

زمین‌شناسی، کانه‌زایی، زمین‌شیمی و ژنز کانسار پلی‌متال کچ‌کلاه، شرق زنجان

زهرا طولابی‌فر^۱، قاسم نباتیان^{۲*}، مریم هنرمند^۳، مریم افشاری^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲. دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۳. استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

۴. دبیر زمین‌شناسی آموزش و پرورش، زنجان، ایران

* نویسنده مسئول: E-mail: gh.nabatian@znu.ac.ir

چکیده

کانسار پلی‌متال کچ‌کلاه در شرق زنجان و در زیر پهنه طارم و نوار فلززایی طارم- هشتجین واقع شده است. این کانسار در داخل توده نفوذی طارم تشکیل شده است. ترکیب توده نفوذی طارم در محدوده مورد مطالعه کوارتز-مونزونیت تا کوارتز-مونزویدوریت بوده و کانی‌های اصلی آن شامل پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار، کوارتز و کلینوپروکسن هستند. ماهیت زمین‌شیمیایی توده طارم کالک‌آلکان پتاسیم بالا تا شوشونیتی و مرتبط با خاستگاه تکتونیکی فرورانش است. کانه‌زایی منگنز، مس، سرب و روی و باریت در کانسار کچ‌کلاه به صورت رگه- رگچه‌ای و عدسی شکل در داخل توده طارم روی داده است. کانی‌های اصلی ماده معدنی در این کانسار شامل گالن، اسفالریت، کالکوپیریت، پیریت، آرسنوپیریت، پسیلوملان، پیرولولزیت، منگنیت، کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت و گوتیت هستند. کانی‌های باطله نیز شامل کلسیت، باریت و کوارتز می‌باشند. بافت‌های قابل مشاهده در این کانسار شامل توده‌ای، سوزنی، رگه- رگچه‌ای، شانه‌ای و گل‌کلمی و در مقیاس میکروسکوپی شامل بافت‌های جانشینی، رگه-رگچه‌ای، گل‌کلمی، توده‌ای، بازماندی و پرکننده فضای خالی می‌باشند. فاز اول و اصلی کانه‌زایی در این منطقه، کانه‌زایی سولفیدی است که توسط فاز بعدی، کانه‌زایی اکسیدی، قطع شده است. فاز اکسیدی در این کانسار شامل دو زیرمرحله کوارتز- باریت و کوارتز منگنز است. در مرحله آخر رگه- رگچه‌های کوارتز و کلسیت فازهای کانه‌زایی قبلی را قطع و برشی کرده‌اند. الگوی عناصر نادر و نادر خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت در نمونه‌های کانه‌دار و توده نفوذی، مشابه هم است. این امر بیانگر نقش توده نفوذی در تشکیل دگرسانی‌ها و سیالات کانه‌ساز در این کانسار است. کانسار پلی‌متال کچ‌کلاه با توجه به ویژگی‌های صحرایی، میکروسکوپی و زمین‌شیمیایی، بیشترین شباهت را با کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون حدواسط دارد.

کلید واژه‌ها: پلی‌متال، اپی‌ترمال، کوارتز-مونزونیت، کالک‌آلکان پتاسیم بالا، کچ‌کلاه، طارم- هشتجین

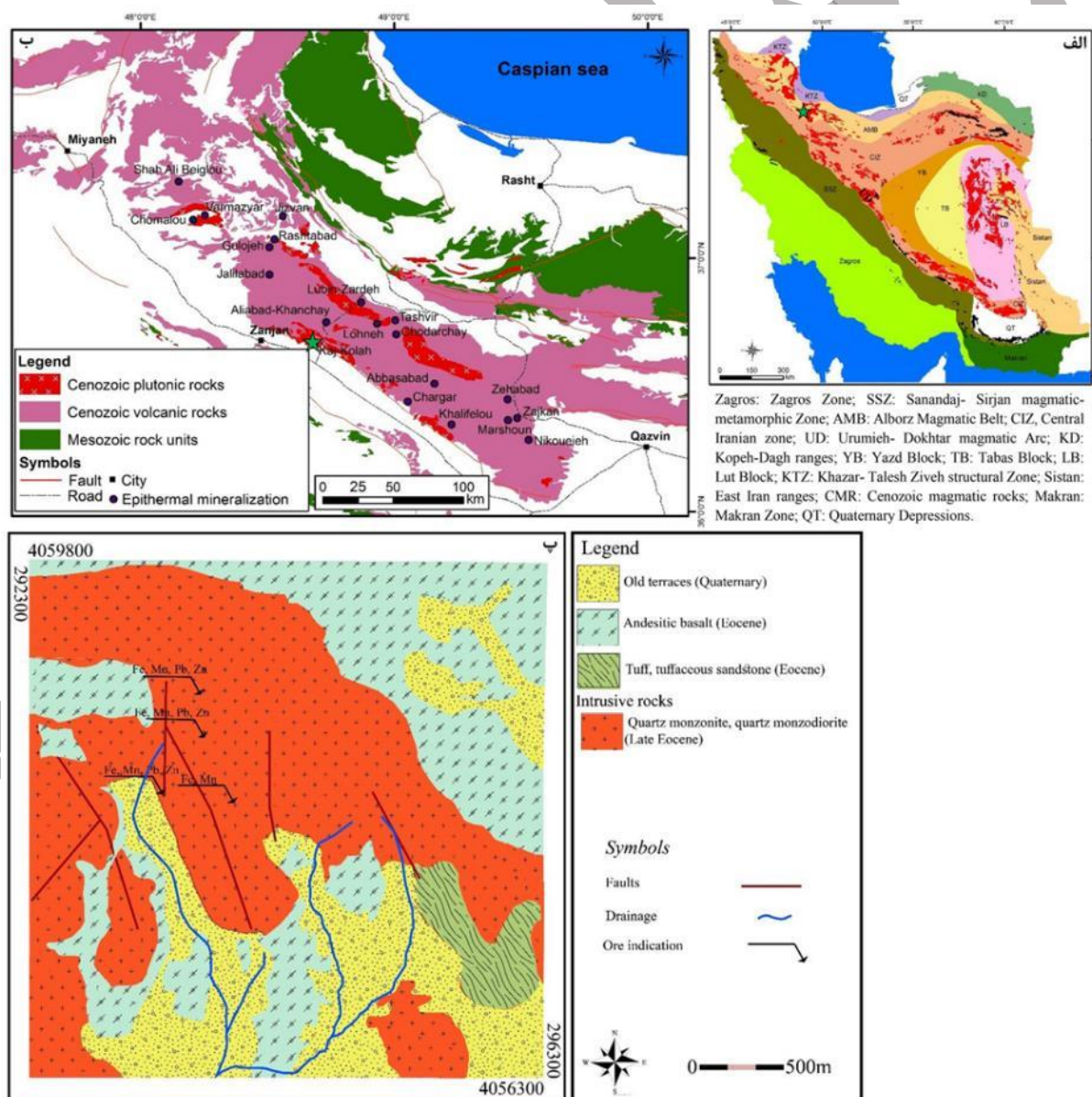
۱- مقدمه

محدوده معدنی کچ‌کلاه در ۲۰ کیلومتری شرقی استان زنجان قرار گرفته و بخشی از نقشه ۱:۱۰۰,۰۰۰ زمین‌شناسی طارم [۱] (شکل ۱) را شامل می‌شود. از نظر تقسیمات زمین‌شناسی- ساختمانی ایران، منطقه مورد مطالعه در پهنه ماگمایی البرزغربی- آذربایجان [۲] و در نوار فلززایی طارم- هشتجین قرار گرفته است. کمربند فلزایی طارم- هشتجین عمدتاً متشکل از واحدهای واحدهای مربوط به سازند کرج است که یکسری توده‌های نفوذی با سن ائوسن پایانی در داخل سازند کرج نفوذ کرده‌اند: [۳، ۴، ۵]. از دیدگاه متالوژنی، این کمربند میزبان کانه‌زایی‌های مهمی از جمله آهن، طلا، مس، سرب و روی است که کانسارهای متعددی مانند سرخه دیزج، مروارید، ذاکر، کردکند، ماری، لهنه، دهنه، گلجیک و ... در آن تشکیل شده‌اند [۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸]. علی‌رغم عملیات اکتشافی انجام شده در منطقه کچ‌کلاه، مطالعات دقیق علمی و پژوهشی در این منطقه صورت نگرفته است. بر همین اساس، مطالعه کانه‌زایی سرب- روی و منگنز کچ‌کلاه برای پژوهش حاضر انتخاب گردید تا به وسیله‌ی مطالعه ویژگی‌های زمین‌شناسی، زمین‌شیمی و خاستگاه این کانسار، عوامل کلیدی توزیع مکانی و زمانی اکتشاف کانه‌زایی‌های مشابه در این ناحیه

را مشخص کرد. این مطالعه اولین گزارش تهیه شده از کانه‌زایی سرب و روی و منگنز در این بخش از استان زنجان می‌باشد که اطلاعات حاصل از این پژوهش می‌تواند در اکتشاف کانسارهای مشابه در پهنه البرز غربی- آذربایجان مفید واقع شود.

۲- روش مطالعه

در طی بازدیدهای صحرایی به منظور بررسی کلی محدوده معدنی و پیدا کردن شناخت کافی نسبت به سنگ‌ها، واحدهای زمین‌شناسی و ماده معدنی و ارتباط آنها با یکدیگر، همین‌طور نمونه‌برداری هدف‌دار از سنگ میزبان و توده‌های نفوذی و نمونه‌های کانه‌دار صورت گرفت. در مرحله آزمایشگاهی، ۱۲ عدد مقطع نازک و ۲۳ عدد مقطع نازک- صیقلی برای مطالعات سنگ‌شناسی، دگرسانی، کانه‌نگاری و ساخت و بافت ماده معدنی تهیه گردید. سپس جهت انجام مطالعات زمین‌شیمیایی، تعداد ۵ نمونه از توده نفوذی (در شرکت زرآزما) و ۵ عدد نمونه ماده معدنی (در شرکت کانسارهای بینالود) مورد آنالیزهای XRF (اکسید عناصر اصلی) و ICP-MS (عناصر کمیاب و نادر خاکی) قرار گرفتند. در مرحله بعد، به بررسی نتایج حاصل از تجزیه‌های شیمیایی و تلفیق آنها با نتایج حاصل از مطالعات صحرایی و میکروسکوپی پرداخته شد.



شده است. ب) نقشه زمین‌شناسی ساده شده از کمربند فلزایی طارم- هشتجین که کانسارهای مهم اپی‌ترمال همچنین کانسار کچ‌کلاه

(علامت ستاره سبز رنگ) بر روی آن مشخص شده است با تغییرات جزئی از [۱۱]. نقشه زمین‌شناسی تهیه شده از منطقه مورد مطالعه با مقیاس ۱:۵۰۰۰.

