



بررسی کانی‌سازی و ویژگی‌های میان‌بارهای سیال در رگه- رگچه‌های طلا دار با میزبان رسوبی در قره کند، جنوب شرق مراغه، آذربایجان شرقی

فاطمه حسنی سوقی^{۱*}، علی اصغر کلاگری^۱ و قهرمان سهرابی^۲

(۱) گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

(۲) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۲۴، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۱۳

چکیده

منطقه قره کند در فاصله ۲۵ کیلومتری جنوب شرق شهرستان مراغه در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. کانی‌سازی در منطقه قره کند به صورت رگه- رگچه‌ای در سنگ‌های میزبان رسوبی رخ داده است. دو مرحله کانه‌زایی در منطقه قره کند قابل تفکیک هستند. در مرحله اول، رگه- رگچه‌های کوارتزی هم‌زمان با فرایندهای دگرسانی و کانی‌سازی طی سه زیرمرحله مجزا (پیشین، میانی و پسین) توسعه یافته‌اند. بلورهای کوارتز در رگه- رگچه‌های کوارتزی، بافت‌های برشی، جعبه‌ای، دروزی و شانه‌ای را به نمایش می‌گذارند. طی مرحله دوم، رگه- رگچه‌های باریتی شکل گرفته‌اند. دگرسانی درون‌زاد اغلب به صورت توسعه هاله‌های سیلیسی که جانشین سنگ‌های میزبان رسوبی در دیواره و اطراف رگه- رگچه‌های کوارتزی شده‌اند، توسعه یافته‌اند. کانه‌زایی سولفیدی (گالن، اسفالریت، پیریت و کالکوپیریت) و طلا در رگچه‌ها و ریزرگچه‌های کوارتزی زیرمرحله پسین متجلی می‌شوند. گوتیت، هماتیت، ژاروسیت، مالاکیت و آزوریت در زون اکسیدان و سولفیدهای ثانویه مس (کولیت، کالکوسیت و دیژنیت) در زون برون‌زاد تشکیل شده‌اند. میان‌بارهای سیال در بلورهای کوارتز زیرمرحله پسین مورد بررسی قرار گرفته و بر اساس محتوای فازهای اصلی، به سه نوع دوفازی غنی از مایع، تک‌فاز گازی و دوفازی غنی از گاز طبقه‌بندی شده‌اند. مقادیر دمای همگن شدن میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از مایع در محدوده دمایی ۸۰ تا ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. دماهای ذوب نهایی یخ از ۹/۱- تا ۳/۷- درجه سانتی‌گراد متغیر بوده که منطبق با شوری‌هایی بین ۶ تا ۱۳ درصد وزنی معادل نمک طعام هستند. بر اساس یافته‌های ریزدماسنجی، رخداد جوشش و سرد شدن ساده مؤثرترین سازوکارهای نهشت کانی‌های کانسنگی و باطله در قره کند تشخیص داده شدند. همچنین بررسی‌های ریزدماسنجی نشان دادند که لیگاند‌های کمپلکس‌ساز بی‌سولفیدی به احتمال زیاد نقشی مهم در حمل فلزات کانسنگی (به‌ویژه طلا) ایفا کرده‌اند. ویژگی‌های زمین‌شناسی، یافته‌های میان‌بارهای سیال، کانی‌شناسی و بافت کانی‌های کدر و باطله در رگه- رگچه‌های کوارتز و باریت نشان‌دهنده آن است که کانه‌زایی در قره کند از قسم اپی‌ترمال نوع سولفید کم است.

واژه‌های کلیدی: میان‌بار سیال، کانه‌زایی طلا، اپی‌ترمال، قره کند، مراغه

مقدمه

کانه‌زایی طلائی مرتبط با رگه- رگچه‌های کوارتزی با میزبان سنگ رسوبی در جنوب شرق مراغه (قره‌کند)، از قسم اپی‌ترمال نوع سولفید کم با میزبان سنگ رسوبی (آهک و شیل) است (Sohrabi et al., 2017). در این پژوهش، زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری، کانه‌زایی، دگرسانی، ویژگی‌های میان‌بارهای سیال و در نهایت شرایط فیزیکوشیمیایی سیالات کانه‌ساز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین در این پژوهش، مشخصات رگه- رگچه‌های کوارتزی طلادار در منطقه قره‌کند از نظر زمانی و مکانی به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش می‌تواند به اکتشاف و شناسایی زون‌های طلادار مناطق مشابه دیگر در کشور کمک کند.

زمین‌شناسی

منطقه قره‌کند در فاصله ۲۵ کیلومتری جنوب شرق شهرستان مراغه در استان آذربایجان شرقی (شکل ۱- A) و در منطقه فلززایی تکاب واقع شده است. طبق تقسیمات پهنه‌های ساختاری ایران (Stocklin, 1968)، این منطقه در جنوب کوه آتشفشان سهند و در زون ایران مرکزی و از نظر موقعیت زمین‌شناسی بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ مراغه (Alavi and Shahrabi, 1980) با مختصات عرض جغرافیایی $37^{\circ} 11' 10''$ تا $37^{\circ} 12' 00''$ شمالی و طول جغرافیایی $46^{\circ} 22' 10''$ تا $46^{\circ} 23' 23''$ شرقی قرار گرفته است. کارآمدترین و متنوع‌ترین فازهای کانی‌سازی (به‌خصوص طلا) در منطقه تکاب، در ترشیری و به‌طور عمده در الیگومیو سن و میو سن- پلیوسن رخ داده‌اند (Maghsoudi et al., 2004). در این دوره‌های زمانی آثار شدیدترین فعالیت‌های ماگمایی (اعم از آتشفشانی و نفوذی‌های کوچک اسیدی تا حدواسط) را می‌توان در منطقه شاهد بود (Maghsoudi et al., 2004) که بقایای آنها هنوز به صورت چشمه‌های آب گرم قابل مشاهده هستند. کانه‌زایی‌ها در منطقه تکاب، در ارتباط با محلول‌های گرمابی وابسته به توده‌های آذرین نفوذی عمیق و نیمه‌عمیق ترشیری هستند (Maghsoudi

et al., 2004). این توده‌ها که در پیکره سنگ‌های مختلف با ترکیبات متفاوت نفوذ کرده‌اند، کانی‌سازی مختلف را از نوع رگه- رگچه، رگه‌ای پلی‌متال، کارلین و گاهی پورفیری تشکیل داده‌اند (Maghsoudi et al., 2004). کانسارهای طلائی زرشوران (Mehrabi et al., 1999; Asadi et al., 2000)، آق‌دره (Daliran, 2008) و توزلار (Heidari et al., 2015) از جمله این کانه‌زایی‌ها هستند. در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ مراغه (Alavi and Shahrabi, 1980)، سن نهشته‌های رسوبی منطقه قره‌کند، از ژوراسیک تا کرتاسه در نظر گرفته شده است. در شرق روستای قره‌کند، سنگ‌های آتشفشانی ائوسن با مرز عادی بر روی این نهشته‌ها قرار می‌گیرند. همچنین در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ مراغه (Alavi and Shahrabi, 1980)، گسل یا عارضه ساختاری خاصی مربوط به منطقه مورد بررسی گزارش نشده است. بر اساس اطلاعات موجود در این ورقه، واحدهای کامبرین تا سنوزوئیک پی سنگ این منطقه بوده و واحدهای آتشفشانی منطقه، به‌ویژه سهند، از داخل این مجموعه سربر آورده‌اند.

روش مطالعه

بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش شامل دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی هستند. بررسی‌های صحرایی شامل بازدید و پیمایش‌های صحرایی، ثبت مشخصات سنگ‌شناسی در سطح برون‌زدها، برداشت نمونه‌های سنگی و کانسنگی (حدود ۴۰ عدد) از پهنه‌های کانه‌زایی و سنگ‌های میزبان و در نهایت تهیه نقشه زمین‌شناسی (۱:۵۰۰۰) است. در بخش آزمایشگاهی، ۸ عدد مقطع نازک و ۹ عدد مقطع نازک صیقلی در کارگاه‌های سنگ‌بری دانشکده علوم طبیعی دانشگاه تبریز و شرکت ریز کاوان منابع زمین زنجان، تهیه‌شد. بررسی‌های پتروگرافی و مینرالوگرافی بر روی مقاطع تهیه‌شده، در آزمایشگاه زمین‌شناسی دانشکده علوم پایه دانشگاه محقق اردبیلی (اردبیل) انجام‌شد. تعداد ۸ مقطع دوبر صیقل (به ضخامت ۱۰۰ میکرون) نیز از رگه‌های کوارتزی و باریتی، برای بررسی‌های ریزدماسنجی

(میان‌بارهای سیال) در شرکت ریز کاوان منابع زمین زنجان، تهیه شد. بررسی‌های پتروگرافی اولیه بر روی مقاطع دوبر صیقل با استفاده از میکروسکوپ Olympus مدل BX50 و با لنز 100X در آزمایشگاه گروه زمین‌شناسی دانشگاه پیام نور تبریز انجام شد و در نهایت تعداد ۲ عدد از مقاطع ذکر شده، برای بررسی‌های ریزدما سنجی، مناسب تشخیص داده شد. برای انجام بررسی‌های ریزدما سنجی از دستگاه Linkam مدل THMSG600 نصب شده بر روی میکروسکوپ Olympus، استفاده شد. این سیستم قابلیت تغییر حرارت از ۶۰۰+ تا ۱۹۰- درجه سانتی‌گراد را داراست. کالیبراسیون دستگاه با استفاده از استاندارد های نیترا ت سدیم با نقطه ذوب ۳۰۶/۸+ درجه سانتی‌گراد و تتراکلرید کربن با نقطه ذوب ۲۲/۹۹- درجه سانتی‌گراد انجام شد.

سنگ‌نگاری

واحدهای سنگی رخنمون یافته در منطقه قره‌کند بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ مراغه شامل سنگ‌های رسوبی (کربناته و تخریبی) و آذرین هستند که در ادامه به بررسی ویژگی‌های صحرایی و میکروسکوپی آنها پرداخته خواهد شد.

واحد رسوبی ژورا سیک- کرتاسه: این واحد به‌عنوان میزبان رگه-رگچه‌های کانه‌دار از گسترش زیادی در منطقه برخوردار است که شامل تناوبی از آهک چرت‌دار، شیل قرمز، مارن و ماسه‌سنگ است (شکل‌های B-۱ و ۲) (Alavi and Shahrabi, 1980). آهک‌های این واحد در نمونه دستی به رنگ زرد نخودی بوده و گاهی حاوی رگچه‌هایی از اکسیدهای آهن هستند. در زیر میکروسکوپ، این سنگ‌ها حاوی ریزبلورهای کلسیت و میکروفسیل‌های فرامینفر (Alavi and Shahrabi, 1980) بوده که توسط رگچه‌های کوارتز، دولومیت و اکسیدهای آهن قطع شده‌اند (شکل A-۳).

مارن‌ها، در نمونه دستی به رنگ سفید متمایل به خاکستری روشن دیده می‌شوند. در زیر میکروسکوپ خیلی دانه‌ریز بوده و حاوی حفره‌های ثانویه هستند که گاه توسط مواد سیلیسی

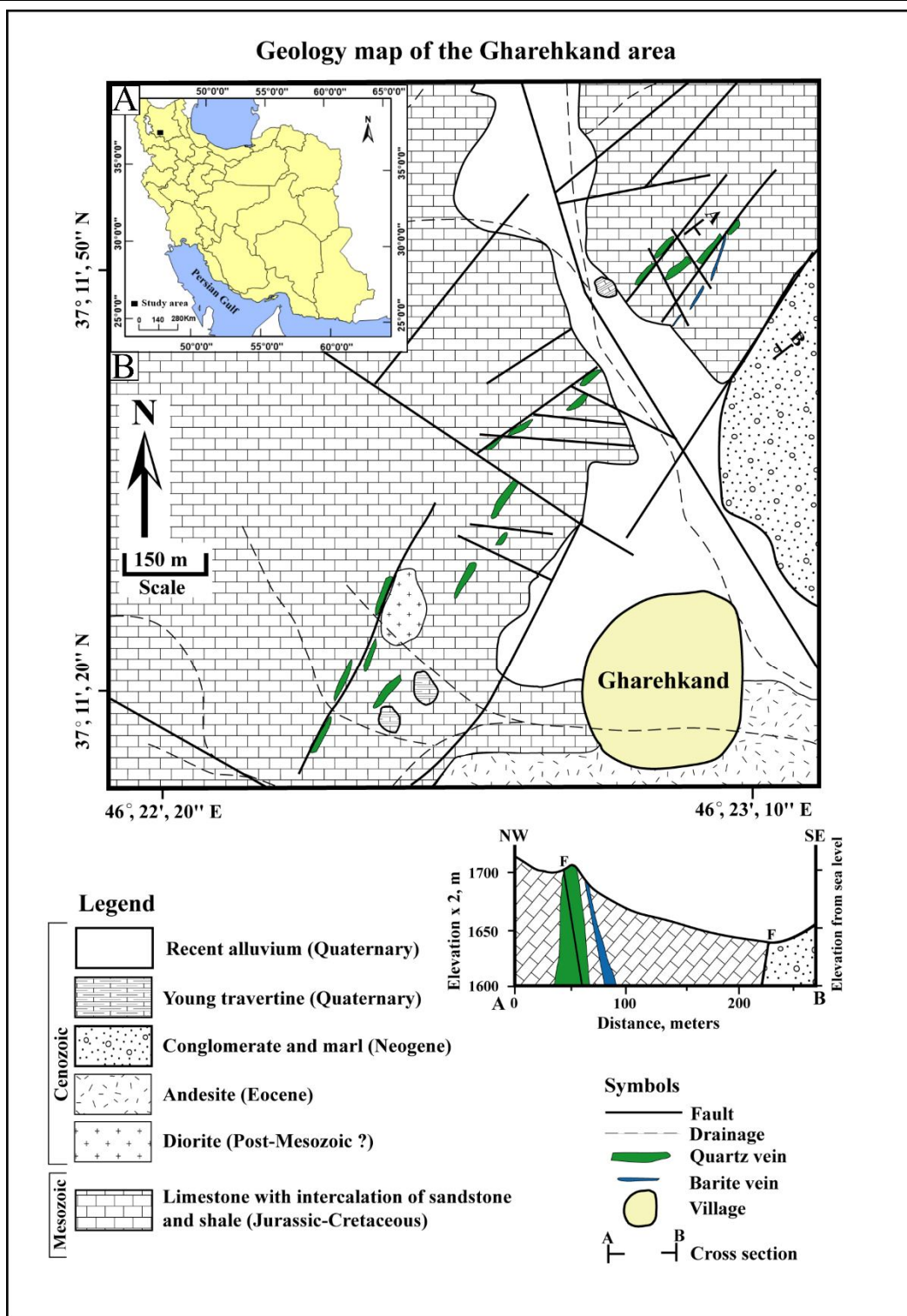
(کوارتز و کلسدون) پر شده‌اند (شکل B-۳).

