کانه‌زایی در حفره‌های کارستی، فضاها میان‌بلوری و برشی‌های انحلالی کربناتی نشانگر نقش تخلخل ثانویه در تمرکز کانه‌هاست. چنین ساختارهایی محیطی مناسب برای تمرکز دوباره فلزها از محلول‌های گرمایی فراهم کرده و نقش مهمی در تشکیل ذخایر روزادی ایفا می‌کنند [۱۰]. به‌ویژه در سطح، مواد معدنی اکسید شده به فراوانی دیده می‌شوند که می‌توانند نتیجه فرآیندهای اکسایش سطحی و تبدیل سولفیدها به اکسیدها باشند. با این حال، بر اساس بررسی‌های مغفوری و همکاران [۹]، آتش‌فشان‌زایی‌های جوان‌تر منجر به مهاجرت دوباره سیال‌ها و تشکیل فازهای تازه‌ای از کانی‌های سولفیدی در عمق شده‌اند. این پدیده اهمیت اکتشافی بالایی دارد، زیرا نشان می‌دهد که بخش‌های زیرسطحی همچنان امکان کانه‌زایی قابل‌توجهی دارند.

### مراحل کانه‌زایی

بررسی توالی همبری ذخیره مس قره تپه نشان‌دهنده یک سامانه کانه‌زایی چندمرحله‌ای شامل فرآیندهای رسوبی اولیه تا دگرسانی‌های ثانویه متأخر است. این سامانه به سه مرحله اصلی پیش از کانه زایی، کانه زایی و پس از کانه زایی (برون‌زایی)، تقسیم می‌شود که هر یک دارای ویژگی‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی ویژه خود هستند.

دولومیت‌ها رسوب کرده‌اند. تفاوت ترکیب سنگ‌های میزبان و کالکوسیت، همچنین حضور فازهای اکسید شده، نشان‌دهنده‌ی فعالیت‌های دگرسانی بعدی و احتمال فرآیندهای اکسایش در مراحل بالایی و سطحی است. این یافته‌ها می‌توانند پایه مهمی برای مدل‌سازی کانی‌سازی در منطقه و اولویت‌بندی اهداف اکتشافی در آینده باشند.

#### ساختار کانی‌شناسی و ترکیب مولکولی کانی‌ها

نتایج طیف‌سنجی FTIR برای نمونه‌های کالکوسیت و دولومیت‌های همراه، اطلاعات ارزشمندی پیرامون ترکیب مولکولی، پیوندهای شیمیایی و ساختارهای کانی‌شناسی موجود در این مجموعه معدنی فراهم کرده است. طیف‌های FTIR به‌دست‌آمده، تفاوت‌های معناداری را میان سه گروه اصلی نمونه‌ها، یعنی کالکوسیت، دولومیت روشن‌رنگ و دولومیت تیره‌رنگ، نشان می‌دهند که در ادامه به تفصیل بررسی می‌شوند.

در نمونه‌های کالکوسیت (نمونه‌های شماره ۱، ۲، ۳، ۱۰، ۱۱ و ۱۲)، شدت عبور نور در طول موج‌های ۸۸۵، ۱۱۵۲، ۱۳۹۰، ۱۴۹۷، ۳۳۲۰ و  $3398\text{ cm}^{-1}$  به‌طور قابل توجهی کاهش یافته که این امر نشان‌دهنده جذب انرژی توسط گروه‌های فعال یا پیوندهای ویژه در این نواحی است. قله‌های شدید در حدود  $3320\text{ cm}^{-1}$  و  $3398\text{ cm}^{-1}$  به احتمال بسیار به ارتعاش‌های کششی گروه‌های  $\text{OH}^-$  یا  $\text{H}_2\text{O}$  ساختاری مربوط هستند که اغلب در مواد معدنی ثانویه و فازهای اکسید شده یا رطوبت باقی‌مانده در ساختار دیده می‌شوند. همچنین، جذب در گستره ۱۳۹۰ تا  $1497\text{ cm}^{-1}$  می‌تواند به پیوندهای کربناتی یا حضور یون‌های  $\text{CO}_3^{2-}$  در ساختار سیال‌های گرمابی اشاره داشته باشد. قله‌های جذب در نواحی پایین‌تر حدود ۵۸۱، ۷۱۰، ۷۸۴ و  $1250\text{ cm}^{-1}$  ممکن است به ارتعاش‌های خمشی پیوندهای فلز-گوگرد (Cu-S و Fe-S) نسبت داده شوند که با توجه به ماهیت سولفیدی کالکوسیت و حضور فازهای فرعی چون پیریت و بورنیت، منطقی به نظر می‌رسد. این داده‌ها به‌خوبی با ترکیب معدنی برآمده از XRD همخوانی دارد و نقش طیف‌سنجی FTIR را در تأیید این فازها تقویت می‌کند.

