



زمین‌شناسی، زمین‌شیمی و مطالعات میان‌بارهای سیال در رگه‌های کوارتزی مس - مولیدن - طلا دار قره‌چیلر، شمال خاور خاروانا، آذربایجان شرقی

فریبا آسیای صوفیانی، میرعلی اصغر مختاری، حسین کوهستانی* و امیر مرتضی عظیم‌زاده

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۲۳، پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۰

چکیده

رخداد معدنی قره‌چیلر در فاصله ۷۰ کیلومتری شمال تبریز واقع شده است و بخشی از پهنه کانه‌دار ارسباران در پهنه ساختاری البرز باختری - آذربایجان محسوب می‌شود. کانه‌زایی به شکل رگه‌ای در میزبان توده گرانودیوریت - کوارتمونزودوریت رخ داده است. کانه‌های فلزی در منطقه قره‌چیلر شامل کالکوپریت، پیریت، مولیدنیت و گالن و کانی‌های باطله شامل کوارتز، کلسیت و آنکرایت است. مهم‌ترین بافت‌های کانسنک شامل رگه - رگه‌چهای، برشی، دانه‌پراکنده، پُرکننده فضای خالی، بازماندی و جانشینی است. چهار مرحله کانه‌زایی در قره‌چیلر قابل تشخیص است، این مراحل با رگه‌های کوارتز - پیریت - کالکوپریت (مرحله اول) آغاز و به ترتیب با تشکیل رگه - رگه‌چهای کوارتز - مولیدنیت - پیریت (مرحله دوم)، رگه‌چهای هیدروکسید آهنی طلا دار (مرحله سوم) و سرانجام رگه‌چهای منفرد و یا دسته رگه‌چهای نیمه‌موازی تا متقاطع کوارتز - کربنات تأخیری (مرحله چهارم) ادامه یافته است. دگرسانی گرمابی به بخش‌های سیلیسی، سرسیتی و کربناتی بخش‌های کانه‌دار محدود می‌شود. دگرسانی پروپلیتیک در خارج از بخش‌های کانه‌دار و دگرسانی پتاسیک به صورت محدود در منطقه رخ داده‌اند. مقایسه الگوی عناصر کمیاب خاکی در توده گرانودیوریت - کوارتمونزودوریت میزبان سالم و بدون کانه‌زایی، توده دگرسان شده و رگه‌های کوارتز کانه‌دار، بیانگر تهنی‌شدگی مشخص در میزان این عناصر در توده دگرسان شده و به‌ویژه رگه‌های کانه‌دار است. این امر بیانگر تحرک این عناصر توسط سیالات ماگمایی - گرمابی غنی از کلر و فلوئوردار است که سبب شست‌وشو و حمل آنها از بخش‌های دگرسانی و کانه‌زایی شده‌اند. دمای همگن شدن میان‌بارهای سیال دو فازي موجود در کوارتزهای مراحل اول و دوم کانه‌زایی در محدوده دمای ۱۸۲-۵۳۲ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد. دمای ذوب یخ از ۵/۷- تا ۲۲- درجه سانتی‌گراد متغیر است که منطبق بر شوری بین ۹/۲ تا ۲۳/۵ درصد وزنی معادل نمک طعام است. دمای همگن شدن میان‌بارهای سیال سه فازي نوع اول ($T_h > T_{m-h}$) و نوع دوم ($T_{m-h} > T_h$) به ترتیب بین ۱۹۷-۵۳۰ و ۲۰۳-۳۷۵ درجه سانتی‌گراد و شوری آنها به ترتیب بین ۲۹/۵ تا ۵۵/۱ و ۳۲/۴ تا ۴۵/۶ درصد وزنی معادل نمک طعام است. روند دمای همگن شدن - شوری با ترکیبی از فرآیندهای آمیختگی هم‌دمای سیال‌های با شوری متفاوت و جوشش سازگار است. رخداد مس، مولیدن و طلا در اثر این فرآیندها و همچنین واکنش سیال کانه‌دار با کمرسنگ‌ها صورت گرفته است. ویژگی‌های زمین‌شناسی، ساخت و بافت کانسنک، کانی‌شناسی کانسنک، زمین‌شیمی و داده‌های میان‌بارهای سیال بیانگر کانه‌زایی رگه‌ای مس - مولیدن - طلا مرتبط با سیستم‌های مس - مولیدن پورفیری و ذخایر طلای مرتبط با توده‌های نفوذی در منطقه قره‌چیلر است.

واژه‌های کلیدی: زمین‌شناسی، زمین‌شیمی، میان‌بارهای سیال، قره‌چیلر، خاروانا، ارسباران

مقدمه

منطقه قره‌چیلر در پهنه کانه‌دار ارسباران، داخل باتولیت قره‌داغ و در فاصله هوایی حدود ۲۰ کیلومتری شمال‌خاور خاروانا و ۷۰ کیلومتری شمال تبریز واقع شده است (شکل ۱). پهنه ارسباران یکی از مهم‌ترین پهنه‌های فلززایی ترشیری در ایران است (Jamali et al., 2010; Jamali et al., 2012; Simmonds and Moazzen, 2015; Jamali and Mehrabi, 2015). این پهنه میزبان انواع مختلف کانه‌زایی‌های فلزی مانند کانسارهای مس پورفیری سونگون (Mehrpour, 1993; Calagari, 1997; Hezarkhani and Williams-Jones, 1998; Calagari, 2004; Aghazadeh et al., 2015; Mohammadi, 2004; Fard et al., 2005; Akbarpour, 2006; Zonouzi, 2005)، هفت‌چشمه (Hassanpour et al., 2011) و سوناجیل (Hosseinzadeh, 2008)، اسکارن‌های مس مزرعه، سونگون و انجرد (Mollai, 1993; Karimzadeh, 2002; Somarin and Moayyed, 2002; Calagari and Hosseinzadeh, 2006; Mollai et al., 2014) و ذخایر طلای اپی‌ترمال شرف‌آباد (Pournik, 2002)، مسجدداغی (Mohammadi, 2004; Fard et al., 2005; Akbarpour, 2006; Zonouzi, 2005)، زگلک-ساریلار (Heydarzadeh, 2007; Ebrahimi et al., 2011)، اندریان (میوه‌رود) و آسترکان (Jamali, 1999; Gholami Checheki, 2001; Jamali et al., 2010; Jamali et al., 2012; Ferdosi et al., 2014; Jamali and Mehrabi, 2015; Ferdosi et al., 2016) نبی‌جان (Baniadam, 2003) و صفی‌خانلو-نقدوز (Ghadimzadeh, 2002) است. ویژگی‌های زمین‌ساختی، کانه‌زایی و نوع دگرسانی‌های گرمابی این پهنه فلززایی شباهت‌های زیادی با بخش جنوبی قفقاز کوچک در ارمنستان دارد (Simmonds and Moazzen, 2015). باتولیت قره‌داغ یکی از مهم‌ترین توده‌های نفوذی در این پهنه کانه‌دار محسوب می‌شود که بخش عمده آن در کشورهای آذربایجان و ارمنستان برون‌زد دارد. کانی‌سازی‌های متعددی در سنگ‌های میزبان و درون این باتولیت شناسایی شده است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به کانسارهای مس پورفیری آگراک و کاجاران (Zvedov et al., 1993; Moritz

et al., 2016)، کانسار طلای اپی‌ترمال ژد (Kozerenko, 2004; Konstantinov et al., 2010)، کانسارهای پلی‌متال کافان، الاوردی و مهمانا (Mederer et al., 2014) در ارمنستان، کانسارهای اسکارن آهن شمال آستامال و پهناور (Mokhtari, 2012; Baghban et al., 2015; Baghban et al., 2016)، اسکارن‌های مس آوان و کمتال (Mokhtari et al., 2013; Mokhtari et al., 2016) و کانی‌سازی مس-مولیدن-طلای قره‌چیلر (Mokhtari, 2008; Simmonds and Moazzen, 2015) در ایران اشاره کرد.

با اینکه پژوهشگران متعددی باتولیت قره‌داغ را از جنبه‌های مختلف مانند زمین‌شناسی، پتروژنی، زمین‌شیمی، نحوه جایگیری، جایگاه زمین‌ساختی و پتروژنز مورد بررسی قرار داده‌اند؛ اما تاکنون بررسی علمی دقیقی بر روی کانی‌سازی مس-مولیدن-طلای قره‌چیلر انجام نشده است؛ به‌طوری‌که نوع کانه‌زایی هنوز مورد بحث است و انواع طلای مرتبط با توده نفوذی (Mokhtari, 2008; Mokhtari et al., 2013)، کانی‌سازی نوع رگه‌ای (Rezai Aghdam and Sohrabi, 2010) و مس-مولیدن پورفیری (Amini Fazl, 2013; Zakeri, 1994) برای آن پیشنهاد شده است. سن‌سنجی Re-Os انجام‌شده توسط سیمونز و مؤذن (Simmonds and Moazzen, 2015) بر روی رگه‌های کانه‌دار قره‌چیلر نیز بیشتر برای درک کلی کانه‌زایی سنوزوئیک در جنوب ارمنستان، نخجوان و ایران بوده است. این محققان اطلاعاتی را که بتواند ویژگی‌های کانه‌زایی مس-مولیدن-طلای قره‌چیلر را برشمرد و نوع آن را تعیین کند، ارائه نکرده‌اند. در این پژوهش، زمین‌شناسی، زمین‌شیمی و بررسی‌های میان‌بارهای سیال در رگه‌های مس-مولیدن-طلادار قره‌چیلر مورد بررسی قرار گرفته و نوع کانه‌زایی تعیین و مدل تشکیل آن بررسی شده است. بررسی دقیق این نوع کانه‌زایی‌ها می‌تواند عوامل کلیدی توزیع زمانی و مکانی برای اکتشاف کانه‌زایی‌های مشابه در پهنه کانه‌دار ارسباران را معرفی کند و به‌عنوان الگوی اکتشافی مورد استفاده قرار گیرد.

روش مطالعه

این پژوهش شامل دو بخش بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی

در مرحله گرمایش با دقت ± 0.6 درجه سانتی گراد است که با نیترا ت سزیم با نقطه ذوب ۴۱۴ درجه سانتی گراد و در مرحله سرمایش با دقت ± 0.2 درجه سانتی گراد و با ماده استاندارد آن همگزان با نقطه ذوب ۹۴/۳- درجه سانتی گراد انجام شد. برای تعیین چگالی و فشار حاکم در زمان به دام افتادن میان‌بارهای سیال، از نرم‌افزار Software Modelling for Fluid Inclusion V2.6 طراحی شده توسط شرکت Linkam استفاده شده است. میزان شوری بر حسب درصد وزنی معادل نمک طعام (wt% NaCl eq.) و از طریق دمای ذوب آخرین قطعه یخ (T_{mice}) با استفاده رابطه هال و همکاران (Hall et al., 1988) محاسبه شده است. محاسبه شوری در میان‌بارهای حاوی فاز جامد هالیت نیز با استفاده از دمای انحلال فاز هالیت و بهره‌گیری از نرم‌افزار SALT (Bodnar et al., 1989) انجام شد.

زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه قره‌چیلر

بر اساس تقسیمات پهنه‌های ساختمانی - رسوبی ایران (Nabavi, 1976) منطقه مورد بررسی بخشی از پهنه البرز - آذربایجان است. در دیدگاهی فراگیرتر، این منطقه بخشی از حاشیه جنوبی قفقاز کوچک (Adamia et al., 1981) را تشکیل می‌دهد. با توجه به نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سیه‌رود (Mehrpour et al., 1997) و بر اساس بررسی‌های صحرایی انجام‌شده در قالب تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰ منطقه قره‌چیلر (شکل ۱)، واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در منطقه شامل توده‌های نفوذی (فازهای مختلف باتولیت قره‌داغ) سنوزوئیک هستند. با توجه به روابط صحرایی، چهار واحد سنگی نفوذی تا نیمه‌عمیق به ترتیب از قدیم به جدید شامل ۱- توده گرانودیوریت - کوارتز مونوزودیوریت به‌عنوان میزبان رگه‌های کانه‌دار، ۲- آپوفیزهای گرانیت پورفیری، ۳- استوک‌های کوارتز-مونزونیت و ۴- دایک‌های اسیدی و حدواسط در منطقه قابل تشخیص هستند. زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی این توده‌ها به شرح زیر است:

۱) گرانودیوریت - کوارتز مونوزودیوریت

بخش عمده باتولیت قره‌داغ متشکل از این فاز نفوذی است که میزبان رگه‌های کوارتزی کانه‌دار منطقه قره‌چیلر است (شکل ۲-).

است. بررسی‌های صحرایی شامل شناسایی رگه‌های کانه‌دار و چگونگی ارتباط آنها با سنگ‌های میزبان و نمونه‌گیری از آنها برای بررسی‌های آزمایشگاهی بوده است. در این راستا، علاوه بر انجام بررسی‌های صحرایی و تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ بیش از ۷۰ نمونه از واحدهای سنگی میزبان و رخنمون‌های کانه‌زایی برداشت شد. از این بین، ۲۱ مقطع نازک و ۱۶ مقطع نازک - صیقلی برای بررسی‌های سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری و ساخت و بافت، تهیه و با استفاده از میکروسکوپ‌های پلاریزان دو منظوره مدل GX دانشگاه زنجان مطالعه شد. سپس برای انجام بررسی‌های زمین‌شیمیایی، ۶ نمونه از توده میزبان سالم و غیرهوازده، ۱ نمونه از توده میزبان دگرسان‌شده و ۲ نمونه از رگه‌های کانه‌دار انتخاب شد. برای این منظور، ابتدا نمونه‌ها توسط خردکننده فولادی تا اندازه حدود ۵ مش (۴ میلی‌متر) خرد و سپس با استفاده از آگات به مدت ۲ دقیقه تا اندازه حدود ۲۰۰ مش (۷۴ میکرون) پودر شدند. مراحل خردایش و پودر کردن نمونه‌ها در آزمایشگاه دانشگاه زنجان انجام شد. پس از آماده‌سازی، میزان ۲۰ گرم از پودر نمونه‌ها برای تعیین میزان عناصر کمیاب و کمیاب خاکی به روش ICP-MS به آزمایشگاه شرکت زرآزما در تهران ارسال شد و مورد تجزیه قرار گرفت. برای تعیین میزان عناصر کمیاب خاکی حدود ۰/۲ گرم از هر نمونه در لیتیم متابورات/تترابورات ذوب و سپس در اسید نیتریک حل شد. برای تعیین میزان فلزات پایه به‌صورت جداگانه حدود ۰/۵ گرم از هر نمونه در تیزاب سلطانی داغ (۹۵ درجه سانتی گراد) حل شد. حد پایین دقت اندازه‌گیری برای عناصر مختلف در جدول ۱ آمده است. بررسی میان‌بارهای سیال بر روی ۵ نمونه کوارتز مربوط به مراحل اول و دوم کانه‌زایی انجام شده است. به‌دلیل اندازه بسیار کوچک میان‌بارهای سیال موجود در کوارتزهای مرحله سوم کانه‌زایی، هیچ مطالعه‌ای بر روی این میان‌بارهای سیال انجام نشده است. اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی با استفاده از دستگاه میان‌بار سیال مدل Linkam THMSG600 متصل به میکروسکوپ ZEISS و مجهز به کنترل‌کننده حرارتی TMS94 و سردکننده LNP در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شده است. دامنه حرارتی دستگاه، ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی گراد است. کالیبراسیون دستگاه

بیوتیت ثانویه، کوارتز و فلدسپار پتاسیم ثانویه به صورت کانی‌های ثانویه حضور دارند.

۳) کوارتز موزونیت

این سنگ‌ها به صورت استوک‌های کوچک در جنوب و جنوب‌خاور روستاهای انیق و قره‌چیلر رخنمون داشته و به داخل توده گرانودیوریت - کوارتز موزودیوریت نفوذ کرده‌اند. از شواهد صحرایی این تزریق، حضور آنکلاوهای گرانودیوریت - کوارتز موزودیوریت در داخل کوارتز موزونیت‌ها است (شکل ۲-۲). این سنگ‌ها بافت میکروگرانولار داشته و کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده آنها شامل فلدسپارها و کوارتز به همراه کانی‌های مافیک است. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، این سنگ‌ها دارای بافت میکروگرانولار، موزونیتی و پوئی کلیتیک متشکل از فلدسپار پتاسیم (ارتوکلاز)، پلاژیوکلاز، کوارتز و هورنبلاند هستند (شکل ۳-۳). کانی‌های کدر، بیوتیت، زیرکن، اسفن و آپاتیت به عنوان کانی‌های فرعی و کانی‌های سرسیت، کلریت، کلسیت و اپیدوت به صورت کانی‌های ثانویه در این سنگ‌ها حضور دارند.

۴) دایک‌های اسیدی - حدواسط

دایک‌های متعددی با ترکیب اسیدی - حدواسط در منطقه قره‌چیلر و به‌ویژه در مجاورت با رگه‌های کوارتز کانه‌دار حضور دارند. این دایک‌ها اغلب ترکیب گرانیت پورفیری داشته (شکل ۴-۴ و B) و دارای امتداد شمال‌باختر - جنوب‌خاور و هم‌راستا با رگه‌های کوارتز کانه‌دار هستند. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، این دایک‌ها دارای بافت پورفیری و فلسوفیری بوده و کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده آنها شامل پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم (ارتوکلاز)، کوارتز و بیوتیت در زمینه کوارتز - فلدسپاتی است (شکل ۵-۴ و B). در انواع دگرسان‌شده، کلریت، کانی‌های رسی، کوارتز، بیوتیت و کانی‌های سولفیدی به صورت ثانویه تشکیل شده‌اند. دایک‌های آندزیتی - تراکی آندزیتی در بخش‌های مختلف منطقه دیده می‌شوند. رخنمون اصلی آنها ضلع خاوری رودخانه قره‌چیلر است (شکل ۴-۴). بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، این

A). این سنگ‌ها در نمونه دستی بافت گرانولار داشته و کانی‌های اصلی آنها شامل فلدسپار پتاسیم، کوارتز، آمفیبول و بیوتیت است. از ویژگی‌های این توده‌ها حضور آنکلاوهای میکروگرانولار مافیک در اندازه‌ها و شکل‌های مختلف است (شکل ۲-۲). بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، این سنگ‌ها دارای بافت‌های هتروگرانولار، موزونیتی، پوئی کلیتیک، میرمکتی و پرتیتی متشکل از کانی‌های پلاژیوکلاز، کوارتز، فلدسپار پتاسیم (ارتوکلاز)، هورنبلاند و بیوتیت هستند (شکل ۳-۳ و B). زیرکن، اسفن، آپاتیت، کانی‌های کدر و کلینوپروکسن به عنوان کانی‌های فرعی و سرسیت، کلریت، اپیدوت و اکتینولیت نیز به عنوان کانی‌های ثانویه در این توده‌ها حضور دارند. در حاشیه رگه‌های کوارتزی، این توده با شدت‌های متفاوتی تحت تأثیر دگرسانی‌های سرسیتی و سیلیسی قرار گرفته است و ضخامت پهنه دگرسانی آن تا ۲ متر می‌رسد. در دره قره‌چیلر، رگه‌های تیره رنگی، توده گرانودیوریتی - کوارتز موزودیوریتی را قطع کرده است. بررسی میکروسکوپی این رگه‌چه‌ها بیانگر تمرکز بلورهای کوچک و شکل‌دار بیوتیت در همراهی با کوارتز و آلپیت است که به صورت ثانویه تشکیل شده‌اند (شکل ۳-۳). این رگه‌چه‌ها می‌تواند شواهدی از عملکرد سیالات گرمایی و دگرسانی پتاسیک در منطقه مورد بررسی باشد.