ماسه‌سنگ‌ها، در نمونه دستی به رنگ قرمز تا قهوه‌ای بوده و حاوی رگچه‌های کوارتزی هستند. در مقاطع میکروسکوپی، این سنگ‌ها حاوی ذرات تخریبی کوارتز، فلدسپار و خرده‌سنگ هستند. ذرات فلدسپار بیش از ۲۵ درصد حجمی سنگ را تشکیل داده و در بیشتر موارد به کانی‌های رسی دگرسان شده‌اند (شکل C-۳). با توجه به مقدار زیاد ذرات فلدسپار (>۲۵٪) می‌توان نام این سنگ را آرکوز نیز در نظر گرفت.

توده‌های نفوذی: سنگ‌های این توده در نمونه دستی به رنگ سبز تیره تا خاکستری بوده و از نظر ترکیبی در حد دیوریت هستند. این سنگ‌ها در زیر میکروسکوپ دارای بافت گرانولار تا پورفیری بوده و از کانی‌های اولیه پیروکسن، آمفیبول، بیوتیت و پلاژیوکلاز و کانی‌های ثانویه سریسیت، کلریت، کلسیت، کانی‌های رسی و کانی‌های کدر تشکیل شده‌اند. پلاژیوکلازها (۵۰ تا ۶۰ درصد) به صورت درشت‌بلورهای شکل‌دار بوده و ماکل‌های پلی سنتتیک و گاه کارلسباد نشان می‌دهند و اغلب به سریسیت و کلسیت دگرسان شده‌اند. پیروکسن‌ها (۲۵ تا ۳۰ درصد) به صورت بی‌شکل بوده و اغلب به کلریت تجزیه شده‌اند (شکل D-۳). بیوتیت‌ها (۱۵ تا ۲۰ درصد) اغلب به کلریت دگرسان شده‌اند. کلسیت به‌عنوان کانی ثانویه به صورت پراکنده و رگچه‌ای در متن سنگ دیده می‌شود.

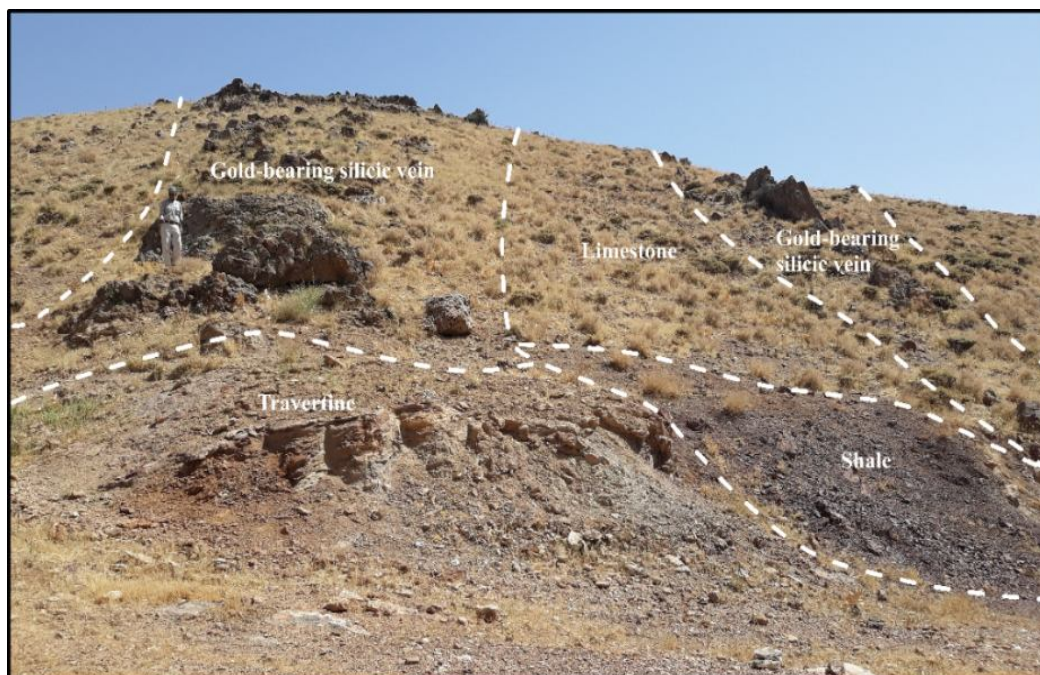
واحدهای آتشفشانی ائوسن: سنگ‌های آتشفشانی ائوسن به صورت ناپیوسته با سازندهای قدیمی تر هم‌پوشانی دارند. توالی با جریان‌ات‌گدازه‌ای که فقط آندزیتی و معمولاً بلورین است شروع شده است. در بیشتر بخش‌ها توف‌ها و آذرآواری‌ها به صورت متوالی با گدازه‌ها قرار گرفته‌اند. ضخامت این سازنده ۲۰۰۰ متر تخمین زده شده است (شکل B-۱) (Alavi and Shahrabi, 1980).

واحد رسوبی تخریبی نئوژن: این واحد در بخش شمالی منطقه قره‌کند گسترش داشته و از نظر سنگ‌شناسی شامل کنگلومرا و مارن قرمز است (شکل‌های B-۱ و A-۴).



شکل ۱. A: موقعیت قره کند در ایران و B: نقشه و مقطع زمین شناسی منطقه قره کند که در روی آن موقعیت رگه های کوارتزی طلا دار، رگه باریتی و محل برآمدگی های تراورتن نشان داده شده اند (با تغییراتی از علوی و شهبابی (Alavi and Shahrabi, 1980)).

Fig. 1. A: Location of the Gharehkand in Iran, and B: Geological map and cross section of the Gharehkand area, which are shown the location of gold-bearing quartz veins, barite vein, and travertine mounds (modified from Alavi and Shahrabi, 1980).



شکل ۲. تصویر صحرایی که وضعیت واحدهای سنگی رسوبی (سنگ آهک و شیل) و رگه‌های کوارتزی کانه‌دار در منطقه قره‌کند را نشان می‌دهد (دید به سمت شمال‌شرق).

Fig. 2. Field picture showing the position of sedimentary rock units (limestone and shale) and ore-bearing quartz veins in the Gharehkand area (view toward northeast).

تا ۱۵ متر منطبق بر یک پهنه گسلی در راستای شمال‌شرق-جنوب‌غرب در داخل واحد رسوبی ژوراسیک-کرتاسه تشکیل شده‌اند (شکل ۲). این رگه‌های کوارتز بافت برشی (شکل ۵-۵-A)، جعبه‌ای (شکل‌های ۵-B و ۶-A)، تیغه‌ای، نواری و توده‌ای (شکل ۵-B) را به نمایش می‌گذارند. کانی‌سازی در رگه‌های کوارتزی شامل گالن (شکل ۶-B)، اسفالریت، کالکوپیریت، پیریت و طلاست. عیار طلا در نمونه‌های سطحی برداشت شده از رگه‌های کوارتزی کانه‌دار بین ۰/۱ تا ۵/۱ گرم در تن اندازه‌گیری شده است (Sohrabi et al., 2017). رگه اصلی باریت به ضخامت ۱۵ تا ۱۰۰ سانتی‌متر و به طول حدود ۳۰ متر با روند شمال‌شرق-جنوب‌غرب (تقریباً هم‌راستا با رگه‌های کوارتزی) و به حالت تقریباً قائم در داخل سنگ‌های رسوبی ژوراسیک-کرتاسه شکل گرفته است (شکل ۷-A). در برخی موارد به دلیل عملکرد گسل، روند رگه باریتی تغییر یافته است. همراه با این رگه اصلی باریت یک دسته رگچه‌های کوچک و

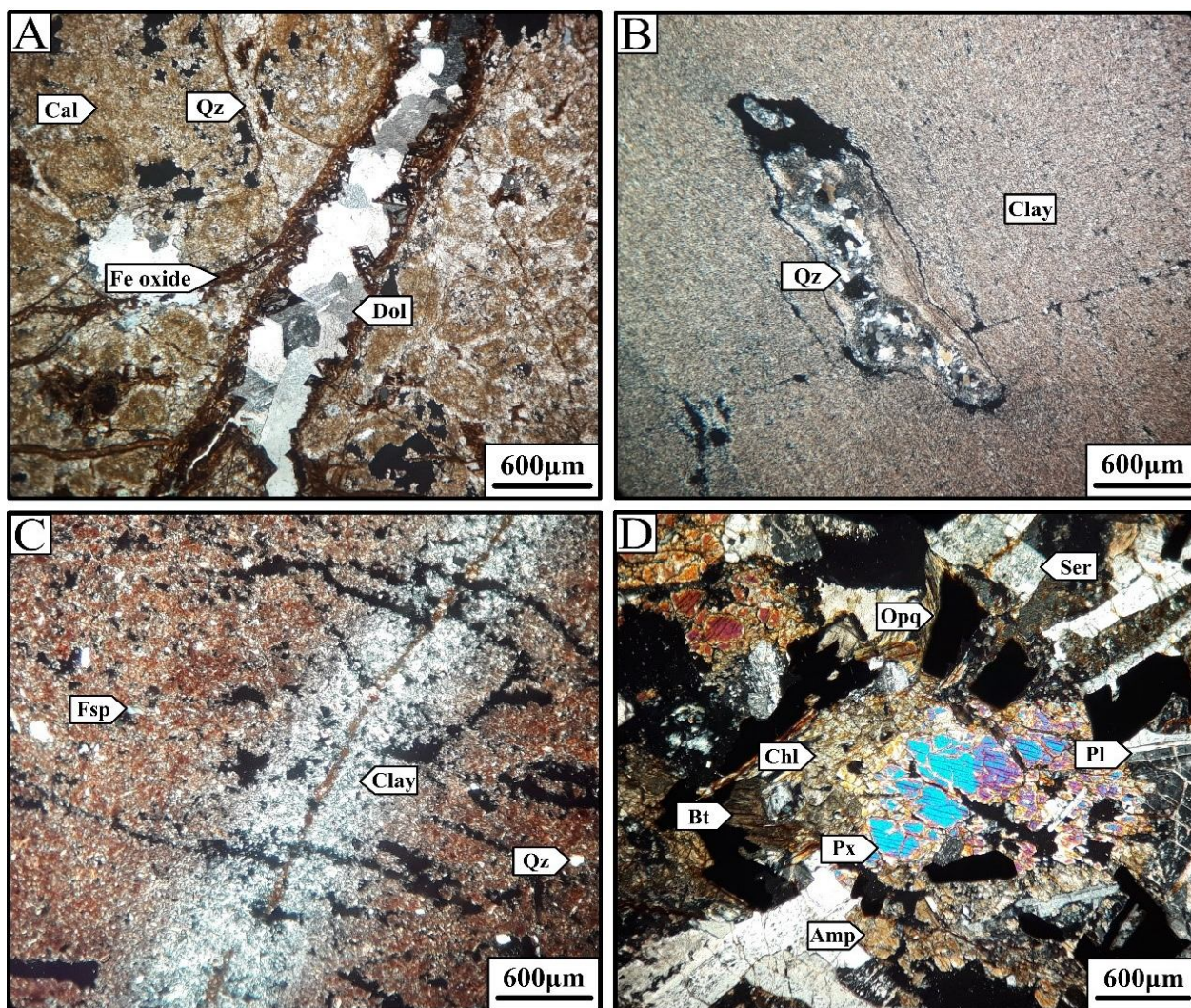
نهشته‌های کواترنری: این نهشته‌ها شامل تراورتن و تراس‌های رودخانه‌ای هستند. کانی‌های کربناته در این تراورتن‌ها اغلب آراگونیت‌های دانه‌ریز تا درشت بوده و بافت نواری نشان می‌دهند. نهشته‌های تراورتن به صورت لایه‌ای در اطراف چشمه‌های آب گرم در قره‌کند دیده می‌شوند (شکل‌های ۲ و ۴-B) که معمولاً در مسیر خط گسلی تشکیل شده‌اند. در واقع سیالات تراورتن‌ساز توانسته‌اند از طریق این گسل‌ها به سطح زمین راه‌یابند و باعث تشکیل لایه‌های تراورتن شوند. بر اساس امتداد و گسترش رخنمون‌های سطحی به نظر می‌رسد، ضخامت لایه‌های تراورتن بین ۱۰ تا ۳۰ متر متغیر باشد.

کانی‌سازی و دگرسانی

کانی‌سازی در منطقه قره‌کند به صورت رگه-رگچه‌های کوارتزی و باریتی قطع‌کننده سنگ میزبان رسوبی رخ داده است. رگه‌های کوارتزی به صورت منقطع به طول ۱۰ تا ۱۰۰ متر و ضخامت ۱

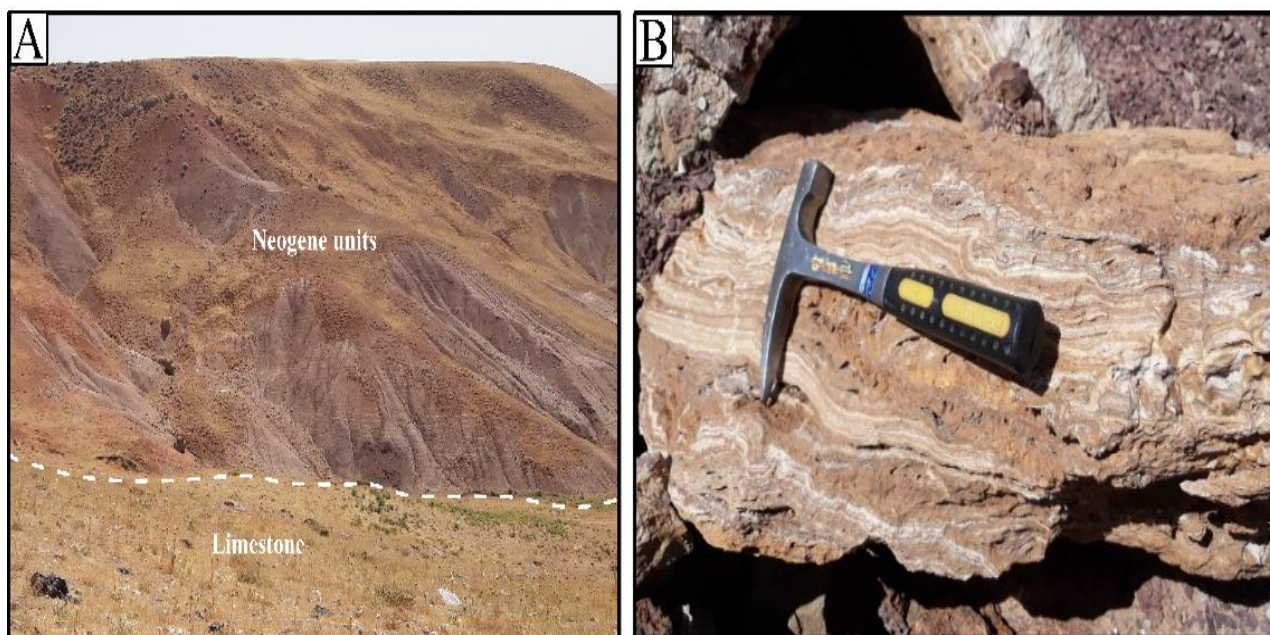
قطع کرده‌اند. از آنجایی که این رگچه‌های باریتی، رگه‌های کوارتزی را قطع کرده‌اند، می‌توان چنین استنباط کرد که از نظر زمانی نسبت به آنها تأخیری باشند.