۳- زمین‌شناسی

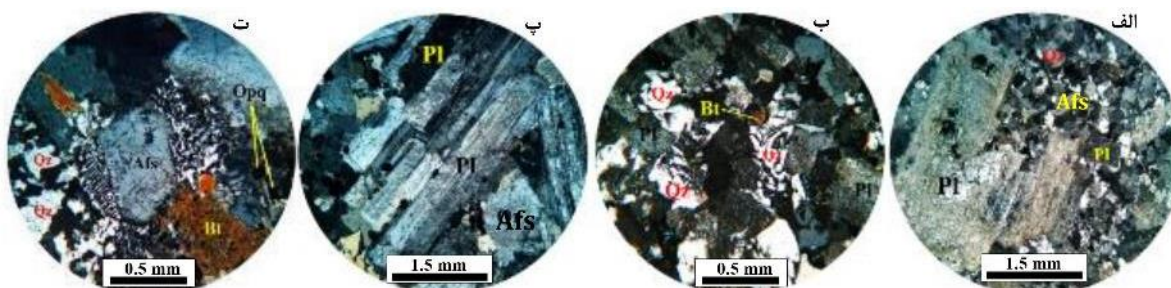
بر اساس نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ طارم [۱۱]، روند عمومی ساختارهای زمین‌شناسی، همسان با دیگر مناطق البرز غربی NW-SE است. پی‌سنگ قدیمی این ناحیه، مجموعه سنگ‌های دگرگونی واحد $P \in^{mt}$ است که احتمالاً به زمان پرکامبرین تعلق دارد. رسوبات کم ضخامت و پراکنده ای از پالئوزوئیک و مزوزوئیک در بخش‌های شمال‌شرقی و جنوب‌غربی ورقه رخنمون دارد. در بین آن‌ها، نهشته‌های سنوزوئیک و به ویژه ائوسن از اهمیت شایانی برخوردار هستند. در زمان ائوسن، بر اثر فازهای کششی حجم زیادی از گدازه‌های آتشفشانی و مواد آذرآواری به همراه نهشته‌های رسوبی تشکیل یافته است. ردیف ائوسن به صورت پیش رونده با کنگلومرای قاعده‌ای سازند فجن بر روی رسوبات مزوزوئیک و یا قدیمی‌تر نشسته است. ضخامت این واحدها که در این منطقه تحت عنوان سازند کرج از آن‌ها یاد می‌شود، به بیش از ۳۰۰ متر می‌رسد. براساس نقشه زمین‌شناسی تهیه شده از منطقه کج‌کلاه (شکل ۱ ب)، واحدهای سنگی رخنمون یافته در این منطقه شامل واحدهای ائوسن (توف‌های ماسه‌سنگی، توف، بازالت-های آندزیتی) و کواترنری هستند که توده نفوذی طارم با ترکیب عمدتاً کوارتزموزنونیت تا کوارتزموزنودیوریت با سن ائوسن پایانی [۳]، به داخل توالی آتشفشانی-رسوبی سازند کرج نفوذ کرده است. قابل ذکر است که کانه‌زایی منگنز، سرب-روی و باریت در داخل واحد های کوارتزموزنونیتی تا کوارتزموزنودیوریتی رخ داده است. با توجه به بازدیدهای صحرایی صورت گرفته از منطقه مورد مطالعه، واحدهای موجود در محدوده شامل واحدهای توف، توف‌های ماسه‌سنگی و بازالت‌های آندزیتی هستند که میزبان توده نفوذی طارم می‌باشند (شکل ۲).



شکل ۲ الف) رخنمون صحرایی از کنتاکت بین توده نفوذی و واحدهای آندزیتی ائوسن (دید به سمت جنوب‌غرب). ب) نمای نزدیک از رخنمون توده نفوذی کوارتزموزنونیت-کوارتزموزنودیوریتی در منطقه مورد مطالعه (دید به سمت شمال).

۴- سنگ‌نگاری

در مقیاس نمونه دستی، نمونه‌های توده نفوذی طارم به صورت متوسط بلور تا درشت بلور و به رنگ خاکستری مایل به صورتی هستند. براساس مطالعات میکروسکوپی، نمونه‌های توده (سنگ میزبان کانه‌زایی) دارای بافت گرانولار ناهمسان دانه و میکروگرافیکی بوده و متشکل از کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز (۳۰-۴۰ درصد)، کوارتز (۱۰-۱۵ درصد)، کلینوپیروکسن (۱۵-۱۰ درصد)، آلکالی‌فلدسپار (۲۵-۳۰ درصد) و بیوتیت (۳-۱۰ درصد) می‌باشند. کانی‌های فرعی این گروه از سنگ‌ها شامل کانی‌های اپک، آپاتیت و زیرکن هستند. همین‌طور کانی‌های اپیدوت، کلریت، آمفیبول رسته‌ای، سریسیست، کلسیت، اسفن و کانی‌های رسی به عنوان کانی‌های ثانویه در این سنگ‌ها حضور دارند. پلاژیوکلاز درشت‌بلور اصلی (حداکثر تا ۵ میلی‌متر) موجود در این سنگ‌ها است که عمدتاً متحمل دگرسانی سریسیستی شده است. کلینوپیروکسن کانی اصلی فرومنیزین موجود در این سنگ‌ها و با درجات مختلفی به کلسیت و کلریت دگرسان شده‌اند. کلینوپیروکسن در برخی موارد به صورت ادخال در داخل بلورهای پلاژیوکلاز حضور دارد. کانی‌های آلکالی‌فلدسپار نیز به صورت بلورهای درشت‌شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار در این سنگ‌ها وجود دارند که عمدتاً به کانی‌های رسی دگرسان شده‌اند. همین‌طور بلورهای بیوتیت در ابعاد حدود ۱ میلی‌متر که به کلریت دگرسان شده‌اند، نیز در این سنگ‌ها حضور دارند. تصاویر میکروسکوپی توده‌های نفوذی منطقه کج‌کلاه در شکل ۳ ارائه شده است.



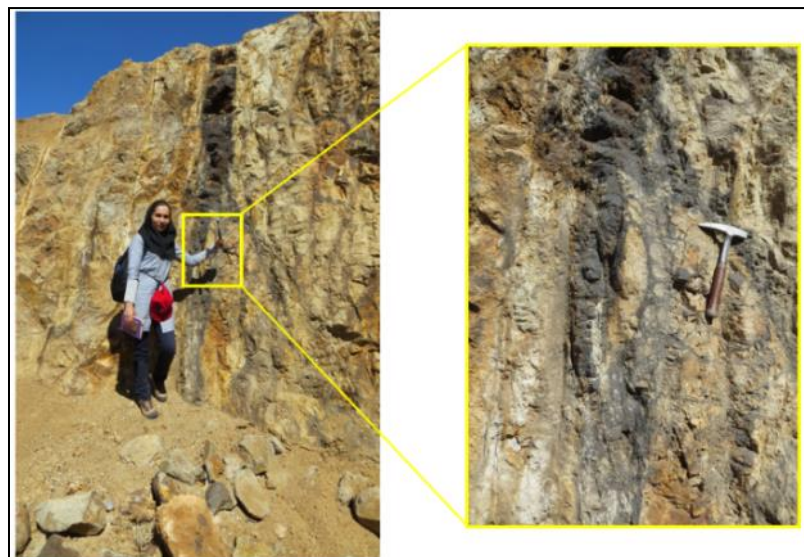
شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از کانی‌ها و بافت‌های موجود در واحدهای کوارتز مونزونیتی و کوارتز مونزودیوریتی در نور عبوری پلاریزه متقاطع (XPL). الف) بافت گرانولار ناهم‌سان دانه، درشت بلور پلاژیوکلاز (Pl) در کنار بلورهای متوسط کوارتز (Qz) و آلکالی فلدسپار (Afs) در توده کوارتز مونزونیتی. ب) بافت میکروگرافیکی در توده کوارتز مونزونیتی. پ) درشت بلورهای پلاژیوکلاز (Pl) و آلکالی فلدسپار (Afs) در توده کوارتز مونزودیوریتی که تشکیل بافت گرانولار ناهم‌سانه داده‌اند. ت- درشت بلورهای کوارتز (Qz)، آلکالی فلدسپار (Afs) و بیوتیت (Bt) به همراه بافت میکروگرافیکی در توده کوارتز مونزودیوریتی. علائم اختصاری برگرفته‌شده از [۱۲] است.

۵- کانه‌زایی

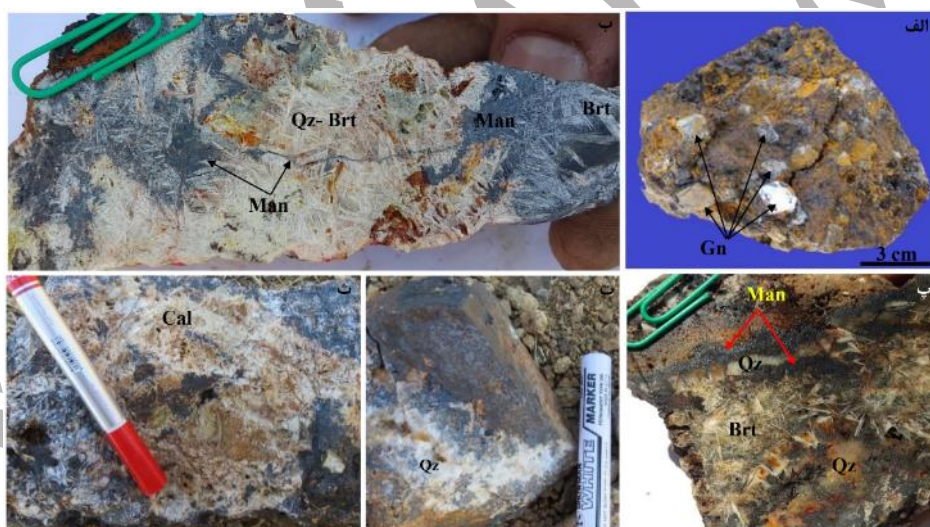
کانه‌زایی منگنز، مس، سرب، روی و باریت در کانسار کچ کلاه به صورت رگه- رگچه‌ای و عدسی شکل در داخل توده نفوذی طارم روی داده است. طول رخنمون رگه‌ها ۱۰۰ متر و عرض رخنمون رگه‌ها کمتر از ۲ متر می‌باشد (شکل ۴). این رگه‌ها عمدتاً با راستای شرقی- غربی و شمال شرقی- جنوب غربی در منطقه قابل مشاهده هستند که در راستای گسل‌های کششی با امتداد NNE-WSW تشکیل شده‌اند (شکل ۴). قابل ذکر است که یکسری گسل‌های معکوس، امتدادلغز دیگری در منطقه تشکیل شده‌اند که بعد از تشکیل کانه‌زایی در منطقه بوده و رگه‌های کانه‌زایی را قطع کرده‌اند. بافت‌هایی که در مقیاس نمونه دستی در این کانسار مشاهده می‌شود عمدتاً توده‌ای، رگه- رگچه‌ای، برشی، سوزنی شکل، شانه‌ای و گل کلمی هستند (شکل ۵). اما در مقیاس میکروسکوپی بافت‌های جانشینی، رگه- رگچه‌ای، گل کلمی، توده‌ای، بازماندی و پرکننده فضای خالی مهمترین بافت‌های تشکیل شده در این کانسار به‌شمار می‌آیند. در این کانسار، بلورهای درشت و شکل‌دار گالن را می‌توان دید که تحت تأثیر دگرسانی و هوازدگی قرار گرفته‌اند و سطح آنها اکسیده شده است. ابعاد بلورهای گالن در حدود ۱/۵ تا ۲ سانتی‌متر می‌باشد. طی مطالعات صحرایی و میکروسکوپی انجام شده مشخص شد که حجم اصلی کانه‌زایی در این منطقه شامل فازهای سولفیدی و اکسیدی است که فاز سولفیدی در طی مرحله اول کانه‌زایی در این کانسار تشکیل شده و فاز اکسیدی بعد از فاز سولفیدی روی داده است (شکل ۵). در طی فاز اکسیدی کانه‌زایی، رگه- رگچه‌های کوارتز- باریت ابتدا تشکیل شده و بعد از آن کانه‌زایی منگنز به صورت رگه- رگچه‌ای در این کانسار روی داده است (شکل ۵ ب، پ). قابل ذکر است که در مراحل پایانی کانه‌زایی، رگه- رگچه‌های کوارتز بی‌بار و کلسیت نیز تشکیل شده و کل فازهای کانه‌زایی قبلی را قطع کرده است (شکل ۵ ت، ث).