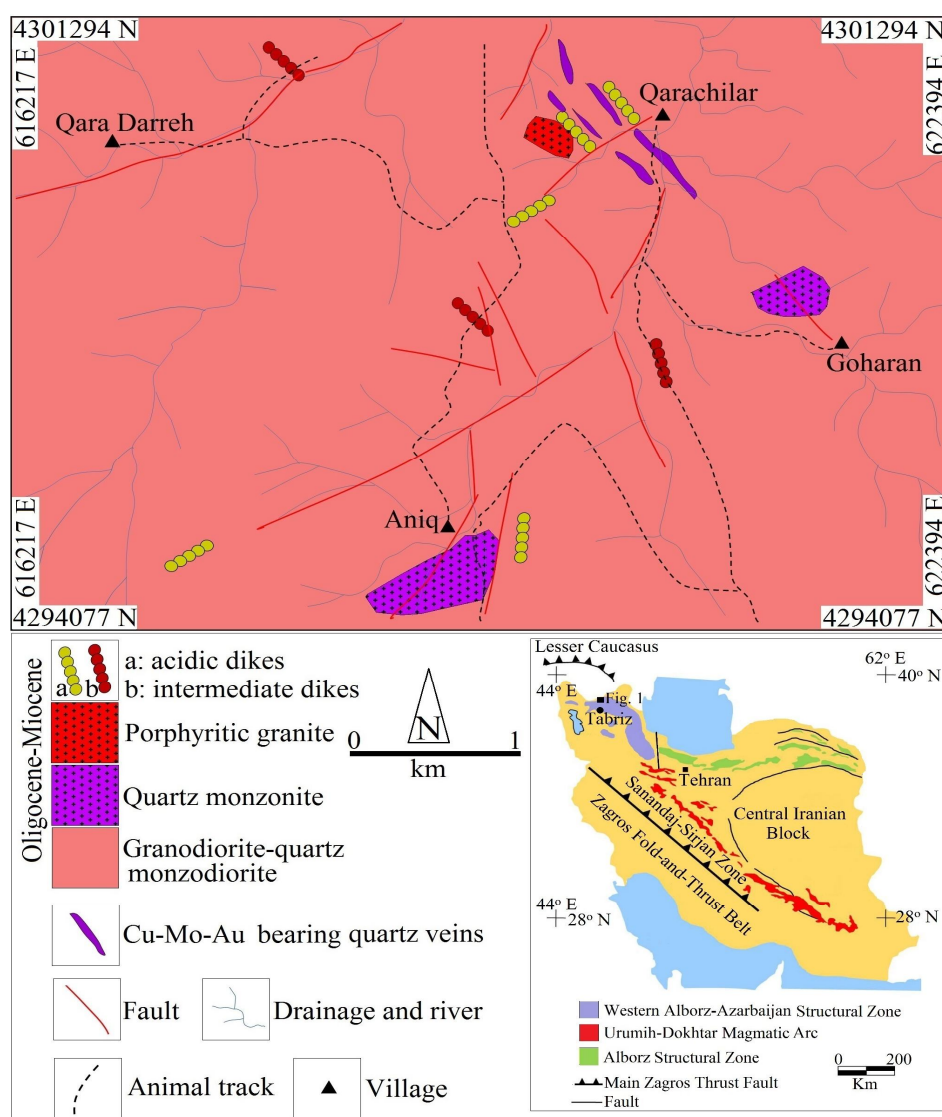
۲) گرانیت پورفیری

این واحد به صورت آپوفیزها و دایک‌هایی با ترکیب گرانیتی به داخل فاز گرانودیوریت - کوارتز موزودیوریت نفوذ کرده است (شکل ۲-۲). این سنگ‌ها در نمونه دستی دارای رنگ روشن و بافت میکروگرانولار تا پورفیری شامل درشت‌بلورهای فلدسپار پتاسیم، کوارتز و بیوتیت است و به ندرت در برخی نقاط آنها ییگانه سنگ‌های مافیک دیده می‌شود (شکل ۲-۲). بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، این سنگ‌ها دارای بافت پورفیری، فلسوفیری، سری‌ایتی و میکروگرانولار هستند (شکل ۳-۳ و D و E). کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده آنها شامل فلدسپار پتاسیم (ارتوکلاز)، پلاژیوکلاز، کوارتز، هورنبلاند و بیوتیت است. زیرکن، آپاتیت، اسفن و کانی‌های کدر به عنوان کانی‌های فرعی و سرسیت، کلریت،

سیستم‌های گسلی با روندهای شمال‌باختری - جنوب‌خاوری و شمال‌خاوری - جنوب‌باختری است (شکل ۱). گسل‌های با روند شمال‌باختری - جنوب‌خاوری مهم‌ترین گسل‌های موجود در این منطقه هستند که اغلب به سمت شمال‌خاور شیب دارند. این گسل‌ها کنترل‌کننده رگه‌های کوارتز کانه‌دار در منطقه قره‌چیلر و مناطق مجاور هستند.

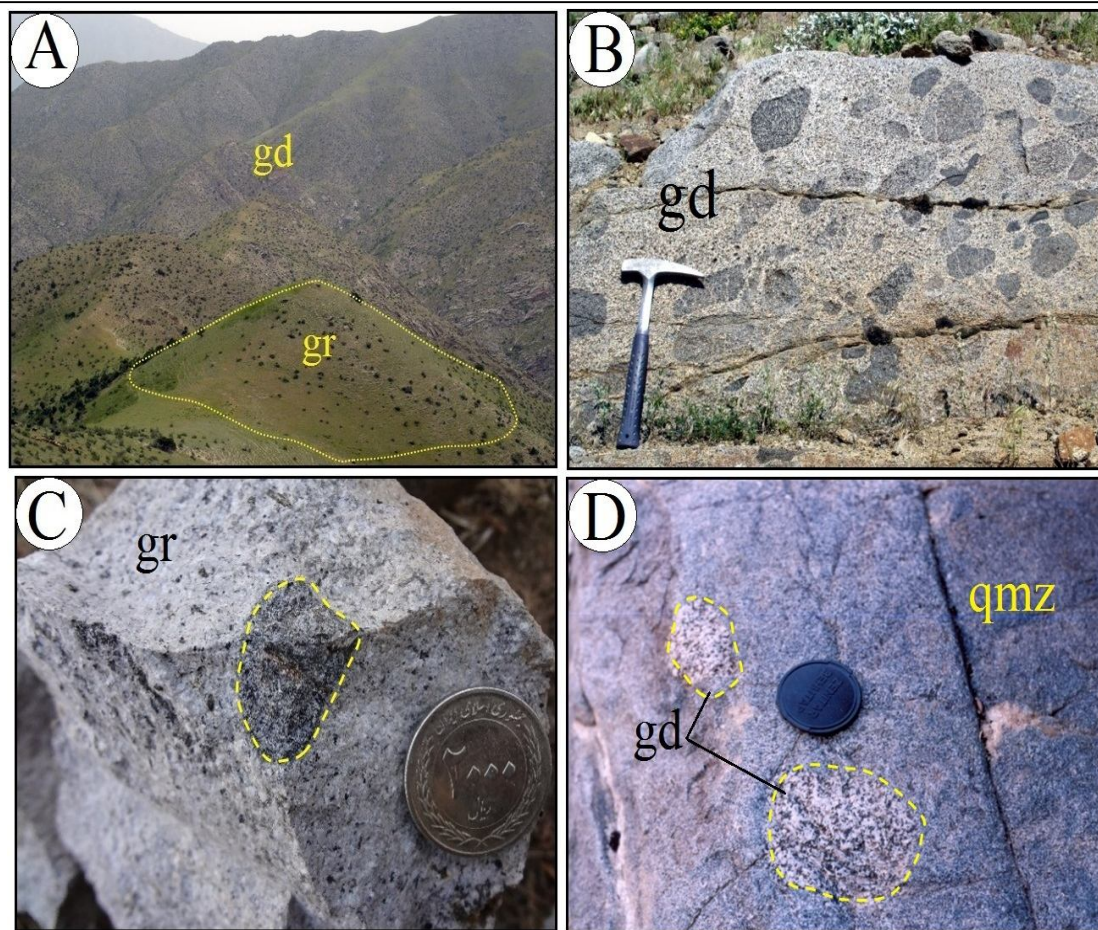
دایک‌ها دارای بافت میکرولیتیک پورفیری تا پورفیری بوده و درشت‌بلورهای آنها شامل پلاژیوکلاز، آمفیبول و بیوتیت است (شکل ۵-C و D). کوارتز، کلینوپیروکسن، کانی‌های کدر و آپاتیت به‌عنوان کانی‌های فرعی در این دایک‌ها حضور دارند. علاوه بر دایک‌های یادشده، دایک‌های با ترکیب آپلیتی نیز در بخش‌های مختلف منطقه حضور دارند (شکل ۴-D).

ساختارهای اصلی در منطقه قره‌چیلر شامل یک گروه از



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه قره‌چیلر نشان‌دهنده روند شمال‌باختری رگه‌های کوارتزی مس - مولیبدن - طلا دار درون فاز گرانودیوریتی - کوارتز مونزونیتی باتولیت قره‌داغ. نقشه زون‌های ساختاری اصلی ایران با تغییرات از علوی (Alavi, 1991) و آقانباتی (Aghanabati, 2004) اقتباس شده است.

Fig. 1. Geological map of the Qarachilar area showing NW-trending mineralized Cu-Mo-Au-bearing quartz veins in the granodiorite-quartz monzodiorite phase of Qaradagh batholith. Major structural zones of Iran is modified from Alavi (1991) and Aghanabati (2004).



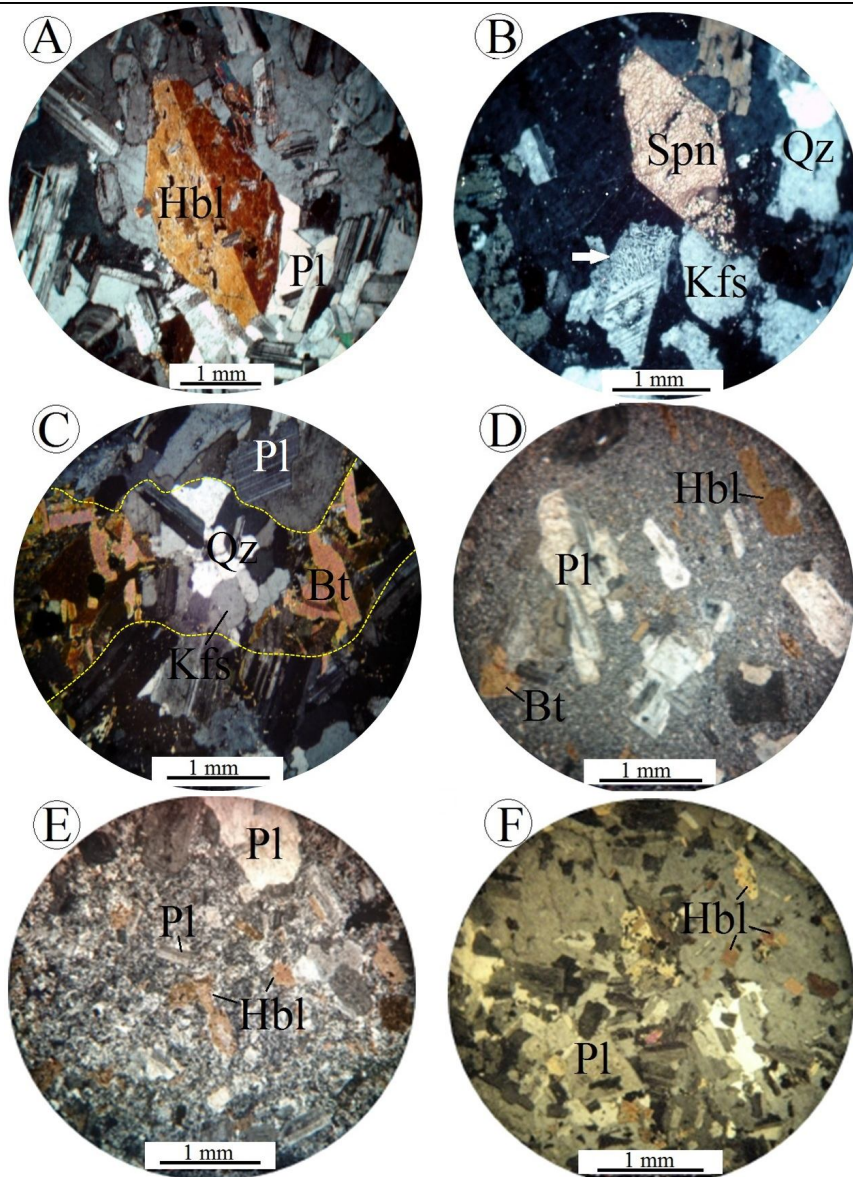
شکل ۲. A: نمایی از توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت (gd) که در باختر روستای قره‌چیلر توسط آپوفیز گرانیت پورفیری (gr) قطع شده است (دید به سمت شمال‌خاور)، B: نمایی نزدیک از آنکلاوهای میکروگرانولار مافیک در داخل توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت، C: نمایی نزدیک از آنکلاو مافیک در داخل آپوفیز گرانیت پورفیری و D: نمایی نزدیک از آنکلاوهای گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت در داخل استوک کوارتز مونزونیت (qmz). علائم اختصاری سنگ‌ها از دُبن و لی‌فُرت (Debon and Le Fort, 1983) اقتباس شده است.

Fig. 2. A: View of granodiorite-quartz monzodiorite (gd) pluton which is intruded by porphyritic granite (gr) apophysis in the west of Qarachilar village (looking northwest), B: A close view of microgranular mafic enclaves within granodiorite-quartz monzodiorite pluton, C: A close view of mafic enclave within porphyritic granite apophysis, and D: A close view of granodiorite-quartz monzodiorite enclaves within quartz monzonite (qmz) stock. Rock abbreviations follow Debon and Le Fort (1983).

کانه‌زایی

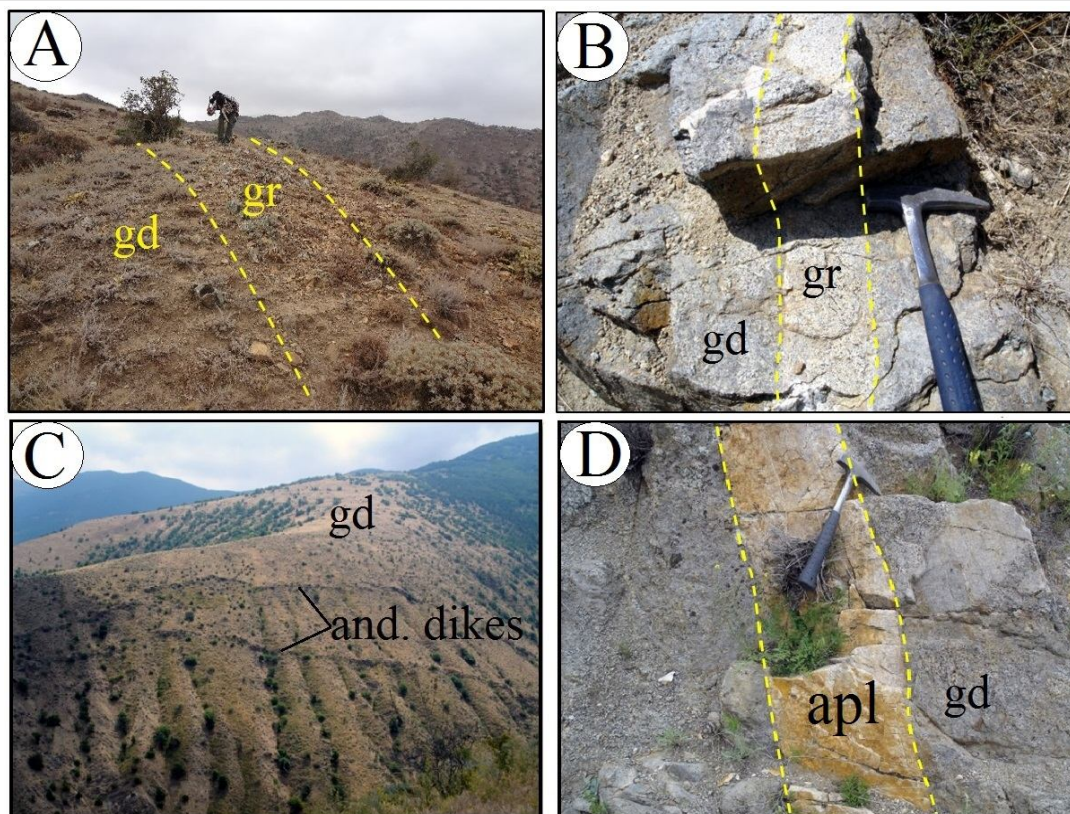
کانی‌سازی در منطقه قره‌چیلر به صورت رگه‌های کوارتز کانه‌دار با میزبان توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت رخ داده است (شکل ۶-۵). به دلیل عملکرد زمین‌ساخت، امتداد رگه‌ها جابه‌جایی‌های نسبتاً زیادی را نشان می‌دهند (شکل ۶-۵). فعالیت‌های معدنی قدیمی به صورت تونل‌های استخراجی متعدد بر روی این رگه‌ها در سطوح مختلف دیده می‌شود. کانی‌سازی

سولفیدی در این رگه‌ها شامل کالکوپریت، پیریت و مولیبدنیت است و محتوای کانی‌های سولفیدی در آنها به ندرت به بیش از ۵ درصد می‌رسد. عیار مس، مولیبدن و طلا در نمونه‌های سطحی برداشت شده از رگه‌های کانه‌دار به ترتیب ۰/۷ تا ۵ درصد، ۲۰ گرم در تن تا ۳/۶ درصد و ۰/۲۳ تا ۳۷/۲ گرم در تن اندازه‌گیری شده است (Sohrabi, 2003; Mokhtari, 2008; Rezai Aghdam and Sohrabi, 2010; Zakeri, 2013).



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع) از کانی‌های تشکیل‌دهنده و بافت واحدهای سنگی در منطقه قره‌چیلر، A: بافت‌های هتروگرانولار، مونزونیتی و پوئی‌کلیتیک همراه با بلور شکل‌دار هورنبلاند در توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت، B: بافت میرمکتی (علامت فلش) همراه با بلور شکل‌دار اسفن در توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت، C: بلورهای بیوتیت به همراه کوارتز و فلدسپار پتاسیم ثانویه در رگه‌های تیره‌رنگ که توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت را قطع کرده‌اند، D: بافت پورفیری و فلسوفیری در آپوفیز گرانیت پورفیری، E: بافت میکروگرانولار تا پورفیری در آپوفیز گرانیت پورفیری و F: بافت مونزونیتی و میکروگرانولار در استوک کوارتز مونزونیت. بلورهای شکل‌دار پلاژیوکلاز و هورنبلاند در تصویر مشخص است. علایم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. (Bt: بیوتیت، Hbl: هورنبلاند، Kfs: فلدسپار پتاسیم، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز، Spn: اسفن)

Fig. 3. Photomicrographs (transmitted cross polarized-light, XPL) of minerals and textures in the rock units at the Qarachilar area. A: Heterogranular, monzonite and poikilitic textures along with automorph hornblende crystal in granodiorite-quartz monzodiorite pluton, B: Myrmekitic texture (arrow) along with automorph sphene crystal in granodiorite-quartz monzodiorite pluton, C: Biotite crystals along with quartz and secondary K-feldspar in dark color veinlets crosscutting the granodiorite-quartz monzodiorite pluton, D: Porphyritic and felsophyritic textures in porphyritic granite apophysis, E: Microgranular to porphyritic texture in porphyritic granite apophysis, and F: Monzonite and microgranular textures in quartz monzonite stock. Automorph crystals of plagioclase and hornblende are also observed. All mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Bt: biotite, Hbl: hornblende, Kfs: alkali feldspar, Pl: plagioclase, Qz: quartz, Spn: sphene)



شکل ۴. A: نمایی از دایک گرانیت پورفیری (gr) در منطقه قره‌چیلر که توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت (gd) را قطع کرده است (دید به سمت شمال‌باختر)، B: نمایی نزدیک از دایک گرانیت پورفیری که توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت را قطع کرده است، C: نمایی از دایک‌های آندزیتی که توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت را قطع کرده‌اند (دید به سمت شمال‌خاور) و D: نمایی نزدیک از دایک آپلیتی (apl) که توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت را قطع کرده است. علائم اختصاری سنگ‌ها از دُن و لی‌فُرت (Debon and Le Fort, 1983) اقتباس شده است.