منقطع باریتی به طول ۱ تا ۵ متر و ضخامت ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر هم‌راستا با رگه اصلی و گاهی به صورت متقاطع با آن تشکیل شده‌اند (شکل ۷-ب) که در بعضی نقاط رگه‌های کوارتزی را



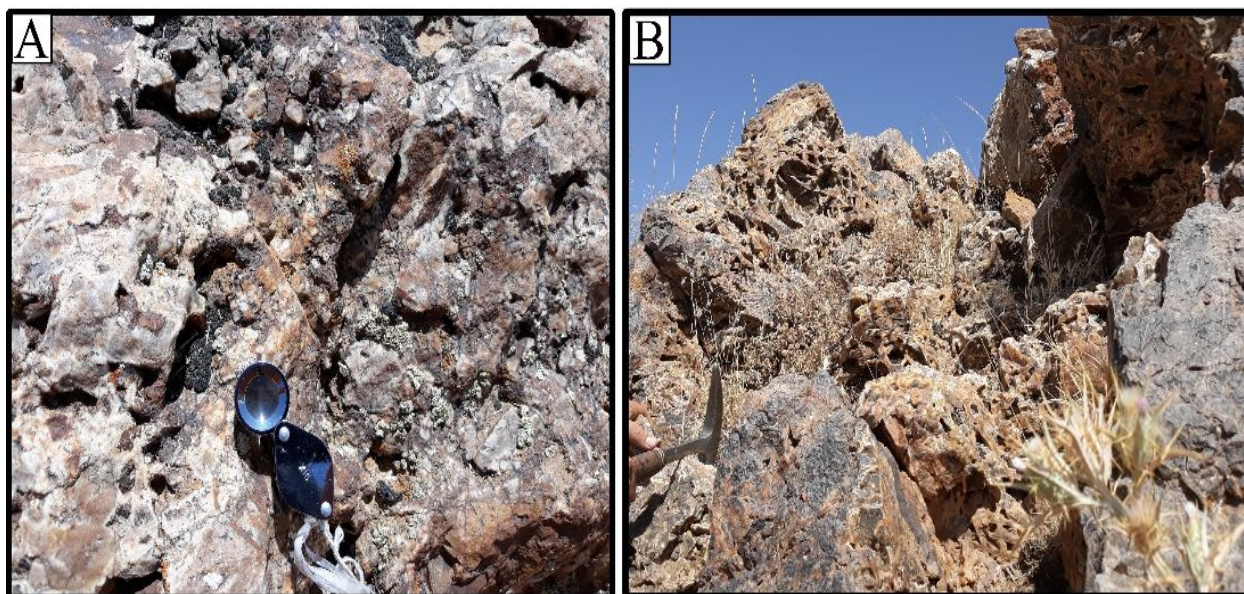
شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از واحدهای سنگی منطقه قره کند. A: رگچه‌های حاوی دولومیت در میزبان سنگ آهک، B: واحد مارنی که حفره‌های موجود در آن توسط کوارتز پر شده‌اند، C: تجزیه فلدسپارها به کانی‌های رسی در واحد ماسه سنگی و D: تبدیل پیروکسن از حاشیه به کلریت در واحد دیوریتی. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Clay: کانی‌های رسی، Dol: دولومیت، Cal: کلسیت، Qz: کوارتز، Chl: کلریت، Px: پیروکسن، Amp: آمفیبول، Bt: بیوتیت، Pl: پلاژیو کلاز، Ser: سریسیت، Fsp: فلدسپار، Opq: کانی کدر).

Fig. 3. The microscopic images (XPL) of rock units in the Gharehkand area. A: Veinlets containing dolomite hosted in the limestone, B: Marl unit with cavities filled by quartz, C: Decomposition of feldspars into clay minerals in the sandstone unit, and D: Conversion of pyroxene from margin to chlorite in the diorite unit. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Clay: clay minerals, Dol: dolomite, Cal: calcite, Qz: quartz, Chl: chlorite, Px: pyroxene, Amp: amphibole, Bt: biotite, Pl: plagioclase, Ser: sericite, Fsp: feldspar, Opq: opaque mineral).



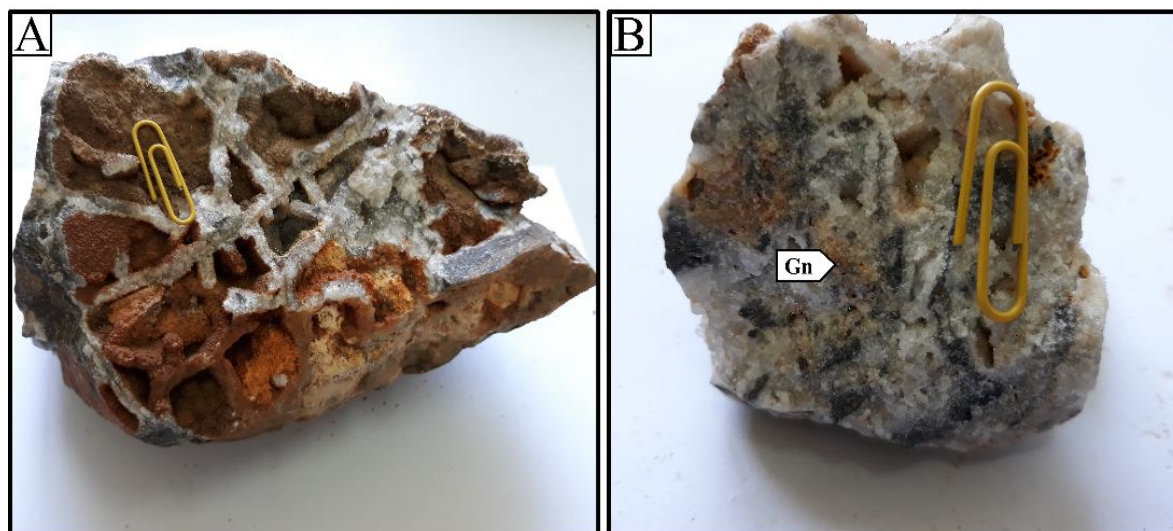
شکل ۴. تصاویر صحرایی از واحدهای نئوژن و کواترنری در منطقه قره کند. A: نمای صحرایی از برون‌زدهای واحد رسوبی تخریبی (کنگلوмера و مارن قرمز) نئوژن در شمال قره کند (دید به سمت جنوب شرق) و B: نمایی نزدیک از لایه‌های تراورتن

Fig. 4. Field images of Neogene and Quaternary units in the Gharehkand area. A: Field view of the Neogene detrital sedimentary units (conglomerate and red marl) in the north of Gharehkand (view toward southeast), and B: A close-up view of the travertine layers



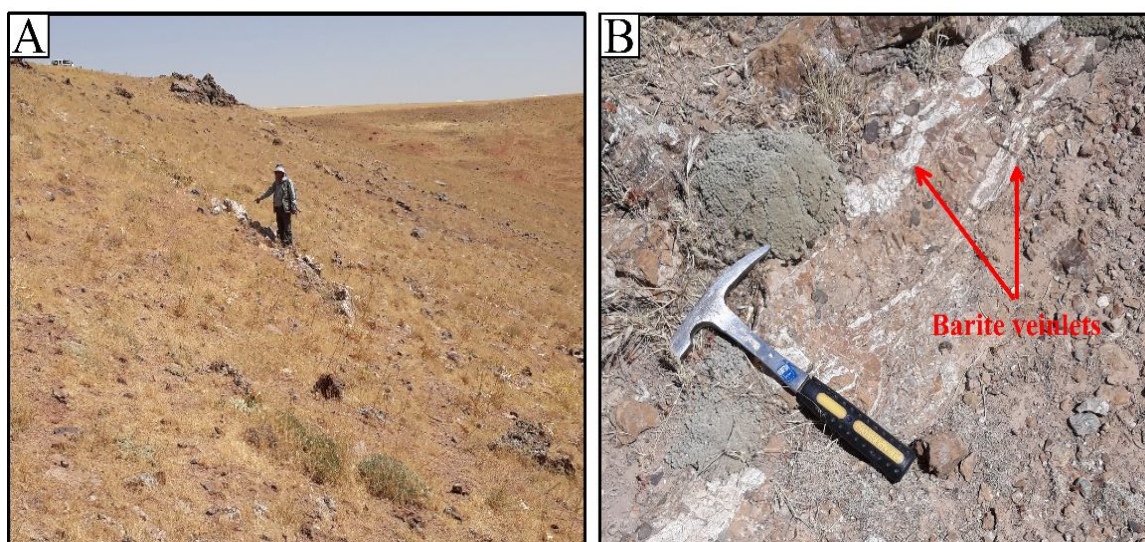
شکل ۵. تصاویر صحرایی از رگه‌های کوارتزی منطقه قره کند. A: رگه کوارتزی با بافت برشی و B: بافت‌های جعبه‌ای و توده‌ای در رگه‌های کوارتزی

Fig. 5. Field pictures of the quartz veins in the Gharehkand area. A: quartz vein with brecciated texture, and B: Boxwork and massive textures in quartz veins



شکل ۶. تصاویر مزوسکوپی از رگه‌های کوارتزی و کانه سولفیدی موجود در رگه‌های کوارتزی منطقه قره‌کند. A: بافت جعبه‌ای در نمونه دستی و B: کانه‌زایی گالن در رگه‌های کوارتزی. علامت اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Gn: گالن).

Fig. 6. Mesoscopic images of the quartz veins and sulfide ore mineral in quartz veins in the Gharehkand area. A: Boxwork texture in hand specimen, and B: Galena mineralization in quartz veins. Abbreviation after Whitney and Evans (2010) (Gn: galena).



شکل ۷. تصاویر صحرایی از رگه-رگچه‌های باریتی در منطقه قره‌کند. A: نمایی دور از رگه اصلی باریت و B: نمایی نزدیک از رگچه‌های باریتی

Fig. 7. Field picture of barite vein-veinlets in the Gharehkand area. A: Distant view of major barite vein, and B: Close view of barite veinlets

کوارتزی تشکیل شده‌اند. بر اساس سیماهای تقاطعی و محتوای کانیاپی (کدر و روشن)، رگچه‌ها و ریزرگچه‌های کوارتزی از نظر زمانی به سه زیرمرحله پیشین، میانی و پسین تقسیم شده‌اند

بر اساس بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی انجام شده، دو مرحله کانه‌زایی به صورت رگه-رگچه‌ای در منطقه قره‌کند قابل تفکیک است. طی مرحله اول کانه‌زایی، رگه-رگچه‌های

پیریت است که تقریباً تمامی آنها در زون اکسیدان به اکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند (شکل ۹-B). بلورهای ریز باریت در حاشیه بلورهای درشت باریت دیده می‌شوند که احتمالاً حاصل خردشدگی این بلورهای درشت از حاشیه در اثر فعالیت‌های زمین‌ساختی و احتمالاً گرمایی هستند (شکل ۹-B).

دگرسانی درون‌زاد اغلب به صورت توسعه هاله‌های سیلیسی که جانشین سنگ‌های میزبان رسوبی در دیواره و اطراف رگه-رگچه‌های کوارتزی شده‌اند، مشاهده می‌شوند. این نوع دگرسانی در ارتباط نزدیک و تنگاتنگ با کانه‌زایی‌های سولفیدی و طلا در قره‌کند بوده که به صورت رگه-رگچه‌های متقاطع کوارتزی و همچنین سیلیسی‌شدن سنگ میزبان در قره‌کند دیده می‌شود. پهنه‌های حاوی این دگرسانی، به واسطه مقاومت بیشتر در برابر هوازدگی نسبت به سنگ‌های میزبان از نظر توپوگرافی به صورت مناطق برآمده و برجسته در منطقه مشاهده می‌شوند (شکل ۲). در این پهنه‌ها، کوارتز و کلسدون به صورت رگه-رگچه‌ای و جانیشینی کانی‌های اولیه سنگ‌های میزبان رسوبی، فازهای کانیایی اصلی را تشکیل می‌دهند (شکل‌های ۶-A و ۸-A).

