

زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و مطالعه سیالات درگیر در رگه‌های پلی‌متال محدوده اکتشافی کلاته کلوخ گناباد، شرق ایران (بلوک لوت)

روح اله میری بیدختی^{۱*}، صدیقه زیرجانی زاده^۲، امیرمهدوی^۳

۱ و ۲ استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، مجتمع آموزش عالی گناباد

۳ استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند

شماره تماس: ۰۹۱۵۳۶۲۴۹۸۴

پست الکترونیک: roholamiri@gonabad.ac.ir

تاریخ تنظیم: ۱۴۰۳/۰۸/۲۵

چکیده

محدوده اکتشافی کلاته کلوخ در ۲۵ کیلومتری شمال غرب گناباد، در شمال بلوک لوت و شرق ایران، قرار دارد. واحدهای سنگی اصلی این منطقه شامل سنگ‌های آذرین خروجی با ترکیب آندزیت و تراکی آندزیت، واحدهای نفوذی نیمه عمیق با ترکیب مونزونیت تا مونزودیوریت و واحدهای آذرآواری است. دگرسانی در منطقه شامل سیلیسی، پروپیلیتیک و آرژیلیک است. کانی‌سازی به صورت رگه‌ای در داخل واحدهای آذرآواری رخ داده است. کانی‌های اولیه شامل پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن و کانی‌های ثانویه شامل کالکوزیت، سروزیت، کولیت، کریزوکلا، مالاکیت، آزوریت و گوتیت هستند که بیشتر درون واحدهای آذرآواری و در امتداد گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه تشکیل شده‌اند. دماسنجی بر روی میانبرهای سیال اولیه همزاد با کانی‌سازی بر روی کانی کوارتز، نشان داد که دمای همگن‌شدن سیالات درگیر در این منطقه بین ۲۱۰ تا ۳۹۴ و بطور میانگین ۳۰۶ درجه سانتی‌گراد است. دمای ذوب آخرین یخ در میان بارهای سیال نشان دهنده شوری بین ۴/۸ تا ۱۳/۵ و بطور میانگین ۹/۵ درصد، معادل درصد وزنی NaCl می‌باشد. نتایج حاصل از مطالعه سیالات درگیر نشان می‌دهد سیالات گرمابی از منابع عمیق‌تر و ماگمایی منشأ گرفته و پس از اختلاط با آبهای جوی و جوشش، باعث نهشت موادمعدنی و تشکیل کانسار به شکل رگه‌های گرمابی شده‌اند. براساس ویژگی‌ها و الگوی دگرسانی، کانه زایی و میان بارهای سیال، گستره معدنی کلاته کلوخ شباهت نزدیکی با ذخایر مس رگه‌ای مرتبط با مس پورفیری دارد.

لغات کلیدی: زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، سیالات درگیر، رگه‌های پلی‌متال، کلاته کلوخ، بلوک لوت

Geology, Mineralogy, and Fluid Inclusion Study of Polymetallic Veins in the Kalateh Klukh prospecting Area, Gonabad, Eastern Iran (Lut Block)

Roohollah Miri Beydokhti^{1*}; Sedigheh Zirjanizadeh²; Amir Mahdavi³

^{1,2} Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Gonabad, Gonabad, Iran

³ Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

Email: roholamiri@gmail.com

Abstract

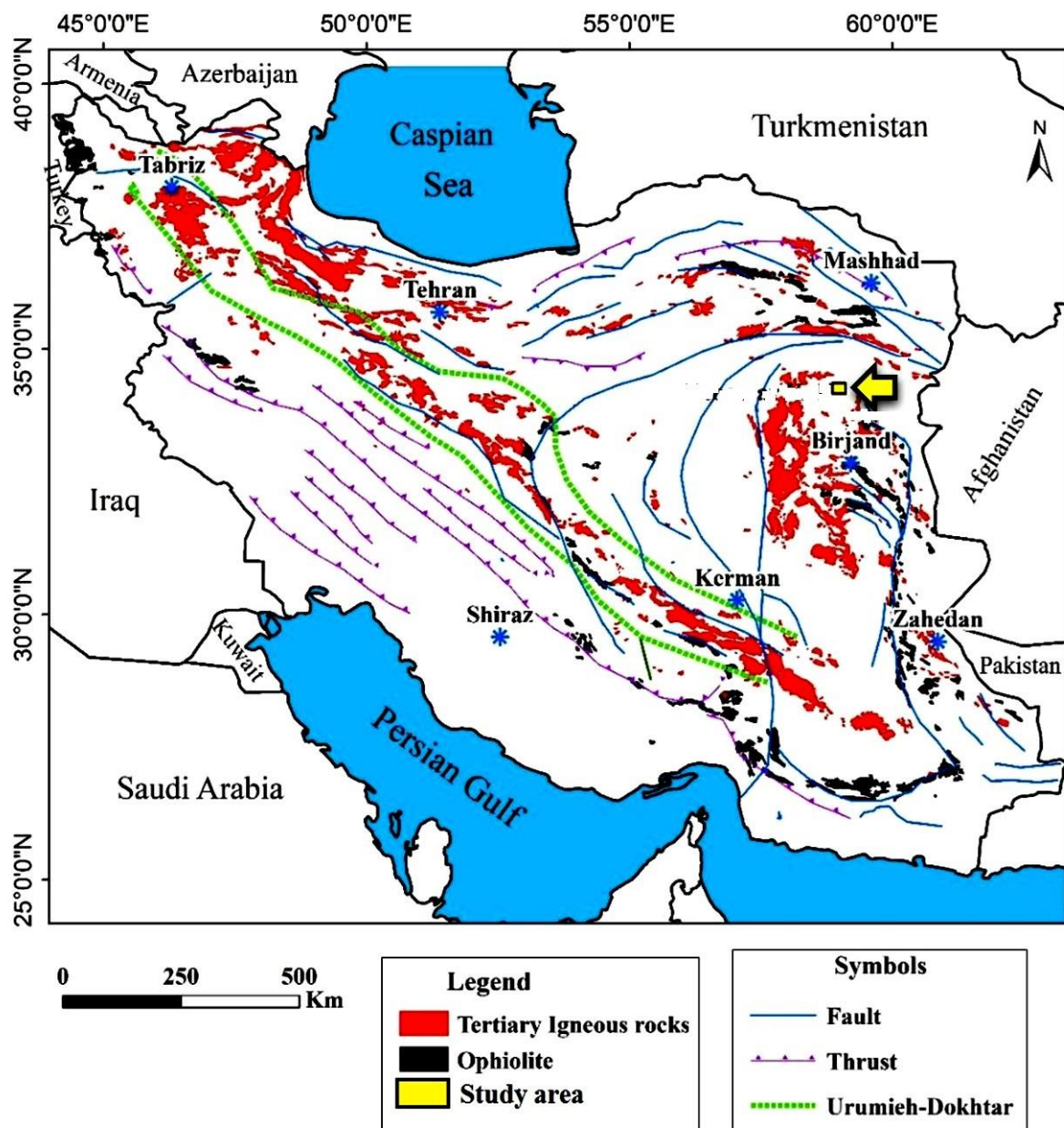
The Kalateh Klukh prospecting area, is located 25 kilometers northwest of Gonabad, in northern Lut Block, eastern Iran. The main lithological units in this area consist of extrusive igneous rocks with andesitic to trachyandesitic compositions, subvolcanic rocks with monzonitic to monzodioritic compositions, and pyroclastic rocks. Alteration in the area includes silicification, propylitic, and argillic alteration. Mineralization is vein-type and occurs primarily within the pyroclastic units. Hypogene mineralogical complex includes pyrite, chalcopyrite, sphalerite, and galena, while secondary minerals such as chalcocite, cerussite, covellite, chrysocolla, malachite, azurite, and goethite are mostly formed along regional faults and fractures within the pyroclastic units. Thermometry on primary fluid inclusions coeval with mineralization, hosted in quartz, revealed homogenization temperatures ranging from 210°C to 394°C, with an average of 306°C. The final ice-melting temperatures in fluid inclusions indicate salinity levels between 4.8 and 13.5 wt.% NaCl equivalent, with an average salinity of 9.5 wt.% NaCl. Results from the fluid inclusion studies suggest that hydrothermal fluids originated from deeper magmatic sources and, after mixing with meteoric water and experiencing boiling, led to the precipitation of minerals and the formation of hydrothermal vein-type deposits. Based on alteration characteristics, mineralization patterns, and fluid inclusion data, the Kalateh Klukh mineralized zone bears a close resemblance to vein-type copper deposits associated with porphyry copper systems.