Fig. 4. A: View of porphyritic granite dike (gr) crosscutting the granodiorite-quartz monzodiorite (gd) pluton at the Qarachilar area (looking northwest), B: A close view of porphyritic granite dike crosscutting the granodiorite-quartz monzodiorite pluton, C: View of andesitic dikes (and. dikes) crosscutting the granodiorite-quartz monzodiorite pluton (looking northeast), and D: A close view of aplitic (apl) dike crosscutting the granodiorite-quartz monzodiorite pluton. Rock abbreviations follow Debon and Le Fort (1983).

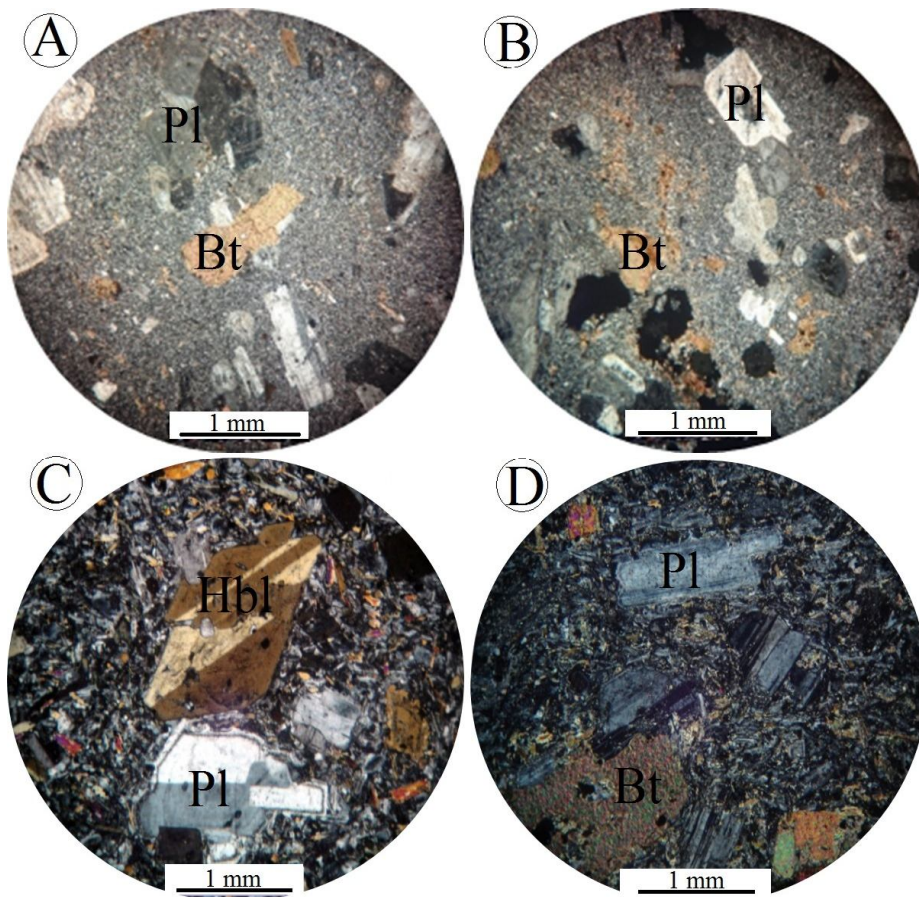
A و B). این رگه بافت متراکم و توده‌ای داشته و کانه‌های کالکوپیریت، پیریت و مولیدنیت در داخل آن قابل مشاهده است. فعالیت‌های معدنی قدیمی بر روی این رگه در مقایسه با دیگر رگه‌ها چشمگیرتر است. آثار آغشتگی‌های مالاکیتی و آزوریتی در اطراف این رگه به صورت گسترده دیده می‌شود.

رگه شماره ۲ (QV2) دارای امتداد کلی N35-40W/80NE بوده و در فاصله حدود ۵۰ تا ۲۰۰ متری رگه QV1 واقع شده است (شکل ۶-A). درازای این رگه حدود ۴۰۰ متر و ضخامت متوسط آن حدود ۰/۶ متر است (شکل ۶-C). این رگه نیز بافت توده‌ای و

بر اساس بررسی‌های صحرایی، کانه‌سازی مس-مولیدن-طلا در قره‌چیلر شامل ۳ رگه کوارتز سولفیددار است که در جنوب تا شمال‌باختر روستای قره‌چیلر رخنمون دارند. علاوه بر رگه‌های کوارتزی یادشده، چندین رگه باریک با طول رخنمون کوتاه نیز در این منطقه وجود دارد. این رگه‌ها دارای امتداد کلی شمال‌باختر-جنوب‌خاور و شیب حدود ۸۰ درجه به سمت شمال‌خاور هستند. رگه شماره یک (QV1)، اصلی‌ترین رگه کوارتز سولفیددار منطقه است که دارای امتداد کلی N40W/75-80NE است و در طول حدود ۷۰۰ متر با ضخامت متوسط ۰/۷ متر رخنمون دارد (شکل ۶-۶).

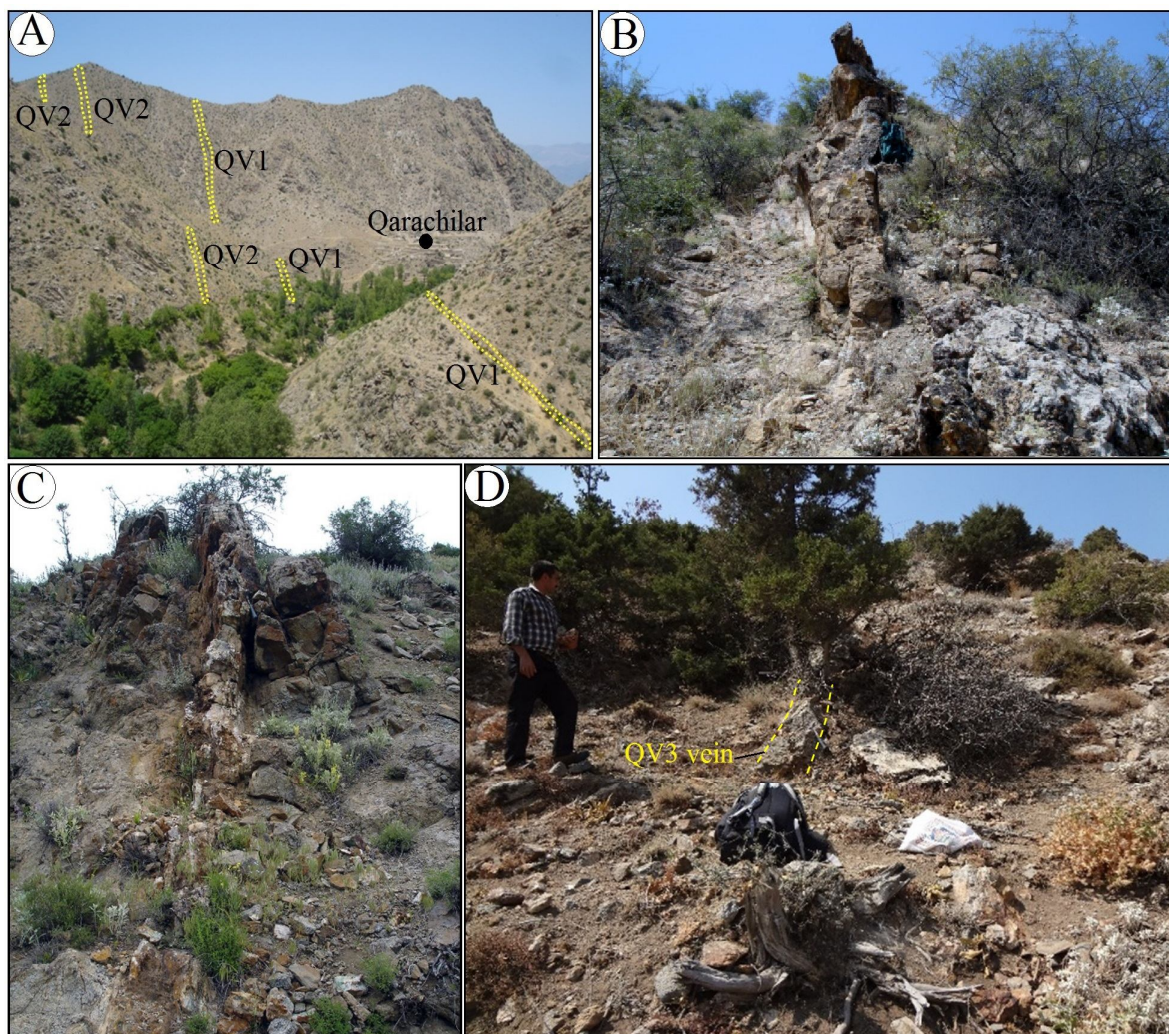
QV2 واقع شده است. درازای این رگه حدود ۲۰۰ متر و ضخامت متوسط آن حدود ۰/۷ متر است (شکل ۶-D). این رگه نیز بافت توده‌ای و متراکم داشته و کانه‌های کالکوپیریت، پیریت و مولیدنیت در داخل آن وجود دارد. برخلاف رگه‌های دیگر، این رگه برجسته و صخره‌ساز نبوده و بیشتر به صورت رخنمون‌های ناپیوسته پشت سر هم رخنمون دارند.

متراکم داشته و کانه‌های کالکوپیریت، پیریت و مولیدنیت در آن وجود دارد. در برخی بخش‌های مجاور این رگه، رگه‌های کوارتزی باریک (ضخامت حداکثر ۲ سانتی‌متر) به موازات هم به صورت دسته رگه وجود دارند که غنی از کانی‌سازی سولفیدی (اغلب کالکوپیریت و پیریت) است و در مجموع ضخامتی بین ۲-۵ متر دارند. رگه شماره ۳ (QV3) دارای امتداد کلی N60W/75NE بوده و در فاصله حدود ۲۰۰ متری باختر رگه



شکل ۵. A: بافت فلسوفیری با درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز حاوی منطقه‌بندی و بیوتیت در دایک‌های گرانیت پورفیری در منطقه قره‌چیلر، B: رگه‌چه‌های بیوتیت ثانویه موجود در دایک‌های گرانیت پورفیری، C: بافت پورفیری در دایک‌های آندزیتی حاوی درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و هورنبلاند و D: بافت میکرولیتیک پورفیری با درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و بیوتیت در دایک‌های تراکی‌آندزیتی. کلیه تصاویر در نور عبوری پلاریزه متقاطع گرفته شده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. (Bt: بیوتیت، Hbl: هورنبلاند، Pl: پلاژیوکلاز)

Fig. 5. A: Felsophyritic texture with zoned plagioclase and biotite phenocrysts in porphyritic granitic dikes at the Qarachilar area, B: Secondary biotitic veinlets in porphyritic granitic dikes, C: Porphyritic texture in andesitic dikes containing plagioclase and hornblende phenocrysts, and D: Microlitic porphyry texture with plagioclase and biotite phenocrysts in trachyandesitic dikes. All photomicrographs are taken in transmitted cross polarized-light (XPL). All mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Bt: biotite, Hbl: hornblende, Pl: plagioclase)



شکل ۶. A: تصویر صحرایی نشان‌دهنده موقعیت رگه‌های کوارتز کانهدار در رخداد معدنی قره‌چیلر (دید به سمت شمال‌باختر)، B: نمایی از رگه کانهدار QV1 (دید به سمت شمال‌باختر)، C: نمایی از رگه کانهدار QV2 به‌همراه هاله دگرسانی باریک در حاشیه آن (دید به سمت شمال‌باختر) و D: نمایی از رگه کانهدار QV3 (دید به سمت شمال‌باختر)

Fig. 6. A: Field photograph showing the location of mineralized quartz veins at the Qarachilar occurrence (looking northwest), B: View of QV1 mineralized quartz vein (looking northwest), C: View of QV2 mineralized quartz vein along with thin alteration halo around it (looking northwest), and D: View of QV3 mineralized quartz vein (looking northwest)

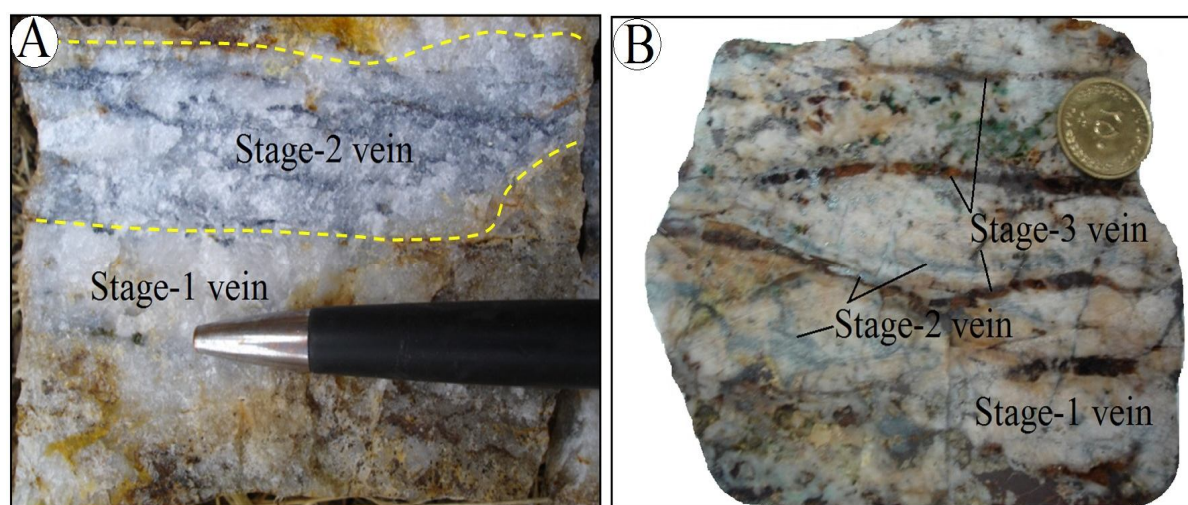
می‌کند. کالکوپیریت اغلب به‌صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار و در مواردی بی‌شکل حضور دارد. درحالی‌که؛ پیریت به‌صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار ریز تا گاهی درشت دیده می‌شود. پیریت از فراوانی بسیار کمتری نسبت به کالکوپیریت برخوردار است. کوارتزها اغلب به‌صورت بلورهای درشت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل به‌صورت توده‌ای در کنار هم دیده می‌شوند. مرحله دوم کانی‌زایی شامل رگه-رگه‌چه‌های ۱

بر اساس بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی انجام‌شده، چهار مرحله کانه‌زایی در رخداد معدنی قره‌چیلر قابل تفکیک است. مرحله اول کانه‌زایی که مرحله اصلی کانه‌زایی در این منطقه است، شامل رگه‌های کوارتز-سولفیدی (پیریت و کالکوپیریت) است (شکل ۷-A و B). پیریت و کالکوپیریت معمولاً در متن رگه‌های کوارتز به‌صورت دانه‌پراکنده حضور دارند. ضخامت رگه‌ها از چند سانتی‌متر تا حداکثر ۱ متر تغییر

کانه‌زایی را قطع کرده‌اند (شکل ۷-۲). با وجود عیارهای بالای طلا (تا ۳۷/۲ گرم در تن) در این رگه‌چه‌ها (Mokhtari and Yarmohamadi, 2008; Mokhtari, 2008)، در بررسی‌های میکروسکوپی، طلای آزاد در آنها شناسایی نشده است. هیدروکسیدهای آهن مزبور احتمالاً محصول هوازدگی کانی‌های سولفیدی طلادار (احتمالاً پیریت) در طی فرآیندهای برون‌زاد هستند. مرحله چهارم کانه‌زایی شامل رگه‌چه‌های منفرد و یا دسته رگه‌چه‌های نیمه‌موازی تا متقاطع کوارتز-کربناتی تأخیری است که مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع کرده‌اند. هیچ کانی سولفیدی با این رگه‌چه‌ها تشکیل نشده است. ضخامت رگه‌چه‌های این مرحله از چند میکرون تا ۵ میلی‌متر متغیر است.

میلی‌متر تا ۳ سانتی‌متری کوارتز-مولیدنیت به‌همراه مقدار بسیار کمی پیریت است که در شکستگی‌های رگه‌های مرحله اول تشکیل شده‌اند (شکل ۷-۲ و ۷-۳). مولیدنیت به‌صورت بلورهای ورقه‌ای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و به‌حالت دانه‌پراکنده تا رگه‌چه‌ای دیده می‌شود. پیریت به‌صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار حضور دارد. کوارتزهای همراه با این مرحله از کانی‌سازی، اغلب به‌صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار و در ابعاد کوچک‌تر از بلورهای مربوط به کوارتزهای مرحله اول قابل مشاهده هستند.

کانه‌زایی مرحله سوم شامل یک دسته رگه‌چه‌های هیدروکسید آهنی طلادار با ضخامت ۱ تا ۱۰ سانتی‌متری است که رگه-رگه‌چه‌های کوارتز مس و مولیدن‌دار مراحل اول و دوم



شکل ۷. تصویرهای نمونه دستی از مراحل کانه‌زایی در رخداد معدنی قره‌چیلر. A: رگه کوارتز-کالکوپیریتی مرحله اول که توسط رگه کوارتز-مولیدنیتی مرحله دوم قطع شده است و B: رگه‌چه‌های کوارتز-مولیدنیتی مرحله دوم که رگه کوارتز-کالکوپیریتی مرحله اول را قطع کرده و خود توسط رگه‌چه‌های هیدروکسید آهنی طلادار مرحله سوم قطع شده‌اند.

Fig. 7. Hand specimen photographs illustrating mineralization stages at Qarachilar occurrence. A: Stage-1 quartz-chalcopyrite vein crosscut by Stage-2 quartz-molybdenite vein, and B: Stage-2 quartz-molybdenite veinlets which are crosscutting the Stage-1 quartz-chalcopyrite vein and are crosscut by Stage-3 Au-bearing Fe-hydroxide veinlets.

دگرسانی

رخ‌داده است. دگرسانی پتاسیک به‌صورت بسیار محدود در منطقه دیده می‌شود. دگرسانی سیلیسی به‌صورت رگه-رگه‌چه‌ای و همچنین سیلیسی شدن سنگ میزبان رخ‌داده است. ضخامت رگه-رگه‌چه‌های کوارتزی تا ۱ متر می‌رسد (شکل‌های ۶ و ۷). دگرسانی سرسیتی بیشتر در حاشیه رگه‌های کوارتز کانه‌دار دیده می‌شود. این

دگرسانی گرمابی در رخداد معدنی قره‌چیلر دارای وسعت چندانی نیست و به مناطق سیلیسی، سرسیتی و کربناتی بخش‌های کانه‌دار محدود می‌شود. دگرسانی پروپلیتیک در خارج از بخش‌های کانه‌دار و در توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت میزبان

و گوتیت دگرسان شده است (شکل ۹-A و B). در مواردی شدت دگرسانی به حدی است که این کانی به طور کامل دگرسان شده و یا تنها بقایایی از آن به صورت بافت بازماندی و یا جزیره‌ای (Ineson, 1989) باقی مانده است. در برخی نقاط، ادخال‌هایی از پیریت در داخل کالکوپیریت و یا کالکوپیریت در داخل پیریت دیده می‌شود که این امر بیانگر تبلور هم‌زمان این کانی‌هاست.

پیریت اغلب به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با ابعاد ۱۰ تا ۵۰ میکرون حضور داشته و در برخی از نمونه‌ها از حاشیه‌ها و در امتداد شکستگی‌ها به گوتیت دگرسان شده است (شکل ۹-C). مولیدنیت بیشتر به صورت بلورهای ورقه‌ای و گاه رشته‌ای نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل در ابعاد ۱۰ تا ۵۰۰ میکرون در رگه-رگه‌های کوارتزی-مولیدنیتی دیده می‌شود (شکل ۹-D). گالن به میزان بسیار کم و به صورت بلورهای بی‌شکل با ابعاد حدود ۵۰۰ میکرون در رگه‌های مرحله سوم حضور دارد (شکل ۹-E). کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت، آزوریت و گوتیت حاصل فرآیندهای برون‌زاد بوده و بیشتر به صورت رگه‌چهای و پرکننده حفرات و فضاهای خالی دیده می‌شوند (شکل ۹-F). فری‌مولیدنیت به صورت بلورهای کوچک زردرنگ در مسیر شکستگی‌های رگه‌های کوارتزی حاوی مولیدنیت قابل مشاهده است. این کانی محصول دگرسانی برون‌زاد مولیدنیت بوده و در مقاطع میکروسکوپی در حاشیه برخی از بلورهای مولیدنیت دیده می‌شود (شکل ۹-G).