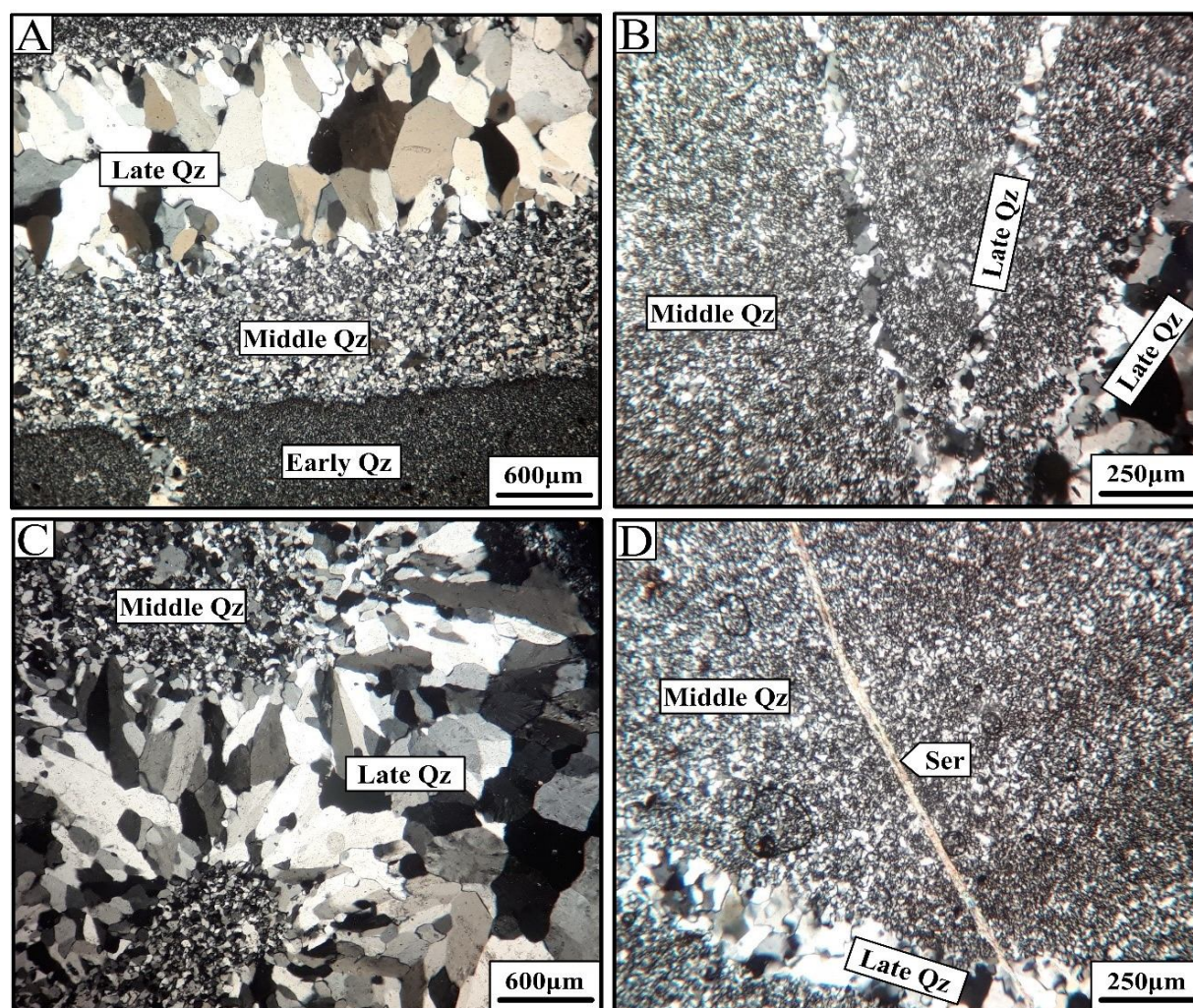
چنان‌که بیان‌شد، کانی‌سازی سولفیدی و طلا در رگچه‌ها و ریزرگچه‌های کوارتزی زیرمرحله پسین روی داده است و هیچ نوع کانه‌زایی فلزات پایه و قیمتی در داخل رگچه‌ها و ریزرگچه‌های کوارتزی متعلق به زیرمرحله‌های میانی و پیشین مشاهده نشد. کانی‌های سولفیدی که هم‌رشدی با بلورهای کوارتز نشان می‌دهند، اغلب شامل گالن، اسفالریت، پیریت و کالکوپیریت هستند. گالن از فراوانی بیشتری نسبت به سایر کانی‌های سولفیدی برخوردار است و اغلب به صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل دار حضور دارد (شکل ۱۰-A). اسفالریت به صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل دار دیده می‌شود که در مواردی توسط گالن جانشین شده است (شکل ۱۰-A). پیریت به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل دار و اغلب به حالت دانه‌پراکنده در داخل بلورهای کوارتز حضور دارد و در اغلب موارد به گوتیت، هماتیت و ژاروسیت دگرسان شده است (شکل

(شکل ۸-A). ضخامت رگچه‌های زیرمرحله پیشین از ۲ میلی‌متر تا حداکثر ۱ سانتی‌متر و ضخامت ریزرگچه‌های زیرمرحله پیشین از ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر متغیر است. این رگچه‌ها و ریزرگچه‌ها حاوی بلورهای کوارتز بسیار دانه‌ریز تا نهران‌بلور با بافت توده‌ای بوده و اغلب به‌رنگ خاکستری تا خاکستری تیره مشاهده می‌شوند (شکل ۸-A) و تقریباً بدون کانی‌های سولفیدی و طلا هستند. برشی‌شدن کوارتزهای زیرمرحله پیشین و پرشدگی فضاهای خالی بین قطعات خرد شده آنها، توسط کوارتزهای زیرمرحله‌های میانی و پسین، بسیار رایج است. ضخامت رگچه‌های زیرمرحله میانی از ۲ تا ۳ میلی‌متر و ضخامت ریزرگچه‌های زیرمرحله میانی از ۲۰ میکرون تا ۲ میلی‌متر تغییر می‌کند. این رگچه‌ها و ریزرگچه‌ها اغلب بدون کانی‌های سولفیدی و طلا بوده و رگچه‌ها و ریزرگچه‌های زیرمرحله پیشین را قطع کرده و اندازه بلورهای کوارتز در آنها نسبتاً بزرگ‌تر و با رنگ روشن‌تر هستند (شکل ۸-A و B). رگچه‌های زیرمرحله پسین دارای ضخامت‌هایی بین ۲ تا ۵ میلی‌متر و ریزرگچه‌های زیرمرحله پسین دارای ضخامت‌هایی بین ۳۰ میکرون تا ۲ میلی‌متر بوده و رگچه‌ها و ریزرگچه‌های زیرمرحله‌های پیشین و میانی را قطع کرده‌اند (شکل ۸-A و B) و حاوی بلورهای دانه‌درشت کوارتز با رنگ خاکستری روشن تا سفید به‌همراه کانی‌های سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت) و طلا (به صورت آزاد) بوده و بافت‌های معمول شانه‌ای و دروزی (شکل ۸-A و C) را به نمایش می‌گذارند. رگچه‌ها و ریزرگچه‌های کوارتزی (پیشین، میانی و پسین) توسط یک دسته رگچه‌ها و ریزرگچه‌های سریستی (با ضخامت ۵ تا ۲۰ میکرون) که بدون کانه‌زایی سولفیدی و طلا هستند، قطع شده‌اند (شکل ۸-D).

کانه‌زایی مرحله دوم در غالب تشکیل رگه-رگچه‌های باریتی انجام شده است. نمونه دستی کانسنگ باریتی در رگه اصلی به رنگ خاکستری تا سفید بوده و توسط رگچه‌های اکسید آهن قطع شده‌اند (شکل ۹-A). کانسنگ باریتی در زیر میکروسکوپ اغلب حاوی بلورهای ریز تا درشت باریت به‌همراه مقداری

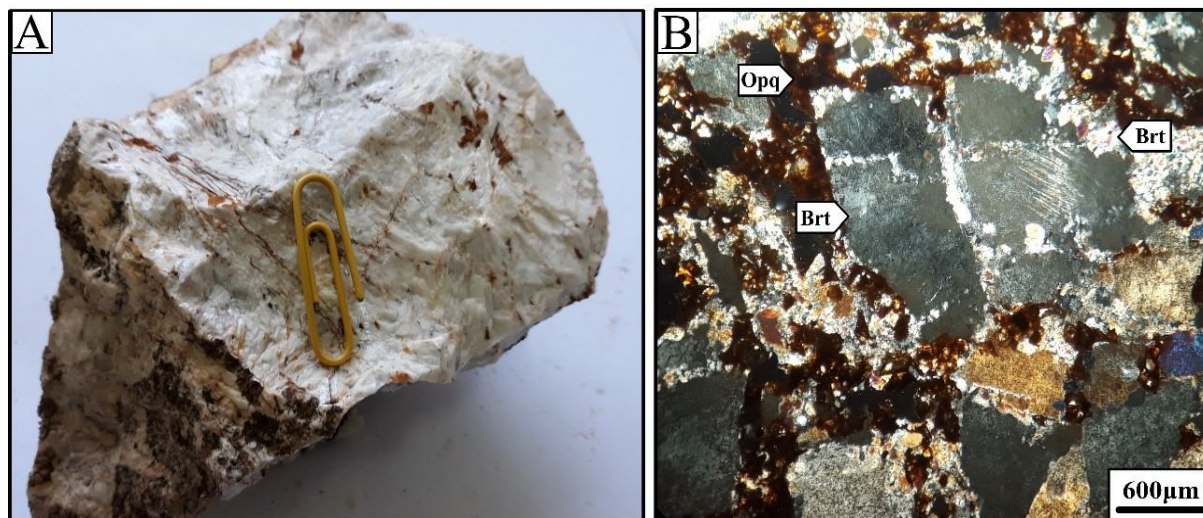
دگرسان شده است (شکل ۱۰-B). طلا در ابعاد بسیار کوچک و به صورت پراکنده داخل بلورهای کوارتز حضور دارد (شکل ۱۰-C).

۱۰-B). کالکوپیریت اغلب به صورت بلورهای بی‌شکل دیده می‌شود و در بیشتر موارد از حاشیه به کولیت، کالکوسیت، دیژنیت، ملاکیت، آزوریت، گونیت، هماتیت و ژاروسیت



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از رگچه‌ها و ریزرگچه‌های مربوط به مرحله اول کانه‌زایی در منطقه قره کند. A: رگچه‌ها و ریزرگچه‌های کوارتزی متعلق به زیرمرحله‌های پیشین، میانی و پسین و قطع‌شدگی رگچه‌ها و ریزرگچه‌های کوارتزی زیرمرحله پیشین توسط رگچه‌ها و ریزرگچه‌های کوارتزی زیرمرحله میانی، B: رگچه‌ها و ریزرگچه‌های کوارتزی زیرمرحله میانی که توسط رگچه‌ها و ریزرگچه‌های کوارتزی زیرمرحله پسین قطع شده است، C: بافت دروزی در رگچه‌ها و ریزرگچه‌های کوارتزی زیرمرحله پسین و D: ریزرگچه سریسیتی که رگچه‌ها و ریزرگچه‌های کوارتزی زیرمرحله‌های میانی و پسین را قطع کرده است. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Qz: کوارتز، Ser: سریسیت).

Fig. 8. Microscopic images (XPL) of the veinlets and micro-veinlets related to stage-1 mineralization in the Gharehband area. A: Early, middle, and late sub-stages quartz veinlets and micro-veinlets and crosscutting of early sub-stage quartz veinlets and micro-veinlets by middle sub-stage quartz veinlets and micro-veinlets, B: Middle sub-stage quartz veinlets and micro-veinlets crosscut by late sub-stage quartz veinlets and micro-veinlets, C: Drusy texture in late sub-stage quartz veinlets and micro-veinlets, and D: Sericite micro-veinlet which is crosscutting the middle and late sub-stages quartz veinlets and micro-veinlets, Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Qz: quartz, Ser: sericite).



شکل ۹. تصاویر مزوسکوپی و میکروسکوپی (نور عبوری بلاریزه متقاطع، XPL) از باریت منطقه قره کند. A: نمونه دستی از باریت که حاوی ریزرگچه‌های اکسید آهن است و B: خردشدگی بلورهای درشت باریت از حاشیه. علائم اختصاری از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Brt: باریت، Opq: کانی کدر).

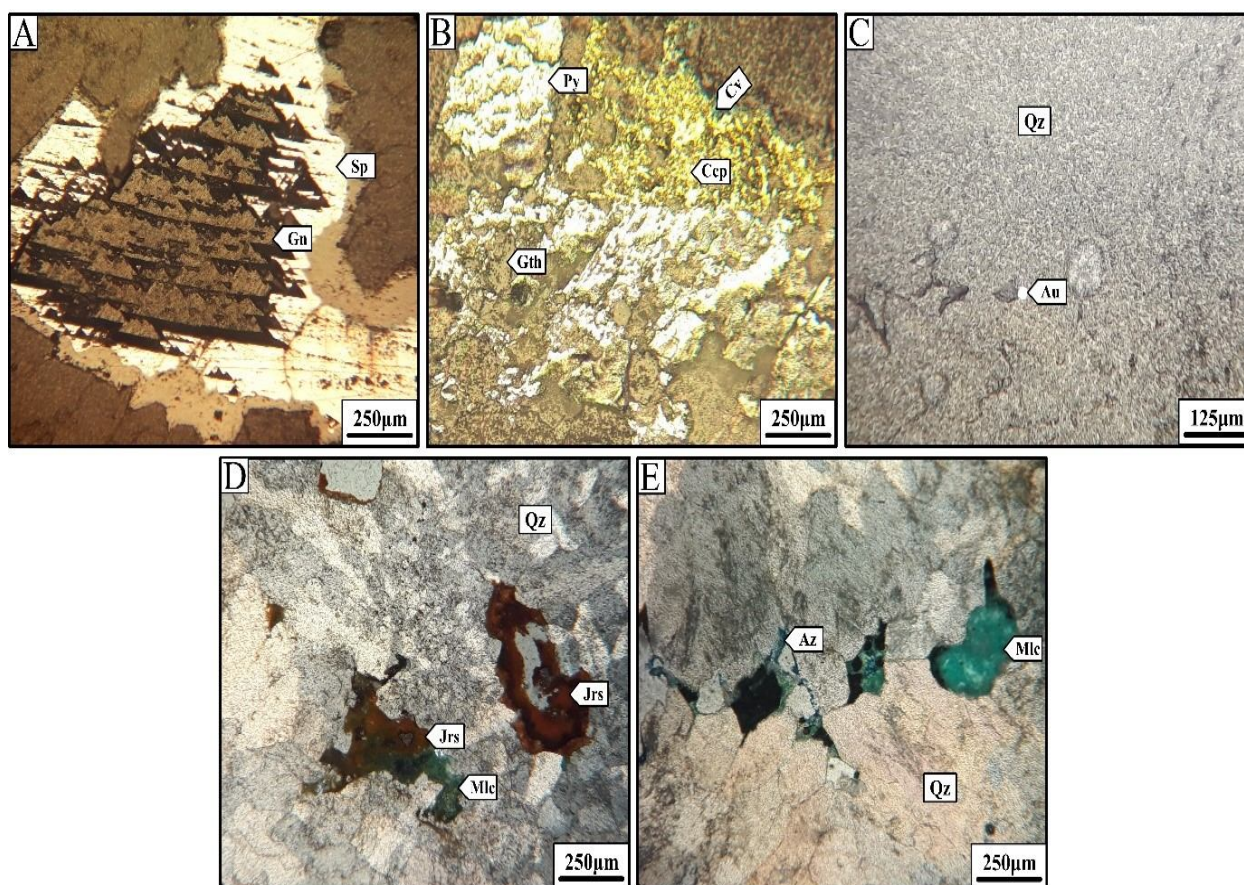
Fig. 9. Mesoscopic and microscopic (XPL) pictures of barite in the Gharehband area. A: Hand specimen of barite containing micro-veinlets of iron oxide, and B: Crushing of coarse barite crystals from the margin. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Brt: barite, Opq: opaque mineral).