Keywords: geology, mineralogy, fluid inclusions, polymetallic veins, Kalateh Klukh, Lut block

کانسارهای ماگمایی-گرمابی منبع اصلی عناصر مس، تنگستن، قلع، مولیبدن و طلا هستند [۱]. این کانسارها از یک رشته فرآیندهای پیچیده زمین‌شناسی به وجود می‌آیند که با تولید ماگماهای سیلیکاته آبدار آغاز می‌شود، سپس تبلور آن‌ها، جداسازی سیالات ماگمایی غنی از مواد فرار و در نهایت، ته‌نشینی کانه در رگه‌ها یا کانسارهای جان‌شینی را به دنبال دارد [۲].

محدوده اکتشافی کلاته کلوخ در شرق ایران و ۲۵ کیلومتری شمال غرب گناباد، ۲ کیلومتری شرق روستای کلاته کلوخ، در استان خراسان رضوی و بین طول $31^{\circ}31'30''$ تا $58^{\circ}32'30''$ شرقی و عرض $34^{\circ}28'30''$ تا $34^{\circ}29'30''$ شمالی قرار دارد. این محدوده اکتشافی به لحاظ تقسیم‌بندی ایالت‌های زمین‌ساختاری ایران، در بخش‌های شمالی ایالت زمین‌شناسی بلوک لوت قرار دارد [۳] (شکل ۱). ویژگی‌های زمین‌شناسی بلوک لوت شامل وجود گسترده واحدهای آتشفشانی و نفوذی، ساختارهای پیچیده تکتونیکی و سیستم‌های حرارتی می‌باشد که شرایط مناسبی برای تشکیل ذخایر معدنی اپی‌ترمال و پورفیری فراهم کرده‌اند و پژوهشگران زیادی به معرفی انواع کانی‌سازی‌ها در سرتاسر این بلوک پرداخته‌اند [۴-۱۰]. ناحیه شمالی بلوک لوت که این محدوده اکتشافی در آن جای گرفته، میزبان شمار زیادی از رگه‌های چندفلزی Pb-Zn-Cu-Au-Ag است که بیشتر در پیرامون توده‌های نفوذی ائوسن و در پهنه‌های گسلی تشکیل شده‌اند. از مهمترین این کانسارها می‌توان به رگه‌های چندفلزی نین بجستان [۱۱]، رگه‌های روی و سرب کجه فردوس [۱۲]، رگه‌های چندفلزی شوراب فردوس [۱۳] و رگه‌های پلی‌متال Cu-Sn-Pb-Zn-Au رودگز گناباد [۱۴] اشاره کرد.

از بررسی‌های انجام شده پیشین در منطقه می‌توان به پژوهش‌های تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰۰۰ گناباد [۱۵ و ۱۶] و زیرجانی‌زاده ۱۳۹۴، در قالب پایان‌نامه دوره دکتری اشاره کرد که در آن به بررسی‌های سنگ‌شناسی، زمین‌شیمی، کانی‌سازی و منشأ سنگ‌های منطقه شمال‌غرب گناباد می‌پردازد و منطقه اکتشافی کلاته کلوخ نیز در محدوده مورد مطالعه واقع شده است [۱۷]. فعالیت معدنی صورت گرفته در این محدوده در غالب یکسری اکتشافات سطحی نظیر حفر ترانشه و احداث پیشکار قابل مشاهده است. آخرین پژوهش صورت گرفته در این محدوده اکتشافی، تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی، دگرسانی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ و مطالعات زمین‌شیمی بوده است. براین اساس، کانی‌سازی عناصر مس، سرب و روی در محدوده اکتشافی کلاته کلوخ از نوع رگه‌ای معرفی شده است که درون واحدهای آتشفشانی با روند غالب شمال‌غرب-جنوب‌شرق رخ داده است [۱۸]. با توجه به اهمیت اقتصادی و علمی این منطقه، هدف این پژوهش بررسی زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و مطالعات سیالات درگیر در کانی‌کوارتز می‌باشد. این بررسی می‌تواند به شناخت بهتر فرآیندهای تشکیل ذخیره معدنی و ارزیابی پتانسیل اقتصادی منطقه منجر شود و دانش ما را درباره فرآیندهای زمین‌شناسی و کانه‌زایی در این منطقه افزایش دهد.



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی محدوده اکتشافی کلاته کلوخ در نقشه تکتونیک ایران.

زمین شناسی

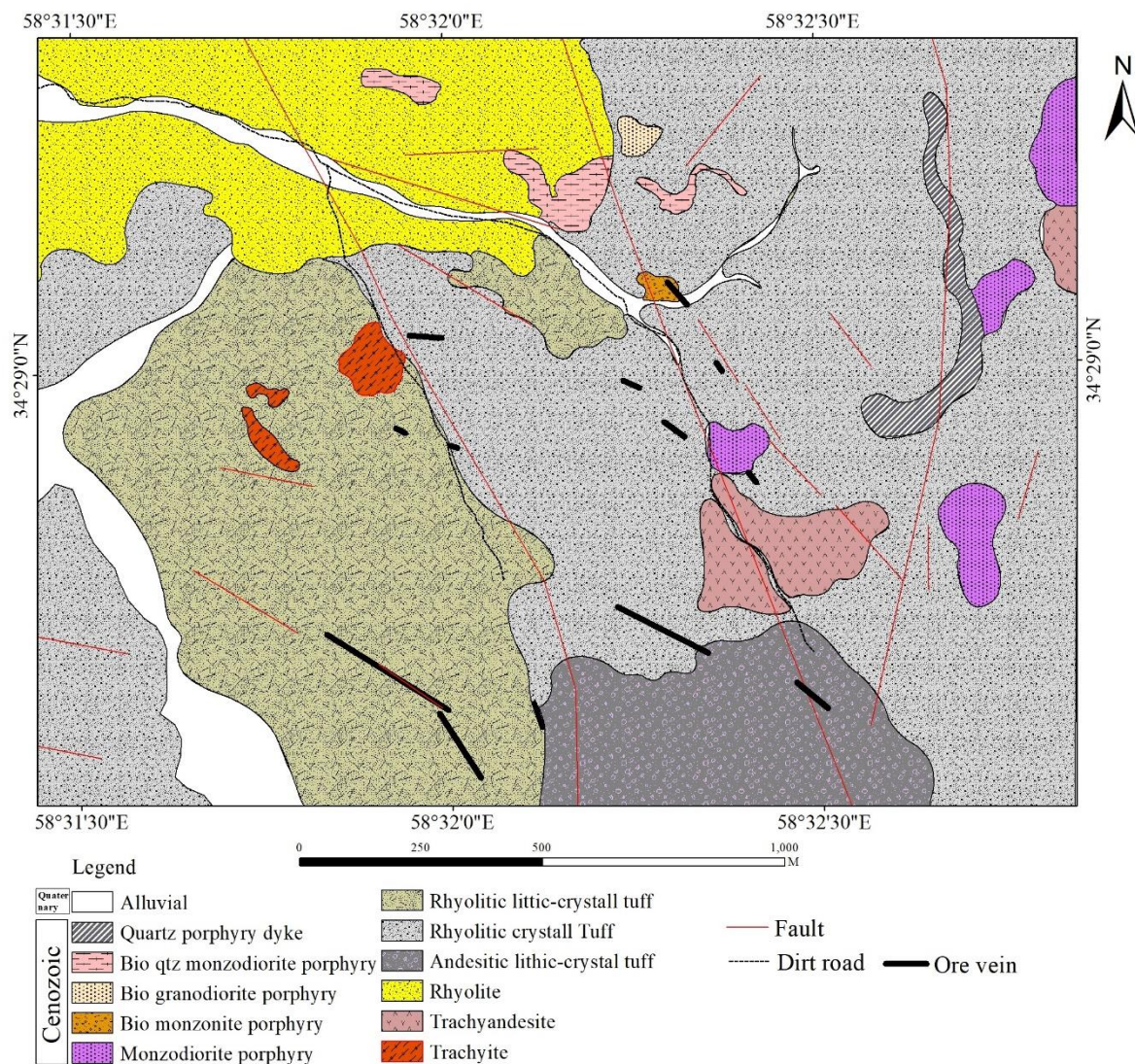
محدوده اکتشافی کلاته کلوخ در قسمت شمالی بلوک لوت و در شرق ایران قرار گرفته است. واحدهای سنگی رخنمون یافته در محدوده مورد مطالعه شامل سنگ‌های آذرین خروجی، سنگ‌های آذرین نیمه عمیق و واحدهای سنگی آذرآواری بوده و بطور کلی می‌توان آنها را به دو بخش واحدهای آتشفشانی و آذرآواری و توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق تقسیم کرد [۱۸] (شکل ۲). تمامی این

واحدها تحت تاثیر دگرسانی قرار گرفته اند و دگرسانی در این محدوده، گستره‌ای بیش از ۴ کیلومترمربع را می‌پوشاند عمده زون‌های دگرسانی پروپلیتیک، سیلیسی و آرژیلیک باشد.