در نمونه‌های دولومیتی با رنگ روشن (شماره‌های ۵، ۷ و ۹)، قله‌های جذب در طول موج‌های ۸۸۷ و  $1431\text{ cm}^{-1}$  به‌عنوان نقاط جذب بارز شناسایی شده‌اند. این نواحی به ارتعاش‌های کششی گروه‌های کربناتی ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) موجود در ساختار

مرحله پیش‌از کانه‌زایی با سازند روتی و رگه‌های اولیه کلسیتی و کوارتزی همراه با پیریت‌های پراکنده مشخص می‌شود. حضور پیریت‌های پراکنده در این فاز نشان‌دهنده یک محیط احیایی ضعیف و زمینه مناسب برای فعالیت‌های بعدی گرمابی است. این ویژگی‌ها برای بسیاری از سامانه‌های روزادی در سنگ‌های کربناتی گزارش شده‌اند، جایی که سیال‌های گرمابی اولیه در حفره‌ها و شکستگی‌های سازند نفوذ کرده و باعث رسوب فازهای کلسیتی و سیلیسی می‌شوند [۳۰].

مرحله کانه‌زایی هسته اصلی کانه‌زایی را تشکیل داده و با ته‌نشینی کالکوپیریت آغاز می‌شود که به‌تدریج با کالکوسیت جایگزین شده و در پایان با تزریق کلسیت پایان می‌یابد. آغاز کانه‌زایی با کالکوپیریت نشان‌دهنده شرایط احیایی با دمای به نسبت بالا و pH خنثی تا قلیایی است. تغییر تدریجی به کالکوسیت، اغلب ناشی از کاهش فعالیت گوگرد در سیال‌های گرمابی یا دگرسانی کالکوپیریت توسط سیال‌های کم‌دما و فقیر از گوگرد است [۳۲]. تزریق پایانی کلسیت نشان‌دهنده افت انرژی سامانه و توقف کانه‌زایی فلزی است که به‌طور معمول در فاز پس‌گرمابی دیده می‌شود. چنین روندی با الگوهای کانه‌زایی روزادی نوع "رمزگذاری گرمابی در سنگ‌های کربناتی" همخوانی دارد [۳۳].

مرحله پس از کانه‌زایی با دگرسانی گسترده سولفیدها به فازهای ثانویه همراه است. جایگزینی کالکوسیت با کوولیت و گوتیت و همچنین تبدیل پیریت به هماتیت، نشان‌دهنده شرایط اکسایشی شدید در سطح یا نزدیکی سطح زمین است. در این شرایط، سولفیدهای اولیه دچار اکسایش شده و فازهای اکسیدی و هیدروکسیدی تشکیل می‌دهند. تبدیل کالکوسیت به مالاکیت و آزوریت نیز بیانگر تشکیل کانی‌های کربناتی ثانویه مس در محیط‌های کم‌عمق با حضور  $\text{CO}_2$  و آب است. تشکیل جاروسیت در این فاز نشانگر شرایط اسیدی ناشی از اکسایش پیریت و آزادسازی یون‌های سولفات است. این ویژگی اغلب در مناطق با دگرسانی شدید اکسیدی (gossan zones) دیده می‌شود [۳۴].