فیزیکوشیمیایی سیالات کانه‌ساز در بیشتر ذخایر گرمابی هستند و تاکنون پژوهش‌های زیادی در باره میان‌بارهای سیال ذخایر اپی‌ترمال انجام شده است (Bodnar et al., 1985; Vikre, 1985; Hedenquist et al., 2000; Albinson et al., 2001; Simmons et al., 2005; Camprubi and Albinson, 2007; Moncada et al., 2012; Mehrabi et al., 2014; Moncada et al., 2017; Alaminia et al., 2017). بررسی‌های سنگ‌نگاری بر روی مقاطع کانسنگی نشان‌دهنده که بلورهای کوارتز موجود در رگچه‌ها و ریزرگچه‌های کوارتزی زیرمرحله پسین در قره کند با کانی‌های سولفیدی همزاد بوده است. از این‌رو، بررسی میان‌بارهای سیال بر روی کانی‌های کوارتز همزاد با سولفیدها انجام شد. بلورهای باریت نیز در رگه-رگچه‌های باریتی، با سولفیدها (پیریت) هم‌رشدی و همزاد نشان می‌دهند؛ ولی به‌علت وجود میان‌بارهای سیال بسیار ریز در داخل آنها، بررسی‌های ریزدماسنجی بر روی آنها انجام نشد. فراوانی و اندازه میان‌بارهای سیال در مقاطع دوبر صیقل تهیه شده (۸ عدد) متفاوت بوده و تنها دو مقطع برای ریزدماسنجی مناسب تشخیص داده شدند.

گویتیت، هماتیت و ژاروسیت (شکل ۱۰-B و D) به‌همراه مالاکیت و آزوریت (شکل ۱۰-E)، از کانی‌های زون اکسیدان هستند که به صورت جانشینی در حاشیه‌های کانی‌های سولفیدی درون‌زاد مثل پیریت و کالکوپیریت مشاهده می‌شوند. همچنین واکنش محلول‌های فرورو جوی با کانی‌های سولفیدی درون‌زاد سبب تشکیل مجموعه کانی‌های برون‌زاد از قبیل سولفیدهای ثانویه مس (کولیت، کالکوسیت و دیژنیت) شده است که معمولاً در اطراف و داخل کانی‌های سولفیدی درون‌زاد به‌ویژه کالکوپیریت به صورت جانشینی حضور دارند (شکل ۱۰-B). بر اساس بررسی‌های صحرایی، مزوسکوپی و میکروسکوپی، کانی‌های معدنی و باطله موجود در منطقه قره کند که توسط فعالیت محلول‌های آبگین درون‌زاد و برون‌زاد تشکیل شده‌اند، از نظر توالی همیافت تقسیم‌بندی شده و نتایج در شکل ۱۱ ارائه شده است.

بررسی میان‌بارهای سیال

بررسی میان‌بارهای سیال و سیله‌ای بسیار مؤثر برای تعیین شرایط



شکل ۱۰. تصاویر میکروسکوپی از کانه‌های موجود در رگچه‌ها و ریزرگچه‌های کوارتزی زیرمرحله پسین، در منطقه قره کند. A: حضور گالن که جانشین اسفالریت شده است (نور بازتابی، PPL)، B: بلورهای پیریت که به گوتیت دگرسان شده است و حضور بلورهای کالکوپیریت که توسط کانی برونزاد کولیت جانشین شده است (نور بازتابی، PPL)، C: ذره ریز طلا در داخل بلورهای کوارتز (نور بازتابی، PPL)، D: ژاروسیت در بلورهای کوارتز (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL). علائم اختصاری از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است: Gn: گالن، Sp: اسفالریت، Py: پیریت، Ccp: کالکوپیریت، Gth: گوتیت، Cv: کولیت، Au: طلا، Jrs: ژاروسیت، Mlc: مالاکیت، Az: آزوریت، Qz: کوارتز.

Fig. 10. Microscopic images of the ore minerals in the late sub-stage quartz veinlets and micro-veinlets in the Gharehkand area. A: Presence of galena replacing sphalerite (PPL), B: Pyrite crystals altered to goethite and presence of chalcopyrite crystals of replaced by covellite (PPL), C: Fine particle of gold within quartz crystals (PPL), D: Jarosite in the quartz crystals (XPL), and E: Malachite and azurite within the quartz crystals (XPL). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Gn: galena, Sp: sphalerite, Py: pyrite, Ccp: chalcopyrite, Gth: goethite, Cv: covellite, Au: gold, Jrs: jarosite, Mlc: malachite, Az: azurite, Qz: quartz).

سنگ‌نگاری میان‌بارهای سیال

از آنجایی که میان‌بارهای سیال موجود در بلورهای باریت بسیار ریز و بیشتر از نوع ثانویه (S) بودند (شکل ۱۲-۱۲-۱۲)، بررسی‌های سنگ‌نگاری، بیشتر بر روی میان‌بارهای سیال کانی کوارتز انجام شد. میان‌بارهای سیال موجود در کانی‌های کوارتز دارای

شکل‌های نامنظم و بی‌شکل، کشیده، نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار (شکل ۱۲-۱۲-۱۲) و شکل‌های منفی بلورین بوده و شامل انواع اولیه (P) و ثانویه (S) هستند. پدیده باریک‌شدگی نیز در میان‌بارهای سیال اولیه و ثانویه مشاهده شد (شکل ۱۲-۱۲-۱۲). ابعاد میان‌بارهای سیال در قره کند از ۵ تا ۲۵ میکرون متغیر است و بررسی‌های

مشاهده می‌شوند (شکل ۱۲-D). ابعاد آنها از ۵ تا ۲۰ میکرون متغیر است؛ اما ابعاد ۵ تا ۱۰ میکرون، از فراوانی بیشتری برخوردارند.

تک‌فاز گازی (V): این میان‌بارهای سیال به صورت اولیه و ثانویه بوده و حجم اعظم (>۹۵٪) آنها توسط گاز (بخار) اشغال شده است. اندازه آنها از ۵ تا ۱۰ میکرون متغیر است و اغلب به صورت نامنظم تا نیمه‌شکل‌دار، همراه با انواع دوفازی غنی از مایع مشاهده می‌شوند (شکل ۱۲-E).

دوفازی غنی از گاز (V+L): بیش از ۷۵ درصد حجمی این نوع میان‌بارهای سیال را فاز گازی (بخار) تشکیل داده است و در اندازه‌های کمتر از ۵ تا ۱۰ میکرون به صورت شکل‌های کروی، پهن، بیضوی و مستطیلی دیده می‌شوند (شکل ۱۲-F).

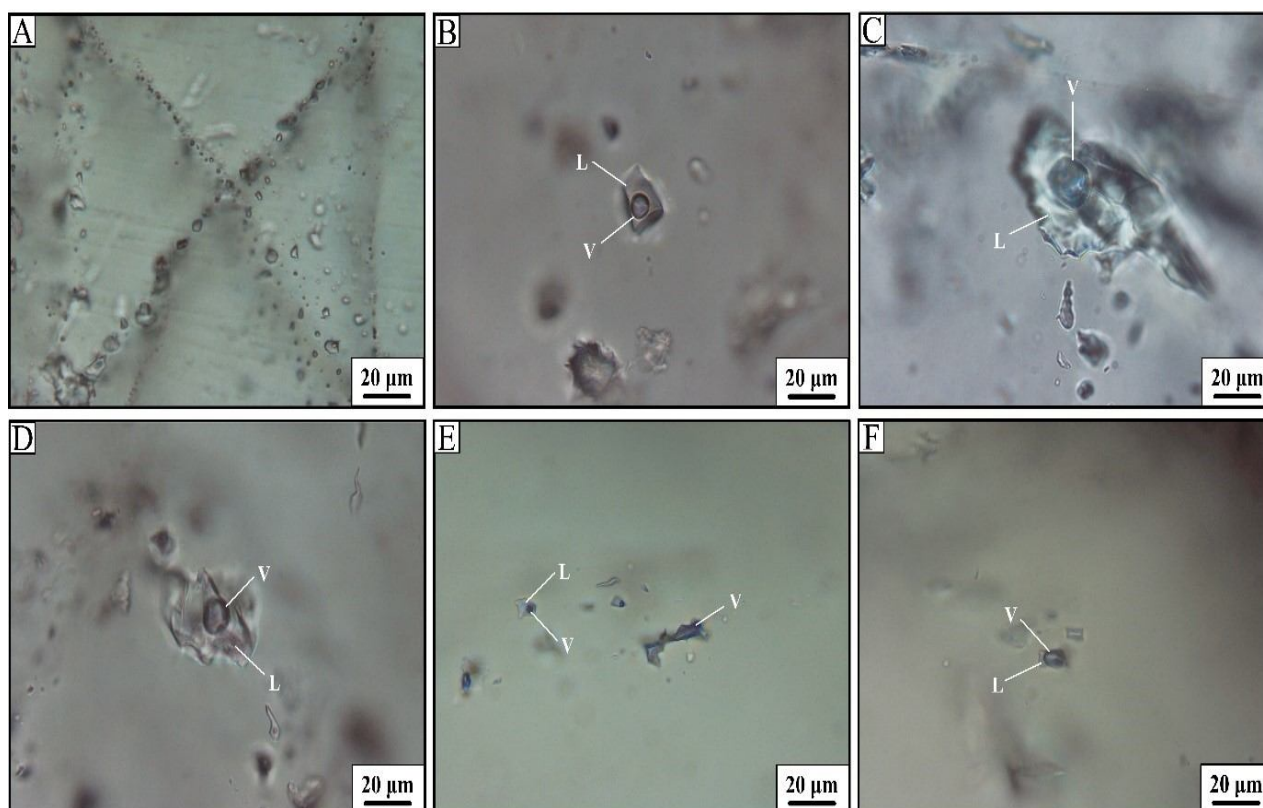
ریزدماسنجی اغلب بر روی میان‌بارهای اولیه که اندازه‌هایی در بازه ۵ تا ۲۵ میکرون داشتند، صورت گرفته است. میان‌بارهای سیال بررسی شده، بر اساس محتوای فازهای اصلی و به ترتیب فراوانی شامل انواع دوفازی غنی از مایع (L+V)، تک‌فاز گازی (V) و دوفازی غنی از گاز (V+L) به شرح زیر هستند:

دوفازی غنی از مایع (L+V): این میان‌بارهای سیال به صورت اولیه و ثانویه حضور داشته و نسبت به انواع دیگر میان‌بارها از فراوانی بیشتری برخوردار هستند. فاز مایع در این نوع میان‌بارهای سیال غالب است و بیش از ۸۰ درصد حجم آنها را اشغال می‌کند. پدیده باریک‌شدگی اغلب در این نوع سیالات دیده می‌شود. اغلب آنها دارای شکل‌های نامنظم و کشیده بوده و تعداد اندکی به صورت شکل‌های منفی بلورین و شکل‌دار

Minerals and textures		→ Decreasing time →					
		Mineralization and alteration					
		Hypogene				Oxidized	Supergene
		Stage I			Stage II		
		Early	Middle	Late			
Ore and gangue	Quartz	◆					
	Sericite			◆			
	Barite				◆		
	Gold			◆			
	Pyrite			◆	◆		
	Chalcopyrite			◆			
	Sphalerite			◆			
	Galena			◆			
	Goethite					◆	
	Hematite					◆	
	Jarosite					◆	
	Malachite					◆	
	Azurite					◆	
	Chalcocite						◆
	Covellite						◆
Digenite						◆	
Texture	Veinlets	◆					
	Replacement	◆				◆	
	Massive	◆					
	Drusy			◆			

شکل ۱۱. توالی همیافت کانی‌های معدنی و باطله در منطقه قره‌کند

Fig. 11. Paragenetic sequence of ore and gangue minerals in the Gharehkand area



شکل ۱۲. تصاویر میکروسکوپی از انواع میان‌بارهای سیال موجود در بلورهای کوارتز زیرمرحله پسین و باریت در قره‌کند. A: میان‌بارهای سیال ثانویه در بلور باریت، B: میان‌بار سیال دوفازی مربعی شکل در بلور کوارتز، C: باریک‌شدگی میان‌بار سیال در بلور کوارتز، D: میان‌بار سیال دوفازی غنی از مایع با شکل نامنظم تا نیمه‌منظم در بلور کوارتز، E: میان‌بار سیال دوفازی غنی از مایع در کنار میان‌بار سیال تک‌فاز گازی در بلور کوارتز و F: میان‌بار سیال دوفازی غنی از گاز در بلور کوارتز (L: فاز مایع، V: فاز بخار، (Diamond, 2003))

Fig. 12. Photomicrographs of types of fluid inclusions in the late sub-stage quartz and barite crystals at Gharehkand. A: The secondary fluid inclusions in barite crystal, B: Square-shaped two-phase fluid inclusion in the quartz crystal, C: Necking-down of fluid inclusion in the quartz crystal, D: Liquid-rich two-phase fluid inclusions with irregular to sub-regular shapes in the quartz crystal, E: Coexisting liquid-rich two-phase and vapor mono-phase fluid inclusion in quartz crystal, and F: Vapor-rich two-phase fluid inclusion in quartz crystal (L: liquid phase, V: vapor phase (Diamond, 2003))

نتایج بررسی‌های ریزدماسنجی

برای انجام بررسی‌های ریزدماسنجی، ابتدا عملیات سرمایش و سپس گرمایش بر روی میان‌بارهای دوفازی غنی از مایع انجام شد. انجماد نهایی میان‌بارها در محدوده دمایی ۸۰- تا ۹۰- درجه سانتی‌گراد انجام شد. در بیشتر میان‌بارهای سیال آنالیز شده، دمای یوتکتیک (T_{fm}) در حدود ۲۱- درجه سانتی‌گراد است که مطابق با سیستم H₂O-NaCl است. سپس دمای ذوب آخرین قطعات یخ (T_{mice}) اندازه‌گیری شد و بر اساس آن مقادیر شوری بر حسب درصد وزنی معادل نمک طعام محاسبه شد

(Bodnar and Vityk, 1994). طی عملیات گرمایش، دماهای

همگن شدن (T_H) نیز تعیین شد که نتایج به دست آمده در جدول ۱ ارائه شده است.