۶- کانه‌نگاری

کانه‌های اصلی موجود در این منطقه شامل گالن، اسفالریت، کالکوپیریت، پیریت، آرسنوپیریت، پسیلوملان، پیرولولزیت، منگنیت، کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت و گوتیت هستند (شکل‌های ۶ و ۷). کانه‌های باطله نیز شامل کلسیت، باریت و کوارتز می‌باشند. گالن، اسفالریت، پیریت، کالکوپیریت و آرسنوپیریت کانی‌های سولفیدی تشکیل شده در این کانسار هستند که در میان آنها، گالن مهمترین کانی سولفیدی موجود در کانسار کچ کلاه است و همراه آن نیز به مقدار کم کانی اسفالریت تشکیل شده است. کانی گالن عمدتاً دارای بافت دانه پراکنده و جانشینی است که توسط سروزیت جانشین شده است (شکل ۶ الف، ب). این کانی در قسمت‌هایی به صورت ادخال در داخل سایر کانی‌ها نظیر کانی اسفالریت وجود دارد. همانطور که در شکل (۶ پ، ت) مشاهده می‌شود، کانی اسفالریت یکی دیگر از کانی‌های سولفیدی در این کانسار است که همراه سایر کانی‌های سولفیدی از جمله پیریت، گالن، آرسنوپیریت و کالکوپیریت تشکیل شده است. قابل ذکر است که اسفالریت عمدتاً دارای بافت رگچه‌ای است و در برخی بخش‌ها بلورهای آن، ادخال‌هایی از کانی‌های گالن، پیریت و آرسنوپیریت را دارد (شکل ۶ ت).

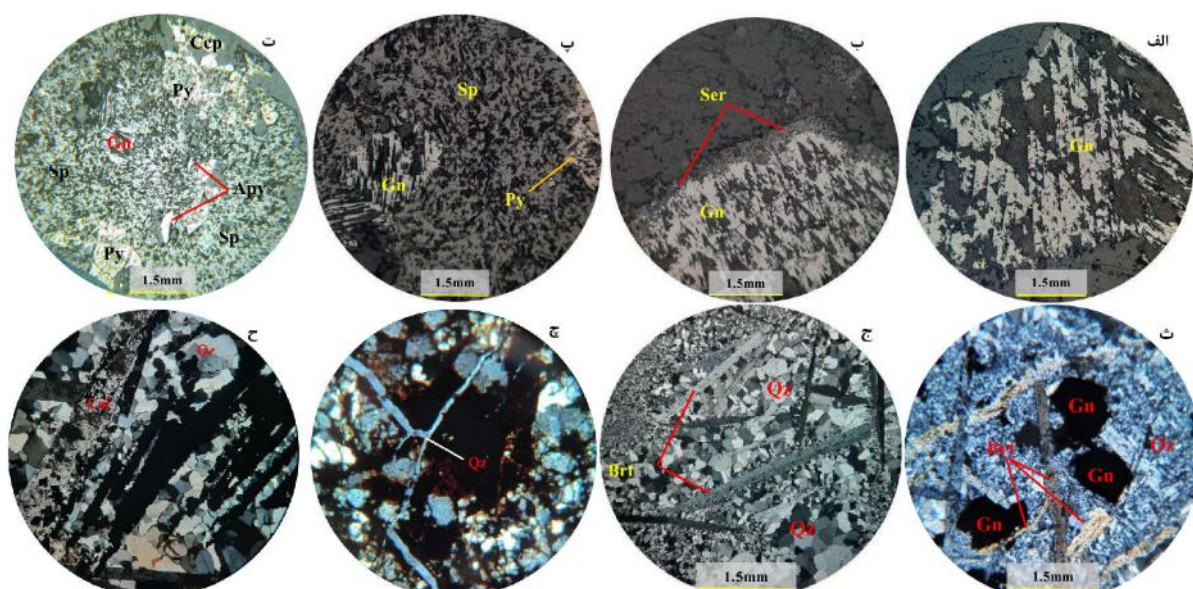


شکل ۴ تصویری از رگه‌های کان‌زایی موجود در منطقه کج کلاه که در راستای شمال شرقی - جنوب غربی است.



شکل ۵ تصویری از نمونه‌های دستی کان‌زایی در کان‌سار منگنز، مس، سرب و روی و باریت کج کلاه. الف) بلور شکل‌دار گالن (Gn) که تحت تاثیر دگرسانی و هوازدگی سطوح آنها اکسیده شده است. ب) رگچه‌های منگنز (Man) که رگچه کوارتزی (Qz) و باریتی (Brt) را قطع کرده است. پ) بلورهای سوزنی شکل باریت (Brt) در همراهی با بلورهای کوارتز (Qz) که رگچه‌های منگنز آنها را قطع کرده است. ت) رگه کوارتزی (Qz) بی‌بار که در مراحل پایانی کان‌زایی، فازهای اولیه کان‌زایی را قطع کرده است. ث) رگه کلسیتی (Cal) که فازهای قبلی کان‌زایی را قطع کرده است. علائم اختصاری برگرفته‌شده از [۱۲] است.

پیریت به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار به صورت دانه پراکنده همراه با سایر کانی‌های سولفیدی از جمله کالکوپیریت، گالن، آرسنوپیریت و اسفالریت تشکیل شده است (شکل ۶ پ، ت). فراوانی پیریت در این کان‌سنگ نسبتاً کم بوده و در برخی نقاط ۱۰٪ کان‌سنگ را به خود اختصاص می‌دهد. قابل ذکر است که کانی آرسنوپیریت نیز به صورت بلورهای خودشکل در این کان‌سار همراه با سایر کانی‌های سولفیدی تشکیل شده است. مقادیر این کانی در منطقه مورد مطالعه نسبت به کانی پیریت کمتر است. شواهد میکروسکوپی بیانگر این است که کالکوپیریت به مقدار خیلی کم و به صورت بلورهای نیمه شکل‌دار تا بی شکل با بافت رگچه‌ای در این بلورهای کان‌سنگ حضور دارد. این کانی در برخی بخش‌ها و در اثر فرایندهای هوازدگی و سوپرژن، توسط کانی‌های ثانویه از جمله ملاکیت و گوتیت جانشین شده است. همچنین کانی پیریت تشکیل شده در طی کان‌زایی سولفیدی، در اثر فرایندهای سوپرژن و هوازدگی به گوتیت تبدیل شده است.



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی از کانی‌های سولفیدی و باریت در منطقه مورد مطالعه. الف- تصویری از کانی گالن (Gn) که با رخ مثلی شکل قابل مشاهده می‌باشد. ب- جانشین شدن کانی گالن (Gn) توسط کانی ثانویه سروزیت (Cer). پ- هم‌رشدی کانی گالن (Gn) با اسفالریت (Sp) و پیریت (Py). ت- تصویری از کانی‌های سولفیدی که شامل کانی گالن (Gn)، اسفالریت (Sp)، کالکوپیریت (Ccp)، پیریت (Py) و آرسنوپیریت (Apy) است. ث- بلورهای تیغه‌ای شکل باریت (Brt) که کانی‌های گالن (Gn) را قطع کرده‌اند. ج- بلورهای تیغه‌ای شکل باریت (Brt) که با بلورهای متوسط دانه و ریزدانه کوارتز (Qz) هم‌رشدی دارند. چ- رگچه کوارتز (Qz) بی‌بار مرحله تاخیری که کانه‌زایی اکسیدی (بخش‌های تیره) را قطع کرده است. ح- تصویر میکروسکوپی از رگچه کلسیتی (Cal) مرحله تاخیری که کانه‌زایی اکسیدی (بخش‌های تیره) و بلورهای کوارتز (Qz) را قطع کرده است. علائم اختصاری برگرفته‌شده از [۱۲] است.

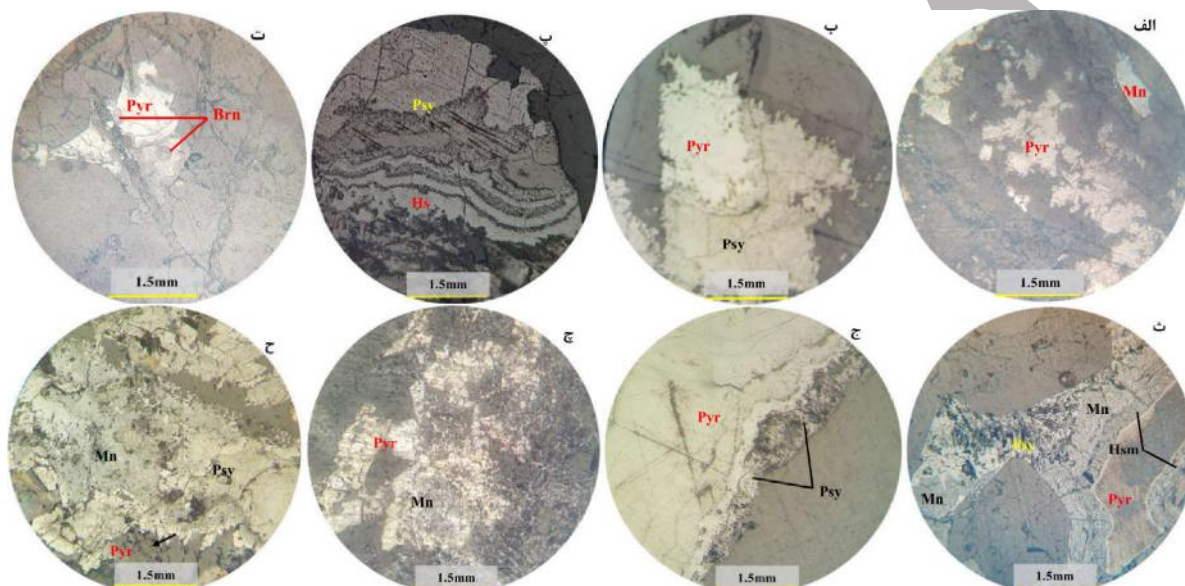
کانه‌زایی اکسیدی در کانسار کچ کلاه، فاز دوم کانه‌زایی بوده و حجم اصلی این فاز را باریت و کانه‌های منگنزدار تشکیل داده که همراه با کوارتز تشکیل شده‌اند. کانه‌زایی اکسیدی در این کانسار شامل دو زیرمرحله باریت- کوارتز و کوارتز- منگنز است. زیرمرحله کانه‌زایی باریت- کوارتز اولین مرحله از کانه‌زایی اکسیدی را تشکیل می‌دهد که کانه‌زایی سولفیدی را قطع کرده است (شکل ۶ ث). همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، بلورهای خودشکل باریت به همراه کوارتز، کانی‌های سولفیدی از جمله گالن را قطع کرده‌اند. بلورهای کوارتز ذکر شده عمده‌تاً به صورت رگه- رگچه‌ای تشکیل شده و گاهی دارای بافت شانه‌ای است که همراه بلورهای تیغه‌ای شکل باریت دیده می‌شوند (شکل ۶ ج).