#### فازهای کانیایی

داده‌های XRD این پژوهش، وجود یک سامانه گرمابی چندمرحله‌ای را تأیید می‌کند که در آن کانه کالکوسیت به‌همراه فازهای جانبی چون پیریت، هماتیت، کوارتز و کانی‌های آلومینوسیلیکاتی در شکستگی‌ها و فضاها ثانویه

کالکوپیریت نشانگر ارتباط نزدیک فرآیندهای کانه‌زایی مس با غنی‌سازی طلا است. چنین هم‌نشینی اغلب بازتابی از یک سامانه گرمایی چندمرحله‌ای است که در آن سیال‌های گرمایی دارای مس و گوگرد، طی تشکیل کانی‌های سولفیدی مس، توانسته‌اند طلا را نیز در ساختار یا لبه این کانی‌ها جای دهند. این هم‌نشینی همچنین می‌تواند گویای شرایط فیزیکوشیمیایی ویژه (چون کاهش Eh و تغییر pH سیال) در طول مسیر مهاجرت سیال باشد که موجب رسوب همزمان مس و طلا شده است. از نظر اکتشافی، حضور طلا در هر دو موقعیت (هم در میزبان دولومیتی و هم در کانی‌های سولفیدی مس) نکته‌ای بسیار مهم است. این امر نشان می‌دهد که طلا در قره‌تپه فقط به صورت آزاد یا رگه‌ای وجود ندارد، بلکه در دو جایگاه متفاوت ذخیره شده است: (۱) به صورت پراکنده در میزبان کربناتی و (۲) در ارتباط با سولفیدهای مس. از این رو، ارزیابی اقتصادی کانسار نه تنها باید بر عیار و پراکندگی مس تمرکز داشته باشد، بلکه طلا نیز به عنوان یک عنصر همراه ارزشمند، سهم بسزایی در ارزش نهایی کانسار دارد. از نظر زمین‌ساختی و مدل کانه‌زایی، حضور همزمان مس و طلا در سامانه دولومیتی می‌تواند تأیید کننده این فرض باشد که کانه‌زایی در قره‌تپه در نتیجه مهاجرت و تمرکز سیال‌های گرمایی در ارتباط با رویدادهای زمین‌ساختی منطقه رخ داده است. نقش دولومیت به عنوان سنگ میزبان، به احتمال بسیار افزون بر فراهم‌سازی فضای فیزیکی، در کنترل شیمی سیال و تسهیل رسوب‌گذاری نیز اثر داشته است. این امر می‌تواند الگویی مشابه با کانسارهای رسوبی مس-طلا در سایر نقاط دنیا (چون کانسارهای اروپای شرقی یا آسیای میانه) داشته باشد [۳۶].

#### نوع و مدل زایشی کانه‌زایی

کانه‌زایی مس و طلا در این منطقه از نوع روزادی گرمایی-کربناتی بوده و بیشتر با رگه‌ها و رگچه‌های کربناتی در دولومیت و لایه‌های تبخیری در ارتباط است. سنگ‌های میزبان دولومیت‌های پرمین دارای تخلخل و نفوذپذیری بالا هستند که مسیر مناسبی برای مهاجرت سیال‌های گرمایی فراهم کرده‌اند. کنترل ساختاری نقش مهمی در تمرکز کانه‌ها دارد و گسل‌ها و شکستگی‌های شمال شرقی-جنوب غربی مسیر اصلی جریان سیال‌های معدنی بوده و رگه‌ها بیشتر در تقاطع گسل‌ها و مناطق شکستگی شدید تشکیل شده‌اند [۳۷]. فرآیند کانه‌زایی چندمرحله‌ای است؛ مرحله پیش از کانه‌زایی شامل ته‌نشینی

دولومیت مربوط می‌شوند که از ویژگی‌های معمول کانی‌های کربناتی به شمار می‌آید. همچنین، جذب در طول موج‌های ۷۲۸ و  $1815\text{ cm}^{-1}$  ممکن است به ارتعاش‌های خمشی کربنات یا آثار جزئی ناشی از ناخالصی‌هایی چون کوارتز یا فلدسپار مربوط باشد. نبود قله‌های جذب برای هیدروکسیل ( $3300\text{ cm}^{-1}$ ) در این نمونه‌ها نشان‌دهنده مقدار به نسبت پایین رطوبت ساختاری یا دگرسانی گرمایی در آن‌هاست.