به علت خیلی ریز بودن میان‌بارهای دوفازی غنی از گاز و امکان بروز خطا، تمام اندازه‌گیری‌ها بر روی ۳۰ میان‌بار سیال اولیه دوفازی غنی از مایع انجام شد. تمامی این میان‌بارهای سیال با از بین رفتن فاز گازی (بخار) همگن شدند. دماهای همگن شدن به دست آمده، در محدوده دمایی بین ۸۰ تا ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است؛ اما بیشترین فراوانی دمای همگن شدن، متعلق به بازه

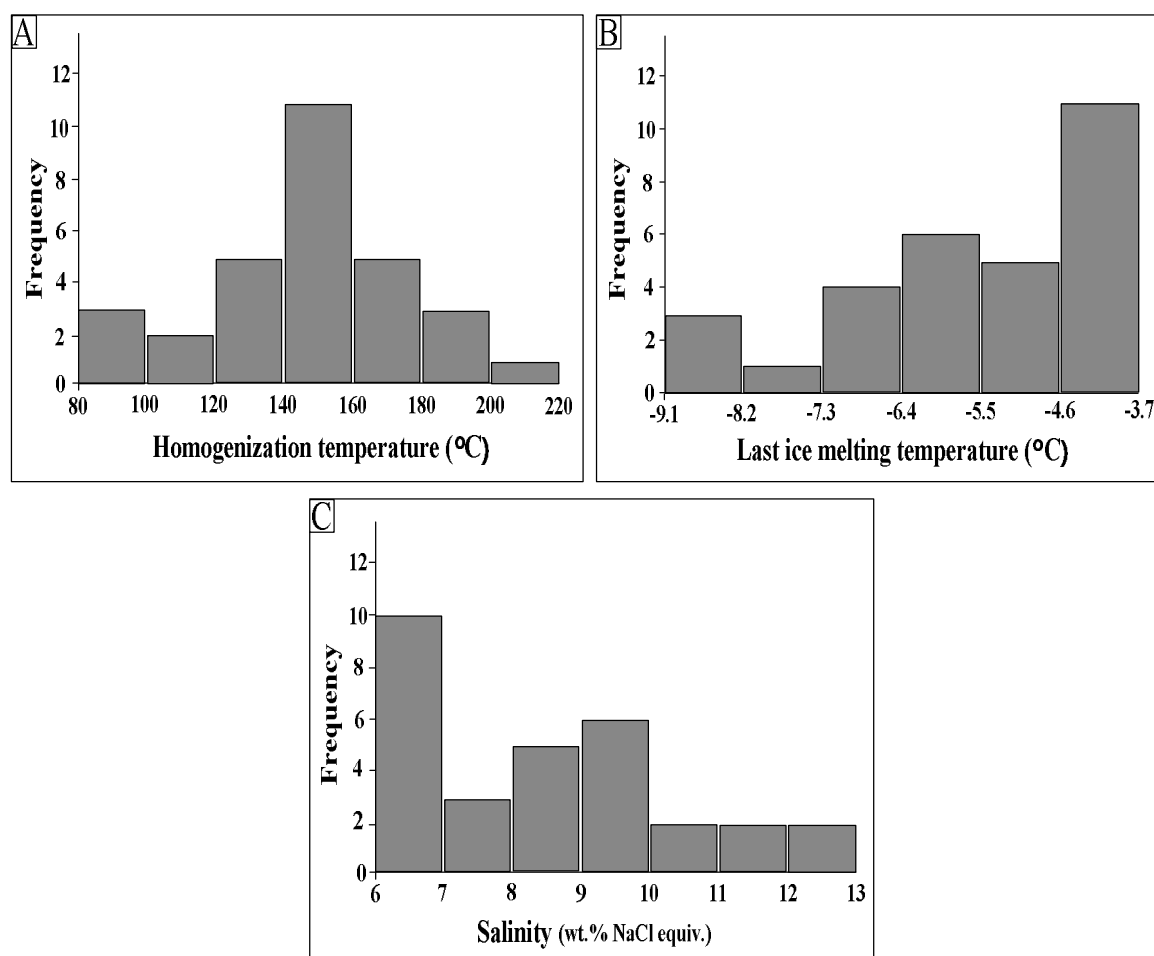
سیال محاسبه‌شده. محدوده شوری‌ها بین ۶ تا ۱۳ درصد وزنی معادل نمک طعام متغیر است. از این میان، بیشترین فراوانی مربوط به محدوده شوری‌های بین ۶ تا ۷ درصد وزنی معادل نمک طعام است (شکل ۱۳-۱۳-۱).

دمایی ۱۴۰ تا ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۱۳-۱۳-۱). مقادیر $T_{m_{ice}}$ به دست آمده، در محدوده دمایی بین ۹/۱- تا ۳/۷- درجه سانتی‌گراد متغیر است؛ اما بیشترین فراوانی مربوط به محدوده دمایی بین ۴/۶- تا ۳/۷- درجه سانتی‌گراد است (شکل ۱۳-۱۳-۲). بر اساس مقادیر $T_{m_{ice}}$ (Bodnar, 2003)، شوری میان‌بارهای

جدول ۱. یافته‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال در رگچه‌های کوارتزی قره‌کند

Table 1. Microthermometric data of fluid inclusions in quartz veinlets at the Gharehkand

Number	Sample name	Host crystal	FI type	$T_{m_{ice}}$ (°C)	$T_{H(L-V)}$ (°C)	Salinity wt.% NaCl
1	M-14	Quartz	L+V	-4.2	80	6.7
2	M-14	Quartz	L+V	-4	87	6.5
3	M-14	Quartz	L+V	-3.8	152	6.2
4	M-14	Quartz	L+V	-6.6	131	10
5	M-14	Quartz	L+V	-5.1	92	8
6	M-14	Quartz	L+V	-5.7	110	8.8
7	M-14	Quartz	L+V	-6.2	104	9.5
8	M-23	Quartz	L+V	-9.1	149	12.9
9	M-23	Quartz	L+V	-8.3	136	12
10	M-23	Quartz	L+V	-6.1	145	9.3
11	M-23	Quartz	L+V	-9	173	12.8
12	M-23	Quartz	L+V	-5	169	7.9
13	M-23	Quartz	L+V	-6.7	146	10.1
14	M-23	Quartz	L+V	-3.9	149	6.3
15	M-23	Quartz	L+V	-6.4	132	9.7
16	M-23	Quartz	L+V	-5.2	157	8.1
17	M-23	Quartz	L+V	-6.1	135	9.3
18	M-23	Quartz	L+V	-6	191	9.2
19	M-23	Quartz	L+V	-5.6	177	8.7
20	M-23	Quartz	L+V	-3.8	151	6.2
21	M-23	Quartz	L+V	-5.2	169	8.1
22	M-23	Quartz	L+V	-3.7	177	6
23	M-23	Quartz	L+V	-4.1	182	6.6
24	M-23	Quartz	L+V	-7.5	149	11.1
25	M-23	Quartz	L+V	-5.3	181	8.3
26	M-23	Quartz	L+V	-3.7	156	6
27	M-23	Quartz	L+V	-4.2	206	6.7
28	M-23	Quartz	L+V	-4	160	6.5
29	M-23	Quartz	L+V	-6.7	137	10.1
30	M-23	Quartz	L+V	-4.5	141	7.7



شکل ۱۳. نمودارهای ستونی دمای همگن شدن، مقادیر $T_{m_{ice}}$ و شوری مربوط به میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از مایع در بلورهای کوارتز قره کند. A: نمودار ستونی دمای همگن شدن (بیشترین فراوانی متعلق به محدوده دمایی بین ۱۴۰ تا ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد است)، B: نمودار ستونی مقادیر $T_{m_{ice}}$ (بیشترین فراوانی متعلق به محدوده دمایی بین ۴/۶- تا ۳/۷- درجه سانتی‌گراد است) و C: نمودار ستونی شوری (بیشترین فراوانی متعلق به محدوده شوری بین ۶ تا ۷ درصد وزنی معادل نمک طعام است)

Fig. 13. Histograms of homogenization temperature, $T_{m_{ice}}$ values, and salinity related to liquid-rich two-phase fluid inclusions in the quartz crystals at Gharehkand. A: Histogram of homogenization temperature (the highest frequency distribution belongs to the range of 140-160°C), B: Histogram of $T_{m_{ice}}$ values (the highest frequency distribution belongs to the range of -4.6 to -3.7°C), and C: Histogram of salinity (the highest abundance belongs to the range of 6-7 wt.% NaCl eq.)

بحث

منشأ و ویژگی‌های سیال کانه‌دار

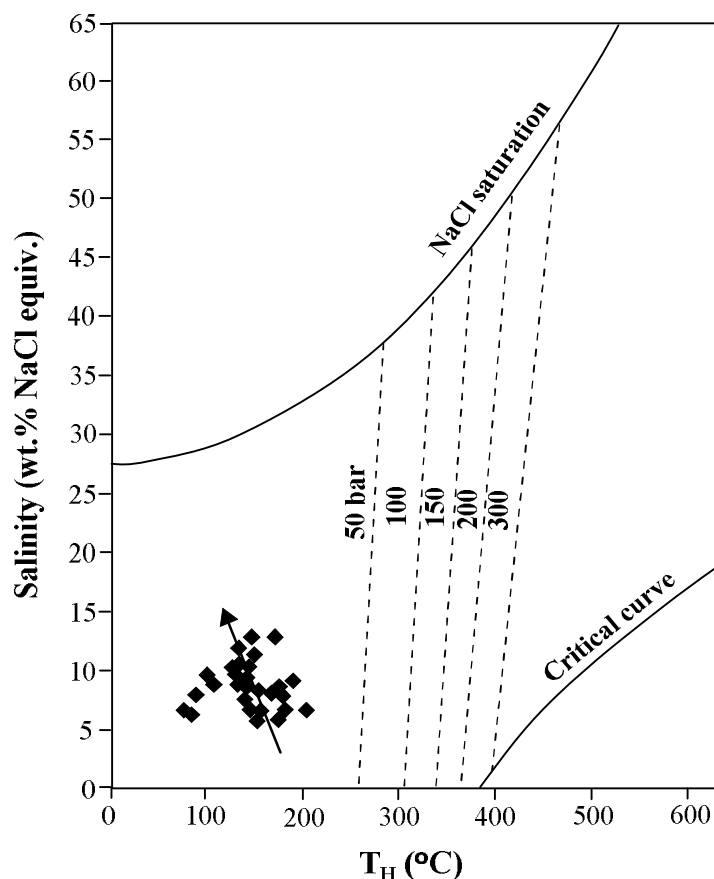
شواهدی از قبیل وجود ساخت و بافت برشی در منطقه قره کند و حضور هم‌زمان میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از مایع و تک‌فاز گازی (شکل ۱۲-E) می‌تواند بیانگر رخداد فرایند جوشش در زمان کانی‌سازی باشند (White and Hedenquist, 1995;

Simmons et al., 2005). لذا با توجه به این نکته، سیالات

کانه‌ساز به احتمال زیاد در زمان به دام‌افتادن، فشار هیدروستاتیک را تجربه می‌کرده‌اند. طبق نمودار شکل ۱۴ (Shepherd et al., 1985)، تمامی یافته‌های ریزدماسنجی، فشارهای کمتر از ۵۰ بار را نشان می‌دهند. بر اساس مقادیر دمای همگن شدن و شوری، میان‌بارهای سیال در قره کند فشارهای هیدروستاتیکی

توسعه رگه-رگچه‌های کوارتزی در محل و مشابیه اعماق تشکیل اغلب ذخایر اپی‌ترمال است (Bodnar et al., 2014).

در بازه بین ۲۰ تا ۲۵ بار را تحمل کرده‌اند که معادل اعماق بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ متری زیر سطح سفره آب‌های زیرزمینی در زمان

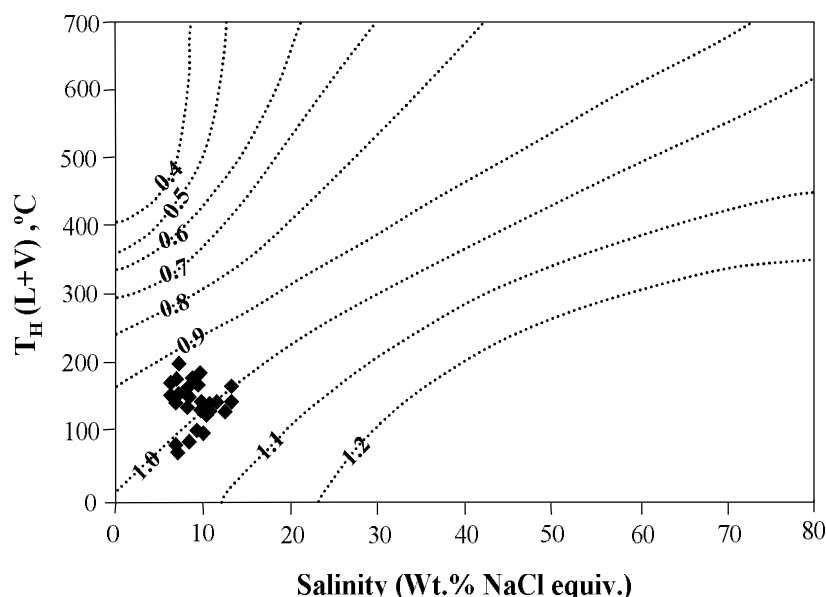


شکل ۱۴. نمودار دمای همگن‌شدن (T_H) در برابر شوری (Shepherd et al., 1985)، که الگوی توزیع یافته‌های مربوط به میان‌بارهای سیال منطقه قره‌کند را نسبت به منحنی‌های بحرانی و اشباع‌هالیت نشان می‌دهد.

Fig. 14. Diagram of homogenization temperature (T_H) versus salinity (Shepherd et al., 1985) displaying the distribution pattern of the Gharehkand fluid inclusions data in relation to the critical and halite saturation curves.