کانه‌زایی منگنز، زیرمرحله دوم از کانه‌زایی اکسیدی در کانسار کچ کلاه به شمار می‌آید که شامل کانی‌هایی از جمله پیرولوزیت، پسیلوملان، منگنیت، هاسمانیت و براونیت است (شکل ۷). همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، کانه‌زایی منگنز در کانسار کچ کلاه رگه- رگچه‌های باریت- کوارتز قطع شده است (شکل ۵ ب، پ). پیرولوزیت فراوان‌ترین کانی منگنز شناسایی شده در کانسار مورد مطالعه بوده و دارای بافت‌های رگه- رگچه‌ای، جانشینی و کلوفرمی است (شکل ۷). قابل ذکر است در این کانسار تبدیل پیرولوزیت به کانی‌های پسیلوملان در مناطقی که شدت دگرسانی و هوازدگی در آن بخش‌ها بالا است، نیز دیده می‌شود (شکل ۷ ج). کانی منگنیت از دیگر کانی‌های منگنزدار در این کانسار است که در همراهی با کانی پیرولوزیت و پسیلوملان تشکیل شده است (شکل ۷ الف، ث، چ). قابل ذکر است که در همراهی با این کانی در بخش‌هایی کانی براونیت نیز تشکیل شده است (شکل ۷ ت)، با این تفاوت که مقدار کانی براونیت در این کانسار نسبت به سایر کانی‌های منگنز پایین است. همانطور که در شکل (۷ پ، ث) مشاهده می‌شود، کانی‌های پیرولوزیت و پسیلوملان در اثر فرایندهای سوپرژن و هوازدگی به کانی هاسمانیت نیز تبدیل شده‌اند.

پسیلوملان با داشتن ۱۶/۵ درصد BaO در ترکیب شیمیایی خود به اکسیدهای سخت و توده‌ای منگنز با بافت بوتروئیدال گفته می‌شود [۱۳]. این کانی بعد از کانی پیرولوزیت، بیشترین فراوانی را در کانسار کچ کلاه دارا می‌باشد. همانطور که ذکر شد، کانی پسیلوملان در قسمت‌هایی با کانی پیرولوزیت و منگنیت هم‌رشدی نشان می‌دهد و اغلب دارای بافت‌های جانشینی، سوزنی و

رگه- رگچه‌ای است. این کانی دارای دو نسل است. نسل اول آن همراه با کانی‌های اولیه مگنز از جمله پیرولولزیت، منگنیت و براونیت تشکیل شده است. نسل دوم این کانی در قسمت‌هایی که شدت دگرسانی و هوازدگی در آن نواحی بالا بوده، جانشین کانی‌های منگنزدار دیگر همانند منگنیت و پیرولولزیت شده است (شکل ۷ ح).

همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، بعد از کانه‌زایی منگنز در این کانسار، ابتدا رگه- رگچه‌های کوارتز بی‌بار تشکیل شده و مجموعه کانه‌زایی قبلی را قطع و برشی کرده است (شکل‌های ۵ و ۶ چ). در ادامه، رگه- رگچه‌های کلسیتی نیز تشکیل شده و تمامی مراحل کانه‌زایی قبلی را قطع و برشی کرده است (شکل‌های ۵ ث و ۶ ح). مجموعه کانی‌های مربوط به فاز کانه‌زایی سوپرژن و هوازدگی شامل مالاکیت، گوتیت، هاسمانیت، پسیلوملان و سروزیت است. از جمله بافت‌هایی که در طی این مرحله تشکیل شده‌اند شامل بافت جانشینی، کلوفرمی و بارماندی است.

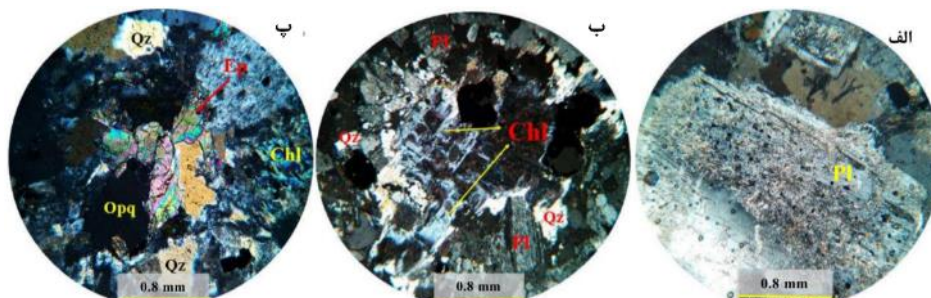


شکل ۷ تصاویر میکروسکوپی از کانی‌های منگنز در منطقه کچ کلاه. الف) تصویری از کانی پیرولولزیت (Pyr) رگچه‌ای و منگنیت (Mn). ب) هم‌رشدی بلورهای پیرولولزیت (Pyr) و بلورهای پسیلوملان (Psy). ت- بافت کلوفرمی کانی پیرولولزیت (Pyr) و پسیلوملان (Psy) که از اطراف توسط هاسمانیت (Hsm) جانشین شده‌اند. ث- بلورهای براونیت (Brn) در کنار بلورهای پیرولولزیت (Pyr). ث) تصویری از هم‌رشدی کانی‌های پیرولولزیت (Pyr)، پسیلوملان (Psy) و منگنیت (Mn) که از حاشیه بلوری به کانی هاسمانیت (Hsm) در حال تبدیل هستند. ج) جانشین شدن کانی پیرولولزیت (Pyr) از اطراف توسط کانی پسیلوملان (Psy). چ) کانه‌زایی رگه- رگچه‌ای منگنیت (Mn) و پیرولولزیت (Pyr) در منطقه مورد مطالعه. ح) تصویری از کانی پسیلوملان (Psy) که جانشین کانی‌های منگنیت (Mn) و پیرولولزیت (Pyr) شده است. علائم اختصاری برگرفته‌شده از [۱۲] است.

۷- دگرسانی

براساس مطالعات صحرایی و میکروسکوپی انجام شده، دگرسانی‌های گرمایی موجود در کانه‌زایی منگنز، سرب و روی و باریت کانسار کچ کلاه شامل دگرسانی‌های سیلیسی، سریسیتی، آرژیلیکی و کلریتی است که در میان آنها، دگرسانی سیلیسی، متداول-ترین و مهمترین نوع دگرسانی گرمایی در این منطقه است. این دگرسانی در همراهی با کانه‌زایی سولفیدی و اکسیدی و همچنین در طی فازهای آخر کانه‌زایی به صورت بی‌بار تشکیل شده و تمامی مراحل کانه‌زایی را قطع کرده است (شکل‌های ۵ ب، پ، ت؛ ۶-ث، ج، چ و ح). دگرسانی سریسیتی بصورت جانشینی سریسیت به جای کانی پلاژیوکلاز در نمونه‌های مربوط به توده نفوذی (سنگ میزبان کانه‌زایی) تشکیل شده‌است (شکل ۸ الف). در بخش‌هایی نیز کانی آلکالی فلدسپار متحمل این دگرسانی شده است. قابل ذکر است که وسعت این دگرسانی در منطقه مورد مطالعه کم بوده و محدود به توده نفوذی است. دگرسانی کلریتی نوع دیگری از دگرسانی‌های شایع موجود در کانسار کچ کلاه می‌باشد که اغلب به صورت جانشینی و پرکننده فضاهای خالی در این کانسار تشکیل شده است. این نوع دگرسانی با جانشین شدن کانی‌هایی نظیر کلینوپیروکسن و بیوتیت با کانی کلریت و اپیدوت مشخص می‌شود (شکل ۸ ب، پ). دگرسانی آرژیلیکی که به واسطه حضور کانی‌های رسی مشخص می‌شود، در منطقه

مورد مطالعه با هیدروکسیدهای آهن همراهی می‌شود که باعث تیره‌تر شدن رنگ رخنمون‌های دگرسانی آرژیلیکی به رنگ قرمز آجری تا قهوه‌ای می‌شود (شکل ۴). همانطور که در این شکل نیز دیده می‌شود، این دگرسانی بطور گسترده در اطراف ماده معدنی تشکیل شده است. دگرسانی کربناتی نیز در این منطقه عمدتاً به صورت رگچه‌های تاخیری و جانبینی تشکیل شده و مجموعه کانه‌زایی و سنگ میزبان را قطع و برشی کرده است (شکل‌های ۵ تا ۶ ح). همانطور که ذکر شد، این دگرسانی آخرین فاز کانه‌زایی در منطقه کچ کلاه به شمار می‌رود.



شکل ۸ الف) تصویر میکروسکوپی از کانی پلاژیوکلاز (Pl) که متحمل دگرسانی سریستی شده است. ب) درشت بلور کلینوپیروکسن که به میزان زیادی به کلریت (Chl) دگرسان شده است. پ) دگرسانی به کلریت (Chl) و اپیدوت (Ep) که در توده نفوذی تشکیل شده است. علائم اختصاری برگرفته‌شده از [۱۲] است.

با توجه به مطالعات صحرایی و میکروسکوپی در کانسار کچ کلاه می‌توان اظهار داشت که کانه‌زایی در این کانسار در ۴ مرحله کانه‌زایی سولفیدی، اکسیدی، تاخیری و سوپرژن رخ داده است. به این صورت که در مرحله اول کانه‌زایی، فاز سیلیسی-سولفیدی روی داده است. در طی این مرحله، کانی‌های گالن، اسفالریت، پیریت، کالکوپریت و آرسنوپریت تشکیل شده‌اند. در طی فاز دوم کانه‌زایی اکسیدی روی داده است. فاز اکسیدی شامل دو زیرفاز کانه‌زایی باریت و منگنز است که به همراه کوارتز تشکیل شده‌اند. در طی این فاز ابتدا رگه-رگچه‌های باریت-کوارتز تشکیل شده و در ادامه کانه‌زایی منگنز، به صورت رگه-رگچه‌ای تشکیل شده است. عمده دگرسانی‌های تشکیل شده در طی این دو مرحله شامل، دگرسانی سیلیسی، دگرسانی سریستی، دگرسانی کلریتی-اپیدوتی و آرژیلیکی است. بافت‌های برشی، رگه-رگچه‌ای، شانه‌ای، گل کلمی و پرکننده فضای خالی از بافت‌های مهم مرحله اول و دوم به شمار می‌روند. در مرحله سوم، رگه-رگچه‌های کوارتز بی‌بار و کلسیتی در این کانسار تشکیل شده و کل مراحل اولیه را قطع و برشی کرده است. مرحله سوپرژن با تشکیل کانی‌هایی از جمله پیرولولزیت، هاسمانیت، براونیت، گوتیت، سروزیت و مالاکیت با بافت‌های جانبینی، کلوفرمی و بازماندی در این کانسار تشکیل شده‌اند. توالی پارائزنی کانسار کچ کلاه در شکل ۹ ارائه شده است.

Alterations/ Minerals	Mineralization				
	Hypogene				Supergene and weathering
	Sulfide Mineralization	Oxide Mineralization Barite	Mn	Late-stage	
Galena					
Sphalerite					
Pyrite					
Chalcopyrite					
Arsenopyrite					
Barite					
Quartz					
Pyrolusite					
Psilomelane					
Manganite					
Brownite					
Calcite					
Hausmannite					
Cerussite					
Malachite					
Goethite					
Chlorite-epidote					
Vein veinlet					
Brecciate					
Comb					
Vug infill					
Colloform					
Replacement					
Relict					

شکل ۹ توالی پاراژنزی کانه‌زایی پلی‌متال در کانسار کج‌کلاه.

۸- زمین‌شیمی

نتایج تجزیه نمونه‌های سنگ میزبان و ماده معدنی در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. در این پژوهش، برای رده‌بندی سنگ‌های منطقه، از نتایج داده‌های آنالیز سنگ کل استفاده شده است.

جدول ۱ نتایج آنالیز نمونه‌های سنگ میزبان در کانسار کج‌کلاه (مقادیر اکسید عناصر اصلی به درصد و مقادیر عنصر کمیاب و کمیاب خاکی به ppm است).