واحدهای آتشفشانی و آذرآواری: این واحدها گسترش و رخنمون سطحی زیادی در منطقه دارند و شامل واحدهای آذرآواری (توف و آگلومرا)، ریولیت، تراکی‌آندزیت و تراکیت می‌باشد (شکل ۲). رخنمون ریولیت‌ها در شمال غرب منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود (شکل ۲). ریولیت‌های شمال غرب حالت جریان‌ی، لایه‌ای و در بعضی قسمت‌ها حالت قله‌ای شکل دارند. تراکی‌آندزیت‌ها در مرکز منطقه و به شکل تپه‌ماهور رخنمون دارند. رخنمون‌های کوچکی از واحد تراکیت در غرب منطقه وجود داشته که در صحرا به رنگ بنفش دیده می‌شود، مشخصه این واحد وجود بافت تراکیتی آن است.

توده‌های نیمه‌عمیق: توده‌های نفوذی و نیمه‌عمیق رخنمون یافته در منطقه بصورت استوک در قسمت‌های مختلف رخنمون داشته و شامل واحدهای بیوتیت گرانودیوریت پورفیری، مونزودیوریت پورفیری، بیوتیت مونزونیت پورفیری و بیوتیت کوارتز مونزودیوریت پورفیری می‌باشد. رخنمون واحد بیوتیت گرانودیوریت پورفیری با راستای شمالی- جنوبی در شمال محدوده اکتشافی کلاته‌کلوخ دیده می‌شود (شکل ۲). این واحد شدیداً دگرسان شده و رگچه‌های اپیدوت در نمونه دستی قابل مشاهده است. بیوتیت مونزونیت پورفیری تقریباً در مرکز منطقه کانی‌سازی مس کلاته‌کلوخ، رخنمون دارد (شکل ۲). رخنمون‌های کوچکی از بیوتیت کوارتز مونزودیوریت پورفیری در شمال منطقه و به شکل استوک وجود دارد (شکل ۲).

براساس مطالعات زیرجانی‌زاده و میری ۱۴۰۳، دگرسانی در محدوده اکتشافی کلاته‌کلوخ، منطبق بر سنگهای آتشفشانی و توده‌های نفوذی نیمه عمیق دیده می‌شود. این زون‌های دگرسانی شامل سیلیسی شدن و پروپلیتیک است. کانی‌سازی در این محدوده به صورت رگه‌ای و برش هیدروترمال مشاهده می‌شود [۱۸]. مهمترین بخش کانی‌سازی در منطقه کلاته‌کلوخ، کانی‌سازی رگه‌ای است که در سنگ میزبان آذرآواری رخ داده است، این رگه‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی محدوده اکتشافی کلاته کلوخ [۱۸].

روش مطالعه

جهت مطالعات کانه‌نگاری، تعداد ۲۰ مقطع صیقلی و نازک صیقلی از کانسنگ و باطله همراه با آن تهیه گردید و برای مطالعات سیالات درگیر ۱۰ نمونه از نمونه‌های فوق که همزمانی تشکیل کوارتز با کانی‌سازی (کانی‌های سولفیدی) محرز گردید، انتخاب شد. از نمونه‌های انتخابی ۱۰ مقطع نازک دوبر صیقل با ضخامت حدود ۲۵۰ میکرون تهیه گردید. مطالعه پتروگرافی سیالات درگیر با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مدل المپیوس در مجتمع آموزش عالی گناباد که دارای نور عبوری و انعکاسی بوده و قابلیت مطالعه همزمان سیالات درگیر و کانی‌های تیره درون آنها را دارد، صورت گرفت. پس از آن اندازه‌گیری‌های ریز دماسنجی میانبارهای سیال درون بلورهای کوارتز براساس مشاهده تغییرات فازی درون میانبار طی سرد کردن و گرم کردن در دانشگاه تربیت مدرس تهران، انجام شد. اندازه‌گیری پارامترهای دمایی به کمک دستگاه ریزحرارت‌سنج THMS600 با مدل Linkam که بر روی میکروسکوپ ZEISS

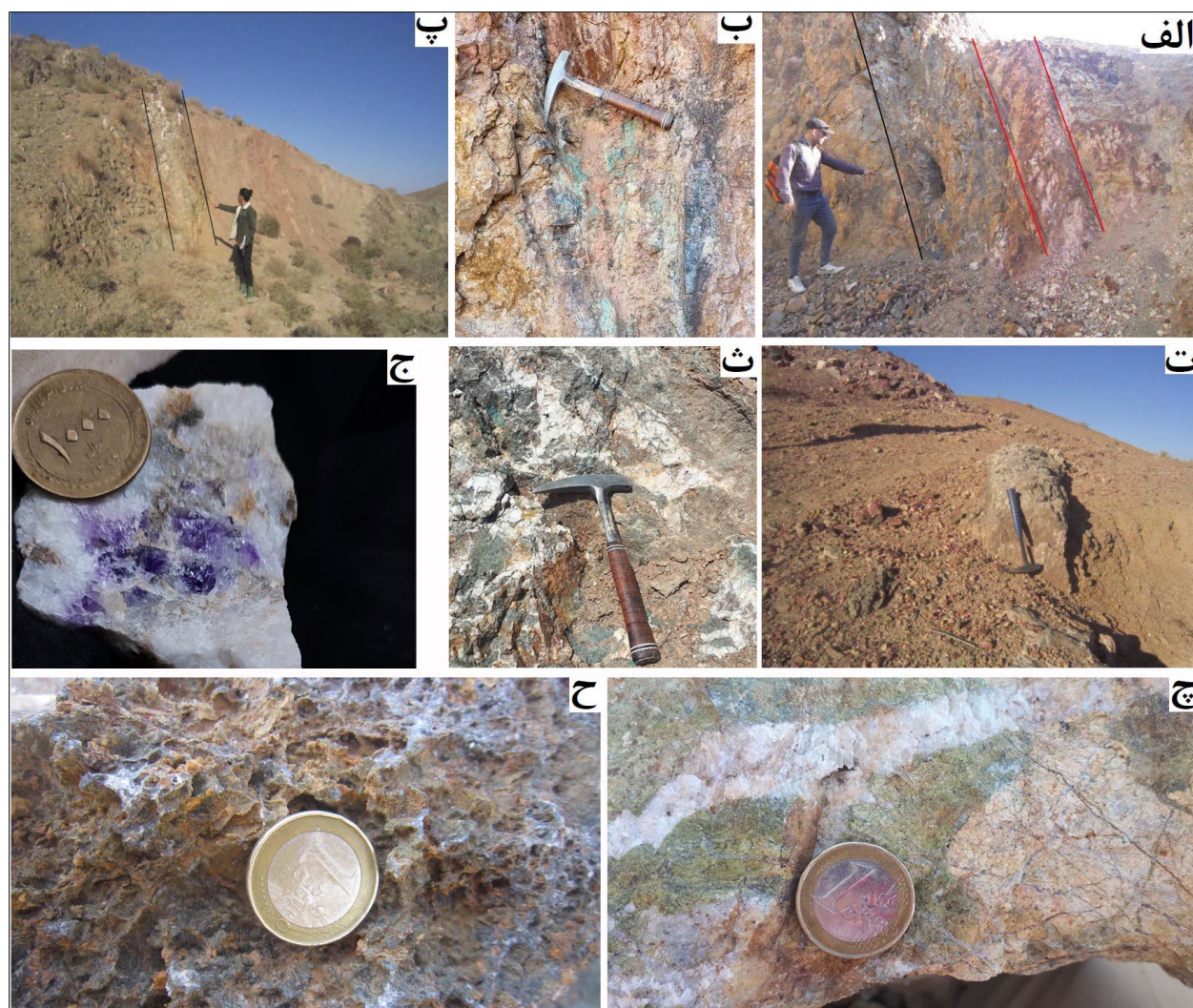
Axioplan2, imaging نصب شده است، صورت گرفته است. محاسبه شوری در میانبرهای دو فازی در سامانه NaCl- H₂O با استفاده از نرم افزار H₂O (HOKIEFLINCS-H₂O-NaCl) با روش [۱۹] تخمین زده شده است. مشخصات میانبرهای سیال در دمای اتاق با استفاده از معیارهای [۲۰] و [۲۱] ثبت شده است. همچنین نسبت‌های فاز بخار به سیال (V/L)، با استفاده از جدول استاندارد پیشنهادی [۲۱] ارزیابی شده است.