در نمونه‌های دولومیت تیره‌رنگ (شماره‌های ۴، ۶ و ۸)، الگوی طیفی مشابه با نمونه‌های روشن دیده می‌شود، با این حال، وجود یک قله جذب اضافی در طول موج  $1030\text{ cm}^{-1}$  می‌تواند به حضور بیشتر سیلیس یا فازهای سیلیکاتی (چون کلریت یا فلدسپار) در این نمونه‌ها اشاره داشته باشد. این ویژگی با رنگ تیره‌تر نمونه‌ها که به احتمال بسیار ناشی از ناخالصی‌های آلی یا معدنی چون اکسیدهای آهن یا کانی‌های سیلیکاتی است، همخوانی دارد. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که دولومیت‌های تیره‌رنگ نسبت به نمونه‌های روشن، در معرض دگرسانی بیشتری قرار گرفته‌اند.

#### شواهد میکروسکوپ الکترونی از هم‌نشینی طلا و مس در قره‌تپه

بر پایه بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی در کانسار رسوبی مس‌دار قره‌تپه، شواهد ارزشمندی پیرامون شرایط زمین‌ساختی، کانه‌سازی و تمرکز عناصر فلزی در این منطقه به دست آمده است (شکل ۱۱). حضور مقادیر قابل توجهی از طلا در واحدهای سنگ میزبان دولومیتی را می‌توان به چند فرآیند زمین‌شیمیایی و کانه‌زایی نسبت داد. تخلخل و نفوذپذیری بالای دولومیت و سنگ آهک دولومیتی شده (فرآیند دولومیتی‌شدن سنگ‌های آهکی با افزایش تخلخل و حجم فضاهای خالی همراه است) و نقشی که سنگ‌های کربناتی در کاهش قدرت اسیدی دارند، محیط مناسبی را برای ته‌نشینی عناصر کانه‌ساز از سیال‌های گرمایی فراهم می‌آورند. این ویژگی باعث شده است که سیال‌های کانه‌دار حامل طلا بتوانند طی مهاجرت در سامانه‌های شکستگی و تخلخل‌های اولیه و ثانویه دولومیت رسوب‌گذاری کنند. چنین الگویی به‌ویژه در کانسارهای رسوبی (چون کانسار برون‌دمی-رسوبی، SEDEX) و برخی کانسارهای فراگرمایی نیز دیده شده است [۳۵]، که در آن‌ها دولومیت نقش کلیدی در تمرکز فلزهای گرانبها دارد.

افزون بر این، شناسایی طلا در اندازه تقریبی ۴ تا ۸ میکرون (شکل ۱۱) درون رگه‌های کانه‌دار کالکوسیت و

پیریت پراکنده و رگه‌های کلسیتی و کوارتزی است، مرحله اصلی شامل جایگزینی کانی‌های میزبان با کالکوپیریت و کالکوسیت همراه با سولفیدهای مس- آهن و مرحله پس از کانه‌زایی شامل برونزایی و دگرسانی سولفیدها به کوولیت، مالاکیت، آزوریت و همتایت است. کانه‌ها بیشتر به صورت رگه‌ای-رگچه‌ای هستند و کانی‌های اصلی کالکوسیت و کالکوپیریت و کانی‌های ثانویه مالاکیت و آزوریت همراه با طلای پراکنده در سولفیدها را شامل می‌شوند. به طور کلی، منطقه یک سامانه گرمایی چندمرحله‌ای کربناتی-گسلی است که مهاجرت و تمرکز سیال‌های معدنی از طریق ساختارها و کارست دولومیت‌ها، مدل زایشی کانه‌زایی را کنترل کرده و ذخایر مس و طلا بیشتر در راستای رگه‌ها و رگچه‌های کربناتی متمرکز شده‌اند.