کوارتز باطله اصلی در رخداد معدنی قره‌چیلر است که هم‌زمان با مراحل اصلی کانه‌زایی تشکیل شده است. بر اساس اندازه بلورها، کوارتزهای موجود را می‌توان در دو دسته ریزبلور (کلسدون) و درشت‌بلور (Dong et al., 1995; Kouhestani et al., 2012; Ebrahimi et al., 2015; Feizi et al., 2016) تقسیم‌بندی کرد. کوارتزهای بلورین به صورت بلورهای درشت و شکل‌دار در رگه‌ها و رگه‌چهای کانه‌دار رخ داده‌اند. بلورها به رنگ روشن، شیری سفید و یا خاکستری دیده شده است و اندازه‌ای کمتر از یک میلی‌متر تا چند سانتی‌متر دارند. کوارتزهای ریزبلور در فضاهای

دگرسانی تا یک متر ضخامت داشته و با دور شدن از رگه‌ها شدت آن کاهش می‌یابد. پولک‌های ریز تا متوسط سرسیت همراه با کوارتز ثانویه، کانی‌های موجود در این دگرسانی هستند (شکل ۸-A). دگرسانی کرناتی معمولاً به صورت رگه و رگه‌چهای آنکریتی و گاهی کلسیتی تأخیری درون پهنه دگرسانی سرسیتی حاشیه رگه‌های کوارتز کانه‌دار قابل مشاهده است (شکل ۸-B). ضخامت رگه‌های مزبور کمتر از ۳ سانتی‌متر است. دگرسانی پروپلیتیک معمولاً از شدت زیادی برخوردار نیست؛ به طوری که بافت سنگ در این نوع دگرسانی معمولاً حفظ شده و یا به راحتی قابل شناسایی است. پلاژیوکلازها به طور بخشی به وسیله کانی‌های سرسیت، اپیدوت و کلسیت و کانی‌های مافیک نیز به طور بخشی توسط کانی‌های اپیدوت، کلسیت و کلریت جانشین شده‌اند (شکل ۸-C). این دگرسانی، محدودکننده بخش‌های بیرونی سیستم دگرسانی گرمایی در منطقه است. دگرسانی پتاسیک تنها در دره قره‌چیلر و به صورت رگه‌چهای تیره‌رنگ متشکل از بیوتیت ثانویه، کوارتز و فلدسپار پتاسیم دیده می‌شود (شکل ۳-C). این رگه‌چها کمتر از ۵ سانتی‌متر ضخامت داشته و توده گرانودیوریت-کوارتز مونوزودیوریت را قطع کرده‌اند.

کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانستگ

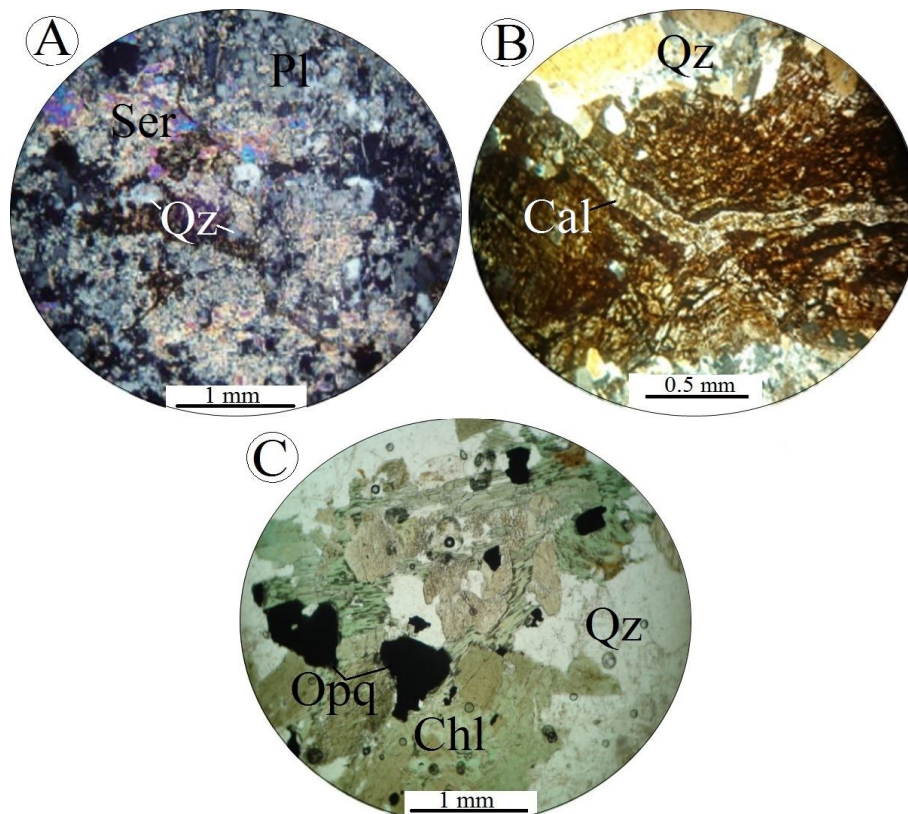
بررسی‌های کانه‌نگاری نمونه‌های برداشت شده از پهنه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی قره‌چیلر نشان‌دهنده حضور کالکوپیریت، پیریت، مولیدنیت و گالن است. کالکوسیت، کوولیت، آزوریت، مالاکیت، فری‌مولیدنیت و گوتیت در اثر فرآیندهای برون‌زاد تشکیل شده‌اند. کوارتز، کلسیت و به‌میزان کمتر آنکریت، کانی‌شناسی اصلی مواد باطله را در این رخداد معدنی تشکیل می‌دهند. بر اساس این بررسی‌ها، بافت کانه‌ها و مواد باطله شامل رگه-رگه‌چهای، برشی، دانه‌پراکنده، پرکننده فضای خالی، بازماندی و جانشینی است.

کالکوپیریت به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل با ابعاد ۵ تا ۱۰۰۰ میکرون دیده شده و در بیشتر موارد از حاشیه‌ها و در امتداد شکستگی‌ها به کوولیت، کالکوسیت، آزوریت، مالاکیت

طلادار است. پیریت‌های این مرحله طی فرآیندهای برون‌زاد به گوتیت دگرسان شده‌اند. مرحله چهارم شامل رگه-رگه‌چه‌های منفرد و یا دسته رگه‌چه‌های نیمه‌موازی تا متقاطع کوارتز-کربناتی (کلسیت و آنکرایت) تأخیری است. تشکیل کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت، آزوریت، فری‌مولیبدات و گوتیت مربوط به مرحله برون‌زاد است. بافت‌های رگه-رگه‌چه‌ای، دانه‌پراکنده و پرشی مهم‌ترین بافت‌های موجود در مراحل اول تا چهارم هستند؛ در حالی که بافت‌های پُرکننده فضای خالی، بازماندی و جاشینی در مرحله برون‌زاد دیده می‌شوند.

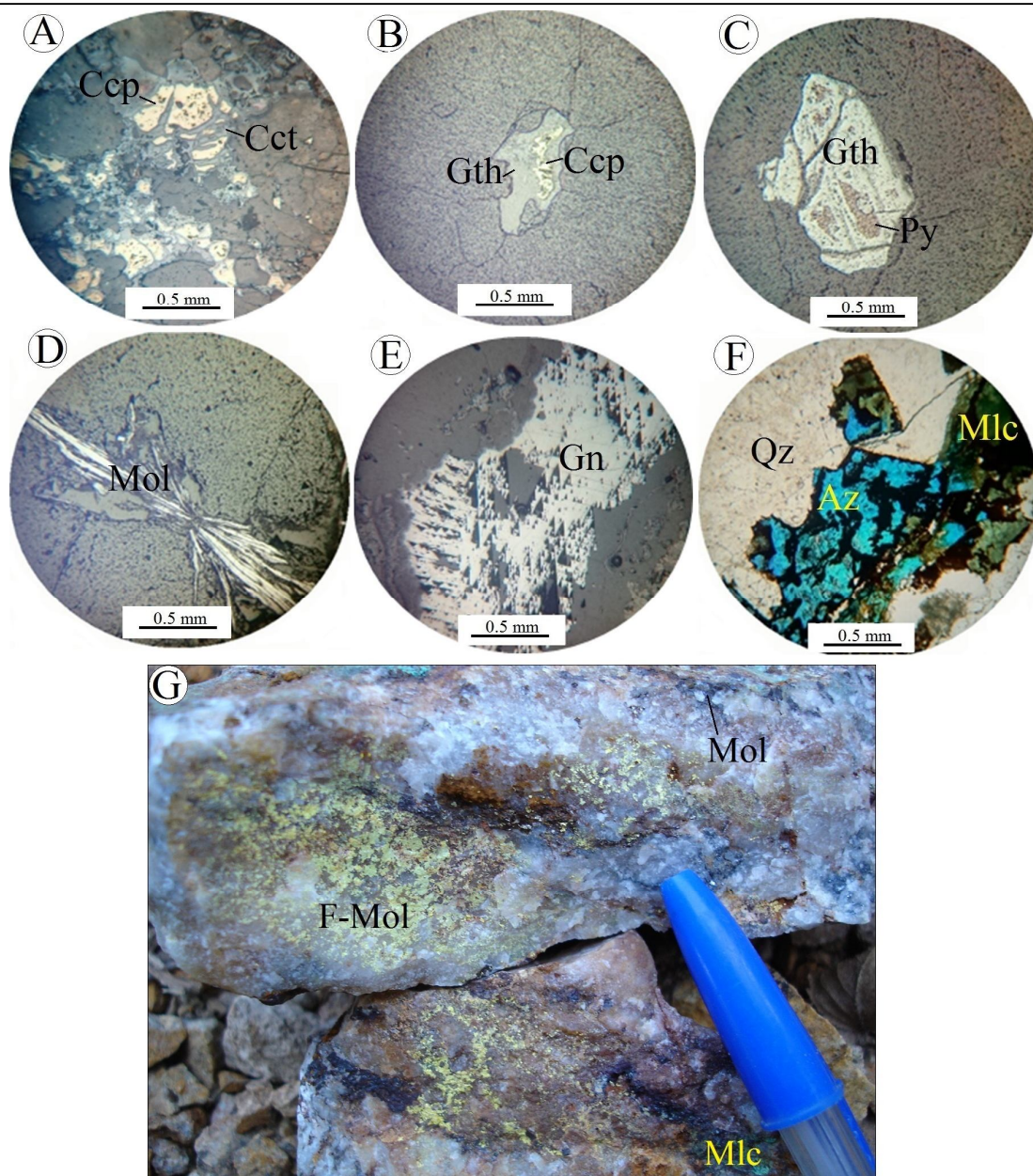
خالی رگه‌های مرحله چهارم دیده می‌شوند. کلسیت و آنکرایت به‌صورت بلورهای ریز تا متوسط در رگه و رگه‌چه‌های تأخیری مرحله چهارم قابل مشاهده هستند.

با توجه به مجموعه شواهد صحرایی و میکروسکوپی، توالی پاراژنتیک کانی‌ها در رخداد معدنی قره‌چیلر به چهار مرحله قابل تقسیم است (شکل ۱۰). مرحله اول با حضور رگه-رگه‌چه‌های کوارتز کالکوپیریت-پیریت مشخص می‌شود. مرحله دوم با تشکیل رگه-رگه‌چه‌های کوارتز-مولیبدینت دارای مقادیر کم پیریت همراه است. مرحله سوم شامل رگه-رگه‌چه‌های هیدروکسید آهنی



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپی از دگرسانی‌های سرسیتی، کربناتی و پروپلیتیک در رخداد معدنی قره‌چیلر. A: دگرسانی سرسیتی به‌صورت بلورهای ریز سرسیت و کوارتز در حاشیه رگه‌های کوارتز کانه‌دار، B: دگرسانی کربناتی به‌صورت رگه‌چه‌های کلسیتی تأخیری و C: دگرسانی پروپلیتیک به‌صورت کلریتی‌شدن بیوتیت‌ها در توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت میزبان. تصاویر A و B در نور عبوری پلاریزه متقاطع و تصویر C در نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای گرفته شده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Opq: کانی کدر، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز، Ser: سرسیت

Fig. 8. Photomicrographs of sericite, carbonate and propylitic alterations at the Qarachilar occurrence. A: Sericite alteration as fine-grained sericite and quartz crystals around mineralized quartz veins, B: Carbonate alteration as late calcite veinlets, and C: Propylitic alteration as chloritization of biotites within host granodiorite-quartz monzodiorite pluton. Photomicrographs are taken in transmitted XPL (A and B) and PPL (C). All mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Cal: calcite, Chl: chlorite, Opq: opaque mineral, Pl: plagioclase, Qz: quartz, Ser: sericite)



شکل ۹. انواع کانه‌ها در رخدادهای معدنی قره‌چیلر. A و B: بلورهای بی‌شکل کالکوپیریت که توسط کانی‌های برون‌زاد کالکوسیت (A) و گوتیت (B) جانشین شده‌اند، C: بلور نیمه‌شکل‌دار پیریت که به گوتیت دگرسان شده است، D: بلورهای تیغه‌ای مولیبدینیت، E: بلور نیمه‌شکل‌دار گالن، F: مالاکیت و آزوریت با بافت پرکننده فضای خالی بلورهای کوارتز و G: بلورهای ریز فری‌مولیبدات در سطوح شکستگی رگه‌های کوارتز حاوی مولیبدینیت. تصاویر میکروسکوپی A، B، C، D و E در نور بازتابی و تصویر F در نور عبوری پلاریزه متقاطع گرفته شده‌اند. علایم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. (Az: آزوریت، Ccp: کالکوپیریت، Cct: کالکوسیت، F-Mol: فری‌مولیبدات، Gth: گوتیت، Gn: گالن، Mlc: مالاکیت، Mol: مولیبدینیت، Py: پیریت، Qz: کوارتز)

Fig. 9. Types of ore minerals at the Qarachilar occurrence. A and B: Anhedral crystals of chalcopirite replaced by chalcocite (A) and goethite (b) supergene minerals, C: Subhedral crystal of pyrite altered to goethite, D: Bladed crystals of molybdenite, E: Subhedral crystal of galena, F: Malachite and azurite with vug infill texture of quartz crystals, and G: Fine-grained ferimolibdite along fractures of Mo-bearing quartz veins. Photomicrographs A–E are taken in reflected light and F is taken in transmitted polarized-light, XPL. All mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Az: azurite, Ccp: chalcopirite, Cct: chalcocite, F-Mol: ferimolibdite, Gth: goethite, Gn: galena, Mlc: malachite, Mol: molybdenite, Py: pyrite, Qz: quartz)

| | | Stage-1 | Stage-2 | Stage-3 | Stage-4 | Supergene |
|----------|----------------------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| Ore | Chalcopyrite | ██████ | | | | |
| | Pyrite | ██████ | ██████ | ██████ | | |
| | Molybdenite | | ██████ | | | |
| | Gold | | | ██████ | | |
| | Galena | | | ██████ | | |
| | Chalcocite-Covellite | | | | | ██████ |
| | Malachite-Azurite | | | | | ██████ |
| | Ferimolybdate | | | | | ██████ |
| | Goethite | | | | | ██████ |
| Gangue | Quartz | ██████ | ██████ | ██████ | ██████ | |
| | Clacite | | | | ██████ | |
| | Ankerite | | | | ██████ | |
| Textures | Vein-veinlets | ██████ | ██████ | ██████ | ██████ | |
| | Disseminated | ██████ | ██████ | ██████ | | |
| | Brecciated | ██████ | ██████ | | | |
| | Vug infill | | | | | ██████ |
| | Relict | | | | | ██████ |
| | Replacement | | | | | ██████ |

شکل ۱۰. توالی پاراژنتیک، فراوانی نسبی و ساخت و بافت کانی‌ها برای مواد معدنی و باطله در رخداد معدنی قره‌چیلر

Fig. 10. Paragenetic sequences showing the relative abundance, structure and texture of gangues and ore minerals at the Qarachilar occurrence

کمیاب خاکی و آنومالی منفی شدیدتر Eu است. در توده دگرسان‌شده، تهی‌شدگی در عناصر کمیاب خاکی سنگین بیشتر از عناصر کمیاب خاکی سبک است که این امر می‌تواند مربوط به دگرسانی کانی‌های اولیه مانند هورنبلاند، یوتیت و پلاژیوکلاز و تشکیل کانی‌های جدید مانند سرسیت باشد. این فرآیند به حذف HREE از ترکیب هورنبلاند و یوتیت و تمرکز مجدد LREE در شبکه سرسیت منجر می‌شود (Wilson, 1993; Rollinson, 2007). رگه‌های کوارتز کانه‌دار دارای تمرکزهای پایین‌تری از عناصر کمیاب خاکی نسبت به توده میزبان سالم و دگرسان‌شده همراه با آنومالی‌های منفی Eu، Er و Yb هستند. آنومالی منفی Eu در این رگه‌ها می‌تواند در ارتباط با شرایط احیایی سیال و محیط نهشت کانه‌ها باشد (Parak, 1985; Whitford et al., 1988; Dokuz et al., 2005; Wang et al., 2006). هرچند این رگه‌ها الگوی عناصر کمیاب خاکی مشابهی دارند؛ اما رگه کوارتز کالکوپریت‌دار مرحله اول در مقایسه با رگه کوارتز مولیبدنیت‌دار مرحله دوم تهی‌شدگی مشخصی از عناصر کمیاب خاکی سنگین دارد.

داده‌های زمین‌شیمیایی رگه‌های کوارتز کانه‌دار و توده میزبان

هدف از این بررسی‌ها، تعیین غنی‌شدگی و تهی‌شدگی‌های عنصری مرتبط با دگرسانی‌های گرمایی در توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت میزبان و رگه‌های کوارتز کانه‌دار است. تجزیه‌های شیمیایی به‌دست آمده از نمونه‌های منطقه قره‌چیلر در جدول ۱ آمده است.

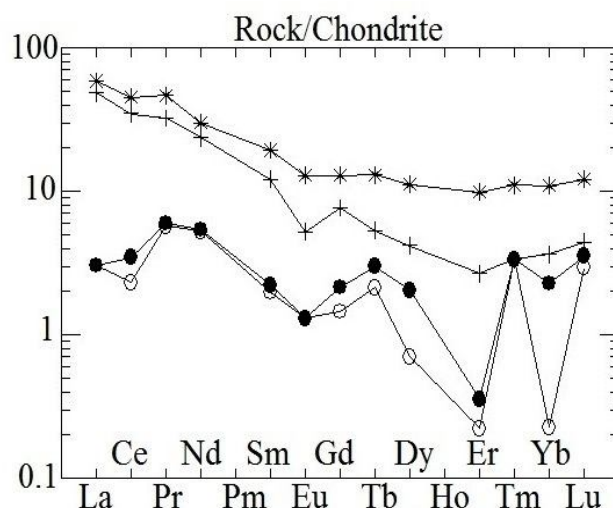
الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی

الگوهای عناصر کمیاب خاکی برای توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت میزبان سالم و دگرسان‌شده و رگه‌های کوارتز کانه‌دار در رخداد معدنی قره‌چیلر که نسبت به کندریت (Nakamura, 1974) بهنجار شده‌اند، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. الگوی عناصر کمیاب خاکی برای توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت میزبان سالم و بدون کانه‌زایی دارای شیب منفی با نسبت بالای LREE/HREE به همراه آنومالی منفی ضعیف Eu است. توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت میزبان دگرسان‌شده دارای الگوی مشابه، اما تمرکزهای پایین‌تری از عناصر

جدول ۱. نتایج تجزیه‌های شیمیایی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی برای میانگین ۶ نمونه از توده گرانودیوریت- کوارتز مونزودیوریت سالم (نمونه QA-20)، توده گرانودیوریت- کوارتز مونزودیوریت دگرسان‌شده (نمونه QA-12)، رگه کوارتز- کالکوپیریت مرحله اول (نمونه QA-05) و رگه کوارتز- مولیبدنیت مرحله دوم (نمونه QA-06) در رخداد معدنی قره‌چیلر. تمامی داده‌ها بر حسب گرم در تن (ppm) است.