بحث و بررسی

کانی‌شناسی

کانه‌زایی در محدوده اکتشافی کلاته‌کلوخ در طول گسل‌ها، درزه‌ها و شکستگی‌ها و به میزبانی واحدهای سنگی آذرآواری به صورت رگه-رگچه‌ای و با ضخامت کمتر از ۱۰ سانتی‌متر تا بیش از ۱ متر با روند شمال غرب-جنوب شرق و با شیب ۷۵ تا نزدیک به ۹۰ درجه به سمت شمال شرق رخ داده است (شکل ۳ الف و ب).

غیر از رگه‌های حاوی کانی‌سازی، رگه‌های سیلیسی و رگه‌های کلسیت فاقد کانی‌سازی نیز در منطقه مشاهده می‌شود (شکل ۳ پ و ت). کانی‌های اصلی باطله همراه با کانی‌سازی کوارتز و کلسیت است. کوارتزهای همراه با کانی‌سازی نسل‌های مختلفی دارند. اولین نسل کوارتزهای محدوده کوارتزهای همزاد با کانی‌سازی هستند که برای مطالعات سیالات درگیر مورد استفاده قرار گرفتند و کوارتزهای شیری رنگ نسل بعدی که کانی‌سازی محدودی دارند (شکل ۳ ث). آخرین کوارتزهای منطقه نیز کوارتزهای بنفش (آمیتیست) می‌باشند که فضای خالی مرکز رگه‌ها را پر نموده است و فاقد کانی‌سازی هستند (شکل ۳ ج). از بافت‌های مهم کوارتزهای منطقه بافت شانه‌ای و کوارتز حفره‌ای می‌باشد (شکل ۳ چ و ح).



شکل ۳ الف-نمایی از رگه کانه‌دار که در زون گسلی شکل گرفته است (دید عکس به سمت جنوب‌شرق) ب-نمایی از رگچه‌های کانه‌دار که در آن کانی‌های مالاکیت و آزوریت مشاهده می‌شود پ- نمایی از رگه سیلیسی فاقد کانی‌سازی (دید عکس به سمت شمال‌غرب) ت-نمایی از رگه کلسیت فاقد کانی‌سازی ث-کوارتزهای شیری رنگ با کانی‌سازی محدود ج-کوارتز بنفش فاقد کانی‌سازی چ-بافت شانه‌ای و شکافه پرکن کوارتز ح- کوارتز حفره‌ای در نمونه دستی

در محدوده کلاته کلوخ کانه‌زایی به دو شکل اولیه و ثانویه مشاهده می‌شود. کانه‌های اولیه تشکیل دهنده کانسنگ براساس مشاهدات صحرایی و مطالعات کانه‌نگاری مقاطع صیقلی، شامل پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن و کانه‌های ثانویه شامل مالاکیت، آزوریت، کریزوکلا، کوولیت، سروزیت، گوتیت و سایر اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن است که به معرفی آنها می‌پردازیم.

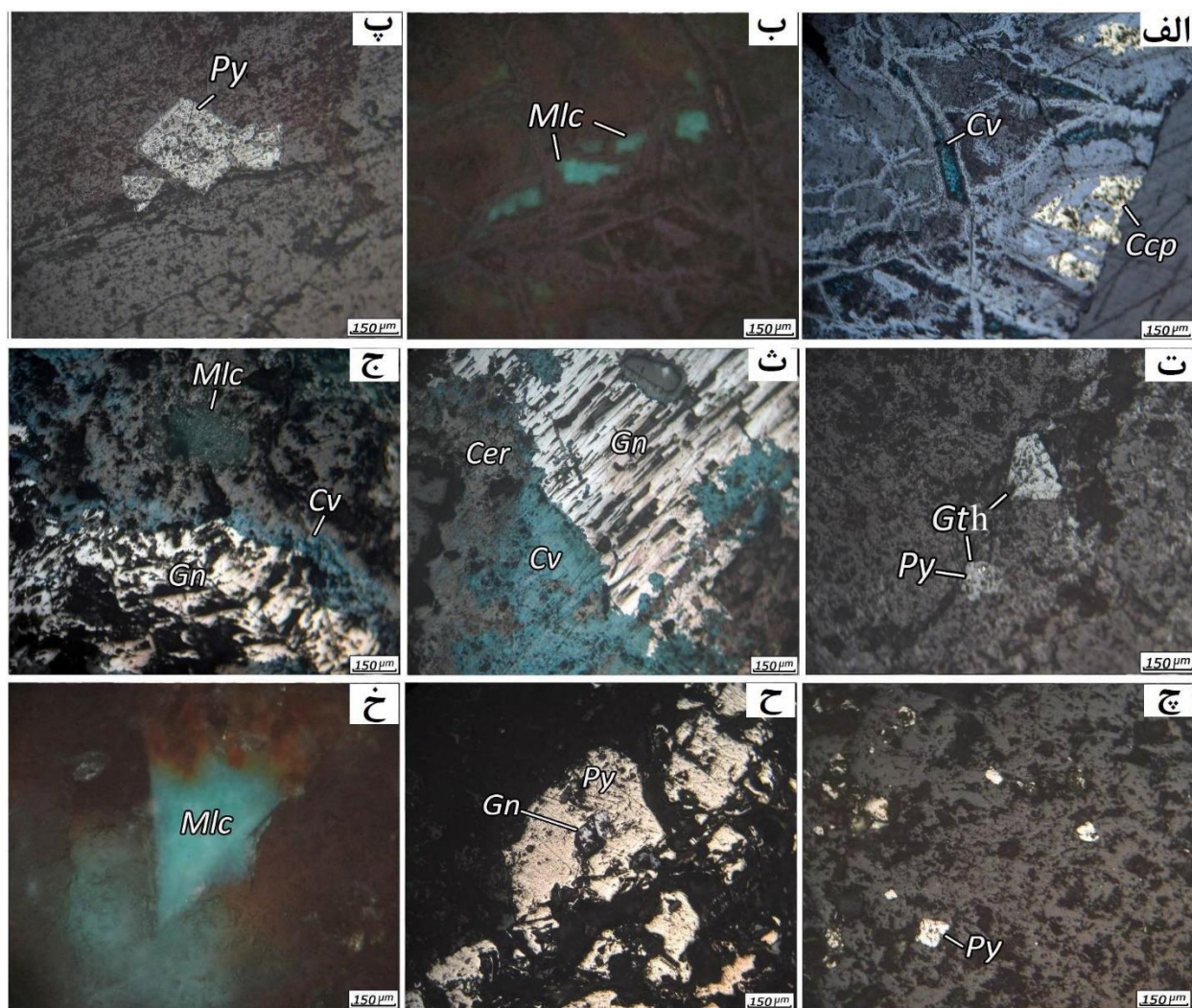
کالکوپیریت (CuFeS_2): یکی از کانه‌های فلزی اصلی در محدوده کلاته کلوخ، کالکوپیریت است. کالکوپیریت در بخش‌های سطحی که در حال حاضر در معرض دسترسی قرار دارد به فراوانی از حاشیه به کانی‌های ثانویه نظیر کوولیت، مالاکیت و گوتیت تبدیل شده است و تنها آثاری از کالکوپیریت در بخش‌های مرکزی گوتیت باقی مانده است (شکل ۴ الف). کوولیت به شکل رگچه‌های کوچک درون توده‌های گوتیت دیده می‌شود. قطعات مالاکیت نیز به شکل پراکنده درون گوتیت حضور دارند (شکل ۴ ب). گوتیت با بافت

کلوفر م عمدتاً در حاشیه کالکوپیریت دیده می‌شود. گوتیت به شکل بلورهای پراکنده و ج‌دار نیز در سنگ حضور داشته که آثار پیریت درون برخی از بلورهای گوتیت نشانه منشأ اولیه پیریت برای بلورهای و ج‌دار گوتیت است. گوتیت در این محدوده اکتشافی دارای دو منشأ، کانی‌های پیریت و کالکوپیریت است (شکل ۴ الف-ت).