#### برداشت

بررسی‌های زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی در منطقه معدنی قره‌تپه نشان می‌دهد که سنگ میزبان اصلی کانه‌زایی مس و طلا، دولومیت‌های سازند روته با سن پرمین است که با رخساره‌های آلی و شرایط تبخیری همراه است. حضور استروماتولیت‌ها و ساختارهای آنکولیتی در این واحدها، افزون بر شواهد دیرینه‌شناسی، بیانگر محیط نهشت کم‌عمق، قلیایی و غنی از مواد آلی بوده که بستر مناسبی برای تمرکز سیال‌های گرمایی ایجاد کرده است. بر پایه شواهد ساختاری، گسل‌ها، شکستگی‌ها و حفره‌های کارستی نقش اصلی را در تمرکز و انتقال سیال‌های کانه‌دار داشته‌اند. کانه‌زایی مس به صورت رگه‌ای، رگچه‌ای و پرشدگی حفره‌ها با حضور کانی‌هایی چون کالکوسیت، کوولیت، پیریت و کالکوپیریت دیده می‌شود. فرایندهای اکسایش سطحی نیز منجر به تشکیل کانی‌های ثانویه‌ای همچون مالاکیت، آزوریت و گوتیت شده‌اند. توالی همبری ذخیره، یک سامانه چندمرحله‌ای شامل پیش از کانه-زایی تا پس از کانه‌زایی را نشان می‌دهد، به طوری که کانه‌زایی اصلی با کالکوپیریت و سپس کالکوسیت آغاز شده و در پایان با جایگزینی و دگرسانی سولفیدها به فازهای ثانویه اکسیدی و کربناتی پایان یافته است. نتایج به دست آمده از XRD و طیف-سنجی FTIR نشان می‌دهد که کانه‌زایی در منطقه قره‌تپه ماهیتی چندمرحله‌ای و روزادی در سنگ‌های کربناتی دارد. حضور فازهای اصلی چون کالکوسیت و دولومیت، همراه با کانی‌های فرعی (پیریت، همتایت، کوارتز و آلومینوسیلیکات‌ها)

بیانگر اثر چند مرحله سیال گرمایی با ترکیب‌های متفاوت بر واحد میزبان است. از سوی دیگر، داده‌های طیف‌سنجی FTIR افزون بر تأیید ترکیب سولفیدی کالکوسیت و کربناتی دولومیت، شواهدی از اکسایش، دگرسانی گرمایی و نقش مواد سیلیکاتی و آلی در تغییرهای بافتی ارائه می‌دهد. تفاوت طیفی میان دولومیت‌های روشن و تیره نشان‌دهنده شدت متفاوت دگرسانی در آن‌هاست و اهمیت دولومیت‌ها را به عنوان میزبان اصلی کانه‌زایی مس و طلا در این منطقه برجسته می‌سازد. از یافته‌های مهم این پژوهش، هم‌نشینی طلا با مس در دو موقعیت متفاوت است: (۱) پراکندگی درون سنگ میزبان دولومیتی و (۲) همراهی با کانی‌های سولفیدی مس. این ویژگی نشان‌دهنده نقش دولومیت هم به عنوان میزبان فیزیکی (تخلخل‌ها و شکستگی‌ها) و هم به عنوان کنترل‌کننده شیمیایی سیال است. چنین الگویی با مدل‌های کانه‌زایی روزادی کربناتی و سامانه‌های رسوبی (SEDEX) همخوانی دارد. در مجموع، قره‌تپه یک سامانه کانه‌زایی چندمرحله‌ای و چندعاملی است که در آن سنگ شناسی کربناتی دولومیتی، کنترل‌های ساختاری (گسل‌ها و شکستگی‌ها)، سیال‌های گرمایی و شرایط اکسایش-کاهش و حضور واحد نفوذی سیل میکرودیوریتی به عنوان منبع احتمالی فلز همه در تمرکز و شکل‌گیری کانه‌زایی مس و طلا نقش داشته‌اند. این یافته‌ها اهمیت اکتشافی منطقه را افزایش داده و نشان می‌دهد که افزون بر ذخایر مس، طلا نیز می‌تواند به عنوان یک عنصر همراه ارزشمند در نظر گرفته شود.

#### قدردانی

به این وسیله مراتب قدردانی خود را از مدیریت محترم معدن مس قره‌تپه و همچنین آقایان عسگری‌زاده و خوشبین برای همکاری‌های ارزشمندشان در فراهم‌آوری زمینه‌های میدانی و دسترسی به اطلاعات و نمونه‌های معدنی اعلام می‌داریم. همچنین از مدیریت تحصیلات تکمیلی دانشگاه تبریز برای حمایت‌های علمی و تسهیل شرایط پژوهشی تقدیر و تشکر می‌کنیم.