Table 1. Geochemical data of trace and rare earth elements for 6 samples of fresh and altered granodiorite- quartz monzodiorite pluton (samples QA-20 and QA-12, respectively), Stage-1 quartz-chalcopyrite vein (samples QA-05) and Stage-2 quartz-molybdenite vein (sample QA-06) from the Qarachilar occurrence. All data in ppm.

| | Ba | Cs | Co | Cu | Cr | V | Th | Zn | Rb | Zr | Pb | U |
|-------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|------|-------|-------|--------|-------|------|
| D.L. | 1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 7 | 0.2 | 1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| QA-05 | 8 | 0.5 | 2.6 | 30183 | 314 | 7 | 0.91 | 690 | 1 | 5 | 209 | 0.7 |
| QA-06 | 16 | 0.5 | 1.8 | 48 | 318 | 8 | 0.87 | 53 | 1 | 5 | 14 | 0.79 |
| QA-12 | 135 | 2.1 | 8.4 | 917 | 132 | 94 | 6.41 | 454 | 181 | 5 | 437 | 1.8 |
| QA-20 | 477.25 | 0.33 | 22.15 | 101.78 | 85.28 | 168.08 | 5.32 | 62.43 | 47.73 | 112.93 | 9.43 | 1.83 |
| | Sc | Sr | Nb | Y | Ti | Ni | Hf | Ta | P | La | Ce | Pr |
| D.L. | 0.2 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 0.01 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.01 | 0.1 | 0.1 | 0.02 |
| QA-05 | 0.5 | 4 | 1 | 2.5 | 10 | 4 | 0.5 | 0.1 | 327 | 1 | 2 | 0.64 |
| QA-06 | 0.5 | 16.2 | 1 | 4.9 | 10 | 3 | 0.5 | 0.1 | 76 | 1 | 3 | 0.67 |
| QA-12 | 8.2 | 21 | 3 | 8.1 | 2139 | 3 | 0.5 | 0.22 | 506 | 16 | 30 | 3.61 |
| QA-20 | 10.89 | 436.85 | 5.65 | 21.75 | - | 11.1 | 1.14 | 0.27 | - | 19.32 | 38.98 | 5.19 |
| | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Er | Tm | Yb | Lu | | |
| D.L. | 0.3 | 0.05 | 0.1 | 0.05 | 0.01 | 0.05 | 0.03 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | | |
| QA-05 | 3.3 | 0.4 | 0.1 | 0.4 | 0.1 | 0.24 | 0.05 | 0.1 | 0.05 | 0.1 | | |
| QA-06 | 3.4 | 0.45 | 0.1 | 0.59 | 0.14 | 0.7 | 0.08 | 0.1 | 0.5 | 0.12 | | |
| QA-12 | 14.8 | 2.46 | 0.4 | 2.11 | 0.25 | 1.43 | 0.6 | 0.1 | 0.8 | 0.15 | | |
| QA-20 | 18.87 | 3.92 | 0.99 | 3.54 | 0.61 | 3.82 | 2.22 | 0.33 | 2.41 | 0.41 | | |



○ Stage-1 quartz-chalcopyrite vein * Barren and fresh host granodiorite-quartz monzodiorite body
● Stage-2 quartz-molybdenite vein + Altered host granodiorite-quartz monzodiorite body

شکل ۱۱. الگوهای عناصر کمیاب خاکی بهنجارشده نسبت به کندریت (Nakamura, 1974) برای رگه‌های کوارتز کانه‌دار، توده گرانودیوریت- کوارتز مونزودیوریت سالم و دگرسان‌شده میزبان در رخداد معدنی قره‌چیلر

Fig. 11. Chondrite-normalized REE patterns (Nakamura, 1974) for the mineralized quartz veins and fresh and altered host granodiorite-quartz monzodiorite pluton at Qarachilar occurrence

تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر در بخش‌های کانهدار

برای بررسی تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر طی کان‌زایی در رخدادهای معدنی قره‌چیلر، داده‌های مربوط به نمونه‌های رگه‌های کوارتز کانهدار و توده گرانودیوریت-کوارتز مونوزودیوریت دگرسان‌شده بر میانگین داده‌های مربوط به توده گرانودیوریت-کوارتز مونوزودیوریت میزبان سالم و بدون کان‌زایی بهنجار شد تا عناصر اضافه و یا کم‌شده به سنگ طی کان‌زایی مشخص شود. این روش کیفی بوده و برای تعیین میزان کمی تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر نیاز به محاسبات موازنه جرم است که در این پژوهش انجام نشده است.

بررسی الگوی عناصر کمیاب در رگه‌های کوارتز کانهدار که نسبت به توده گرانودیوریت-کوارتز مونوزودیوریت سالم و بدون کان‌زایی بهنجار شده‌اند (شکل ۱۲-۱)، نشان می‌دهد که بخش‌های کانهدار نسبت به توده میزبان سالم از عناصر Ba, Rb, Th, Nb, Sc, Zr, Y, V, Sr و Ni تهی و از عناصر Cu, Mo, Zn و Pb غنی شده‌اند. در رگه کوارتز-مولیدینیت مرحله دوم، عناصر Zn و Cu تهی‌شدگی و عنصر Pb غنی‌شدگی ضعیفی دارند. همچنین، نمونه توده گرانودیوریت دگرسان‌شده در همه عناصر به جز Rb, Cs, Ba, Rb, Th, Nb, Sc, Zr, Y, V, Sr و Ni تهی‌شدگی است (شکل ۱۲-۲). تهی‌شدگی عنصر Sr در توده گرانودیوریت-کوارتز مونوزودیوریت دگرسان‌شده را می‌توان به دگرسانی سرسیتی شدید و آزاد شدن این عنصر از شبکه کانی‌هایی مانند پلاژیوکلاز نسبت داد. غنی‌شدگی عنصر Rb را نیز می‌توان در ارتباط با دگرسانی سرسیتی و تمرکز این عنصر در شبکه سرسیت در نظر گرفت. غنی‌شدگی عناصر کان‌ساز مانند Cu, Mo, Zn و Pb نیز نشان‌دهنده تمرکز این عناصر در طی فاز کانی‌سازی در پهنه‌های دگرسانی است.

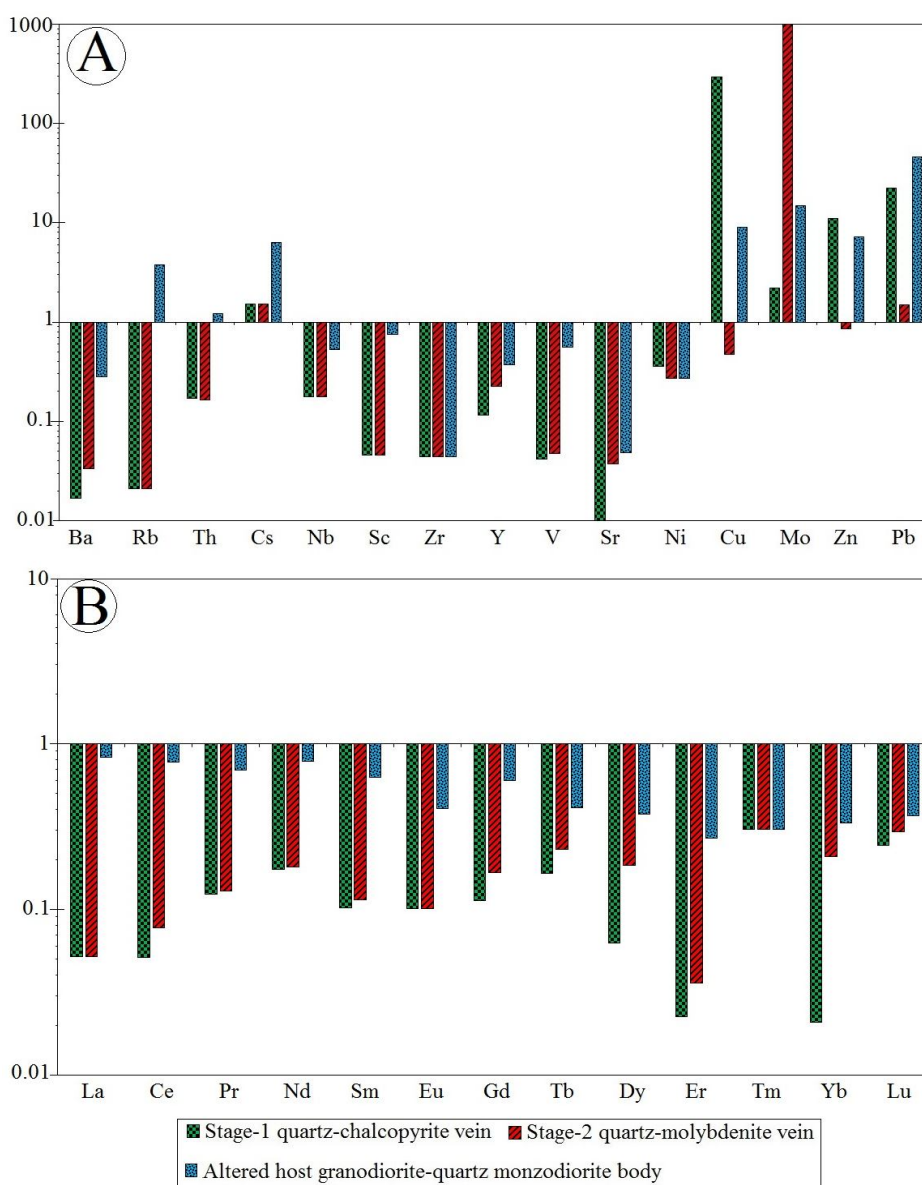
غلظت تمام عناصر کمیاب خاکی در رگه‌های کوارتز کانهدار نسبت به توده میزبان سالم، تهی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۱۲-۲). مقایسه تمرکز عناصر کمیاب خاکی در توده دگرسان‌شده و سالم بیانگر تهی‌شدگی تمام این عناصر در توده دگرسان‌شده است (شکل ۱۲-۲). این تهی‌شدگی نسبت به رگه‌های کوارتز کانهدار ضعیف‌تر و برای عناصر HREE بیشتر از عناصر LREE است.

به‌طور معمول رفتار ژئوشیمیایی عناصر کمیاب خاکی در محیط‌های دگرسانی و کان‌زایی تحت تأثیر فرآیندهایی از قبیل واکنش سیال با سنگ، نهشت سیال، جذب، تجزیه به اجزا، تغییرات دما، فشار، Eh, pH، آلکالینیتی و تمرکز سیال وابسته است (Humphris, 1992; Lottermoser, 1984)؛ لذا بین مجموعه دگرسانی، ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی محلول کان‌ساز، نسبت سیال به سنگ و الگوی عناصر کمیاب خاکی همبستگی وجود دارد (Alderton et al., 1980). ترکیب سیال و شرایط دما و فشار، پایداری و فراوانی نسبی فازهای دربردارنده عناصر کمیاب خاکی را کنترل می‌کنند. اگر دگرسانی و کانی‌سازی در شرایط یکسانی از دما و فشار رخ دهد، تمرکز عناصر کمیاب خاکی توسط ترکیب سیال، فوگاسیته اکسیژن و تمرکزهایی از لیگندهای مناسب مانند F, Cl, OH, SO₄, CO₃, PO₄ (Wood, 1990a; Wood, 1990b; Gieré and Williams, 1992) کنترل می‌شود. این لیگاندها پاسخی به تغییرات ترکیب سیال، بسته به فرآیندهای واکنش سیال-سنگ و یا اختلاط سیالات است (Brunsmann et al., 2001; Rolland et al., 2003). همچنین طی فرآیندهای کان‌زایی، سیالات غنی از F, Cl و CO₂ قادر به تحرک عناصر کمیاب خاکی هستند؛ به‌طوری‌که کمپلکس‌های هالوژنی و کربنیک عامل اصلی انتقال و تحرک عناصر مزبور محسوب می‌شوند (Murphy and Hynes, 1990; Whitford et al., 1988; Bienvenu et al., 1986). حجم پایین دگرسانی‌های موجود در رخداد معدنی قره‌چیلر بیانگر میزان پایین واکنش بین سیالات کان‌زا و سنگ میزبان است. بر این اساس، به‌نظر می‌رسد در منطقه قره‌چیلر ترکیب اسیدی سیالات گرمابی و ماهیت احیایی آنها (وجود آنومالی منفی Eu) در تمرکز و تحرک عناصر کمیاب خاکی نقش داشته است. علاوه بر این، کاهش نسبت HREE به LREE می‌تواند ناشی از تأثیر سیالات ماگمایی-گرمابی غنی از کلر و فلوئورداری باشد که سبب شست‌وشو و حمل آنها از بخش‌های کان‌دار شده‌اند (Gramaccioli et al., 1999; Kikawada et al., 2001).

در مقایسه با توده دگرسان‌شده، رگه‌های کوارتز کانهدار در اغلب عناصر کمیاب (به جز Cu, Mo و Zn) تهی‌شده‌اند (شکل ۱۳-).

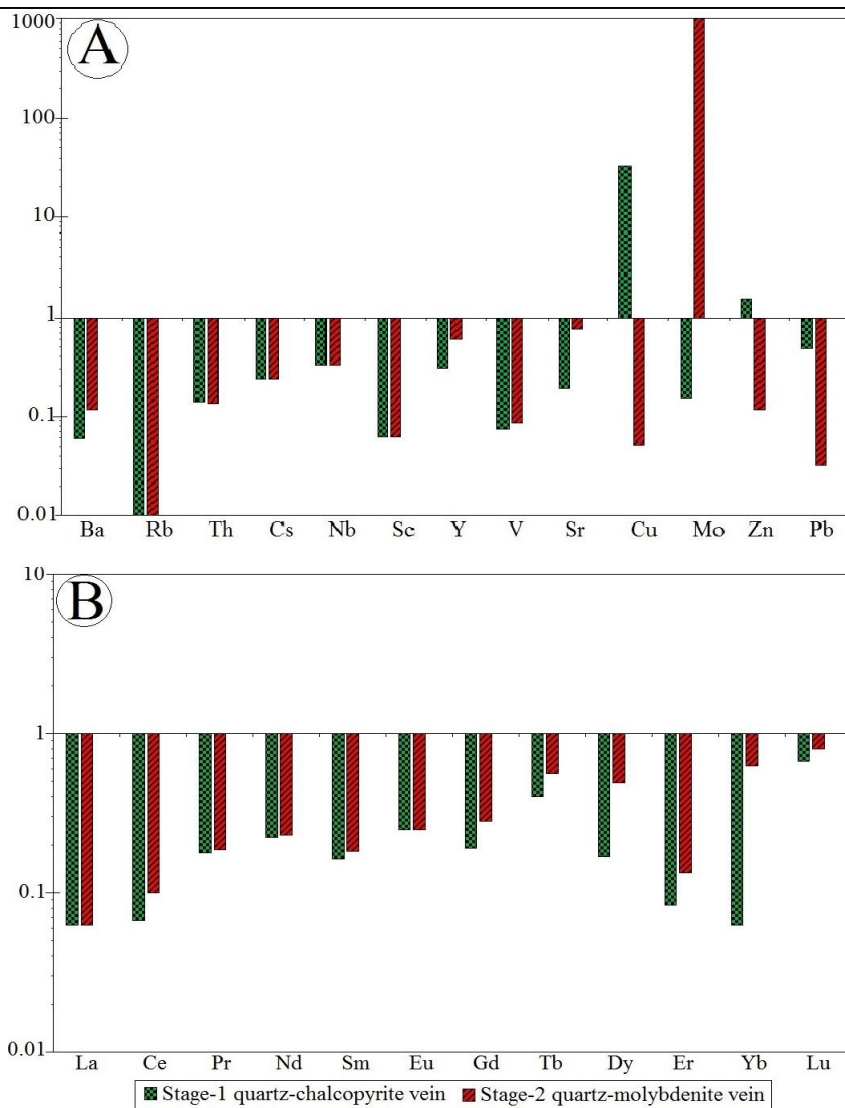
روی زیاد نیست. از طرف دیگر، رگه‌های کوارتز کانه‌دار نسبت به توده دگرسان‌شده از همه عناصر کمیاب خاکی تهی شده‌اند (شکل ۱۳-B).

A؛ اما چنان‌که مشاهده می‌شود این شدگی به‌ترتیب برای عناصر مس و مولیبدن در رگه‌های کوارتز- کالکوپیریت مرحله اول و کوارتز- مولیبدنیت مرحله دوم قابل توجه بوده و برای عنصر



شکل ۱۲. A: نمودار عناصر کمیاب برای رگه‌های کوارتز کانه‌دار و توده گرانودیوریت- کوارتز مونزودیوریت دگرسان‌شده در رخداد معدنی قره‌چیلر که نسبت به توده گرانودیوریت- کوارتز مونزودیوریت سالم و بدون کانه‌زایی (نمونه QA-20، جدول ۱) بهنجار شده‌اند و B: نمودار عناصر کمیاب خاکی برای رگه‌های کوارتز کانه‌دار و توده گرانودیوریت- کوارتز مونزودیوریت دگرسان‌شده در رخداد معدنی قره‌چیلر که نسبت به توده گرانودیوریت- کوارتز مونزودیوریت سالم و بدون کانه‌زایی (نمونه QA-20، جدول ۱) بهنجار شده‌اند.

Fig. 12. A: Histogram of trace elements in mineralized quartz veins and altered host granodiorite-quartz monzodiorite pluton at Qarachilar occurrence, normalized against fresh and barren granodiorite-quartz monzodiorite pluton (sample QA-20, Table 1), and B: Histogram of rare earth elements in mineralized quartz veins and altered host granodiorite-quartz monzodiorite pluton at Qarachilar occurrence, normalized against fresh and barren granodiorite-quartz monzodiorite pluton (sample QA-20, Table 1).



شکل ۱۳. A: نمودار عناصر کمیاب برای رگه‌های کوارتز کانهدار در رخداد معدنی قره‌چیلر که نسبت به توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت دگرسان شده (نمونه QA-12، جدول ۱) بهنجار شده‌اند و B: نمودار عناصر کمیاب خاکی برای رگه‌های کوارتز کانهدار در رخداد معدنی قره‌چیلر که نسبت به توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت دگرسان شده (نمونه QA-12، جدول ۱) بهنجار شده‌اند.

Fig. 13. A: Histogram of trace elements in mineralized quartz veins at Qarachilar occurrence, normalized against altered granodiorite-quartz monzodiorite pluton (sample QA-12, Table 1), and B: Histogram of rare earth elements in mineralized quartz veins at Qarachilar occurrence, normalized against altered granodiorite-quartz monzodiorite pluton (sample QA-12, Table 1).