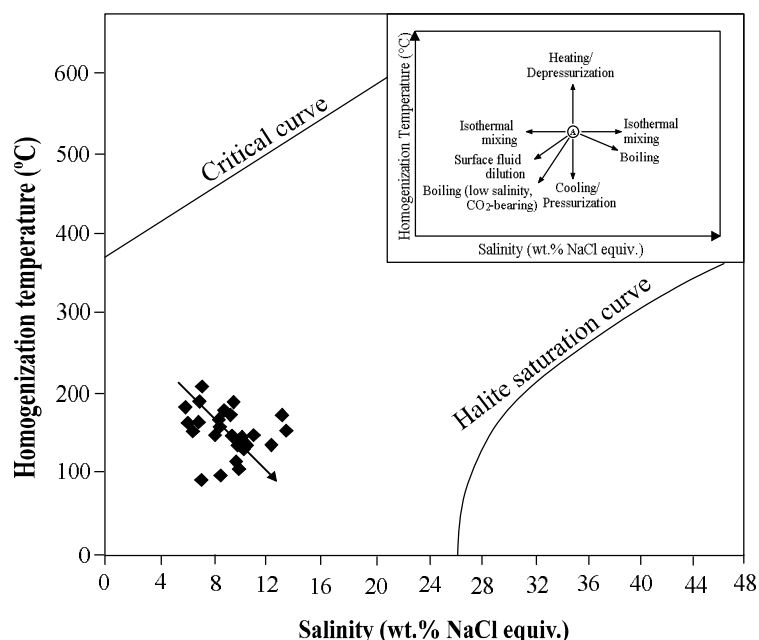
برای تعیین روند تکاملی سیالات کانه‌ساز توسط یافته‌های ریزدماسنجی قره‌کند، از نمودار شوری در مقابل دمای همگن‌شدن میان‌بارهای سیال (Shepherd et al., 1985; Wilkinson, 2001)، استفاده شده است (شکل ۱۶). مطابق این نمودار، نقاط مربوط به یافته‌های قره‌کند، روند تکاملی جوشش همراه با سردشدن ساده را به‌عنوان مهم‌ترین فرایندهای نهشت کانسنگ نشان می‌دهند.

با تلفیق یافته‌های حاصل از دمای همگن‌شدن و شوری میان‌بارهای سیال، صرف نظر از شرایط به‌دام‌افتادن آنها، می‌توان چگالی آنها را تعیین کرد (Bodnar, 1983). ترسیم یافته‌های ریزدماسنجی قره‌کند بر روی نمودار دو متغیره دمای همگن‌شدن در مقابل شوری (Wilkinson, 2001)، نشان می‌دهد که چگالی آنها در محدوده‌ای بین ۰/۹ تا ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب قرار می‌گیرد؛ اما اغلب آنها چگالی‌هایی در حدود ۰/۹۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب دارند (شکل ۱۵).



شکل ۱۵. نمودار تغییرات دما در برابر شوری (Wilkinson, 2001) که در روی آن یافته‌های میان‌بارهای سیال قره‌کند، چگالی‌هایی در محدوده ۰/۹ تا ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب را نشان می‌دهند.

Fig. 15. Diagram of homogenization temperature versus salinity (Wilkinson, 2001) on which the Gharehkand fluid inclusion data show densities ranging from 0.9 to 1g/cm³.

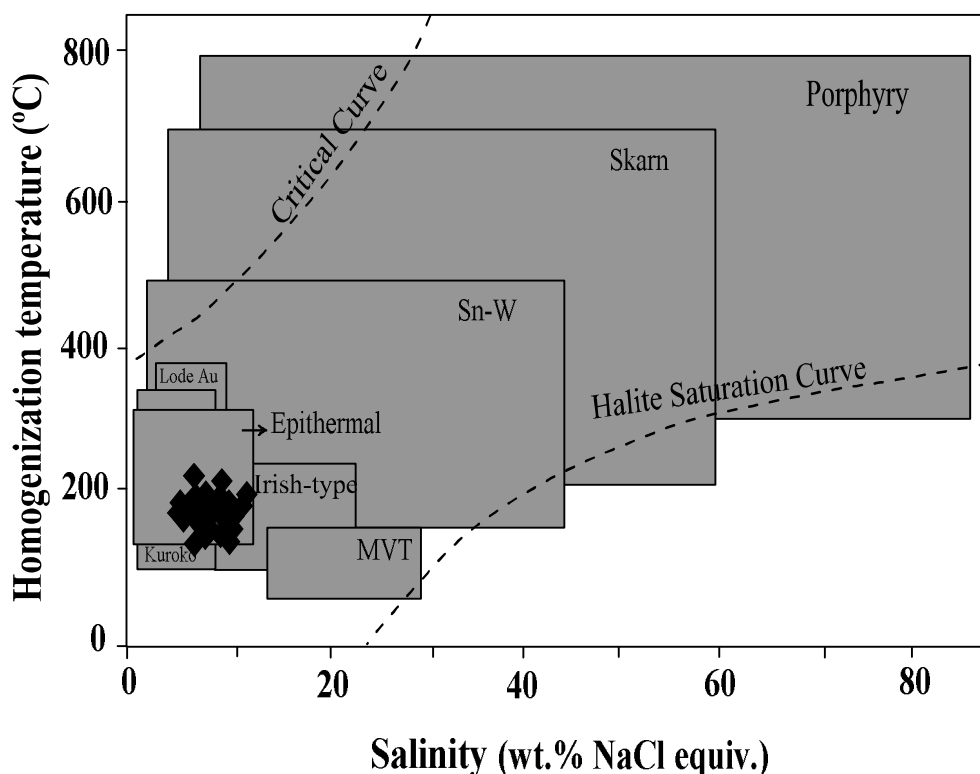


شکل ۱۶. نمودار دمای همگن شدن در برابر شوری (Shepherd et al., 1985; Wilkinson, 2001) که در روی آن روند تکاملی سیالات کانه‌ساز در منطقه قره‌کند نشان داده شده است. مطابق این نمودار، فرایندهای جوشش همراه با سردشدن ساده، از مهم‌ترین سازوکارهای مؤثر در نهشت کانسنگ‌ها در قره‌کند بوده‌اند.

Fig. 16. Diagram of homogenization temperature versus salinity (Shepherd et al., 1985; Wilkinson, 2001) on which the evolutionary trends of ore-forming fluids at Gharehkand were shown. According to this diagram, processes of boiling along with simple cooling were the most effective mechanisms in deposition of ores at Gharehkand.

(1995)، جان‌شینی کانی‌های اولیه سنگ میزبان رسوبی توسط کوارتز و کلسدون (Sillitoe and Hedenquist, 2003) و یافته‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال (شوری و دمای همگن شدن پایین) سیالات کانه‌ساز (Shepherd et al., 1985; Corbett, 2002)، کانی‌سازی سولفیدی و طلا در منطقه قره‌کند را می‌توان در زمره کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفید کم قرار داد.

برای تعیین منشأ احتمالی کانه‌زایی سولفیدی و طلا در رگه-رگچه‌های کوارتزی قره‌کند، از نمودار دو متغیره شوری در مقابل دمای همگن شدن (Wilkinson, 2001) استفاده شده است (شکل ۱۷). مطابق این نمودار، یافته‌های ریزدماسنجی منطقه قره‌کند، همگی در محدوده کانه‌زایی اپی‌ترمال قرار گرفته‌اند. همچنین بر پایه شواهدی از قبیل کانی‌شناسی کانی‌های سولفیدی، بافت‌های بلورهای کوارتز (دروزی، جعبه‌ای، تیغه‌ای، برشی و شانه‌ای) در رگه-رگچه‌های کوارتزی (Dong et al., 2009)

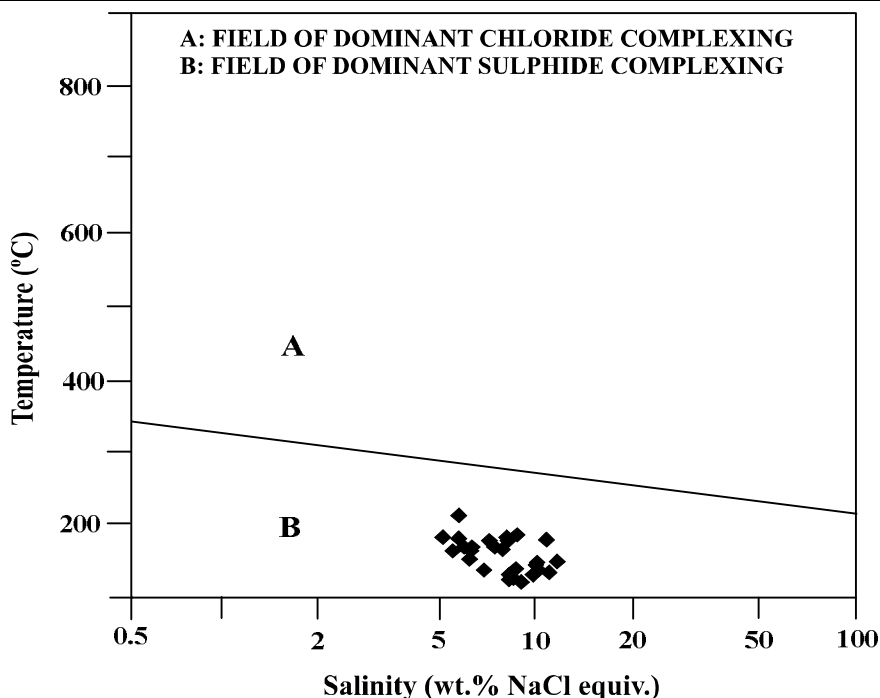


شکل ۱۷. نمودار دمای همگن شدن در مقابل شوری میان‌بارهای سیال قره‌کند، برای تعیین منشأ احتمالی محلول‌های گرمابی (Wilkinson, 2001). چنان‌که در این نمودار مشاهده می‌شود، تقریباً تمامی نقاط مربوط به یافته‌های ریزدماسنجی قره‌کند در محدوده اپی‌ترمال قرار می‌گیرند.

Fig. 17. Diagram of homogenization temperature versus salinity of the Gharehkand fluid inclusions for determining the possible genesis of hydrothermal fluids (Wilkinson, 2001). As shown in this figure, almost all of the Gharehkand microthermometric data points lie within the epithermal zone.

می‌دهد که لیگاند‌های سولفیدی به‌عنوان عوامل کمپلکس‌ساز، نقشی مؤثر در حمل فلزات توسط محلول‌های گرمابی کانه‌ساز در منطقه قره‌کند داشته‌اند.

برای تعیین نوع کمپلکس‌های مؤثر در حمل فلزات پایه و گران‌بها، از نمودار شوری در مقابل دمای همگن شدن (Pirajno, 2009)، استفاده شد (شکل ۱۸). این نمودار نشان



شکل ۱۸. نمودار شوری در مقابل دمای همگن شدن (Pirajno, 2009)، برای تعیین نوع لیگاندهای کمپلکس ساز فلزات در محلول‌های گرمایی. مطابق این نمودار لیگاندهای کمپلکس‌ساز بی‌سولفیدی به احتمال زیاد نقشی مؤثر در حمل فلزات پایه و طلا در قره‌کند داشته‌اند.

Fig. 18. Diagram of Salinity versus homogenization temperature (Pirajno, 2009) for determining the type of metal-complexing ligands in hydrothermal fluids. According to this diagram, the bisulfide complexing ligands did in most likelihood play an important role in transporting of the base metals and gold at Gharehkan.

نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:

- ۱) کانی‌سازی در منطقه قره‌کند به صورت رگه-رگچه‌ای در سنگ‌میزبان رسوبی طی دو مرحله رخ داده است. در مرحله اول، رگه-رگچه‌های کوارتزی طی سه زیرمرحله پیشین، میانی و پسین توسعه یافته‌اند؛ هرچند کانه‌زایی سولفیدی (گالن، اسفالریت، پیریت و کالکوپیریت) و طلا اغلب در رگچه‌ها و ریزرگچه‌های کوارتزی زیرمرحله پسین رخ داده است. در مرحله دوم، کانه‌زایی باریت به صورت رگه-رگچه‌ای اتفاق افتاده است.
- ۲) دگرسانی درون‌زاد اغلب به صورت توسعه‌هاله‌های سیلیسی که جانشین سنگ‌های میزبان رسوبی در دیواره و اطراف رگه-رگچه‌های کوارتزی شده‌اند، مشاهده می‌شوند.
- ۳) کانی‌های گوتیت، همتیت، ژاروسیت، مالاکیت و آزوریت

از کانی‌های زون اکسیدان هستند که از تخریب کانی‌های سولفیدی آهن و مس‌دار درون‌زاد (پیریت و کالکوپیریت) تشکیل شده‌اند. همچنین کانی‌های سولفیدی ثانویه مس (کولیت، کالکوسیت و دیژنیت) در زون برون‌زاد به صورت جانشینی سولفیدهای درون‌زاد شکل گرفته‌اند.

۴) بر اساس محتوای فازی، سه نوع میان‌بار سیال (دوفازی غنی از مایع، تک‌فاز گازی و دوفاضی غنی از گاز) در بلورهای کوارتز رگچه‌ها و ریزرگچه‌های زیرمرحله پسین تشخیص داده شده‌اند. بر اساس یافته‌های ریزدماسنجی، مقادیر دمای همگن‌شدن و شوری میان بارهای سیال به ترتیب بین ۸۰ تا ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد و ۶ تا ۱۳ درصد وزنی معادل نمک طعام متغیر هستند. ۵) بر اساس مقادیر دمای همگن‌شدن و شوری میان‌بارهای سیال در قره‌کند، سیالات کانه‌ساز چگالی در بازه بین ۰/۹ تا ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب داشته و در زمان نهشت کانی‌های کدر و

پایین) سیالات کانه‌ساز، کانی‌سازی سولفیدی و طلا در منطقه قره‌کند را می‌توان در زمره کانسارهای اپی‌ترمال با سبک سولفید کم قرار داد.

قدردانی

نویسندگان از معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه تبریز برای حمایت‌های مالی، از جناب آقای دکتر بهزاد حاج‌علیلو (استاد گروه زمین‌شناسی دانشگاه پیام نور مرکز تبریز) برای همکاری بی‌دریغشان در طی بررسی‌های میکروسکوپی و ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال و از داوران محترم نشریه زمین‌شناسی اقتصادی برای نظرها و پیشنهادهای سازنده‌شان قدردانی می‌نمایند.