#### مراجع

[1] Hitzman M.W., Selley D., Bull S., "Formation of sedimentary rock-hosted stratiform copper deposits through Earth history", *Economic Geology* 105 (2010) 627-639. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.627>

- [11] Aminazar R., Abbasi S., "1:100000 geological sheet of Maku", Geological Survey of Iran (2003).
- [12] Ramezani J., Tucker R.D., "The Saghand Region, Central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics", *American Journal of Science* 303 (2003) 622–665. <https://doi.org/10.2475/ajs.303.7.622>
- [13] Berberian M., King G.C.P., "Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran", *Canadian Journal of Earth Sciences* 18 (1981) 210–265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>
- [14] Stocklin J., "Structural History and Tectonic of Iran: A Review", *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52 (1968) 1229–1258.
- [15] Stocklin J., Nabavi M.H., "Tectonic Map of Iran 1:2,500,000", Geological Survey of Iran; 1973.
- [16] Shafaii Moghadam H., Corfu F., Stern R.J., Lotfi Bakhsh A., "The Eastern Khoy metamorphic complex of NW Iran: a Jurassic ophiolite or continuation of the Sanandaj–Sirjan Zone?", *Journal of the Geological Society* 176 (2019) 517–529. doi:10.1144/jgs2018-081.
- [17] Ghasemi Siani M., Lentz D.R., Nazarian M., "Geochemistry of igneous rocks associated with mineral deposits in the Tarom-Hashtjin metallogenic province, NW Iran: An analysis of the controls on epithermal and related porphyry-style mineralization", *Ore Geology Reviews* 126 (2020) 103753. doi:10.1016/j.oregeorev.2020.103753.
- [18] Alavi M., "Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: New data and interpretations", *Tectonophysics* 229 (1994) 211–238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2)
- [19] Rajabpour S., Abedini A., Alipour S., Lehmann B., Jiang S.-Y., "Geology and geochemistry of the sediment-hosted Cheshmeh-Konan redbed-type copper deposit, NW Iran", *Ore Geology Reviews* 86 (2017) 154–171. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.02.013>
- [20] Klein C., Hurlbut J., "Manual of Mineralogy", John Wiley and Sons, New York (1993) 596.
- [21] Cullity B.D., "Elements of X-ray Diffraction", Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (1956).
- [22] Rietveld H.M., "A profile refinement method for nuclear and magnetic structures", *Journal of Applied Crystallography* 2 (1969) 65–71. <https://doi.org/10.1107/S0021889869006558>
- [23] Scherrer P., "Bestimmung der inneren Struktur und der Größe von Kolloidteilchen mittels
- [2] Sillitoe R.H., "Copper provinces", in: Hedenquist J.W., Harris M., Camus F. (Eds.), *Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world: a tribute to Richard H. Sillitoe*, SEG Special Publication 16 (2012) 1–18.
- [3] Large R., Bull S., McGoldrick P., Walters S., Derrick G.M., Carr G.R., "Stratiform and stratabound Zn-Pb-Ag deposits in Proterozoic sedimentary basins, Northern Australia", *Economic Geology* 100 (2005). <https://hdl.handle.net/102.100.100/494032>
- [4] Soliman M.F., El Goresy A., "Framboidal and idiomorphic pyrite in the upper Maastrichtian sedimentary rocks at Gabal Oweina, Nile Valley, Egypt: Formation processes, oxidation products and genetic implications to the origin of framboidal pyrite", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 90 (2012) 195–220. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.05.004>
- [5] Borg G., "It's all about timing – the origin of the European Kupferschiefer ores", *World of Mining – Surface and Underground* 69 (2017) 24–30.
- [6] Cabral A.R., Beaudoin G., Taylor B.E., "The Transfiguration continental red-bed Cu–Pb–Zn–Ag deposit, Quebec Appalachians, Canada", *Mineralium Deposita* 44 (2009) 285–301. <https://doi.org/10.1007/s00126-008-0217-z>
- [7] Cox D.P., Lindsey D.A., Singer D.A., Moring B.C., Diggles M.F., "Sediment-hosted copper deposits of the world: Deposit models and database", U.S. Geological Survey Open-File Report 2003-107 (2003). <https://doi.org/10.3133/ofr2003107>
- [8] Brown A.C., "Low-temperature sediment-hosted copper deposits", in: Holland H.D., Turekian K.K. (Eds.), *Treatise on Geochemistry*, 2nd ed., Vol. 13, Elsevier (2014) 251–271. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01110-4>
- [9] Maghfouri S., Rastad E., Borg G., Hosseinzadeh M.R., Movahednia M., Mahdavi A., Mousivand F., "Metallogeny and temporal–spatial distribution of sediment-hosted stratabound copper (SSC-type) deposits in Iran; implications for future exploration", *Ore Geology Reviews* 127 (2020) 103834. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103834>
- [10] Dare F., "The Study of Geology, Mineralogy and Geochemistry of Ghareh-Tappeh Copper Index (Maku- West Azerbaijan)", Unpublished M.Sc. Thesis, University of Tabriz, Iran (2015) 122 pp. (in Persian with English abstract).