میان‌بارهای سیال

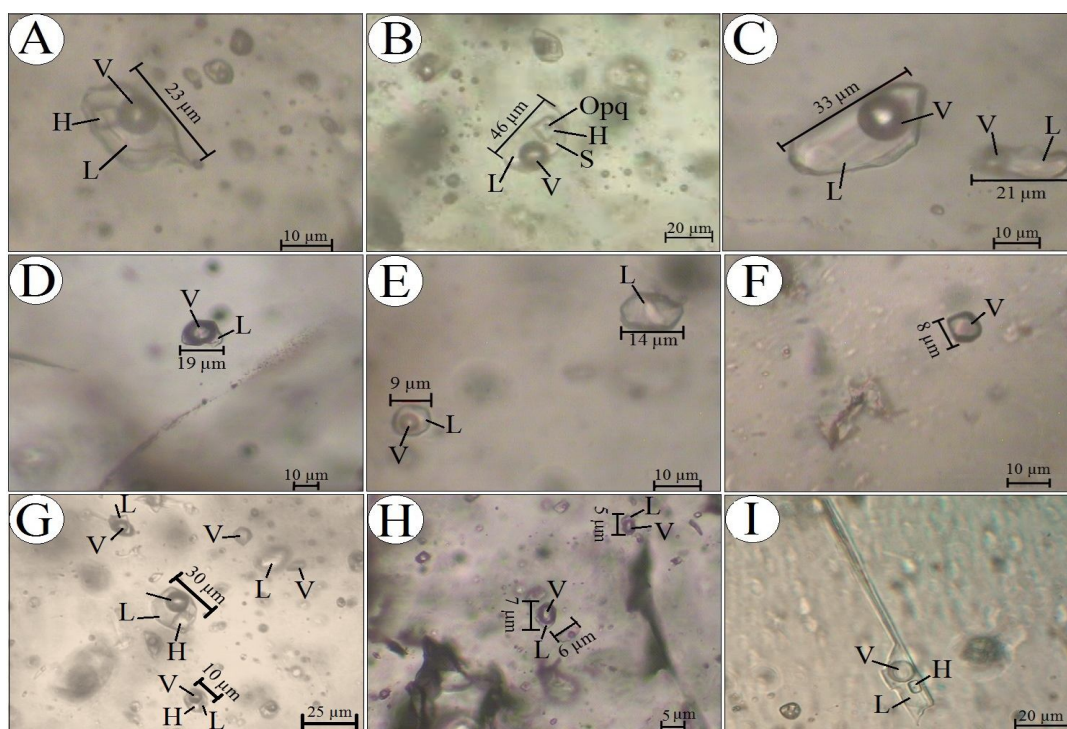
میان‌بارهای سیال موجود در کانی‌های کوارتز مراحل اول و دوم کانده‌زایی منطقه قره‌چیلر شامل انواع اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب (Roedder, 1984) با شکل‌های منفی بلورین، گرد، نیمه‌گرد، نامنظم، کروی، کشیده و باریک، دوکی‌شکل و چند ضلعی

(Shepherd et al., 1985) بوده است و اندازه‌ای بین ۵ تا ۵۰ میکرون دارند. به‌طور کلی در نمونه‌های بررسی شده، ۶ نوع میان‌بار سیال قابل تشخیص است (شکل ۱۴-A، B، C، D، E، F، G، H و I): ۱- سه فاز مایع-گاز-جامد حاوی هالیت (LVS)، ۲- چند فاز مایع-گاز-جامد (هالیت±سیلیت±کانی کدر

از این نوع هستند و ج) سه فاز سیال حای هالیت نوع دوم که همگن شدن آنها با ذوب هالیت همراه بود ($T_{m-h} > T_h$). تعداد این نوع میان‌بارهای سیال VL محدود است. میان‌بارهای سیال VL معمولاً به فاز بخار همگن شدند ($VL \rightarrow V$). دمای همگن شدن دو نمونه از این میان‌بارهای سیال مشابه با دمای همگن شدن میان‌بارهای سیال LV اندازه‌گیری شد؛ اما به دلیل این که مشاهده فاز بخار هنگام همگن شدن این میان‌بارها به سختی قابل مشاهده بود، بررسی‌های ریزدماسنجی بیشتر بر روی آنها انجام نشد.

کالکوپریت، پیریت و هماتیت، (LVSS)، ۳- دو فاز مایع- گاز غنی از مایع (LV)، ۴- دو فاز مایع- گاز غنی از بخار (حجم فاز بخار تا ۷۵ درصد، VL)، ۵- تک فاز مایع (L) و ۶- تک فاز گاز (V). بررسی‌های ریزدماسنجی بر روی میان‌بارهای سیال LV و LVS به شرح زیر انجام شده است:

الف) دو فاز غنی از مایع که به فاز مایع همگن شدند ($LV \rightarrow L$). بخش عمده میان‌بارهای سیال دو فاز از این نوع هستند؛ ب) سه فاز حای هالیت نوع اول که اغلب با از بین رفتن بخار همگن شدند ($T_h > T_{m-h}$). بخش عمده میان‌بارهای سیال سه فاز



شکل ۱۴. تصاویر میکروسکوپی (در دمای اتاق با نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای) از انواع میان‌بارهای سیال موجود در رگه‌های کوارتز کانه‌دار در رخداد معدنی قره‌چیلر. A: میان‌بار سه فاز حای هالیت، B: میان‌بار چند فاز حای هالیت، سیلویت و کانی کدر، C: میان‌بار دو فاز غنی از مایع، D: میان‌بار دو فاز غنی از بخار، E: میان‌بار تک فاز مایع در کنار میان‌بار دو فاز غنی از مایع، F: میان‌بار تک فاز گاز، G: میان‌بارهای سه فاز حای هالیت در کنار میان‌بارهای دو فاز غنی از مایع و غنی از بخار و تک فازهای مایع و گاز، H: میان‌بارهای دو فاز غنی از مایع در کنار میان‌بارهای دو فاز غنی از بخار و I: باریک‌شدگی در میان‌بار سه فاز حای هالیت. (H: هالیت، L: مایع، V: بخار، S: سیلویت، Opq: کانی کدر) علائم اختصاری از دیاموند (Diamond, 2003) اقتباس شده است.

Fig. 14. Photomicrographs (at room temperature in plane-polarized light) of fluid inclusion types in mineralized quartz veins at Qarachilar occurrence. A: Three-phase halite-bearing inclusion, B: Polyphase halite, silvite and opaque mineral-bearing inclusion, C: Two-phase liquid-rich inclusion, D: Two-phase vapor-rich inclusion, E: Coexisting one-phase liquid and two-phase liquid-rich inclusions, F: One-phase vapor inclusion. G: Coexisting three-phase halite-bearing inclusions along with two-phase liquid-rich and vapor-rich as well as one-phase liquid and vapor inclusions, H: Coexisting two-phase liquid-rich and two-phase vapor-rich inclusions, and I: Necking-down of three-phase halite-bearing inclusion. (H: halite, L: liquid, V: vapor, S: silvite, Opq: opaque mineral), Abbreviations follow Diamond (2003)

و شکل ۱۵-A). محدوده دمای انحلال هالیت در این نوع میان‌بارهای سیال، بین ۲۲۰ تا ۳۹۰ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۳۳۵ درجه سانتی‌گراد) اندازه‌گیری شده است (جدول ۲ و شکل ۱۵-B).

براساس دمای ذوب آخرین قطعه یخ (جدول ۲) و با توجه به معادله هال و همکاران (Hall et al., 1988)، میزان شوری اندازگی‌گیری شده برای میان‌بارهای سیال دو فاز و سه فاز حاوی هالیت نوع اول و دوم در نمونه‌های منطقه قره‌چیلر به ترتیب بین ۹/۲ تا ۲۳/۵ (میانگین ۱۵/۴)، ۲۹/۵ تا ۵۵/۱ (میانگین ۳۶/۳) و ۳۲/۴ تا ۴۵/۶ (میانگین ۳۸/۹) درصد وزنی معادل نمک طعام متغیر است (جدول ۲ و شکل ۱۵-C). چگالی کل در این میان‌بارهای سیال به ترتیب بین ۰/۵ تا ۰/۹ و ۰/۸ تا ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب تغییر می‌کند (جدول ۲).

دمای همگن شدن میان‌بارهای سیال دو فاز بین ۱۸۲ تا ۵۳۲ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۳۵۷ درجه سانتی‌گراد) متغیر است (جدول ۲، شکل ۱۵-A). میان‌بارهای سیال سه فاز نوع اول که با از بین رفتن فاز بخار همگن می‌شوند ($T_h > T_{m-h}$)، یا این که فاز بخار تقریباً هم‌زمان با هالیت از بین می‌رود ($T_{m-h} = T_h$)، بیشترین فراوانی را دارد و محدوده دمای همگن شدن آنها بین ۱۹۷ تا ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۳۷۸ درجه سانتی‌گراد) متغیر است (جدول ۲ و شکل ۱۵-A). محدوده دمای انحلال هالیت در این میان‌بارهای سیال، بین ۱۴۵ تا ۴۶۵ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۲۶۷ درجه سانتی‌گراد) است (جدول ۲ و شکل ۱۵-B). در میان‌بارهای سیال سه فاز نوع دوم که با از بین رفتن هالیت همگن می‌شوند ($T_{m-h} > T_h$)، محدوده دمای از بین رفتن فاز بخار بین ۲۰۳ تا ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۲۹۶ درجه سانتی‌گراد) تغییر می‌کند (جدول ۲).

جدول ۲. خلاصه داده‌های بررسی‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال اولیه دو فاز غنی از مایع و سه فاز حاوی هالیت موجود در رگه‌های کوارتز مرحله اول و دوم کانه‌زایی در رخداد معدنی مس-مولیبدن-طلا قره‌چیلر

Table 2. Microthermometric data summary for primary LV and LVS fluid inclusions from the mineralized stage-1 and stage-2 quartz veins from the Qarachilar Cu-Mo-Au occurrence

| Incl. type | Size (μm) | T_e ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{m-\text{ice}}$ ($^{\circ}\text{C}$) | T_{m-h} ($^{\circ}\text{C}$) | T_h ($^{\circ}\text{C}$) | Salinity (wt.% NaCl equiv.) | Density (g/cm^3) |
|---------------------------|------------------------|------------------------------|---|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| LV (n=38) | 4-49 | -40 to -58 | -5.7 to -22 | - | 182-532 (357) ¹ | 9.2-23.5 (15.4) | 0.5-0.9 |
| LVS (type-1) (n=58) | 6-32 | -52 to -63 | -20 to -31 | 145-465 (267) | 197-530 (378) | 29.5-55.1 (36.3) | 0.8-1.1 |
| LVS (type-2) (n=6) | 10-36 | - | - | 220-390 (335) | 203-375 (296) | 32.4-45.6 (38.9) | |

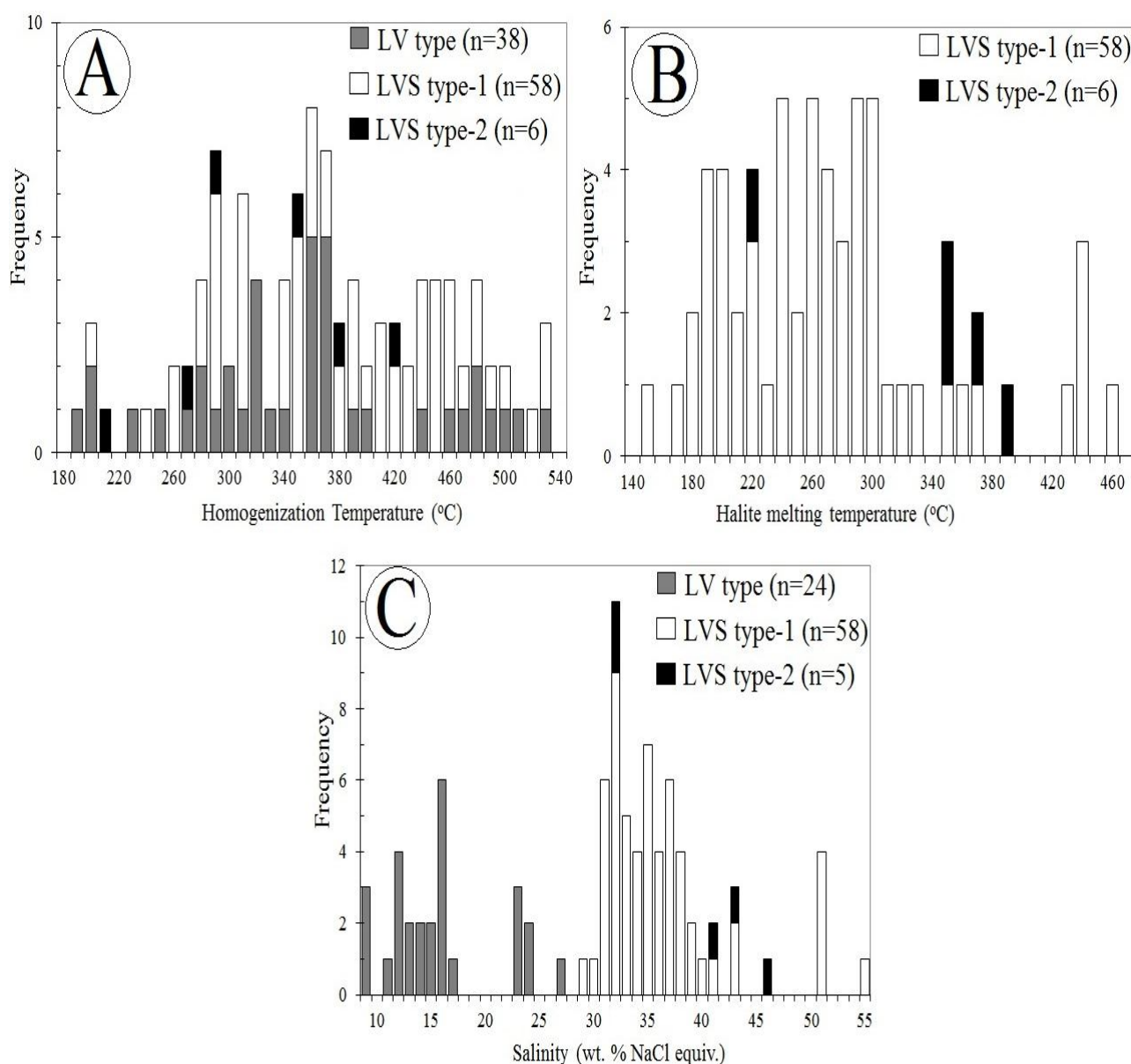
¹values are the measured range, with the average given in parenthesis. T_e = first ice melting, $T_{m-\text{ice}}$ = final ice melting, T_{m-h} = halite melting, T_h = homogenization temperature

(میان‌بارهای سیال سه فاز حاوی هالیت) درصد وزنی معادل نمک طعام بوده و میان‌بارهای سیال با شوری بین ۲۰ تا ۳۰ درصد وزنی

بیشترین فراوانی شوری در میان‌بارهای سیال بررسی‌شده مربوط به شوری بین ۱۰ تا ۲۰ (میان‌بارهای سیال دو فاز) و ۳۰ تا ۴۰

مس پورفیری سونگون نیز گزارش شده است (Mehrpour, 1993; Calagari, 2004; Hosseinzadeh, 2008). این پدیده در تعدادی از میان‌بارهای سیال دو فازی منطقه قره‌چیلر به صورت تشکیل بلورهای ریز هالیت پس از ذوب کامل یخ دیده می‌شود که تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد پایدار هستند.

معادل نمک طعام از فراوانی بسیار کمتری برخوردار هستند (شکل ۱۵-C). کمبود میان‌بارهای سیال مزبور می‌تواند به نیمه‌پایدار بودن هالیت مرتبط باشد؛ زیرا هالیت در این شرایط قادر به هسته‌بندی نیست و یا $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ در نزدیکی نقطه اشباع قادر به هسته‌بندی نیست (Roedder and Bodnar, 1980; Shepherd et al., 1985; Bodnar and Vityk, 1994). چنین خلای در کانسار



شکل ۱۵. نمودارهای فراوانی محدوده‌های A: دمای همگن شدن، B: دمای انحلال هالیت و C: شوری در میان‌بارهای سیال اولیه موجود در رگه‌های کوارتز مرحله اول و دوم کانه‌زایی در رخداد معدنی قره‌چیلر

Fig. 15. Frequency histograms of A: homogenization temperature, B: halite melting, and C: salinity ranges for the primary fluid inclusions in mineralized stage-1 and stage-2 quartz veins at Qarachilar occurrence

شده در میان‌بارهای سیال سه فاز نوع دوم بیانگر شوری واقعی سیال گرمابی در زمان به‌دام افتادن نخواهد بود؛ زیرا ذرات هالیت در طی سرد شدن سیال گرمابی، به‌صورت هسته عمل کرده است و احتمالاً به بلورهای بزرگ‌تر هالیت تبدیل خواهند شد. لذا شوری نادرست و بالاتری را نشان خواهد داد. میزان این شوری نیز وابسته به اندازه و مقدار هسته‌های هالیت به‌دام افتاده است. از طرف دیگر، پدیده باریک‌شدگی در دماهای بالا در طی سرد شدن سیال گرمابی موجب تشکیل میان‌بارهای سیال با شوری و دمای همگن شدن متفاوت خواهد شد (Ahmad and Rose, 1980). این پدیده همچنین سبب اختلاف زیاد بین دمای انحلال هالیت و دمای همگن شدن می‌شود.

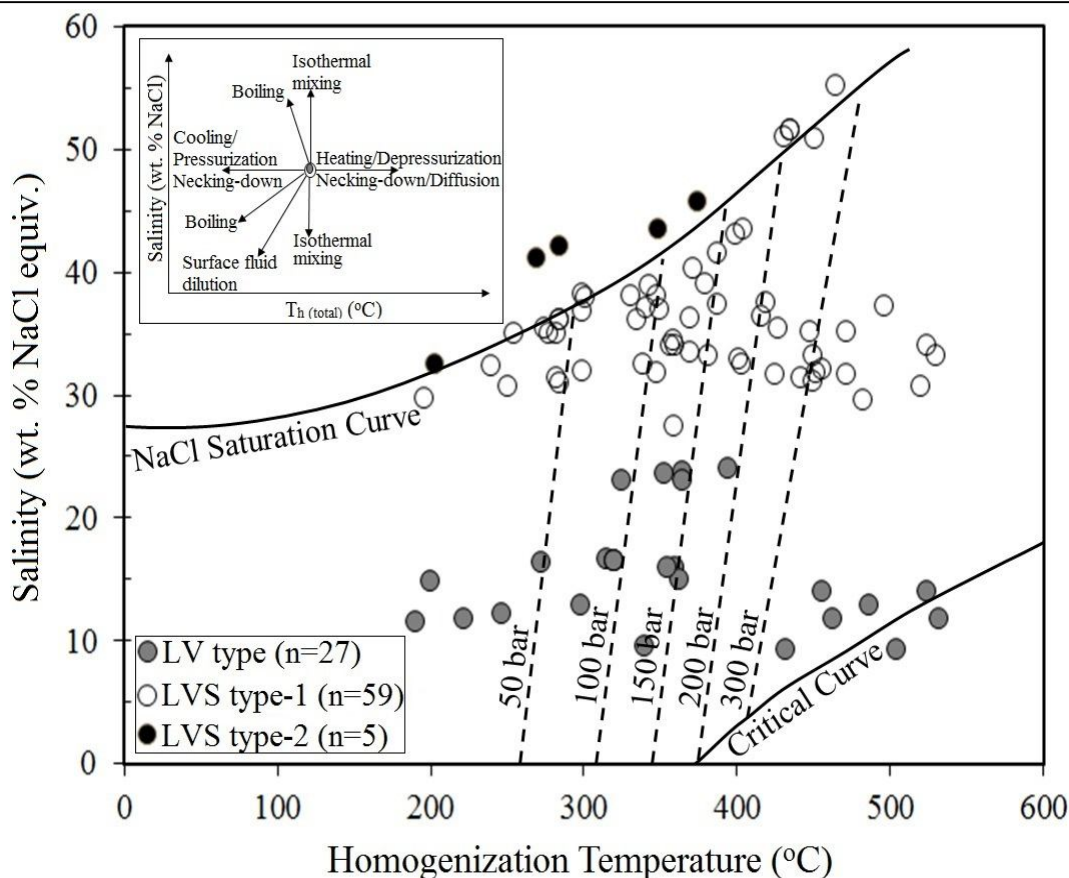
با توجه به رخداد جوشش در میان‌بارهای سیال بررسی شده، فشار به‌دام افتادن میان‌بار سیال معادل فشار بخار آن در دمای همگن شدن است (Bodnar, 2003). بر اساس نمودار دما-فشار - عمق فورنیر (Fournier, 1987) و با توجه به کمینه و بیشینه دمای همگن شدن و شوری میان‌بارهای سیال (جدول ۲)، فشار محاسبه شده برای میان‌بارهای سیال در منطقه قره‌چیلر بین ۵۰ تا ۵۵۰ بار تخمین زده می‌شود. این میزان فشار به‌ترتیب معادل عمق هیدرواستاتیک ۰/۴ تا ۶ کیلومتر زیر سطح ایستابی قدیمی است.

نوع کانه‌زایی و مدل تشکیل رخداد معدنی قره‌چیلر

با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، ترکیب کانی‌شناسی، ساخت و بافت کانسنگ، زمین‌شیمی و داده‌های میان‌بارهای سیال، کانه‌زایی در رخداد معدنی قره‌چیلر شباهت‌های نسبی فراوانی با کانسارهای رگه‌ای مس-مولیبدن-طلا مرتبط با سیستم‌های مس-مولیبدن پورفیری و ذخایر طلای مرتبط با توده‌های نفوذی دارد (جدول ۳). ویژگی‌های کانه‌زایی و به‌ویژه داده‌های میان‌بارهای سیال در این رخداد معدنی شباهت زیادی با سیستم‌های کانه‌زایی مس پورفیری و طلای رگه‌ای موجود در پهنه ارسباران دارد (جدول ۴).