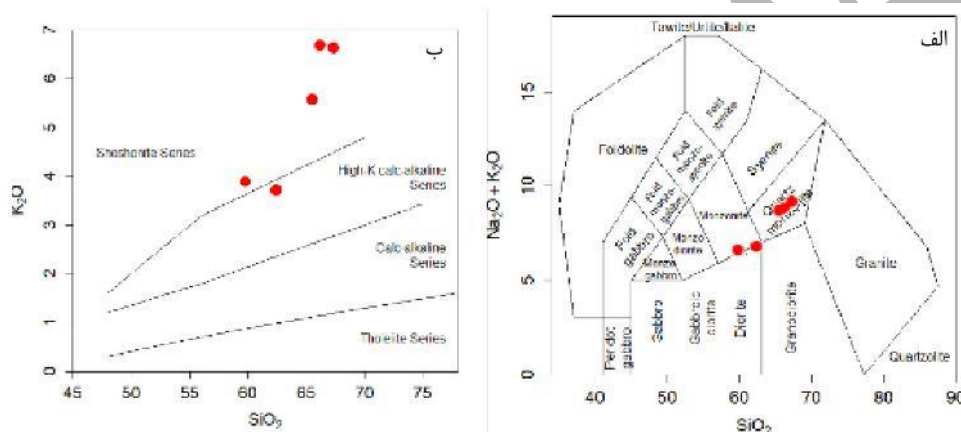
Element	SiO ₂	Al ₂ O ₃	BaO	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	LOI
TO-1	۶۵/۵۴	۱۵/۴۳	-/۱۳	۱/۴	۴/۷۲	۵/۵۷	۱/۵۸	-/۱۴	۲/۷۴	-/۲۵	-/۱	-/۶۴	۱/۷۷
TO-2	۵۹/۸۱	۱۵/۸۱	-/۱	۵/۳۹	۶/۹۸	۳/۸۸	۲/۴۸	-/۲۴	۲/۴۲	-/۳۴	</۰.۵	-/۸	۱/۷۵
TO-6-1	۶۶/۲۲	۱۵/۳۷	-/۱۲	۱/۶۶	۳/۶۹	۶/۶۸	-/۹۶	-/۱۵	۱/۷۵	-/۱۷	-/۰.۵	-/۵۵	۲/۶۴
TO-8-5	۶۷/۳۷	۱۵/۲	-/۱۳	-/۸۴	۳/۵۴	۶/۶۳	۱/۲	-/۱۳	۲/۱۳	-/۱۳	-/۲۲	-/۵۷	۱/۹۳
TO-11	۶۲/۴۳	۱۷/۷	-/۰.۹	۵/۲	۵/۰.۶	۳/۷۱	۱/۴۷	-/۱۱	۲/۷۸	-/۲۳	</۰.۵	-/۶۷	-/۵۵
Element	Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu
TO-1	</۱	۶۸۷۴۱	۱۵	۹۵۷	۱/۹۰	-/۲۰	۹۰۹۸	-/۴۰	۵۶	۸۰۹۰	۱۰	۲۰۱۰	۴۴
TO-2	</۱	۸۰۰۵۸	۱۴	۷۷۶	۱/۸۰	-/۳۰	۳۷۱۱۱	-/۱۰	۴۵	۱۴۰۴۰	۲۳	۲۰۴۰	۳۳
TO-6-1	</۱	۶۸۱۵۲	۸	۸۹۶	۱/۹۰	-/۷۰	۱۰۴۸۰	-/۱۰	۵۹	۶۰۷۰	۹	۴۰۹۰	۴۲
TO-8-5	-/۲۰	۷۲۴۷۲	۱۷	۱۰۳۷	۱/۴۰	-/۱۰	۵۷۵۰	-/۲۰	۵۷	۶۰۸۰	۱۰	۳۰۷۰	۲۹
TO-11	</۱	۹۲۵۳۲	۸	۸۰۴	۱/۸۰	-/۱۰	۳۸۳۹۰	-/۱۰	۴۶	۱۱۰۱۰	۱۰	۲۰۱۰	۴۵
Element	Dy	Er	Eu	Fe	Gd	Hf	In	K	La	Li	Lu	Mg	Mn
TO-1	۳/۷۰	۲/۱۳	۱/۱۴	۲۹۸۲۵	۴/۲۰	۱/۳۲	</۵	۴۳۲۶۸	۳۴	۷	-/۲۹	۸۲۹۱	۱۳۸
TO-2	۴/۲۸	۲/۴۱	۱/۳۶	۴۳۱۴۵	۴/۹۱	-/۶۵	</۵	۳۳۹۶۲	۲۵	۱۱	-/۳۴	۱۲۹۱۹	۱۷۴۵
TO-6-1	۳/۹۵	۲/۲۹	۱/۱۷	۲۳۳۵۷	۵/۴۰	۲/۱۴	</۵	۵۱۷۸۵	۳۵	۵	-/۳۰	۵۰۴۰	۹۹۷
TO-8-5	۳/۱۵	۱/۷۴	-/۹۸	۲۲۷۴۸	۳/۹۴	۲/۰.۴	</۵	۵۳۳۵۸	۳۴	۶	-/۲۳	۶۴۰۶	۹۳۳
TO-11	۳/۲۷	۱/۹۳	۱/۳۱	۳۰۴۶۳	۴/۰۰	-/۷۳	</۵	۳۱۹۵۷	۲۸	۱۰	-/۲۷	۸۳۵۵	۸۲۰
Element	Mo	Na	Nb	Nd	Ni	P	Pb	Pr	Rb	S	Sb	Sc	Se
TO-1	۱/۳۰	۲۴۱۱۸	۱۲/۰۰	۲۳/۲۰	۶	۷۰۳	۴۸	۶/۲۶	۱۲۴	۱۰۶	۱/۳۰	۷/۵۰	-/۸۴
TO-2	۱/۴۰	۳۲۱۷۹	۱۱/۹۰	۲۳/۶۰	۸	۱۰۰۷	۷۳	۵/۷۹	۱۰۸	۱۰۹	-/۸۰	۱۲/۷۰	-/۸۰
TO-6-1	۱/۵۰	۱۵۰۶۴	۱۴/۷۰	۳۷/۶۰	۶	۴۷۲	۶۴	۱۰/۲۷	۱۹۳	۸۲	۳/۸۰	۵/۸۰	۱/۷۳
TO-8-5	۱/۴۰	۱۹۴۰۳	۱۲/۵۰	۲۲/۹۰	۹	۴۹۳	۶۰	۶/۲۱	۱۹۴	۵۲	۱/۴۰	۶/۵۰	-/۶۴
TO-11	۱/۸۰	۲۷۳۱۶	۱۲/۴۰	۲۰/۷۰	۶	۹۵۰	۵۴	۵/۲۹	۹۵	۸۲	</۵	۹/۲۰	-/۵۹
Element	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Te	Th	Ti	Tl	Tm	U	V	W
TO-1	۴/۳۱	۱/۲۰	۱۵۶	-/۶۷	-/۶۴	</۱	۱۳/۷۰	۳۳۵۰	-/۷۲	-/۳۱	۳/۱۰	۷۶	۲/۸۰
TO-2	۴/۶۵	۱/۱۰	۲۹۵	-/۶۴	-/۷۰	</۱	۹/۵۲	۴۴۰۷	-/۴۴	-/۳۴	۱/۵۰	۱۲۹	۳/۴۰
TO-6-1	۵/۸۷	۲/۵۰	۹۹	-/۹۰	-/۷۲	</۱	۲۰/۱۳	۲۹۰۵	۱/۱۳	-/۳۲	۳/۵۰	۵۶	۶/۱۰
TO-8-5	۴/۱۱	۱/۲۰	۸۶	-/۶۴	-/۵۷	-/۱۱	۱۷/۰۹	۲۷۲۶	۱/۱۰	-/۲۶	۲/۷۰	۶۱	۲/۶۰
TO-11	۳/۹۲	-/۹۰	۳۳۵	-/۷۰	-/۵۸	-/۱۶	۸/۵۴	۳۷۶۲	-/۲۷	-/۲۸	۲/۱۰	۷۷	۳/۱۰
Element	Y	Yb	Zn	Zr									
TO-1	۲۴/۹۰	۱/۹۰	۱۱۳	۳۴									
TO-2	۳۰/۴۰	۲/۱۰	۶۷	۱۶									
TO-6-1	۲۴/۵۰	۲/۰۰	۱۰۲	۵۷									
TO-8-5	۲۲/۹۰	۱/۵۰	۲۳۱	۵۷									
TO-11	۲۴/۸۰	۱/۷۰	۶۲	۲۰									

جدول ۲ نتایج آنالیز نمونه‌های ماده معدنی در کانسار کج‌کلاه (مقادیر اکسید عناصر اصلی به درصد و مقادیر عنصر کمیاب و کمیاب خاکی به ppm است).

Element	Al ₂ O ₃	BaO	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Ce	Co
To-15	۳/۵۱	-/۰.۴	-/۶۸	۲/۳۵	-/۴۱	-/۴۸	۸۸/۵۸	۱۶۴۲۱	۱۲۵/۳۲	۷۲	۱/۱۹	۱۲/۴۰	۴۵۶۲	۵۳/۹۳	۵/۳۲	۵/۴۷
To-4-4	۱/۲۷	۳۵/۲۷۰	-/۰.۴	-/۵۵	-/۰.۱	۱/۹۴	>۱۰۰	۶۲۰.۵	۱۰۹۲/۲۰	>۱۰۰۰۰	-/۰.۴	۱/۱۵	۱۷۳	۱۶/۲۳	۳/۷۵	-/۹۳
To-7-5	-/۷۴	-/۴۲۰	-/۲۸	۶/۷۴	-/۲۴	۱۸/۱۷	۵۳/۵۶	۳۶۸۴	۲۱۸۱.۴۹	۳۳۳۵	-/۲۹	۱/۱۷	۲۰۵۱	۱۰/۱۹	۴/۱۲	۱/۵۱
To-4-1	۱/۹۵	۱۲/۳۰	-/۰.۵	۲/۸۸	-/۴۴	۲/۸۰	>۱۰۰	۱۰۶۱۳	۲۸۹۶/۵۰	>۱۰۰۰۰	-/۱۲	۱/۱۱	۲۲۳	۲۱/۱۳	۶/۱۰	۱/۱۱
To-8-1	-/۵۰	-/۴۹۰	-/۱۰	۱/۲۲	-/۰.۱	۵/۲۱	۳۲/۵۷	۲۷۴۸	۵۶۵/۵۱	۳۷۱۹	-/۲۸	-/۸۷	۶۹۸	۱۴/۱۱	۳/۱۹	-/۸۴
Element	Cr	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	Fe	Gd	Hf	In	K	La	Li	Lu	Mg	Mn
To-15	۱۹/۲۳	۴/۸۶	۱۰۱۲/۱	-/۸۶	-/۵۲	-/۸۸	۱۴۳۰	۱/۲۵	-/۲۷	۲/۴۱	۴۵۲۴	۳/۱۶	۵۴/۷۸	-/۰.۹	۳۲۷۴	۴۳۰.۴
To-4-4	۲۴/۲۸	-/۸۹	/	۱/۰.۳	-/۶۹	-/۹۷	۳۵۲۶	۱/۳۴	-/۳۲	-/۱۴	۱۹۳	۲/۹۷	۱۲/۷۲	-/۰.۶	۱۰.۴	>۱۰۰۰۰
To-7-5	۹۱/۲۵	۱/۹۹	۴۳/۹	۱/۳۴	۱/۱۳	۱/۳۳	۴۴۱۶۳	۱/۸۴	-/۱۸	-/۱۲	۱۲۳۹	۳/۶۴	۲۶/۵۱	-/۱	۱۱۳۰	>۱۰۰۰۰
To-4-1	۲۴/۰.۷	۱/۱۸	۸۰۱/۰	۱/۱۴	۱/۰.۳	۱/۲۱	۲۱۳۳۵	۱/۵۹	-/۲۷	-/۱۶	۲۳۵	۴/۲۵	۲۴/۲۱	-/۰.۸	۲۳۶۰	>۱۰۰۰۰
To-8-1	۳۲/۸۳	۱/۹۲	۹۵/۱	-/۹۱	-/۸۴	-/۸۷	۹۱۶۱	۱/۳۲	-/۴۳	-/۱۲	۳۱۵	۲/۲۵	۴۹/۷۳	-/۰.۴	۹۷	>۱۰۰۰۰
Element	Mo	Na	Nb	Nd	Ni	P	Pb	Pr	Rb	S	Sb	Se	Sm	Sn	Sr	Tb
To-15	۵/۶۱	۸۰۱	۱/۴۵	۴/۰.۳	۱۳/۸	۱۶۱	>۱۰۰۰۰	۲/۲۹	۴۷/۹۴	۱۲۴۰.۲	۳۹۶/۶۴	۱/۰.۶	۱/۸۷	۲/۱۸	۱۶۲	-/۶۱