- [32] Seedorff E., Dilles J.H., Proffett J.M. Jr., Einaudi M.T., Zurcher L., Stavast W.J.A., Johnson D.A., Barton M.D., "Porphyry related deposits: Characteristics and origin of hypogene features", in: Hedenquist J.W., Thompson J.F.H., Goldfarb R.J., Richards J.P. (Eds.), *Economic Geology: 100th Anniversary Volume*, Littleton, Colorado (2005) 251–298. <https://doi.org/10.5382/AV100.10>
- [33] Titley S.R., Beane R.E., "The porphyry copper deposit at Bingham, Utah: geologic and geochemical studies", *Economic Geology* 76 (1981) 857–891.
- [34] Sillitoe R.H., "Supergene enrichment and gossan zones in porphyry copper deposits", in: Hedenquist J.W., Thompson J.F.H., Goldfarb R.J., Richards J.P. (Eds.), *Economic Geology: 100th Anniversary Volume* (2005) 811–844.
- [35] Hosseinzadeh M., Asadi A., Simmonds V., Leybourne M., Moayyed M., Vahed Y., "The Jalilabad copper deposit in the Tarom-Hashjin magmatic belt, NW Iran: Epithermal or porphyry deposit? Evidence from geology, alteration, geochemistry, fluid inclusions, and stable isotope studies", *Acta Geochimica* (2025). <https://doi.org/10.1007/s11631-025-00806-6>
- [36] Tunc A., She Z., Zhu Y., Cao K., Deevsalar R., Feng Y., Pan Y., "Nature and origin of dolomite-hosted Th-U-HREE mineralization in the Tethyan Metallogenic Belt, Biga Peninsula, Northwestern Türkiye", *Ore Geology Reviews* 182 (2025) 106671. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106671>.
- [37] Codeço M.S., Weis P., Andersen C., "Numerical modeling of structurally controlled ore formation in magmatic-hydrothermal systems", *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 23 (2022) e2021GC010302. doi:10.1029/2021GC010302.
- Röntgenstrahlen", in: *Kolloidchemie: Ein Lehrbuch. Chemische Technologie in Einzeldarstellungen*, Springer, Berlin, Heidelberg (1912). [https://doi.org/10.1007/978-3-662-33915-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-33915-2_7)
- [24] Harris D.C., "Quantitative Chemical Analysis", 8th ed., W.H. Freeman (2010).
- [25] Smith B.C., "Infrared Spectral Interpretation: A Systematic Approach", 1st ed., CRC Press (1999). <https://doi.org/10.1201/9780203750841>
- [26] Whitney D.L., Evans B.W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", *Am Mineral.* (2010);95(1):185–187. doi: 10.2138/am.2010.3371
- [27] Gruszecka-Kosowska A., Wdowin M., Kosowski T., Klimek A., "An analysis of the chemistry, mineralogy and texture of waste dolomite powder used to identify its potential application in industry", *Geology, Geophysics and Environment* 41 (2016) 343–356. <https://doi.org/10.7494/geol.2015.41.4.343>
- [28] Roshanfar M., Farahani Z., Khanlarian M., et al., "Phytoextraction of copper from copper waste rock by *Tagetes sp*", *Environ Sci Pollut Res.* (2024);31:1026–1032. doi: 10.1007/s11356-023-31199-9
- [29] Yu K., Qiu L., Cao Y., Sun P., Qu C., Yang Y., "Hydrothermal origin of early Permian saddle dolomites in the Junggar Basin, NW China", *Journal of Asian Earth Sciences* 184 (2019) 103990. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.103990>.
- [30] Guilbert J.M., Park C.F., "The Geology of Ore Deposits", W.H. Freeman and Company, New York (1986).
- [31] Loeblich A.R., Tappan H., "Foraminiferal Genera and Their Classification", 1st ed., Springer, New York (1988). <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-5760-3>