روشن، فشارهای هیدرواستاتیکی در بازه بین ۲۰ تا ۲۵ بار را تحمل کرده‌اند که مطابق با اعماق بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ متری زیر سطح سفره آب‌های زیرزمینی است. همچنین بررسی‌های ریزدماسنجی نشان‌داده که جوشش و سرد شدن ساده، مهم‌ترین سازوکارهای نهشت کانسنگ در قره‌کند بودند و لیگاندهای کمپلکس‌ساز سولفیدی نقشی مؤثر در حمل و نقل فلزات در داخل محلول‌های گرمابی کانه‌ساز ایفا کرده‌اند.

۶- بر پایه شواهدی از قبیل کانی‌شناسی کانی‌های سولفیدی، بافت‌های بلورهای کوارتز (دروزی، جعبه‌ای، تیغه‌ای، برشی و شانه‌ای) در رگه-رگچه‌های کوارتزی، جاننشینی کانی‌های اولیه سنگ میزبان رسوبی توسط کوارتز و کلسدونی و یافته‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال (شوری و دمای همگن شدن

References

- Alamina, Z., Bagheri, H. and Salehi, M., 2017. Geochemical and geophysical investigations, and fluid inclusion studies in the exploration area of Zafarghand (Northeast Isfahan, Iran). *Journal of Economic Geology*, 9(2): 295–312. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.v9i2.56334>
- Alavi, M. and Shahrabi, M., 1980. Geological map of the Maragheh, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran. (in Persian)
- Albinson, T., Norman, D.I., Cole, D. and Chomiak, B., 2001. Controls on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: constraints from fluid inclusion and stable isotope data. In: T. Albinson and C.E. Nelson (Editors), *New Mines and Discoveries in Mexico and Central America*. Society of Economic Geologists, Special Publication 8, Littleton, pp. 1–32. <https://doi.org/10.5382/SP.08.01>
- Asadi, H.H., Voncken, J.H.L., Kühnel, R.A. and Hale, M., 2000. Petrography, mineralogy and geochemistry of the Zarshuran Carlin-like gold deposit, northwest Iran. *Mineralium Deposita*, 35(7): 656–671. <https://doi.org/10.1007/s001260050269>
- Bodnar, R.J., 1983. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and PVTX properties of inclusion fluid. *Economic Geology*, 78(3): 535–542. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.78.3.535>
- Bodnar, R.J., 2003. Introduction to aqueous-electrolyte fluid inclusions. In: I. Samson, A. Anderson and D. Marshal (Editors), *Fluid inclusions: Analysis and interpretation*. Mineralogical Association of Canada, Short Course 32, Quebec, pp. 81–100. Retrieved September 1, 2021 from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.466.1758&rep=rep1&type=pdf>
- Bodnar, R.J., Lecumberri-Sanchez P., Moncada D. and Steele-MacInnis M., 2014. Fluid Inclusions in Hydrothermal Ore Deposits. In: H.D. Holland and K.K. Turekian (Editors), *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, Oxford, pp. 119–142. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01105-0>

- Bodnar, R.J., Reynolds, T.J. and Kuehn, C.A., 1985. Fluid-inclusion systematics in epithermal systems. In: B.R. Berger and P.M. Bethke (Editors), *Geology and Geochemistry of Epithermal Systems*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 73–97. <https://doi.org/10.5382/Rev.02.05>
- Bodnar, R.J. and Vityk, M.O., 1994. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. In: B. De Vivo and M.L. Frezzotti (Editors), *Fluid inclusions in minerals: Methods, and Applications*. Short Course of the Working Group, Siena, pp. 117–130. Retrieved September 1, 2021 from <https://ci.nii.ac.jp/naid/10003717232/>
- Camprubí, A. and Albinson, T., 2007. Epithermal deposits in Mexico—update of current knowledge, and an empirical reclassification. In: S.A. Alaniz-Álvarez and Á.F. Nieto-Samaniego (Editors), *Geology of Mexico: Celebrating the Centenary of the Geological Society of Mexico*. Geological Society of America, Special Papers 422, pp. 377–415. [https://doi.org/10.1130/2007.2422\(14\)](https://doi.org/10.1130/2007.2422(14))
- Corbett, G., 2002. Epithermal gold for explorationists. *Australian Institute of Geoscientists*, 1: 1–26. Retrieved September 1, 2021 from <http://aigjournal.aig.org.au/epithermal-gold-for-explorationists/>
- Daliran, F., 2008. The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Aghdarreh, Takab geothermal field, NW Iran, hydrothermal alteration and mineralization. *Mineralium Deposita*, 43(4): 383–404. <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0167-x>
- Diamond, L.W., 2003. Glossary: Terms and symbols used in fluid inclusion studies. In: I. Samson, A. Anderson and D. Marshal (Editors), *Fluid inclusions: Analysis and interpretation*. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series 32, Canada, pp. 363–372. Retrieved September 1, 2021 from <https://cpfd.cnki.com.cn/Article/CPFDTOTAL-ZGKD200410001069.htm>
- Dong, G., Morrison, G. and Jaireth S., 1995. Quartz textures in epithermal veins, Queensland-Classification, origin, and implication. *Economic Geology*, 90(6): 1841–1856. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.6.1841>
- Hedenquist, J.W., Arribas, A.R. and Gonzalez-Urien, E., 2000. Exploration for epithermal gold deposits. In: S.G. Hagemann and P.E. Brown (Editors), *Gold in 2000*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 245–277. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.07>
- Heidari, S.M., Daliran, F., Paquette, J.L. and Gasquet, D., 2015. Geology, timing, and genesis of the high sulfidation Au (-Cu) deposit of Touzlar, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 65(2): 460–486. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.013>
- Maghsoudi, A., Rahmani, M. and Rashidi, B., 2004. Gold deposits and indications of Iran. Arian Zamin publication, Tehran, 364 pp. (in Persian)
- Mehrabi, B., Chaghaneh, N. and Tale Fazel, E., 2014. Intermediate sulfidation epithermal mineralization of No. 4 anomaly of Golojeh deposit (N. Zanjan) based on mineralography, alteration and ore fluid geochemistry features. *Journal of Economic Geology*, 6(1): 1–22. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.v6i1.38302>
- Mehrabi, B., Yardley, B.W.D. and Cann, J.R., 1999. Sediment-hosted disseminated gold mineralization at Zarshuran, NW Iran. *Mineralium Deposita*, 34(7): 673–696. <https://doi.org/10.1007/s001260050227>
- Moncada, D., Baker, D. and Bodnar, R.J., 2017. Mineralogical, petrographic and fluid inclusion evidence for the link between boiling and epithermal Ag-Au mineralization in the La Luz area, Guanajuato Mining District, México. *Ore Geology Reviews*, 89: 143–170. <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.024>
- Moncada, D., Mutchler, S., Nieto, A., Reynolds, T.J., Rimstidt, J.D. and Bodnar, R.J., 2012. Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag–Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 114: 20–35. <http://doi:10.1016/j.gexplo.2011.12.001>
- Pirajno, F., 2009. *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer Science, New York, 1273 pp. <http://doi:10.1007/978-1-4020/8613-7>
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H., 1985. *A practical guide to fluid inclusion*

- studies. Blackie, Glasgow, 239 pp.
- Sillitoe, S.H. and Hedenquist, J.W., 2003. Linkages between volcanotectonic settings, Ore-fluid composition, and epithermal precious metal deposits. In: S.F. Simmons and I. Graham (Editors), Volcanic, geothermal and ore forming processes: Rulers and witnesses of processes within the Earth. Society of Economic Geologists, Special Publication 10, Littleton, pp. 315–343. Retrieved September 1, 2021 from <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.471.4595&rep=rep1&type=pdf>
- Simmons, S.F., White, N.C. and John, D.A., 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. In: J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Richards (Editors), Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume. Society of Economic Geologists, Littleton, CO, U.S.A., pp. 485–522. <https://doi.org/10.5382/AV100.16>
- Sohrabi, G., Rezaei Aghdam, M. and Nasiri Ganjinehketab, M., 2017. Introduction of Gold mineralization related to silicic veins with carbonate host rocks in SE Maragheh (Gharehkand). 35th National Geosciences Congress, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran. (in Persian with English abstract)
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonic of Iran: A review. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 52(7): 1229–1258. <https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Vikre, P.G., 1985. Precious metal vein systems in the National District, Humboldt County, Nevada. Economic Geology, 80(2): 360–393. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.2.360>
- White, N.C. and Hedenquist, J.W., 1995. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. Society of Economic Geologists Newsletter, 23(1): 9–13. Retrieved September 1, 2021 from <https://www.segweb.org/ItemDetail?iProductCode=EDOCNSL23&Category=NSL&WebsiteKey=1606b52c-0bf9-444b-adca-192d063f5db4>
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. Lithos, 55(1): 229–272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



How to cite this article

Hassani Soughi, F., Calagari, A.A. and Sohrabi, Gh., 2021. Consideration of mineralization and characterization of fluid inclusions in the Gharehkand sediment-hosted gold-bearing vein-veinlets, southeast of Maragheh, East Azarbaijan. Journal of Economic Geology, 13(2): 387–409. (in Persian with English abstract) <https://dx.doi.org/10.22067/econg.v13i2.87317>



Consideration of mineralization and characterization of fluid inclusions in the Gharehkand sediment-hosted gold-bearing vein-veinlets, southeast of Maragheh, East Azarbaijan

Fatemeh Hassani Soughi^{1*}, Ali Asghar Calagari¹ and Ghahraman Sohrabi²

1) Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2) Department of Geology, Mohaghegh Ardebili University, Ardebil, Iran

Submitted: June 13, 2020

Accepted: Oct. 04, 2020

Keywords: Fluid inclusion, Gold mineralization, Epithermal, Gharehkand, Maragheh

Introduction

The Gharehkand area is located in the southeast of Maragheh city and in Takab metallogenic district. According to the structural divisions of Iran, this area is situated south of the volcanic Mount Sahand in the Central Iran zone (Stocklin, 1968). This paper aims to investigate the characteristics of gold-bearing vein-veinlets and physicochemical conditions of ore-forming fluids in the Gharehkand area.

Materials and methods

About 40 rock samples were collected from mineralized zones and host rocks. The thin and thin-polished sample sections were studied in the geology department of the Mohaghegh Ardebili University, Ardebil. Microthermometric data were obtained from fluid inclusions using the Linkam THMS600 stage at the Payame Noor University of Tabriz.

Results

1) The mineralization in the Gharehkand area took place principally as vein-veinlets within the host sedimentary rocks during two main stages. Mineralization occurred in quartz vein-veinlets during the first stage. The quartz crystals within the quartz vein-veinlets display brecciated, boxwork, drusy, and comb textures. During the second stage barite mineralization occurred as vein-veinlets. The mineralization of sulfides (galena, sphalerite, pyrite, and chalcopyrite) and gold occurred within

the quartz vein-veinlets of the first stage.

2) The values of homogenization temperature (T_h) and salinity of fluid inclusions vary from 80°C to 220°C and 6 to 13 wt.% NaCl eq., respectively.

3) The study of fluid inclusions demonstrated that boiling and simple cooling were the most important mechanisms in the ore deposition at Gharehkand, and the sulfide complexing ligands played an effective role in transporting metals within the ore-forming hydrothermal fluids.

4) The quartz crystals textures (brecciated, boxwork, and comb) in quartz vein-veinlets and microthermometric data (low salinity and T_h) of the ore-forming fluids indicate that mineralization at Gharehkand is of epithermal type with low-sulfidation style.

Discussion

The mineralization in the Gharehkand area took place principally as vein-veinlets within the host sedimentary rocks. Two main stages of mineralization were distinguished at the Gharehkand area. Stage-1 mineralization is represented by the quartz vein-veinlets. The quartz crystals within the quartz vein-veinlets display brecciated, boxwork, drusy, and comb textures. The formation of quartz crystals in quartz veinlets and micro-veinlets were temporally divided into three sub-stages: early, middle, and late. Stage-2 mineralization is represented by barite vein-veinlets. The hypogene alteration is mainly observed as the development of silicic halos around quartz vein-veinlets within the host sedimentary

*Corresponding author Email: f.hassanisoughi@gmail.com

rocks. The mineralization of sulfides (galena, sphalerite, pyrite, and chalcopyrite) and gold have occurred within the late sub-stage quartz veinlets and micro-veinlets. Oxidized processes have caused formation of goethite, hematite, jarosite, malachite, and azurite. Copper sulfides (covellite, chalcocite, and digenite) are formed in the supergene zone. Based upon phase content, the studied fluid inclusions in late sub-stage quartz crystals may be classified into three types: liquid-rich two-phase (L+V), mono-phase vapor (V), and vapor-rich two-phase (V+L). The values of homogenization temperature (Th) and salinity of the analyzed liquid-rich two-phase fluid inclusions vary from 80°C to 220°C and 6 to 13 wt.% NaCl eq., respectively (Fig. 11A, C). Given the Th and salinity values of the fluid inclusions, ore-forming hydrothermal fluids during development of the quartz vein-veinlets at Gharehkand experienced hydrostatic pressures within the range of 20-25 bars. This is almost equivalent to depths of 200-250 meters below the underground water table level. It is consistent with the estimated depths of most epithermal deposits (Bodnar et al., 2014). The Gharehkand microthermometric data points on the bivariate plot of Th versus salinity (Wilkinson, 2001) show that the densities of fluid inclusions vary from 0.9 to 1 g/cm³. The occurrence of boiling and simple cooling are the most effective mechanisms in deposition of ore and gangue minerals at Gharehkand. The Gharehkand microthermometric data points on the bivariate plot of Th versus salinity (Pirajno, 2009) indicate that the bisulfide complexing ligand most likely played the important role in transporting ore metals (particularly gold).

Acknowledgements

This research study was financially supported by the Research Bureau of the University of Tabriz. Therefore, the authors would like to express their gratitude to the authorities of this bureau. Our sincere thanks are also expressed to Dr. Behzad Hajalilu (faculty member of Geology Department at the Payame Noor University of Tabriz) for his bountiful cooperation during microscopic and microthermometric studies of fluid inclusions. Our appreciation is further extended to the anonymous reviewers for their valuable comments and suggestions on this manuscript.

References

- Bodnar, R.J., Lecumberri-Sanchez P., Moncada D. and Steele-MacInnis M., 2014. Fluid Inclusions in Hydrothermal Ore Deposits. In: H.D. Holland and K.K. Turekian (Editors), *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, Oxford, pp. 119–142. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01105-0>
- Pirajno, F., 2009. *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer Science, New York, 1273 pp. <http://doi:10.1007/978-1-4020/8613-7>
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonic of Iran: A review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52(7): 1229–1258. <https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1): 229–272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)