To-4-4	۳/۵۵	۳۸۷	۳/۲۳	۲/۶۲	۴	۴۳	۳۹۷۷/۰۴	۲/۱۳	۲/۷۷	۳۳۷۲	۵۵۴/۷۱	۱/۲۸	۱/۱۶	۱/۰۶	۲۰۳۹/۴	-/۷۴
To-7-5	۱۱/۷۲	۶۸۳	۳/۸۳	۵/۲	۲/۳	۸۸	۳۶۱۳/۶۸	۲/۴۴	۱۰/۵۹	۲۸۲	۱۸۶۹/۳۳	-/۹۷	۲/۱۱	-/۷۸	۳۹۳/۴	-/۹۷
To-4-1	۱۶/۰۳	۳۵۸	۱/۱۴	۴/۳۹	۴/۹	۲۰۵	>۱۰۰۰۰	۲/۴	۲/۵۸	۵۹۱۵	۱۱۴۹/۰۵	۱/۰۶	۲/۲۸	-/۶۹	۱۹۶۸/۸	-/۸۶
To-8-1	-/۸۹	۴۹۱	۲/۱۷	۳/۸۶	۴/۳	۴۸	۱۵۳/۶	۱/۹۵	۵/۹۵	۱۰۸۵	۳۸۷/۰۶	۱/۱۱	۱/۴۱	-/۷۲	۱۷۲/۲	-/۷۱
Element	Te	Th	Ti	Tl	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zn	Zr	Ga	Ge	Ho	
To-15	-/۰۶	-/۴۲	۸۱۲	۵۳/۷	-/۰۹	۱/۷۸	۴۰/۶	۲/۰۷	۲۳/۶	-/۳۷	>۱۰۰۰۰	۲۹	۵/۱۸	-/۰۸	-/۳۵	
To-4-4	-/۶۲	۳/۹	۲۵۸	۳/۷۰	-/۱۶	۱/۲۱	-/۳	-/۴۱	۲/۹	-/۴۶	۱۰۱۷	۳۴	۱۲۴/۵۴	-/۰۴	-/۴۱	
To-7-5	-/۱۴	۲/۲۸	۳۱۲	۵/۶۶	-/۲۵	۳/۶۶	۱۸.۷	۱/۴۸	۱۶/۵	-/۶۴	۳۶۳۳	۶۱	۳۷/۴۳	۱/۳۷	-/۶۳	
To-4-1	-/۴۲	-/۲۷	۱۸۷	۴۴/۳۳	-/۱۲	۲/۴۸	۶/۳	۱/۲۱	۴/۳	-/۸۷	۳۹۱۷	۴۹	۱۱۵/۹۱	-/۲۳	-/۵۴	
To-8-1	-/۶۳	-/۳۱	۲۲۶	۲/۸۲	-/۰۹	-/۳۰	۲/۵	-/۹۸	۱/۳	-/۵۳	۴۸۲۷	۳۸	۴۳/۹۱	-/۳۰	-/۵۴	

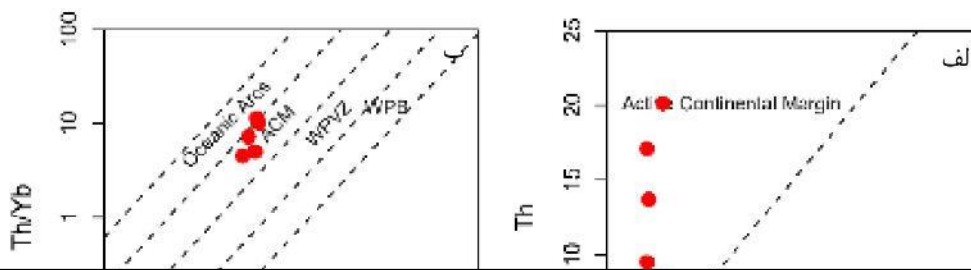
بر اساس نمودارهای رده‌بندی زمین‌شیمیایی [۱۴، ۱۵]، نمونه‌های توده نفوذی طارم در منطقه مورد مطالعه دارای ترکیب کوارتز مونزونیت تا مونزودیوریت و ماهیت کالک‌آلکانل پتاسیم بالا تا شوشونیتی هستند (شکل ۱۰).



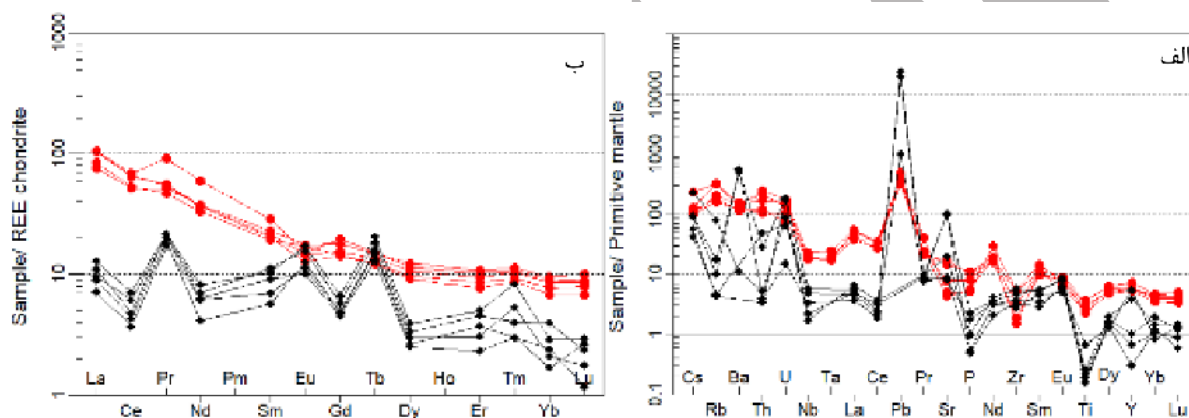
شکل ۱۰ الف) طبقه‌بندی سنگ‌های آذرین موجود در کنسار کچ کلاه بر اساس طبقه‌بندی [۱۴]، ب- براساس نمودار [۱۵]، نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده سری شوشونیتی و سری کالک‌آلکانل پتاسیم بالا قرار می‌گیرند.

در نمودارهای [۱۶]، براساس عناصر کمیاب و برای تفکیک محیط تکتونیکی واحدهای آذرین ارائه گردیده است. بر اساس نمودار Th در مقابل Ta، Th/Yb در مقابل Ta/Yb و Th/Ta در مقابل Yb نمونه‌های توده کچ کلاه در محدوده حاشیه فعال قاره‌ای قرار می‌گیرند (شکل ۱۱).

براساس نمودار عنکبوتی [۱۷]، بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه بیشتر عناصر دارای روند طبیعی هستند. فقط در عناصر Pd، Nd و Sm غنی شدگی و در عناصر Zr، Ce، Nb، P، Ti تهی شدگی دیده می‌شود (شکل ۱۲ الف). آنومالی منفی در عناصر HFSE در همراهی با غنی شدگی در عناصر LILE و LREE است. این غنی شدگی که در نمونه‌های توده کچ کلاه در همراهی با تهی شدگی در عناصر HFSE مانند عناصر Ta و Nb از نشانه‌های بارز کمان‌های ماگمایی می‌باشد و ماگماتیسم مرتبط با فرورانش را نشان می‌دهد [۱۸، ۱۹]. ویژگی این نمودار غنی شدگی عنصر Pb است. همچنین عنصر Rb تهی شدگی نشان می‌دهد که این مسئله ناشی از دگرسان شدن نمونه می‌باشد. در الگوی عناصر کمیاب خاکی به هنجار شده به کندريت [۲۰]، الگوی مشابه در همه نمونه‌های مورد مطالعه مشاهده می‌شود (شکل ۱۲ ب). نمونه‌های مورد مطالعه یک الگوی غنی از عناصر LREE نسبت به HREE را با نسبت بالای LREE / HREE نشان می‌دهند. غنی شدگی بالای عناصر کمیاب خاکی سبک می‌تواند ناشی از درجه پایین ذوب بخشی و پایین بودن عناصر کمیاب خاکی سنگین در ارتباط با حضور گارنت در ناحیه ذوب با [۲۱]. فراوانی LREE با پیشرفت روند تفریق فزایش پیدا می‌کند. این افزایش به این دلیل است که LREE نسبت به فازهای بلوری اصلی (کلینو پیروکسن، پلاژیوکلاز و آمفیبول) ناسازگارتر بوده و در نتیجه به طور فزاینده‌ای در مذاب‌های تحول یافته متمرکز می‌شوند. آنومالی منفی ضعیف Eu در نمونه‌های مورد مطالعه را می‌توان در ارتباط با تفریق پلاژیوکلاز در نظر گرفت. آنومالی منفی Y نیز می‌تواند در ارتباط با تفریق آمفیبول یا کلینوپيروکسن در نظر گرفته شود.



شکل ۱۱ موقعیت نمونه‌های کانسار کچ کلاه در نمودارهای [۱۶]. الف) نمودار Th در مقابل Ta، ب) نمودار Th/Yb در مقابل Ta/Yb.



شکل ۱۲ الف) الگوی فراوانی عناصر کمیاب بهنجار شده نسبت به ترکیب گوشته اولیه [۱۷]، و ب) نمودار عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت [۲۰]. دایره‌های قرمز رنگ مربوط به توده نفوذی و لوزی‌های سیاه رنگ مربوط به نمونه‌های ماده معدنی است.

نمودارهای چند عنصری بهنجار شده به گوشته اولیه برای نمونه‌های کانه‌دار الگوی نسبتاً مشابهی با نمونه‌های توده نفوذی نشان می‌دهند که این امر بیانگر مشتق شدن سیالات کانه‌ساز از سنگ‌های گرانیتوئیدی می‌باشد. البته شایان ذکر است که نمونه‌های ماده معدنی نسبت به سرب و باریم آنومالی مثبت زیادی را نسبت به توده نفوذی نشان می‌دهند (شکل ۱۲ الف). عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده به کندریت برای سنگ‌های نفوذی و ماده معدنی که نسبت به کندریت [۲۲] بهنجار شده‌اند، در شکل (۱۲ ب) نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در الگوی عناصر کمیاب خاکی نمونه‌های توده نفوذی و ماده معدنی یک سیر نزولی از LREE نسبت به HREE دیده می‌شود. در این شکل، الگوهای عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت برای نمونه‌های کانه‌دار تقریباً به صورت موازی با الگوهای عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت برای نمونه‌های توده نفوذی است که نشان دهنده مشتق شدن سیالات کانه‌ساز از توده نفوذی می‌باشد. آنومالی مثبت Eu, Tb و Pr در نمونه‌های ماده معدنی نسبت به سنگ میزبان، احتمالاً ناشی از دگرسانی و ویژگی‌های سیال کانه‌زایی در نمونه‌های آنالیز شده باشد که منجر به غنی‌شدگی این عناصر در ماده معدنی شده است.