گالن (PbS): در برخی رگه‌های محدوده اکتشافی کلاته کلوخ، گالن کانی فلزی اصلی مقطع را تشکیل می‌دهد و به شکل قطعات درشت توده‌ای در سنگ جایگزین شده است. ابعاد قطعات گالن به ۷-۸ میلی‌متر می‌رسد. گالن گاهی به شکل رگه‌های کوچک با ابعاد ۱ میلی‌متر نیز دیده می‌شود. گالن از حاشیه به سروزیت تبدیل شده است (شکل ۴ ث). علاوه بر سروزیت در حاشیه گالن کانی کوولیت به رنگ آبی جایگزین شده است. کوولیت در مرز بین گالن و سروسیت قرار دارد. این کانی همچنین به شکل رگه‌ای به درون گالن نفوذ کرده است. کوولیت کانی ثانویه بوده که در اطراف گالن، در اثر جان‌شینی مس به جای سرب تشکیل شده است [۲۲]. در بخش‌هایی از کانسنگ رگچه و قطعاتی از سروسیت-کوولیت دیده می‌شود و آثار کانی اولیه گالن از بین رفته است. کانی‌های ثانویه مس نظیر مالاکیت نیز به شکل قطعات با ابعاد حدود ۱ میلی‌متر در کانسنگ مشاهده می‌شود (شکل ۴ ج).

پیریت (FeS₂): کانی پیریت فراوانترین کانی فلزی در رگه‌های کانه‌دار است و به اشکال قطعات درشت توده‌ای، پراکنده و رگه‌ای مشاهده می‌شود (شکل ۴ چ). در برخی مقاطع به مقدار جزئی گالن بصورت ادخال (با ابعاد حدود ۱۰۰ میکرون) درون پیریت دیده شد (شکل ۴ ح).

مالاکیت (Cu₂CO₃(OH)₂): این کانی به شکل قطعات پرکننده حفرات و همچنین به شکل رگه‌ای در مقاطع صیقلی و در نمونه‌های سطحی بصورت گسترده مشاهده می‌شود (شکل ۴ خ).



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی (نور انعکاسی) کانه‌ها و کانی‌های موجود در محدوده معدنی الف- کانی کالکوپیریت و تبدیل آن به کوولیت و اکسیدهای آهن (xpl) ب- قطعات ملاکیت پ- گوتیت وجه‌دار که منشأ اولیه آن پیریت است (xpl) ت- کانی پیریت که از حاشیه به اکسیدهای آهن تبدیل شده است (ppl) ث- گالن و در حاشیه آن کوولیت و سرو سیت. کوولیت در حاشیه گالن و همچنین به شکل رگچه‌ای به درون گالن نفوذ کرده است (xpl) ج- ملاکیت به شکل پراکنده و در کنار آن رگچه گالن- کوولیت (xpl) چ- بلورهای پیریت بصورت پراکنده (xpl) ح- ادخال نسبتاً ریز گالن درون پیریت (xpl) خ- قطعه نسبتاً درشت ملاکیت (xpl). علائم اختصاری از [۲۳] اقتباس شده است (Gth: گوتیت، Mlc: ملاکیت، Cv: کوولیت، Ccp: کالکوپیریت، Py: پیریت، Gn: گالن، Cer: سرو سیت).

سیالات درگیر

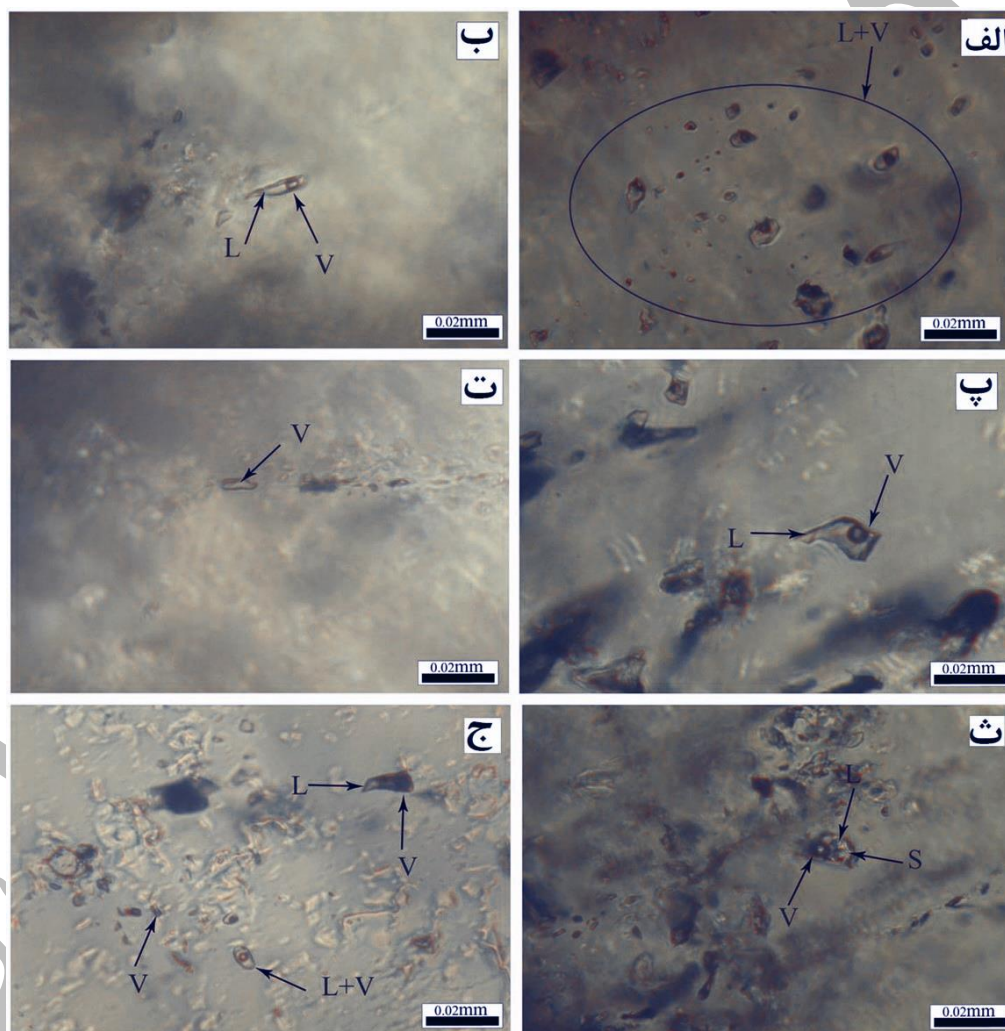
پتروگرافی سیالات درگیر

سیالات درگیر را با پارامترهای ظاهری نظیر اندازه، شکل، رنگ، شاخص انکساری و بخصوص با تنوع و تعداد فازهای موجود در دمای اتاق توصیف می‌کنند [۲۴].

طبقه‌بندی‌های مختلفی برای ساس تعداد فازهای تشکیل شده در سیالات درگیر یا نسبت‌های مختلف جامدات، مایعات و بخار موجود در آنها توسط افراد مختلف ارائه شده است. غالباً این طبقه‌بندی‌ها براساس تعداد فازها در دمای اتاق انجام می‌شود. برای

پذیرفتن این طبقه‌بندی‌ها باید در نظر داشت که یک تداوم و تسلسل ترکیبی برای سیالات زمین‌شناسی وجود دارد و به علت وجود تقسیم‌بندی‌های نسبتاً دلخواه، در 50 درصد آنها همپوشانی‌هایی بین انواع سیالات درگیر مختلف وجود خواهد داشت [۲۵].

براساس مطالعات پتروگرافی سیالات درگیر در کانی کوارتز مرتبط با کانی‌سازی، سیالات درگیر در سه گروه دو فاز مایع-گاز (LV) (غنی از فاز مایع)، چند فاز مایع-گاز-جامد (LVS) و تک فاز مایع (V) مشاهده گردید (شکل ۵). ابعاد این سیال بین ۵ تا ۱۵ میکرون و در اشکال کشیده، بیضی و بی‌نظم دیده می‌شوند.