روند تحول سیال کانه‌ساز در رخداد معدنی قره‌چیلر بر اساس نمودار تغییرات دمای همگن شدن در برابر شوری (شکل ۱۶)، بیانگر وجود دو نوع سیال با شوری متفاوت است که در این بین سیال‌های با شوری بالا غالب هستند. در این نمودار میان‌بارهای سیال سه فاز نوع دوم که با انحلال هالیت همگن می‌شوند در بالای منحنی اشباع نمک قرار گرفته‌اند. در مقابل، بخش عمده میان‌بارهای سیال سه فاز نوع اول که با از بین رفتن فاز بخار همگن می‌شوند در نزدیکی یا در زیر منحنی اشباع نمک قرار گرفته‌اند. این پدیده‌ها به‌ترتیب بیانگر به‌دام افتادن از یک سیال فوق اشباع از NaCl و سیال اشباع تا تحت اشباع از NaCl هستند (Roedder, 1984). قرارگیری تعدادی از میان‌بارهای سیال در سمت راست منحنی بحرانی نشان‌دهنده وجود نمک‌هایی مانند KCl, CaCl₂ و FeCl₂ در سیال اولیه است (Van den Kerkhof and Hein, 2001; Prokofiev et al., 2010). داده‌های مربوط به دمای ذوب اولین قطعه یخ (جدول ۲) تأییدکننده وجود چنین نمک‌هایی است.

روند دمای همگن شدن-شوری (شکل ۱۶) با ترکیبی از فرآیندهای آمیختگی هم‌دمای سیال‌های با شوری متفاوت، باریک‌شدگی میان‌بارهای سیال و جوشش (Shepherd et al., 1985; Wilkinson, 2001) سازگار است. وجود میان‌بارهای سیال نزدیکی یا روی منحنی بحرانی و همزیستی آنها با میان‌بارهای سیال دو فاز غنی از بخار، بیانگر به‌دام افتادن سیال اشباع از NaCl طی پدیده جوشش است (Shepherd et al., 1985; Calagari, 2004). شاهد دیگر رخداد جوشش همراهی نزدیک میان‌بارهای سیال دو فاز غنی از بخار و غنی از مایع با شوری متوسط با میان‌بارهای سیال چند فاز هالیت‌دار بسیار شور است که همگی دمای همگن شدن مشابهی دارند. همزیستی نزدیک میان‌بارهای سیال سه فاز نوع دوم ($T_{hm} > T_h$) با میان‌بارهای سیال سه فاز نوع اول ($T_{hm} \leq T_h$) در یک دامنه از دمای همگن شدن و حضور بلورهای کوچک هالیت نشان می‌دهد که این میان‌بارهای سیال از یک سیال اشباع حاوی بلورهای کوچک هالیت به‌دام افتاده‌اند (Calagari, 2004). بنابراین، شوری بالای اندازه‌گیری



شکل ۱۶. نمودار شوری-دمای همگن‌شدن برای داده‌های میان‌بارهای سیال در رخدادهای قره‌چیلر. روندها نشان‌دهنده فرآیندهای جوشش، آمیختگی و باریک‌شدگی میان‌بارهای سیال طی تحول سیال گرمایی است (Wilkinson, 2001). منحنی‌های اشباع از NaCl و بحرانی از احمد و رُز (Ahmad and Rose, 1980) و خطوط مربوط به فشار بخار محلول NaCl از رودر (Roedder, 1984) اقتباس شده است.

Fig. 16. Salinity vs. homogenization temperature plot for fluid inclusion data at Qarachilar occurrence showing boiling, isothermal mixing and necking-down trends during evolution of hydrothermal fluids (Wilkinson, 2001). NaCl saturation and critical curves are from Ahmad and Rose (1980) and NaCl pressure lines are from Roedder (1984).

حدود ۲۰ کیلومتری جنوب توده گرانودیوریت-کوارتزومنزودیوریت قره‌چیلر دیده می‌شود. به دلیل عدم رخمون واحدهای مزبور در منطقه قره‌چیلر، این واحدها در شکل ۱۷ نشان داده نشده است. طی ائوسن پایانی-الیگوسن آغازین (Mehrprou et al., 1997)، توده گرانودیوریت-کوارتزومنزودیوریت باتولیت قره‌داغ به داخل توالی آتشفشانی-رسوبی کرتاسه نفوذ کرده و سبب تشکیل هاله دگرگونی مجاورتی و کانه‌زایی‌های اسکارنی مس-آهن (Mokhtari, 2008; Mokhtari, 2012; Baghban et al., 2015) در منطقه شده است (شکل ۱۷-B). بررسی‌های سن‌سنجی انجام‌شده توسط موریتز

بر اساس شواهد زمین‌شناسی، ساخت و بافت کانی‌سازی، مجموعه کانی‌شناسی، آنالیزهای زمین‌شیمیایی و شیمی سیال در منطقه قره‌چیلر مراحل تکوین و تکامل این رخداد معدنی را می‌توان به صورت یک توالی چهار مرحله‌ای خلاصه کرد (شکل ۱۷): مرحله نخست با تشکیل توالی‌های آتشفشانی-رسوبی کرتاسه پایانی (Mehrprou et al., 1997) شامل گدازه‌ها و توف‌های حدواسط-بازیک، شیل، مارن، ماسه‌سنگ و سنگ آهک همراه است (شکل ۱۷-A).

مرحله دوم با فعالیت‌های آتشفشانی ائوسن مشخص می‌شود. آثار این فعالیت‌ها به صورت واحدهای آتشفشانی-رسوبی در فاصله

و همکاران (Moritz et al., 2016) بر روی ادامه این توده در (اوسن بالایی) نشان داده است.
جمهوری ارمنستان، سن جای‌گیری آن را حدود ۴۹ میلیون سال

جدول ۳. مقایسه ویژگی‌های اصلی رخداد معدنی قره‌چیلر با کانسارهای مس-مولیبدن پورفیری و رگه‌ای و طلای مرتبط با توده‌های نفوذی. علایم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) و دیاموند (Diamond, 2003) اقتباس شده است. (Apy: آرسنوپیریت، Bis: بیسموتینیت، Ccp: کالکوپیریت، Cct: کالکوسیت، Eng: انارژیت، Gn: گالن، Mol: مولیبدنیت، Py: پیریت، Po: پیروتیت، S: شوری، Sch: شلیت، Sp: اسفالریت، Stb: استیبینیت، T_h: دمای همگن‌شدن)

Table 3. Comparison of main characteristics of Qarachilar occurrence with porphyry and vein type Cu and Mo deposits as well as intrusion related Au deposits. Abbreviations follow Whitney and Evans (2010) and Diamond (2003). (Apy: arsenopyrite, Bis: bismuthinite, Ccp: chalcopyrite, Cct: chalcocite, Eng: enargite, Gn: galena, Mol: molybdenite, Py: pyrite, Po: pyrrhotite, S: salinity, Sch: scheelite, Sp: sphalerite, Stb: stibnite, T_h: homogenization temperature)

| | Porphyry Cu deposits | Porphyry Mo deposits | Vein-type Cu deposits | Vein-type Mo deposits | Intrusion related Au deposits | Qarachilar occurrence |
|--|--|---|--|---|---|--|
| Tectonic setting | active continental margins, island arcs | continental rift, continental margins | back-arc rift basin, continental rift | orogenic belts, collision zones | continental margins, back-arc basin | active continental margins, post collision |
| Host rock | granodiorite, quartz monzodiorite, tonalite, diorite | porphyritic granite, quartz monzonite | granitoids, volcano-sedimentary and metamorphosed formations | granitoids | granite | granodiorite, quartz monzodiorite |
| Timing of mineralization | Proterozoic to Tertiary | Mezozoic to Tertiary | Proterozoic to Tertiary | Mezozoic | Mezozoic | mid-late Oligocene (25–31 Ma) |
| Alteration | potassic, phylic, argillic, propylitic | potassic, propylitic, argillic, sericitic | silisic, chloritic, propylitic, argillic | silisic, carbonatic, sericitic, propylitic | potassic, silisic, sericitic, carbonatic | silisic, sericitic, propylitic, carbonatic |
| Ore texture | disseminated, veinlet, stockwork | veinlet, stockwork | vein-veinlet | vein-veinlet | vein-veinlet, disseminated | vein-veinlet, disseminated |
| Ore Minerals | Ccp, Mol, Py | Mol, Py, Sch | Ccp, Eng, Py, Cct | Mol, Py, Gn | Apy, Py, Po, Stb, Bis, Mol | Ccp, Py, Mol, Gn, Sp, Bis |
| Fluid inclusion characteristics | T _h ≤ 725 °C, S ≤ 20 wt% NaCl | | - | T _h : 133-397 °C, S: 1.5-31.6 wt% NaCl | T _h : 300-480 °C, S: 2-8 wt% NaCl | T _h : 180-530 °C, S: 2-60 wt% NaCl |
| References | Sillitoe, 2010 | Taylor et al., 2012; Li et al., 2013 | Sawkins, 1972 | Gao et al., 2013 | Hart et al., 2000; Lang et al., 2000; Lang and Baker, 2001; Goldfarb et al., 2000 | Mokhtari, 2008; Simmonds and Moazzen, 2015; this study |

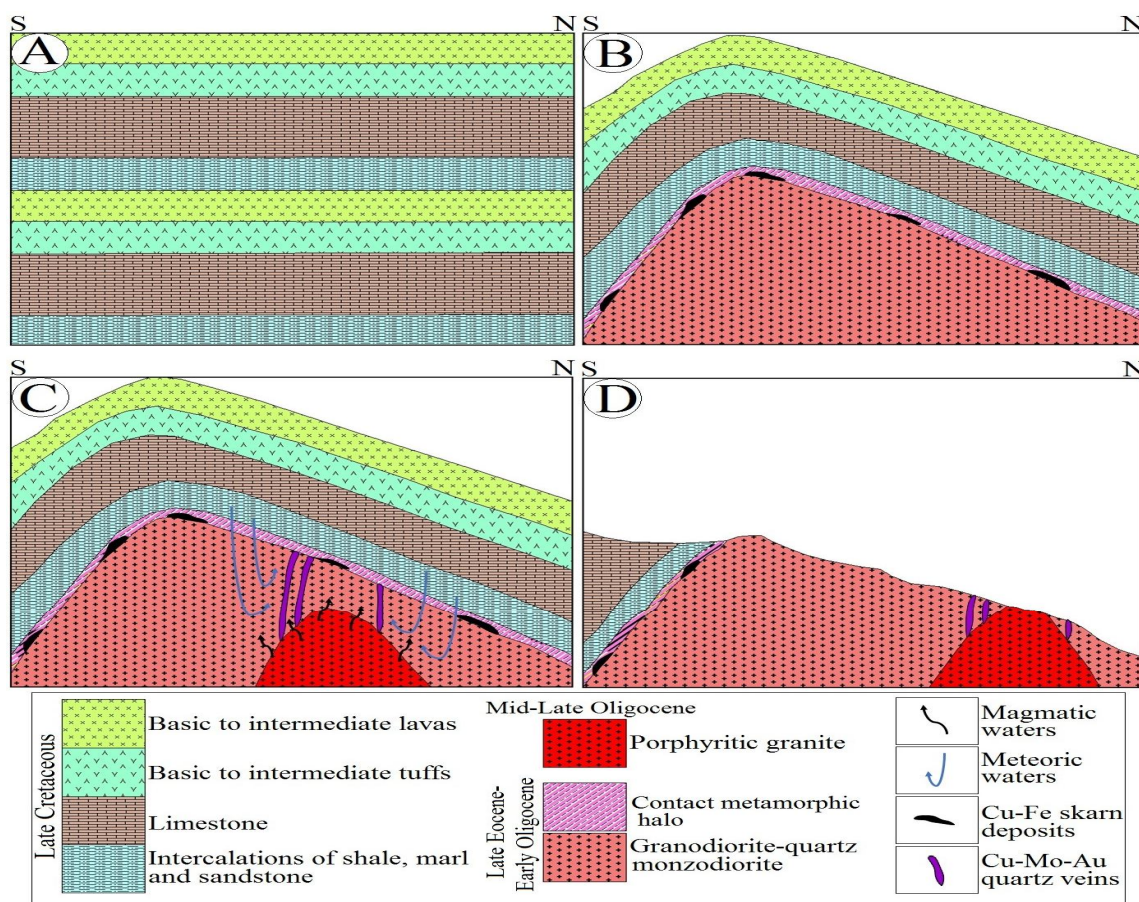
جدول ۴. مقایسه ویژگی‌های اصلی رخداد معدنی قره‌چیلر با برخی از سیستم‌های کانه‌زایی موجود در پهنه ارسباران. علایم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) و دیاموند (Diamond, 2003) اقتباس شده است. (Au: طلا، Bis: بیسموتینیت، Bn: بورنیت، Ccp: کالکوپیریت، Gn: گالن، Mol: مولیبدنیت، Py: پیریت، S: شوری، Sp: اسفالریت، T_h: دمای همگن‌شدن، Ttr: تتراهدریت)

Table 4. Comparison of main characteristics of Qarachilar occurrence with some mineralized systems at Arasbaran zone. Abbreviations follow Whitney and Evans (2010) and Diamond (2003). (Au: gold, Bis: bismuthinite, Bn: bornite, Ccp: chalcopyrite, Gn: galena, Mol: molybdenite, Py: pyrite, S: salinity, Sp: sphalerite, T_h: homogenization temperature, Ttr = tetrahedrite)

| | Sungun porphyry Cu deposit | Saunajil porphyry Cu deposit | Haft- Cheshmeh porphyry Cu deposit | Javan-Sheikh porphyry Cu deposit | Mivehrood Au deposit | Qarachilar occurrence |
|--|---|---|--|---|--|--|
| Tectonic setting | active continental margins | active continental margins | active continental margins | active continental margins | active continental margins | active continental margins, post collision |
| Host rock | quartz monzodiorite to granite | granitoids | granitoids | granite | granitoid | granodiorite, quartz monzodiorite |
| Timing of mineralization | early Miocene (22–20 Ma) | Oligocene | late Oligocene (29–27 Ma) | Oligocene | Oligo- Miocene | mid-late Oligocene (25–31 Ma) |
| Alteration | potassic, philic, argillic, propylitic | potassic, philic, argillic, propylitic | potassic, philic, argillic, propylitic | potassic, philic, argillic, propylitic | philic, silisic, potassic, argillic, propylitic | silisic, sericitic, propylitic, carbonatic |
| Ore texture | disseminated, veinlet, stockwork | disseminated, veinlet, stockwork | disseminated, veinlet, stockwork | disseminated, veinlet, stockwork | disseminated, veinlet, stockwork | vein-veinlet, disseminated |
| Ore Minerals | Ccp, Py, Gn, Sp, Mol | Py, Ccp, Mol, Bn | Ccp, Bn, Mol, Gn, Sp, Ttr | Ccp, Py, Mol | Py, Ccp, Gn, Au, Stb | Ccp, Py, Mol, Gn, Sp, Bis |
| Fluid inclusion characterestics | T _h : 180-650 °C, S ≤ 55 wt% NaCl | T _h : 180-580 °C, S ≤ 50 wt% NaCl | - | T _h : 200-420 °C, S: 10-45 wt% NaCl | T _h : 140-560 °C, S: 5-70 wt% NaCl | T _h : 180-530 °C, S: 2-60 wt% NaCl |
| References | Mehrpourtou, 1993; Calagari, 1997; Hezarkhani and Williams- Jones, 1998; Calagari, 2004; Aghazadeh et al., 2015 | Hosseinzadeh, 2008 | Hassanpour et al., 2011; Aghazadeh et al., 2015 | Imani, 2013 | Jamali, 1999; Gholami Checheki, 2001; Jamali et al., 2010; Jamali et al., 2012; Jamali and Mehrabi, 2015 | Mokhtari, 2008; Simmonds and Moazzen, 2015; this study |

بر اساس داده‌های سن‌سنجی رنیم-اُسمیم سیمونز و مؤذن (Simmonds and Moazzen, 2015)، سن کانی‌سازی رخداد معدنی قره‌چیلر ۲۵ تا ۳۱ میلیون سال است. بر این اساس، سن جای‌گیری گرانیت پورفیری را نیز می‌توان همین زمان در نظر گرفت. مرحله چهارم با بالاآمدگی ناحیه‌ای و توسعه فرآیندهای هوازگی و فرسایش همراه است (شکل ۱۷-D).

مرحله سوم با نفوذ توده گرانیت پورفیری به داخل توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت مشخص می‌شود (شکل ۱۷-C). این نفوذ سبب گسترش درز و شکستگی در توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت و چرخش آب‌های ماگمایی و جوی در منطقه شده است. این آب‌ها علاوه بر توسعه دگرسانی در توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت، به تشکیل رگه‌های کوارتز مس-مولیدن-طلا دار منطقه منجر شده‌اند (شکل ۱۷-C).



شکل ۱۷. تصویر شماتیک از مراحل رخداد کانه‌زایی در منطقه قره‌چیلر. A: تشکیل توالی آتشفشانی-رسوبی کرتاسه پایانی، B: نفوذ توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت و توسعه هاله دگرگونی مجاورتی، دگرسانی، تشکیل مرمر و اسکارن‌زایی (مس-آهن) در واحدهای آتشفشانی ائوسن پایانی و لیگوسن آغازین، C: نفوذ توده گرانیت پورفیری به داخل واحد گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت. نفوذ این توده سبب چرخش آب‌های ماگمایی و جوی و شکل‌گیری کانه‌زایی مس-مولیدن-طلا به صورت رگه‌های کوارتز کانه‌دار درون توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودیوریت شده است و D: بالاآمدگی ناحیه‌ای و توسعه فرآیندهای هوازگی و فرسایش

Fig. 17. Schematic representation of mineralization evolution stages at Qarachilar area. A: Formation of late Cretaceous volcano-sedimentary units, B: Granodiorite-quartz monzodiorite pluton intruded into the late Eocene- early Oligocene units. This event resulted in contact metamorphism halo, alteration, marble formation and skarn mineralization (Fe-Cu) in host rocks, C: Porphyritic granite pluton intruded into the granodiorite-quartz monzodiorite pluton. Intrusion of this pluton caused circulation of magmatic and meteoric waters and formation of Cu-Mo-Au mineralization as mineralized quartz veins within granodiorite-quartz monzodiorite pluton, and D: Regional exhumation and development of weathering and erosion processes

نتیجه‌گیری

(۱) نتایج به‌دست آمده از مشاهدات صحرایی، ساخت و بافت، زمین‌شیمی و بررسی میان‌بارهای سیال در رخداد معدنی قره‌چیلر بیانگر آن است که این رخداد معدنی را می‌توان با کانسارهای رگه‌ای مس-مولیبدن-طلا مرتبط با سیستم‌های مس-مولیبدن پورفیری و ذخایر طلای مرتبط با توده‌های نفوذی مقایسه کرد. (۲) مقایسه الگوهای بهنجار شده عناصر کمیاب خاکی در توده گرانودیوریت-کوارتز مونزودوریت میزبان سالم و بدون کانه‌زایی و توده دگرسان شده بیانگر تحرک عناصر کمیاب خاکی طی فرآیندهای دگرسانی گرمایی است. کاهش نسبت HREE به LREE در این نمونه‌ها با دگرسانی شدید سرسیتی انطباق دارد که به حذف HREE از ترکیب هورنبلاند و بیوتیت و تمرکز مجدد LREE در شبکه سرسیت منجر شده است. (۳) بررسی نمودارهای تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر در رخداد معدنی قره‌چیلر نشان‌دهنده تمرکز عناصر کانه‌ساز (مانند Cu, Mo, Zn و Pb) در بخش‌های دگرسان شده و رگه‌های کوارتز کانه‌دار است. تهی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی در این نمودارها بیانگر ترکیب اسیدی و ماهیت احیایی سیالات گرمایی است. نسبت بالای LREE/HREE ناشی از تأثیر سیالات ماگمایی-گرمایی غنی از کلر و فلوئورداری است که سبب شست‌وشو و حمل آنها از بخش‌های کانه‌دار شده‌اند. (۴) واکنش سیال‌های کانه‌دار با کمرسنگ‌ها می‌تواند در نهشت فلزات در رخداد معدنی قره‌چیلر نقش داشته باشد؛ اما شواهد

به‌دست آمده از بررسی‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد که نهشت مس، مولیبدن و طلا در این رخداد معدنی ناشی از رخداد فرآیندهای جوشش و آمیختگی سیالات است. این فرآیندها سبب کاهش دما و افزایش pH سیال و به دنبال آن کاهش حلالیت فلزات و ته‌نشینی کالکوپریت، مولیبدنیت و پیریت‌های طلا دار شده است.