۹- تیپ کانه‌زایی

با توجه به مقایسه تمامی ویژگی‌های مهم در مشخص کردن انواع تیپ کانه‌زایی، نظیر شواهد زمین‌شناسی، کانه‌زایی، کانی‌شناسی و ساخت و بافت در کانسار کچ کلاه با انواع کانسارهای فلزات پایه و گران‌بها می‌توان اظهار داشت که کانه‌زایی در این کانسار در دسته کانسارهای اپی‌ترمال قرار دارد. مهمترین شواهد و نتایج بدست آمده طی این مقایسه عبارت‌اند از:

۱- ساختارهای گسلی و شکستگی‌های به وجود آمده تحت تاثیر این ساختارها نقش بسزایی در کانه‌زایی کانسار کچ کلاه داشته و در واقع می‌توان اظهار داشت که کانه‌زایی در کانسار کچ کلاه توسط ساختارهای گسلی کششی کنترل شده است.

۲- کانه‌زایی در کانسار کچ کلاه شامل مجموعه کانیاپی پیریت، آرسنوپیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت و کانی‌های منگن‌دار از جمله پسیلوملان و پیرولوزیت است که با مجموعه کانی‌های باطله کوارتز، باریت، کلریت و کلسیت همراه هستند.

۳- ساخت و بافت‌های موجود در کانسارهای اپی‌ترمال شامل رگه- رگچه‌ای، برشی، شانه‌ای، گل کلمی و پُرکننده فضای خالی است که این بافت و ساخت‌ها در کانسار کچ کلاه قابل مشاهده است.

۴- مجموعه کانی‌های دگرسانی موجود در این کانسار، نشان دهنده و مشخص کننده دگرسانی گرمابی در این کانسار است. مقایسه این ویژگی‌ها با انواع کانسارهای اپی‌ترمال جدول (۳) نشان می‌دهد که این مجموعه کانیاپی، ساخت و بافت و الگوی دگرسانی بیشترین شباهت را با کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون حد واسط دارد [۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷]. عدم وجود دگرسانی آرژلیک پیشرفته با مجموعه کانی‌های آلونیت، کائولینیت و پیروفیلیت به همراه کانی‌های آدولاریا، لوزونیت، انارژیت و تنانتیت در کانسار کچ کلاه بیانگر آن است که این کانسار متفاوت از کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین و بالا است. از طرفی، وجود کانی‌های دگرسانی از جمله سیلیسی، آرژلیکی، سریسیت، اپلیت، کلسیت و کلریت در کانسار کچ کلاه بیانگر تشکیل این دگرسانی‌های گرمابی در دماهای پایین تا متوسط هستند که این مجموعه کانیاپی، شاخص کانی‌های دگرسانی در کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط به‌شمار می‌آیند [۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸]. لذا با توجه به این ویژگی‌ها و همین‌طور ویژگی‌های ذکر شده در قسمت‌های بالاتر، می‌توان اظهار داشت که کانسار کچ کلاه بیشترین شباهت را با کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون حدواسط دارد. در جدول (۴)، ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زایی کانسار کچ کلاه با برخی از کانسارهای مشابه در ایران مقایسه شده است.

۱۰- الگوی تشکیل کانسار کچ کلاه

براساس نتایج به دست آمده از مشاهدات صحرایی، مطالعات سنگ‌شناسی و کانه نگاری و بررسی ویژگی‌های کانی‌ها، مراحل تکوین و تکامل کانسار کچ کلاه را می‌توان در چهار مرحله به شرح زیر خلاصه کرد (شکل ۱۳):

مرحله نخست با تشکیل توالی‌های آتشفشانی- رسوبی ائوسن که شامل واحدهای توف و واحدهای آتشفشانی از جمله بازالت، بازالت‌های آندزیتی و آندزیت در منطقه همراه است (شکل ۱۳ الف).

مرحله دوم با نفوذ توده نفوذی با ترکیب کوارتز مونزونیتی- کوارتز مونزودیوریتی در زمان ائوسن پایانی به داخل توالی آتشفشانی و آتشفشانی- رسوبی ائوسن همراه بوده است (شکل ۱۳ ب).

مرحله سوم با نفوذ توده گرانیتوئیدی به داخل توالی آتشفشانی ائوسن در محل تماس توده با سنگ‌های میزبان، آثار دگرسانی گرمابی به صورت آرژلیکی و سیلیسی شدن ظاهر می‌گردد. سپس همزمان با رخ دادن دگرسانی در مرز تماس توده و سنگ‌های میزبان، کانه‌زایی منگنز، مس، سرب و روی و باریت به صورت رگه‌های نسبتاً ضخیم در داخل توده نفوذی و به میزان کمتر در داخل واحدهای آتشفشانی میزبان صورت می‌گیرد. رخنمون این توده‌ها در بخش‌های جنوبی منطقه بیشتر می‌باشد. همراه با کانه‌زایی، دگرسانی‌های سیلیسی، آرژلیکی، کلریتی- اپیدوتی، کربناتی و سریسیتی نیز در اطراف ماده معدنی تشکیل شده است.

جدول ۳- مقایسه ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژنتیکی کانسارهای اپی‌ترمال فلزات پایه و گران‌بها [۲۳، ۲۶، ۲۷، ۲۹، ۳۰، ۳۱] با کانسار کچ کلاه.

ویژگی	کانسارهای سولفیداسیون بالا	کانسارهای سولفیداسیون متوسط	کانسارهای سولفیداسیون پایین	کانسار کچ کلاه
-------	----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	----------------

سنگ میزبان	گدازه‌ها و سنگ‌های آذرآواری، ریوداسیت	گدازه‌ها و سنگ‌های آذرآواری، ریوداسیت، آندزیت	بازالت- ریولیت	توف، آندزیت، توده کوارتز مونوزونیتی- کوارتز مونوزودیوریتی
فلزات همراه	طلا- نقره، مس، آرسنیک، آنتیمون (روی، سرب، بیسموت، قلع، مولیبدن، تنگستن، جیوه)	طلا- نقره، روی- سرب، مس (آنتیمون، آرسنیک، مولیبدن، تلریم، سلنیوم، جیوه)	طلا- نقره (روی- سرب، مس (آنتیمون، آرسنیک، مولیبدن، جیوه)	نقره، روی- سرب، آرسنیک، منگنز
عوامل کنترل کننده کانه‌زایی	گسل‌های موازی، دیاترم‌ها و برش‌ها گرمایی	گسل‌های کششی و امتدادلغز	گسل‌های کششی و امتدادلغز	گسل‌ها و شکستگی‌ها
ساخت و بافت	رگه‌ای، دانه پراکنده، جانشینی، برشی	رگه‌ای، داربستی، پرکننده فضای خالی، برشی	رگه‌ای، داربستی، دانه پراکنده، جانشینی، برشی، پرکننده فضای خالی	رگه- رگچه‌ای، برشی، داربستی
کانی‌شناسی	انارزیت، لوزونیت، کوولیت، کالکوپیریت، اسفالریت، تتراندريت- تنانتیت، پیریت، بورنیت	الکتروم، آکانتیت، سولفوسالت نقره، گالن، اسفالریت (فقیر از آهن)، تتراندريت- تنانتیت، کالکوپیریت، تلورید، سلنید	الکتروم، آکانتیت، سولفوسالت نقره، گالن، اسفالریت (غنی از آهن)، تتراندريت- تنانتیت، کالکوپیریت، تلورید، سلنید، پیرویت	پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، پسیلوملان، پیرولولوزیت
کانی‌های باطله	کوارتز، آلونیت، باریت، کائولینیت، آیدریت، دیکیت، پیروفیلیت	کوارتز، کلسدون، کلسیت ± کانی‌های منگن‌دار، باریت، آدولاریا	کوارتز، کلسدون، کلسیت، آدولاریا، ایلیت، کلریت، به مقدار کم فلوئوریت	کوارتز، کربنات، باریت
بافت	کوارتز حفره‌دار، برشی، جانشینی، رگه- رگچه‌ای	کلوفر، نواربندی، کوکاد، شانه‌ای، رگه- رگچه‌ای، جانشینی	کلوفر، نواربندی، کوکاد، شانه‌ای، ای، جانشینی	رگه- رگچه‌ای، برشی، شانه‌ای، گل کلمی، پرکننده فضای خالی
دگرسانی	سیلیسی، آلونیت، کانی‌های سولفاتی- فسفاتی- آلومینیم‌دار، پیروفیلیت، دیکیت	سیلیسی، سریسیت (ایلیت)، آدولاریا	سیلیسی، ایلیت، آدولاریا، اسمکتیت	سیلیسی، آرژیلیکی، سریسیتی، کربناتی، کلریتی- اپیدوتی
ویژگی سیالات کانه‌ساز	ماگمایی + آب‌های جوی (اکسیدان و اسیدی)	آب‌های جوی + ماگمایی (تقریباً خنثی و احیایی)	آب‌های جوی ± ماگمایی (تقریباً خنثی و احیایی)	آب‌های جوی ± ماگمایی

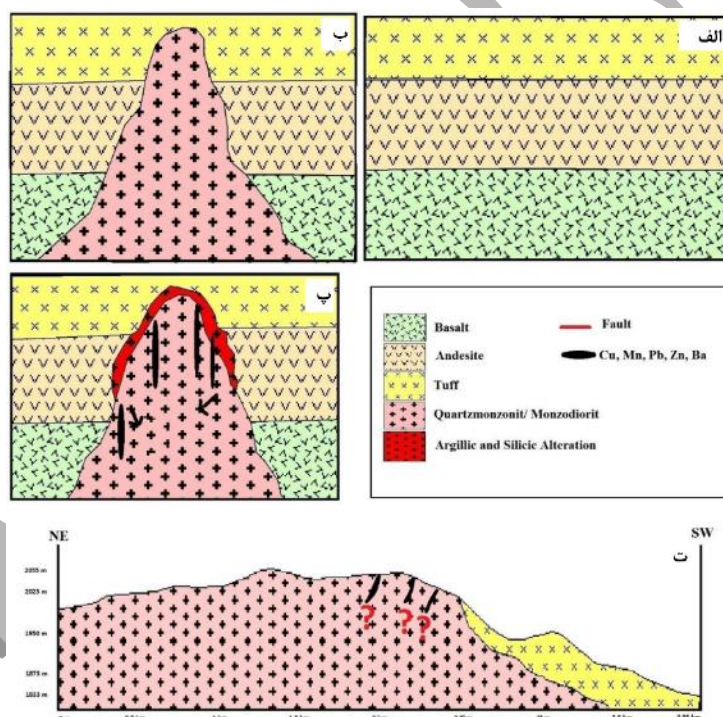
در واقع می‌توان اظهار داشت که نفوذ توده باعث چرخش سیالات جوی در منطقه شده و در نتیجه آن دگرسانی‌های ذکر شده به همراه رگه‌های کانه‌زایی در منطقه شده است. در واقع، چرخش سیالات گرمایی باعث تشکیل دگرسانی‌های مختلف و شسته شدن عناصر از واحدهای مسیر خود شده و در نتیجه در شکستگی‌ها و زون‌های گسلی رگه‌های سیلیسی- سولفیدی تشکیل داده است (شکل ۱۳ پ). قابل ذکر است که توده نفوذی نیز علاوه بر اینکه به عنوان موتور حرارتی نقش داشته است، احتمال دارد به عنوان منشأ سیالات و فلزات نیز در این کانه‌زایی نقش داشته باشد که اثبات این قضیه نیاز به مطالعات سیالات در گیر و ایزتوبی پایدار در این کانسار دارد.

مرحله چهارم با بالآمدگی منطقه و توسعه فرآیندهای هوازدگی و فرسایش همراه بوده و طی آن ریخت‌شناسی امروزی منطقه حاصل شده است (شکل ۱۳ ت).