شکل ۵ سیالات درگیر در محدوده اکتشافی کلاته کلوخ در کانی کوارتز (در دمای اتاق و نور PPL) الف- فراوانی سیالات درگیر با دو فاز مایع و گاز و با اشکال مختلف ب- سیال درگیر با دو فاز مایع و گاز به شکل میله‌ای پ- سیال درگیر با دو فاز مایع و گاز به شکل نامنظم ت- سیال درگیر تک فاز مایع-گاز ث- سیال درگیر با سه فاز مایع، گاز و جامد ج- انواع سیالات درگیر در یک نمونه شامل سیال گاز، گاز مایع و مایع گاز

میکروترمومتری سیالات درگیر

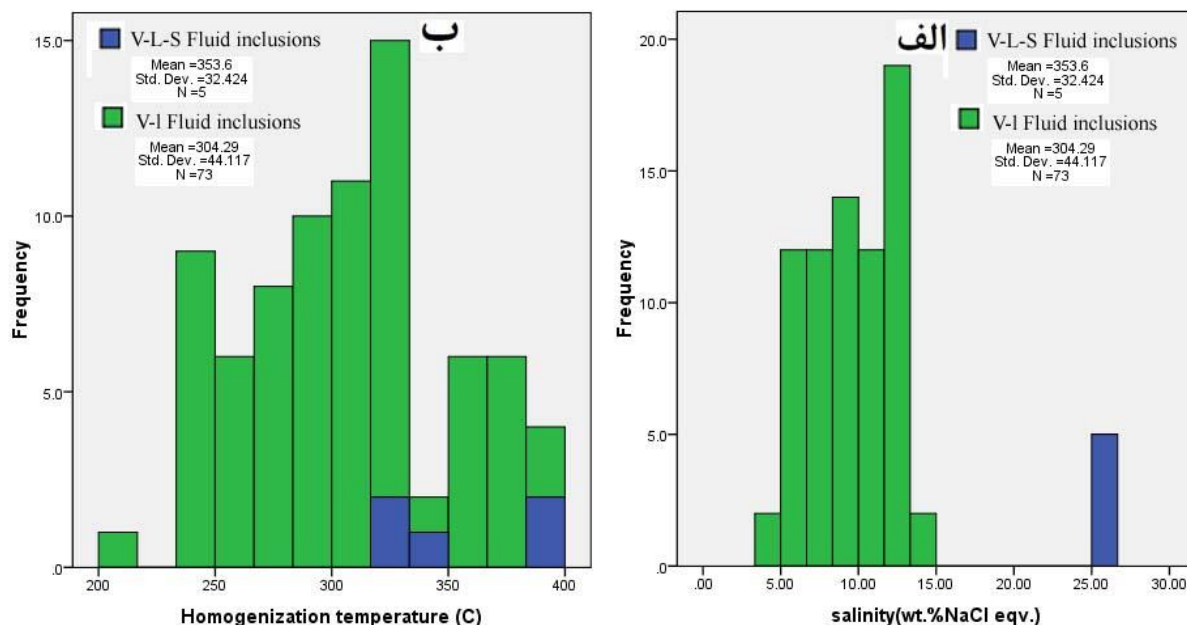
اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی برای ۷۳ میانبار سیال دو فاز ی مایع-گاز (LV) (غنی از فاز مایع) و ۵ سیال چند فاز ی مایع-گاز- جامد (LVS)، انجام شد (جدول ۱).

دماسنجی در همه سیالات درگیر به روش گرم کردن و تعیین دقیق درجه حرارت همگن شدن (Th) صورت گرفته است. در نتیجه حداقل دمای تشکیل کانی کوارتز همراه با کانی‌های سولفیدی در رگه و رگچه‌ها بدست می‌آید. برای بدست آمدن دمای واقعی تشکیل، فشار ستون چینه‌ای که در آن زمان بر روی کانی‌سازی قرار داشته است لازم می‌باشد و می‌بایست بر روی دمای همگن شدن بدست آمده، تصحیح فشار صورت گیرد. باتوجه به جایگیری سیستم‌های اپی ترمال در اعماق کم که بیشتر همراه با فشار هیدروستاتیک هستند، تاثیر فشار بر روی سیالات درگیر واقع در این محیط‌های کانی‌سازی نیز بسیار ناچیز است [۲۶]. تجمع انواع مختلف سیالات درگیر با نسبت‌های مختلف فاز بخار به مایع نشانگر پدیده جوشش می‌باشد [۲۷]. دماهای همگن شدن سیالات درگیر محدوده اکتشافی کلاته کلوخ بین ۲۱۰ تا ۳۹۴ و بطور میانگین ۳۰۶ درجه سانتی‌گراد در سئالات درگیر دوفازی و ۳۵۳ درجه سانتی‌گراد در سئالات درگیر سه فاز ی محاسبه شده است (جدول ۱ و شکل ۶). برای تعیین شوری سیالات درگیر محدوده کلاته کلوخ پس از انجماد کامل سیال درگیر و گرم کردن مجدد آن با بدست آوردن دمای شروع ذوب و تشکیل اولین قطره مایع (T_m) نوع املاح موجود در سیال و با تعیین دمایی که آخرین قطعه یخ ذوب می‌شود (T_m), مقدار شوری سیال محاسبه می‌شود. مقدار شوری با استفاده از نمودارها و جداولی که بوسیله [۲۵] ارائه شده است اندازه گیری گردیده است. نتایج مربوط به مطالعات میکروترمومتری در جدول ۱ ارائه شده است. چنان که در این جدول مشاهده می‌شود دمای اولیه (T_{fm}(°C) و نهایی ذوب یخ (T_m(°C) در سئالات درگیر دوفازی و سه فاز ی به ترتیب ۵۱/۴- و ۶/۵- و ۵۵/۳- و ۸/۹۲- می‌باشد. بر این اساس مقدار شوری در سئالات درگیر دوفازی بین ۴/۸ تا ۱۳/۵ و بطور میانگین ۹/۵ درصد، معادل درصد وزنی NaCl و مقدار شوری در سئالات درگیر سه فاز ی بطور میانگین ۲۶/۲ درصد، معادل درصد وزنی NaCl محاسبه شده است.

جدول ۱ نتایج مربوط به مطالعه سیالات درگیر در محدوده کلاته کلوخ

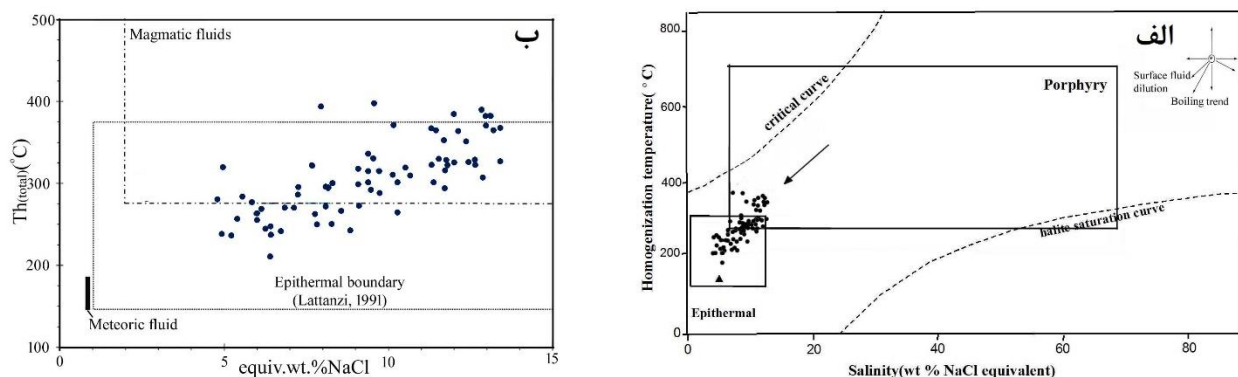
کانی میزبان	تعداد سیال درگیر	نوع میانبار	دمای یوتکتیک T _{fm} °C	دمای ذوب یخ T _m °C	میانگین دمای همگن شدن Th °C	شوری (wt.%NaCl)	دانسیته gr/cm ³
کوارتز	73	L-V	-51.4	-6.5	306	9.45	0.81
کوارتز	5	V-L-S	-55.3	-8.92	353	26.2	0.92

لازم بذکر است که شوری و دانسیته از روی اطلاعات بدست آمده در نرم افزار HOKIEFLINCS و بر طبق فرمول [۲۸] محاسبه شده است. شکل ۶ الف و ب، به ترتیب هیستوگرام فراوانی شوری سیالات درگیر و دمای همگن شدن که در نرم افزار SPSS18 ترسیم شده است به تفکیک نشان می‌دهد.



شکل ۶ الف- هیستوگرام درصد شوری در مقابل فراوانی سیالات درگیر ب- هیستوگرام دمای همگن شدن در مقابل فراوانی سیالات درگیر

با استفاده از درصد شوری و دمای همگن شدن سیالات درگیر، موقعیت نمونه‌ها در نمودار شوری-درجه حرارت همگن شدن آورده شده است (شکل ۷ الف). این نمودار محل قرارگیری سیال‌های مربوط به کانسارهای گرمابی نظیر پورفیری و اپی ترمال مشخص شده است [۲۹]. موقعیت قرارگیری نمونه‌های کلاته کلوخ عمدتاً در محدوده اپی ترمال و محدوده مشترک سیستم‌های اپی ترمال-پورفیری می‌باشد (شکل ۷ الف). برای تعیین خاستگاه سیالات کانه‌ساز موجود در میان‌بارهای سیال، براساس نتایج به دست آمده، میان‌بارهای سیال در محدوده با خاستگاه سیالات ماگمایی قرار می‌گیرند (شکل ۷ ب). موقعیت نمونه‌ها در داده‌های میکروترمومتری محدوده کلاته کلوخ با روندی مشخص در محدوده‌ای با شوری و دمای متوسط قرار گرفته‌اند. که این وضعیت بیانگر کاهش شوری و حرارت سیالات درگیر در اثر اختلاط بین یک سیال با شوری کم/دما کم با یک سیال با شوری بالا دمای بالا و یا حاصل جوشش سیال، تفسیر کرد.