جدول ۴ مقایسه ویژگی‌های اصلی کانسار کچ کلاه با برخی از کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون حدواسط در ایران.

ویژگی‌های اصلی/کانسار	ابولحسنی	آی قلعه سی	ورمزیر	قیچاق	کچ کلاه
زیر گروه	فلزات پایه و نقره	فلزات پایه و نقره	فلزات پایه و نقره	فلزات پایه	فلزات پایه
موقعیت جغرافیایی	جنوب غرب دامغان	جنوب شرق تکاب	شمال زنجان	شمال غرب قره چمن	شرق زنجان
پهنه ساختاری	ترو-د-چاه شیرین	ارومیه- دختر	البرز غربی- آذربایجان	البرز غربی- آذربایجان	البرز غربی- آذربایجان

سنگ درونگیر	سنگ‌های پیروکلاستیک و گدازه-های آندزیتی	سنگ‌های رسوبی و گنبدیهای نیمه عمیق	توف‌های حدواسط و اسیدی	توف، گدازه و توده دیوریتی-گابرویی	توف، آندزیت، توده کوارتز مونزونیتی-کوارتز مونزودیوریتی
سن کانه زایی کنترل کننده ساختاری	اٹوسن	پلیوسن	پلیوسن	اٹوسن-الیگوسن	اٹوسن پایانی
کانی شناسی	گسل‌ها و شکستگی‌ها، اسفالریت فقیر از آهن، گالن، نقره، پیریت و کالکوپیریت	گسل‌های نرمال	گسل‌ها و شکستگی‌ها، گالن، اسفالریت، پیریت، سیلوملان، پیرولوویت	گسل‌ها و شکستگی‌ها، پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، طلا، رآلگار، پسیلوملان، پیرولوویت	گسل‌ها و شکستگی‌ها، پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، پسیلوملان، پیرولوویت
بافت و ساخت	برشی، دانه پراکنده، پرکننده فضای خالی	برشی، دانه پراکنده، پرکننده فضای خالی، توده‌ای، قشرگون، شانه‌ای سیلیسی، آرژیلیک	برشی، دانه پراکنده، پرکننده فضای خالی، توده‌ای، قشرگون، شانه‌ای سیلیسی، آرژیلیک	برشی، دانه پراکنده، پرکننده فضای خالی، توده‌ای، قشرگون، شانه‌ای سیلیسی، آرژیلیک	برشی، دانه پراکنده، پرکننده فضای خالی، توده‌ای، قشرگون، شانه‌ای سیلیسی، آرژیلیک
دگرسانی	آرژیلیک، سیلیسی، پروپیلیتیک	پیشرفته، پروپیلیتیک، سرسیتیک، کربناته	سیلیسی، آرژیلیک متوسط، پروپیلیتیک	سیلیسی، سیلیسی، آرژیلیک متوسط، کربناتی، پروپیلیتیک	سیلیسی، آرژیلیک، سرسیتی، کربناتی، کلریتی-اپیدوتی
ژنز	اپی ترمال سولفیداسیون حدواسط	اپی ترمال سولفیداسیون حدواسط	اپی ترمال سولفیداسیون حدواسط	اپی ترمال سولفیداسیون حدواسط	اپی ترمال سولفیداسیون حدواسط
منبع	[۳۲]	[۳۳]	[۳۴]	[۳۵]	پژوهش حاضر



شکل ۲۰ نمایی شماتیک از مراحل تکوین و تکامل کانه‌زایی در کانسار کچ کلاه. (الف) تشکیل توالی‌های آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی (ب) نفوذ توده نفوذی کوارتز مونزونیتی-کوارتز مونزودیوریتی به درون واحدهای آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی اٹوسن. (ج) نفوذ توده گرانیتوئیدی و تبلور آن سبب تشکیل دگرسانی گرمایی و کانه‌زایی منگنز، مس، سرب و روی و باریت به صورت رگه-رگچه‌ای در داخل توده نفوذی و به میزان کمتر در داخل واحدهای آتشفشانی میزبان صورت گرفته است. (پ) بالآمدگی ناحیه‌ای و توسعه فرایندهای هوازدگی و سوپرژن (وضعیت کنونی منطقه). مدل ارتفاعی براساس تصاویر گوگل ارث است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان کمال تشکر و قدردانی را دارند. همچنین از سردبیر محترم و داوران محترم مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، به‌خاطر راهنمایی‌های علمی که منجر به غنای بیشتر مقاله حاضر گردیده است، تشکر می‌نمایند.

References:

- [1] Amini B., Amini M.R., Stocklin J., Hirayama K., "Geological map of Tarom, sheet no.5763, 1:100,000 scale". Geological Survey of Iran (2001).
- [2] Stocklin J., "Structural history and tectonics of Iran: a review". American Association of Petrological Geology B. 52 (1968) 1229-1258. <https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- [3] Nabatian Gh., "Geology, geochemistry and evolution of iron oxide- apatite deposits in the Tarom volcano- plutonic belt, western Alborz". PhD. thesis Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (230 pp. in Persian with English abstract) (2012).
- [4] Nabatian Gh., Ghaderi M., Neubauer F., Honarmand M., Lui X., Dong Y., Jiang S.-Y., Bernroider M., "Petrogenesis of Tarom high-potassic granitoids in the Alborz–Azarbaijan belt, Iran: geochemical, U–Pb zircon and Sr–Nd–Pb isotopic constraints". Lithos 184–187 (2014) 324–345. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.11.002>
- [5] Nabatian Gh., Jiang S.Y., Honarmand M., Neubauer F., "Zircon U–Pb ages, geochemical and Sr–Nd–Pb–Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Tarom-Olya pluton, Alborz magmatic belt, NW Iran", Lithos 244 (2016), 43–58. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.11.020>
- [6] Mohammadi M., "Geology, geochemistry and genesis of Dohneh Cu deposit, Northeast of Zanjan". M.Sc. thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran (230 pp. in Persian with English abstract) (2018).
- [7] Ahmadi M., "Geology, mineralogy, geochemistry and genesis of Kordkand Cu-Fe deposit, Northeast of Zanjan". M.Sc. thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran (230 pp. in Persian with English abstract) (2018).
- [8] Mehrabi B., Ghasemi Siani M., Goldfarb R., Azizi H., Ganerod M., Marsh E.E., "Mineral assemblages, fluid evolution and genesis of polymetallic epithermal veins, Gulojeh district, NW Iran". Ore Geology Reviews 78 (2016), 41–57. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.03.016>
- [9] Aghanabati A., "Major sedimentary and structural units of Iran". Geosciences 7 (1998), 29-30.
- [10] Alavi, M., "Tectonic Map of the Middle East". Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, 60pp (1991).
- [11] Afshari M., Nabatian Gh., Honarmand M., Ebrahimi M., Li X.-H., "Shoshonitic pluton and an associated base-metal deposit in the Tarom-Hashtjin metallogenic zone, NW Iran: implication for tectono-magmatic evolution and metallogenic considerations". Australian Journal of Earth Sciences 71(2) (2023), 251-276. <https://doi.org/10.1080/08120099.2023.2273974>
- [12] Whitney D.L., Evans B.W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals". American mineralogist, 95(1) (2010) 185-187. DOI: 10.2138/am.2010.3371
- [13] Roy S., "Environments and processes of manganese deposition". Economic Geology, 87 (5) (1992) 1218-1236. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.87.5.1218>
- [14] Middlemost E.A.K., "Naming materials in the magma/igneous rock system". Earth Science Reviews 37 (1994), 215–224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- [15] Peccerillo A., Taylor S.R., "Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from Kastamonu area, northern Turkey". Contributions to Mineralogy and Petrology 58 (1976) 63–81. <https://doi.org/10.1007/BF00384745>
- [16] Schandl E.S., Gorton M.P., "Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments". Economic geology, 97(3) (2002), 629-642. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.3.629>
- [17] McDonough W.F., Sun S.S., "Composition of the Earth". Chemical Geology 120 (1995) 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- [18] Wilson M., "Igneous petrology". Chapman and Hall, London, 466 p (1989).
- [19] Rollinson H.R., "Using geochemical data: evolution, presentation, and interpretation". London, UK, 652 p (1993).
- [20] Nakamura N., "Determination of REE, Ba, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites". Geochimica et Cosmochimica Acta 38 (1974) 757–775.

- [21] Wilson M., "Igneous petrology". Chapman and Hall, London, 466 p (1989).
- [22] Boynton W.V., "Cosmochemistry of the earth element: meteorite studies". In: Henderson, R. (Ed), Rare Earth Element geochemistry. Developments in geochemistry, Vol. 2. Elsevier, Amsterdam (1984).
- [23] Gemmell J.B; "Exploration implications of hydrothermal alteration associated with epithermal Au-Ag deposits", AESC 2006, Melbourne, Australia (2002).
- [24] Wang L, Qin K-Z, Song G-X, Li G-M, "A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification". Ore Geology Reviews 107 (2019) 434–456. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.023>
- [25] Einaudi M.T., Hedenquist J.W., Inan E.E., "Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: transitions from porphyry to epithermal environments". In: Simmons, S.F., Graham, I. (Eds.), Volcanic, Geothermal, and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth. Society of Economic Geologists, Special Publication 10 (2003) 285–313.
- [26] Sillitoe R.H., Hedenquist J.W., "Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious-metal deposits". In: Simmons, S.F., Graham, I., (eds.) Volcanic, geothermal, and ore forming fluids: rulers and witnesses of processes within the earth. Society of Economic Geologists, Special Publication, 10 (2003) 315-343.
- [27] Hedenquist J.W., Arribas A., Urien-Gonzalez E., "Exploration for epithermal gold deposits". In: Hagemann, S.G., Brown, P.E. (Eds.), Gold in 2000. Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, (2000) pp. 245–277.
- [28] Albinson T., Norman D.I., Cole D., Chomiak B.A., "Controls on formation of low sulfidation epithermal deposits in Mexico: constraints from fluid inclusion and stable isotope data". In: Albinson, T., Nelson, C.E. (Eds.), New Mines and Discoveries in Mexico and Central America. Society of Economic Geologists, Special Publication 8, (2001) pp. 1–32.
- [29] Hedenquist J.W., Sillitoe R.H., Arribas A., "Characteristics of and exploration for high-sulfidation epithermal Au-Cu deposits". Cooke D R., Deyell CL, Pongratz J.,(eds.), 24 (2004) 99-110.
- [30] Simmons S.F., White N.C., John D.A., "Geological characteristics of epithermal precious and base-metal deposits", Economic Geology 100th Anniversary (2005) 485–522.
- [31] Cooke D.R., Simmons S.F., "Characteristics and genesis of epithermal gold deposits". In: Hagemann S.G., Brown P.E. (Eds.), Gold in 2000. Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, (2000) pp. 221–244.
- [32] Shamanian G.H., Hedenquist J.W., Hattori K.H., Hassanzadeh J., "The Gandy and Abolhassani epithermal prospects in the Alborz magmatic arc, Semnan province, northern Iran". Economic Geology, 99(4) (2004) 691–712. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.4.691>
- [33] Shirkhani M., "Mineralogy, geochemistry and genesis of Ay Qalasi Pb-Zn deposit, SE Takab". Unpublished M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares, Tehran, Iran, 143 pp. (in Persian with English abstract) (2007).
- [34] Ghorbani A., "Geology, geochemistry and genesis of Varmazyar Pb-Zn (Ag) mineralization, north of Zanjan". M.Sc. thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran (230 pp. in Persian with English abstract) (2020).
- [35] Sohbato M., "Geology, geochemistry and genesis of Qebchaq base and precious metals mineralization, NW Qarehchaman". M.Sc. thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran (230 pp. in Persian with English abstract) (2021).