شکل ۷ الف-موقعیت داده‌های میکروترمومتری محدوده کلاته کلوخ در نمودار شوری-درجه حرارت همگن شدن. نمودار با اندکی تغییر از [۲۹] ب-دمای همگن شدن کل در مقابل نمودار شوری معادل که منعکس کننده روند اختلاط سیالات درگیر در اپی ترمال کلاته کلوخ است [۳۰]، [۳۱] و [۳۲].

• برداشت

کانی‌سازی در محدوده اکتشافی کلاته کلوخ، در جایگاه تکتونیکی زون فرورانش حاشیه فعال قاره در ارتباط با واحدهای آتشفشانی و توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق و دگرسانی‌های مرتبط با آنها شکل گرفته است [۳۳]. واحدهای ولکانیکی منطقه، دارای ترکیب اسیدی (ریولیت) و حدواسط (تراکیت و تراکی‌اندزیت) بوده که توده‌های نفوذی عمدتاً حدواسط با ترکیب مونزونیت، مونزوئوریت و -گرانودیوریت پورفیری در آن نفوذ کرده، و موجب دگرسانی و کانی‌سازی شده‌اند. کانی‌سازی سولفیدی و اکسیدهای آهن بصورت رگه‌ای مشاهده می‌شوند. مطالعات کانی‌شناسی حضور کانی‌های پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت را نشان می‌دهد که به شکل اولیه از سیالات کانه‌ساز تشکیل شده‌اند، از دیگر کانی‌های موجود می‌توان به کانی‌های ثانویه از جمله کوولیت، مالاکیت، آزوریت، کریزوکولا، سروزیت و اکسیدهای آهن که در اثر فرایند سوپرژن تشکیل شدند، اشاره کرد. حضور، گسترش و شدت میزان اکسیدهای آهن پراکنده (تا ۱۵ درصد) حاکی از قرارگیری زون‌های سولفیدی با عیار بالا در معرض هوازدگی و اسیدشویی می‌باشد. حضور دگرسانی از نظر نوع، گسترش و شکل، همچنین خصوصیات کانی‌سازی در این منطقه مشابه با سیستم‌های رگه‌ای اپی ترمال است [۳۴].

با عنایت به دمای تشکیل رگه‌های کوارتزی در محدوده کلاته کلوخ که براساس مطالعه سیالات درگیر بطور میانگین ۳۰۶ درجه سانتی‌گراد بدست آمده است، بنظر می‌رسد کمپلکس حمل کننده مس در این محدوده بدلیل کاهش درجه حرارت در اثر اختلاط با آبهای جوی فرورو (شکل ۷-الف) و کاهش فشار بدلیل ورود سیال گرمابی به زون‌های گسلی و وقوع فرآیند جوشش نهشته شده است.

کانی‌سازی در این رگه‌ها بنا به دلایل زیر از نوع رگه‌ای چندفلزی اپی ترمال و احتمالاً در ارتباط با یک سیستم مس پورفیری می‌باشد:

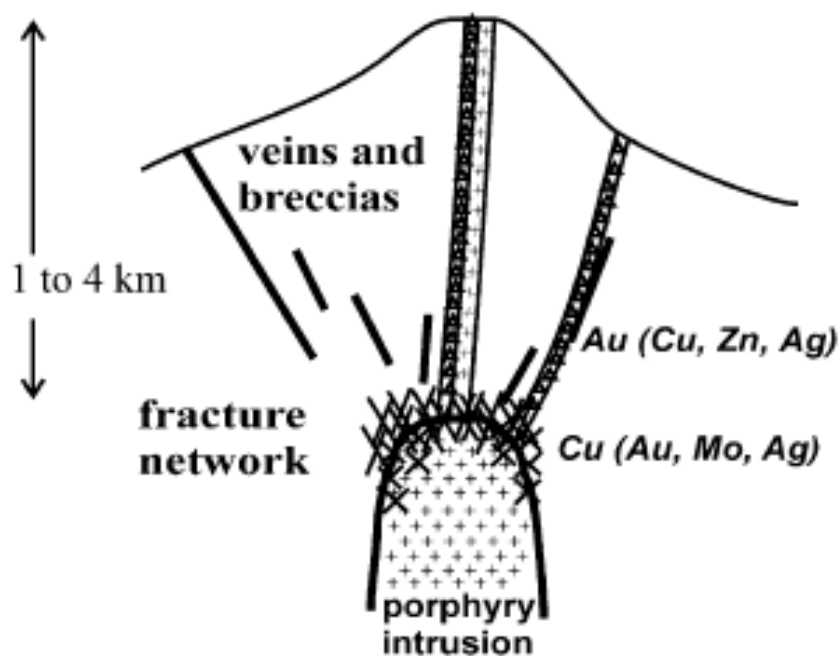
- ۱- توده‌های نیمه‌عمیق حدواسط پورفیری و توده‌های آتشفشانی مرتبط با کانی‌سازی در محدوده مشاهده می‌شوند.

- ۲- کانی‌سازی به صورت رگه‌ای در سنگ‌های میزبان قرار دارند. رگه‌ها معمولاً به شکل خطوط یا شکاف‌هایی در سنگ‌ها هستند که از مواد معدنی پر شده‌اند.

- ۳- مجموعه کانی هیپوژن که شامل پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن و بافت‌های پرکننده فضای خالی و جان‌نشینی دیده می‌شود.

۴- دما و شوری نسبتاً بالای سیالات درگیر. دماهای همگن شدن سیالات درگیر کلاته کلوخ بین ۲۱۰ تا ۳۹۴ و بطور میانگین ۳۰۶ درجه سانتی‌گراد و مقدار شوری بین ۴/۸ تا ۱۳/۵ و بطور میانگین ۹/۵ درصد، معادل درصد وزنی NaCl محاسبه شده است که در محدوده ذخایر اپی‌ترمال قرار می‌گیرد (شکل ۷).

ذخایر رگه‌ای اپی‌ترمال و ذخایر پورفیری از یک سیستم گرمایی مشترک منشأ می‌گیرند و به دلیل تفاوت در شرایط فشار و دما، در عمق‌های مختلفی از زمین شکل می‌گیرند [۳۵]. کانی‌سازی رگه‌ای همراه با زون‌های گسترده دگرسانی که با تیپ رگه‌ای همخوانی ندارد و نمایانگر فعالیت وسیع سیالات گرمایی در منطقه بوده و شرایط را برای کانی‌سازی از نوع پورفیری مناسب ساخته است. بنابراین کانی‌سازی رگه‌ای می‌تواند نشانه‌ای از کانی‌سازی وسیع پورفیری مرتبط با توده‌های نفوذی در منطقه باشد چرا که در حال حاضر ارتباط مکانی و زمانی بین ذخایر رگه‌ای اپی‌ترمال و ذخایر مس-طلا پورفیری در مناطق مختلف جهان، به اثبات رسیده است [۳۵]. زونهای گسترده دگرسانی آرژلیک، پروپلیتیک و سیلیسی و کانی‌سازی رگه‌ای، مشخص می‌سازد که سطح فرسایش فعلی، درحقیقت بخش سیستم رگه‌ای اپی‌ترمال و احتمالاً بخش بالایی یک سیستم پورفیری می‌باشد که لازم است مطالعات اکتشافی ادامه پیدا کند (شکل ۸).



شکل ۸ دیاگرام شماتیک از سیستم مس پورفیری، و ارتباط آن با رگه‌های اپی‌ترمال چند فلزی، اقتباس از [۳۶]

- [1] Kesler S. E., "Mineral Resources", Economics and the Environment (Macmillan, New York (1994).
- [2] Kesler, S.E., "Mineral supply and demand into the 21st century. In proceedings for a workshop on deposit modeling, mineral resource assessment, and their role in sustainable development", US Geological Survey circular 1294 (2007) 55-62.
- [3] Aghanabati S. A., "Geology of Iran (in Persian)", Geological Survey of Iran, Tehran, (2004), 586pp.
- [4] Malekzadeh Shafaroudi A., "Geology, mineralization, alteration, geochemistry, microthermometry, radiogenic isotopes, petrogenesis of intrusive rocks and determination of source of mineralization in Maherabad and Khopik prospect area, South Khorasan Province (in Persian)", Unpublished PhD Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, (2009), 536 pp.
- [5] Abdi, M., Karimpour, M. H., "Geology, alteration, mineralization, petrogenesis, geochronology, geochemistry and airborne geophysics of Kuh Shah prospecting area, SW Birjand (in Persian)", Journal of Economic Geology, 4(1), (2012), 77-107.
<https://doi.org/10.22067/econg.v4i1.13394>
- [6] Arjmandzadeh, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., Medina, J., Homam, S.M., "Sr-Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut Block, Eastern Iran)", Journal of Asian Earth Sciences 41(3), (2011), 283-296.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.02.014>
- [7] Arjmandzadeh R., Santos J. F., "Sr-Nd isotope geochemistry and tectonomagmatic setting of the Dehsalm Cu-Mo porphyry mineralizing intrusive from Lut Block, eastern Iran". Int. Journal of Earth Sciences 103, (2014), 123-140.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00531-013-0959-4>
- [8] Miri Beydokhti R., Karimpour M.H., Mazaheri S.A., "Studies of remote sensing, geology, alteration, mineralization and geochemistry of Balazard copper-gold prospecting area, west of Nehbandan (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 22(3), (2014), 459-470.
<http://ijcm.ir/article-1-227-fa.html>
- [9] Almasi A., Miri Beydokhti R., Karimpour M.H., Mazaheri S.A., "An approach to the genesis of Mahoor copper deposit, southwest of Nehbandan, based on mineralogy, fluid inclusions and sulfur isotopes studies (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 29 (3), (2021), 619-636.
<http://ijcm.ir/article-1-1652-fa.html>
- [10] Javidi Moghaddam M., Karimpour M. H., Ebrahimi Nasrabadi K., Haidarian Shahri M. R., Malekzadeh Shafaroudi A., "Mineralogy, Geochemistry, Fluid Inclusion and Oxygen Isotope Investigations of Epithermal Cu $\pm$ Ag Veins of the Khur Area, Lut Block, Eastern Iran", Acta Geologica Sinica 92(3), (2018), 1139-1156.
<https://doi.org/10.1111/1755-6724.13596>
- [11] Hadizadeh, H., Calagari, A., Nezafati, N., Mollaei, H., "Geology, Petrography, Alteration, and Mineralization in Neian Polymetallic (Pb-Zn-Cu-Au-Ag) Deposit, Bejestan, Northwest of Lut Block, East of Iran", Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 24(94), (2015), 315-329.
<https://doi.org/10.22071/gsj.2015.42950>
- [12] Zirjanizadeh S, Miri bedokhti R., "Geology, mineralogy and fluid inclusion studies of the Kajah deposit, northwest of Ferdows, South Khorasan", 32 (2), (2024), 275-286.
<http://ijcm.ir/article-1-1861-fa.html>
- [13] Mehrabi B., Tale Fazel E., "The role of magmatic and meteoric water mixing in mineralization of Shurab polymetal ore deposit South of Ferdows: isotope geochemistry and microthermometry evidences", 19 (1), 2011, 121-130.
<http://ijcm.ir/article-1-472-fa.html>

[14] Hajimirzajan, H., Karimpour, M. H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Haidarian Shahri, M. R., Hamooni, S. J., "Compilation of geology, mineralization, geochemistry and geophysical study of IP/RS and ground magnetic survey at Roudgaz area, southeast of Gonabad, Khorasan Razavi province", *Journal of Economic Geology*, 5(1), (2013), 117-136.

[doi: 10.22067/econg.v5i1.22916](https://doi.org/10.22067/econg.v5i1.22916)

[15] Alavi Naini M., "Geological map of Gonabad, scale 1:250000", Geological survey of Iran (1963).

[16] Ghaemi, F., Shahrivar, H., "Geological Map of Gonabad, scale 1:100000", geological survey of Iran, (2004).

[17] Zirjanizadeh S., "Mineralogy, geochemistry and petrogenesis igneous rocks in the northwest of Gonabad (in Persian)", Unpublished PhD Thesis, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran, (2015), 259pp.

[18] Zirjanizadeh S., Miri Beydokhti R., "Geological, alteration, mineralogy and geochemical studies of the Copper deposit in the Kalatehno prospect area, northwest of Gonabad (Khorasan Razavi province)", *Journal of Economic Geology*, 16(3), (2024), 1-22.

[doi: 10.22067/econg.2024.1118](https://doi.org/10.22067/econg.2024.1118)

[19] Steele-MacInnis, M., Lecumberri-Sanchez, P. and Bodnar, R.J., "HOKIEFLINCS-H₂O-NaCl: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H₂O– NaCl" *Computer in Geosciences*, 49, (2012), 334–337.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.01.022>

[20] Lecumberri-Sanchez P., Steel-MacInnis M., Bodnar R.J., "A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 92, (2012), 14–22.

<https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.05.044>

[21] Shepherd, T. J., Rankin, A. H., M Alderton, D. H., "A practical guide to fluid inclusion studies", New York, Blackie, (1985), p.p. 239.

[22] Bao Z., Tom Al., Couillard M., Poirier G., Bain G., Shrimpton H. K., Finrock Y.Z., Lanzirotti A., Paktunc D., Saurette E., Hu Y., Ptacek C.G, Blowes D.W, 2021, A cross scale investigation of galena oxidation and controls on mobilization of lead in mine waste rock, *Journal of Hazardous Materials* 412(15), 125130.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125130>

[23] Whitney, D.L., Evans, B.W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", *American Mineralogist*, 95(1), (2010), 277-279.

<https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>

[24] Alfons M., Ulrich F., "Fluid inclusion petrography", *Lithos*, 55 (2001), 27-47.

[https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00037-2)

[25] Sheppherd T.J., Rankin A.H., Alderton D.H.M., "A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies", Blackie and Son, (1985), 239.

[26] Ruggieri G., Lattoazi P., Luxoro S., Dessi R., Benvenuti M., Tunelli G., "Geology, mineralogy, and fluid inclusion data of the Furtei high-sulfidation gold deposit, Sardinia, Italy" *Economic Geology*, 92 (1997) 1–19.

<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.92.1.1>

[27] Kouhestani H., Mokhtari M. A. A., Qin K., Xianan Zhang, "Genesis of the Abbasabad epithermal base metal deposit, NW Iran: Evidences from ore geology, fluid inclusion and O–S isotopes", *Ore Geology Reviews*, 126, (2020), 103752.

<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103752>

[28] Brown P. E., Lamb W. M., "P-V-T properties of fluids in the system H₂O-CO₂-NaCl: New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies", *Geochemical Acta*, 53 (1989) 1209-1221.

[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90057-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90057-4)

- [29] Wilkinson J. J., "Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits", *Lithos* 55 (2001) 229-272.
[https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)
- [30] Hedenquist, J.W., Arribas, A., "Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: far southeast Lepanto porphyry and epithermal Cu–Au deposits, Philippines", *Econ. Geol.* 93, (1998) 373–404.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.4.373>
- [31] Lattanzi, P., "Applications of fluid inclusions in the study and exploration of mineral deposits", *Eur. J. Mineral.* 3, (1991) 689–697.
[https://doi.org/10.1016/0375-6742\(91\)90068-6](https://doi.org/10.1016/0375-6742(91)90068-6)
- [32] Naden, J., Killias, S.P., Darbyshire, D.P.F., "Active geothermal system with entrained seawater as modern analogs for transitional volcanic-hosted massive sulfide and continental magmato-hydrothermal mineralization: the example of Milos Island, Greece", *Geology* 33, (2005) 541–544.
<https://doi.org/10.1130/G21307.1>
- [33] Zirjanizadeh, S., Karimpour, M. H., Ebrahimi Nasrabadi, K., & Santos, J. F., "Petrography, Geochemistry and Petrogenesis of Volcanic Rocks, NW Ghonabad, Iran", *Journal of Economic Geology*, 8(1), (2016), 265-282.
[doi: 10.22067/econg.v8i1.48865](https://doi.org/10.22067/econg.v8i1.48865)
- [34] Sillitoe R. H., Hedenquist J. W., "Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-Fluid Compositions, and Epithermal Precious Metal Deposit", *Society of Economic Geologists* 13 (2005) 1-29.
<https://doi.org/10.5382/SP.10.16>
- [35] Sillitoe, R. H., "Porphyry copper systems", *Economic geology*, 105(1), (2010) 3-41.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- [36] Cooke D.R., Hollings P., Walshe J.L., "Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls", *Economic Geology* 100 (2005) 801–818.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.5.801>