(۵) کانی‌سازی در منطقه قره‌چیلر محصول فرآیندهای ماگمایی-گرمایی مرتبط با نفوذ توده‌های گرانیت پورفیری به داخل بخش‌های گرانودیوریت-کوارتز مونزودوریت باتولیت قره‌داغ است. از این‌رو، بررسی مناطق مجاور آپوفیزهای گرانیت پورفیری در این باتولیت می‌تواند از نظر اکتشاف کانه‌زایی‌های مشابه با رخداد معدنی قره‌چیلر حائز اهمیت باشد. با توجه به گسترش زیاد باتولیت قره‌داغ در پهنه کانه‌دار ارسباران، تعمیم شواهد به‌دست آمده از این بررسی‌ها به مناطق مشابه در این پهنه می‌تواند به شناسایی این نوع از کانی‌زایی‌ها منجر شود.

قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوهش تشکر می‌کنند. همچنین نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از سردیر و داوران محترم نشریه زمین‌شناسی اقتصادی برای راهنمایی‌های علمی که به غنای بیشتر این مقاله منجر شده است، تشکر نمایند.

References

- Adamia, S.A., Chkhotua, T., Kekelia, M., Lordkipanidze, M., Shavishvili, I. and Zakariadze, G., 1981. Tectonics of the Caucasus and adjoining regions: Implications for the evolution of the Tethys Ocean. *Journal of Structural Geology*, 3(4): 437–447.
- Aghanabati, A., 2004. *Geology of Iran*. Geological Survey of Iran, Tehran, 606 pp. (in Persian)
- Aghazadeh, M., Hou, Z., Badrzadeh, Z. and Zhou, L., 2015. Temporal-spatial distribution and tectonic

- setting of porphyry copper deposits in Iran: Constraints from zircon U–Pb and molybdenite Re–Os geochronology. *Ore Geology Reviews*, 70: 385–406.
- Ahmad, S.N. and Rose, A.W., 1980. Fluid inclusions in porphyry and skarn ore at Santa Rita, New Mexico. *Economic Geology*, 75(2): 229–250.
- Akbarpour, A., 2005. *Economic geology studies of Kiamaki region with special reference to copper and gold mineralization in Masjed-Daghi area, Jolfa, Eastern Azerbaijan province, Iran*. Ph.D.

- Thesis, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, 241 pp. (in Persian with English abstract)
- Alavi, M., 1991. Tectonic map of the Middle East. Geological Survey of Iran. Tehran.
- Alderton, D.M.H., Pearce, J.A. and Potts, P.J., 1980. Rare earth element mobility during granite alteration: evidence from southwest England. *Earth and Planetary Science Letters*, 49(1): 149–165.
- Amini Fazl, A., 1994. Petrology, mineralogy and geochemistry of Qaradagh intrusive body (Ordubad granite) at NW Iran (Ghoolan, Doozal, Astamal). Ph.D. Thesis, Azerbaijan Republic Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan Democratic Republic, 258 pp.
- Baghban, S., Hosseinzadeh, M.R., Moayyed, M., Mokhtari, M.A.A. and Gregory, D., 2015. Geology, mineral chemistry and formation conditions of calc-silicate minerals of Astamal Fe-LREE distal skarn deposit, Eastern Azarbaijan Province, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 68: 79–96.
- Baghban, S., Hosseinzadeh, M.R., Moayyed, M., Mokhtari, M.A.A., Gregory, D. and Mahmoudi Nia, H., 2016. Chemical composition and evolution of the garnets in the Astamal Fe-LREE distal skarn deposit, Qara-Dagh–Sabalan metallogenic belt, Lesser Caucasus, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 78: 166–175.
- Baniadam, F., 2003. Geology and genesis of gold-copper mineralization in Nabijan area. M.Sc. Thesis, Institute of Geoscience, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran. 167 pp. (in Persian with English abstract)
- Bienvenu, P., Bougault, H., Joron, J.L., Treuil, M. and Dmitriev, L., 1990. MORB alteration: Rare-earth element/non-rare-earth hygromagmaphile element fractionation. *Chemical Geology*, 82: 1–14.
- 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.
- Bodnar, R.J., Sterner, S.M. and Hall, D.L., 1989. SALTY: A FORTRAN program to calculate compositions of fluid inclusions in the system NaCl-KCl-H₂O. *Computers & Geosciences*, 15(1): 19–41.
- 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 methods and applications*. Short Cours of the Working Group, Siena, pp. 117–130.
- Brunsmann, A., Franz, G. and Erzinger, J., 2001. REE mobilization during small-scale high-pressure fluid-rock interaction and zoisite/fluid partitioning of La to Eu. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 65(4): 559–570.
- Calagari, A.A., 1997. Geochemical, stable isotope, noble gas and fluid inclusion studies of mineralization and alteration at Sungun porphyry copper deposit, East Azarbaijan, Iran: Implication for genesis. Ph.D. Thesis, University of Manchester, Manchester, England, 537 pp.
- Calagari, A.A., 2004. Fluid inclusion studies in quartz veinlets in the porphyry copper deposit at Sungun, East-Azarbaijan, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(2): 179–189.
- Calagari, A.A. and Hosseinzadeh, M.R., 2006. The mineralogy of copper-bearing skarn to the east of the Sungun-Chay River, East-Azarbaijan, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(4-6): 423–438.
- Debon, F. and Le Fort, P., 1983. A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, 73(3): 135–149.
- 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.
- Dokuz, A., Tanyolu, E. and Genc, S., 2005. A mantle and a lower crust derived bimodal suite in the Yusufeli Artvin area, NE Turkey: Trace element and REE evidence for subduction-related rift origin of early Jurassic Demirkent intrusive complex. *International Journal of Earth Sciences*, 95(3): 370–394.
- Dong, G., Morrison, G. and Jaireth, S., 1995. Quartz textures in epithermal veins, Queensland; classification, origin and implication. *Economic Geology*, 90(6): 1841–1856.
- Ebrahimi, M., Kouhestani, H. and Shahidi, E., 2015.

- Investigation on type and origin of iron mineralization at Mesgar occurrence, south of Zanjan, using petrological, mineralogical and geochemical data. *Journal of Economic Geology*, 7(1): 111–127. (in Persian with extended English abstract)
- Ebrahimi, S., Alirezaei, S. and Pan, Y., 2011. Geological setting, alteration, and fluid inclusion characteristics of Zaglic and Safikhanloo epithermal gold prospects, NW Iran. *Geological Society of London, Special Publications* 350, London, pp. 133–147.
- Fard, M., Aliakbari, H. and Mohammadi, B., 2005. Geology and drilling report of Masjed-Daghi, Siahrood-Jolfa area (scale 1:1000), Geological Survey of Iran, Tehran, Report 125, 136 pp.
- Feizi, M., Ebrahimi, M., Kouhestani, H. and Mokhtari, M.A.A., 2016. Geology, mineralization and geochemistry of Aqkand Cu occurrence (north of Zanjan, Tarom-Hashtjin zone). *Journal of Economic Geology*, 8(2): 505–524. (in Persian with extended English abstract)
- Ferdosi, R., Calagari, A.A., Hosseinzadeh, M.R. and Siahcheshm, K., 2014. Investigation of petrography, mineralography, and mineralization of gold-bearing epithermal veins in Astarghan area, Kharvana, East Azarbaijan. 32th national and 1th international Geosciences Congress. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran. (in Persian with English abstract)
- Ferdosi, R., Calagari, A.A., Hosseinzadeh, M.R. and Siahcheshm, K., 2016. Petrography, geochemistry and mineral chemistry of Astergran porphyritic stock, Kharvana, Eastern Azarbaijan. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 23(4): 759–774. (in Persian with English abstract)
- Fournier, R.O., 1987. Conceptual models of brine evolution in magmatic-hydrothermal systems. *U.S. Geological Survey, Professional Paper* 1350, pp. 1487–1506.
- Gao, Y., Ye, H., Mao, J. and Li, Y., 2013. Geology, geochemistry and genesis of the Qianfanling quartz-vein Mo deposit in Songxian County, Western Henan Province, China. *Ore Geology Reviews*, 55: 13–28.
- Ghadimzadeh, H., 2002. Economic geology and Au exploration at Safikhanlou-Noghdouz area (SE Ahar). M.Sc. Thesis, Institute of Earth Science, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, 232 pp. (in Persian with English abstract)
- Gholami Checheki, S., 2001. Geology and controlling factors of Au mineralization at Mivehrood deposit, Kharvana area (East Azarbaijan). M.Sc. Thesis, North Tehran branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, 310 pp. (in Persian with English abstract)
- Giere, R. and Williams, C.T., 1992. REE-bearing minerals in a Ti-rich vein from the Adamello contact aureole (Italy). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 112(1): 83–100.
- Goldfarb, R., Hart, C., Miller, M., Miller, L., Framer, G.L. and Groves, D., 2000. The Tintina gold belt: a global prospective. In: T.L. Tucker and Smith M.T. (Editors), *The Tintina gold belt: concepts, exploration and discoveries*. British Columbia and Yukon Chamber of Mines, Special volume 2, Vancouver, pp. 5–34.
- Gramaccioli, C.M., Diella, V. and Demartin, F., 1999. The role of fluoride complexes in REE geochemistry and the importance of 4f electrons: some complexes in minerals. *European Journal of Mineralogy*, 11(6): 983–992.
- Hall, D.L., Cohen, L.H. and Schiffman, P., 1988. Hydrothermal alteration associated with the iron skarn deposit, Eastern Mojave Desert, San Bernardino County, California. *Economic Geology*, 83(3): 568–587.
- Hart, C.J.R., Baker, T. and Burke, M., 2000. New exploration concepts for country rock-hosted, intrusion-related gold systems: Tintina gold belt, in Yukon. In: T.L. Tucker and Smith M.T. (Editors), *The Tintina gold belt: concept, exploration and discoveries*. British Columbia and Yukon Chamber of Mines, Special volume 2, Vancouver, pp. 145–172.
- Hassanpour, Sh., Rasa, I., Heydari, M., Motakan, A.A. and Moayyed, M., 2011. Geology, alteration, and mineralization in Haft-Cheshmeh copper-molybdenum porphyry deposit. *Iranian Journal of Geology*, 4(15): 15–28. (in Persian with English abstract)
- Heydarzadeh, R., 2007. Mineralization, alteration, and genesis of gold mineralization in Zaglik-Sarilar area. M.Sc. Thesis, Institute of Earth Science, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, 223 pp. (in Persian with English abstract)
- Hezarkhani, A. and Williams-Jones, A.E., 1998. Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit, Iran: Evidence from fluid inclusions and stable isotopes. *Economic Geology*, 93(5): 651–670.
- Hosseinzadeh, M.R., 2008. Geology, geochemistry, fluid inclusion, alteration, and genesis of Saunajil

- Porphyry copper deposits, East of Heris, Eastern Azerbaijan province, Iran. Ph.D. Thesis, Tabriz University, Tabriz, Iran, 230 pp. (in Persian with English abstract)
- Humphris, S.E., 1984. The mobility of the rare earth elements in the crust. In: P. Henderson (Editor), Rare earth element geochemistry. Elsevier, Amsterdam, pp. 317–342.
- Imani, F., 2013. Investigation of copper mineralization related with quartz veins at Javan-Sheikh village, Ahar. M.Sc. Thesis, Tabriz Payam Noor University, Tabriz, Iran, 212 pp. (in Persian with English abstract)
- Ineson, P.R., 1989. Introduction to practical ore microscopy. Longman Scientific and Technical, London, 181 pp.
- Jamali, H., 1999. Geology, geochemistry, mineralogy and genesis of Mivehrud Au-Cu mineralization, Eastern Azerbaijan Province. M.Sc. Thesis, Tarbiat Moallem University of Tehran, Tehran, Iran, 172 pp. (in Persian with English abstract)
- Jamali, H., Dilek, Y., Daliran, F., Yaghubpour, A.M. and Mehrabi, B., 2010. Metallogeny and tectonic evolution of the Cenozoic Ahar-Arasbaran volcanic belt, northern Iran. *International Geology Review*, 52(4–6): 608–630.
- Jamali, H. and Mehrabi, B., 2015. Relationships between arc maturity and Cu-Mo-Au porphyry and related epithermal mineralization at the Cenozoic Arasbaran Magmatic Belt. *Ore Geology Reviews*, 65(2): 487–501.
- Jamali, H., Yaghubpour, A., Mehrabi, B., Dilek, Y., Daliran, F. and Meshkani, S.A., 2012. Petrogenesis and tectono-magmatic setting of Meso-Cenozoic magmatism in Azerbaijan province, Northwestern Iran. In: A.I. Al-Juboury (Editor), *Petrology, New Perspectives and Applications*. INTECH, Croatia, pp. 39–56.
- Karimzadeh Somarin, A. and Moayyed, M., 2002. Granite and gabbrodiorite associated skarn deposits of NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 20(3–4): 127–138.
- Kikawada, Y., Ossaka, T., Oi, T. and Honda, T., 2001. Experimental studies on the mobility of lanthanides accompanying alteration of andesite by acidic hot spring water. *Chemical Geology*, 176(1–4): 137–149.
- Konstantinov, M.M., Kryazhev, S.G. and Ustinov, V.I., 2010. Characteristics of the ore-forming system of the zod gold-tellurium deposit (Armenia) according to isotopic data. *Geochemistry International*, 48(9): 946–949.
- Kouhestani, H., Ghaderi, M., Zaw, K., Meffre, S. and Emami, M.H., 2012. Geological setting and timing of the Chah Zard breccia-hosted epithermal gold-silver deposit in the Tethyan belt of Iran. *Mineralium Deposita*, 47(4): 425–440.
- Kozerenko, S.V., 2004. Hydrothermal system of the Zod gold sulfide deposit, Armenia: ore sources and formation conditions. *Geochemistry International*, 42(2): 188–190.
- Lang, J.R. and Baker, T., 2001. Intrusion-related gold system. The present level of understanding. *Mineralium Deposita*, Professional edition, Shapman and Hall, London, 318 pp.
- Lang, J.R., Baker, T., Hart, C.J.R. and Mortensen, J.K., 2000. An exploration model for intrusion-related gold systems. *Society of Economic Geologist Newsletters*, 40: 5–15.
- Li, N., Chen, Y.J., Pirajno, F. and Ni, Z., 2013. Timing of the Yuchiling giant porphyry Mo system, and implications for ore genesis. *Mineralium Deposita*, 48 (4): 505–524.
- Lottermoser, B.G., 1992. Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes. *Ore Geology Reviews*, 7(1): 25–41.
- Mederer, J., Moritz, R., Zohrabyan, S., Vardanyan, A., Melkonyan, R. and Ulianov, A., 2014. Base and precious metal mineralization in Middle Jurassic rocks of the Lesser Caucasus: A review of geology and metallogeny and new data from the Kapan, Alaverdi and Mehmana districts. *Ore Geology Reviews*, 58: 185–207.
- Mehrpour, M., 1993. Contributions to the geology, geochemistry, ore genesis and fluid inclusion investigations on Sungun Cu-Mo porphyry deposit, northwest of Iran. Ph.D. Thesis, University of Hamburg, Hamburg, Germany, 245 pp.
- Mehrpour, M., Mirzaei, M. and Alaei, S., 1997. Geologic map of Siahrood, scale 1:100 000. Geological Survey of Iran.
- Mohammadi, B., 2004. A brief report of exploration of porphyry Au-Cu-Mo in Masjed-Daghi area. Geological Survey of Iran. Tehran, Report 126, 26 pp. (in Persian)
- Mokhtari, M.A.A., 2008. Petrology, geochemistry, and petrogenesis of Qara-Dagh batholith (east of Siahrood, Eastern Azerbaijan) and associated skarn deposits with considering on mineralization. Ph.D. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 303 pp. (in Persian with English abstract)

- Mokhtari, M.A.A., 2012. The mineralogy and petrology of Pahnavar Fe skarn in the Eastern Azarbaijan, NW Iran. *Open Geosciences*, 4(4): 578–591.
- Mokhtari, M.A.A., Ebrahimi, M. and Ghorbani, M.R., 2016. The mineralogy and skarnification processes at the Avan Cu–Fe Skarn, northeast of Kharvana, NW Iran. *Journal of Economic Geology*, 8(2): 359–380. (in Persian with extended English abstract)
- Mokhtari, M.A.A., Moein-Vaziri, H., Gorbani M.R. and Mehrpartou, M., 2013. Geology and geochemistry of Aniq-Qarachilar Au-Cu-Mo mineralization (NE of Kharvana, Eastern Azarbaijan). *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 23(90): 135–150. (in Persian with English abstract)
- Mokhtari, M.A.A. and Yarmohamadi, A., 2008. Prospecting report for polymetal resource at Aniq-Qarachilar (northeast of Kharvana). Geological Survey of Iran. Tehran, Report 244, 187 pp. (in Persian)
- Mollai, H., 1993. Petrochemistry and genesis of the granodiorite and associated iron–copper skarn deposit of Mazraeh, Ahar, East Azerbaijan, Iran. Ph.D. Thesis, University of Rookee, India, 287 pp.
- Mollai, H., Pe-Piper, G. and Dabiri, R., 2014. Genetic relationships between skarn ore deposits and magmatic activity in the Ahar region, Western Alborz, NW Iran. *Geologica Carpathica*, 65(3): 207–225.
- Moritz, R., Rezeau, H., Ovtcharova, M., Tayan, R., Melkonyan, R., Hovakimyan, S., Ramazanov, V., Selby, D., Ulianov, A., Chiaradia, M. and Putlitz, B., 2016. Long-lived, stationary magmatism and pulsed porphyry systems during Tethyan subduction to post-collision evolution in the southernmost Lesser Caucasus, Armenia and Nakhichevan. *Gondwana Research*, 37: 465–503.
- Murphy, J.B. and Hynes, A.J., 1986. Contrasting secondary mobility of Ti, P, Zr, Nb and Y in two metabasaltic suites in the Appalachians. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 23(8): 1138–1144.
- Nabavi, M.H., 1976. An introduction to the Iranian geology. Geological Survey of Iran, Tehran, 110 pp. (in Persian)
- Nakamura, N., 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary Chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(5): 755–773.
- Parak, T., 1985. Phosphorus in different type of ore, sulfides in the iron deposits, and the type and origin of ores at Kiruna. *Economic Geology*, 80(3): 646–665.
- Pournik, P., 2002. Economic geology and Au exploration at Sharafabad-Hizehjan area (northwest of Varzaghan). Institute of Earth Science, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, 201 pp. (in Persian with English abstract)
- Prokofiev, V.Y., Garofalo, P.S., Bortnikov, N.S., Kovalenker, V.A., Zorina, L.D., Grichuk, D.V. and Selektor, S.L., 2010. Fluid inclusion constraints on the genesis of gold in the Darasun District (Eastern Transbaikalia), Russia. *Economic Geology*, 105(2): 395–416.
- Rezai Aghdam, M., and Sohrabi, G., 2010. Investigation on the geochemistry of alteration and its relationship with the Mo and Cu mineralization in Gharachilar–Gharadareh area (NW Iran). *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 20(77): 130–150. (in Persian)
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy* 12, Vancouver, 644 pp.
- Roedder, E. and Bodnar, R.J., 1980. Geologic pressure determinations from fluid inclusions studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 8: 263–301.
- Rolland, Y., Cox, S., Boullier, A.M., Pennacchioni, G. and Mancktelow, N., 2003. Rare earth and trace element mobility in mid-crustal shear zones: insights from the Mont Blanc Massif (Western Alps). *Earth and Planetary Science Letters*, 214(1–2): 203–219.
- Rollinson, H.G., 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation and interpretation. *Longman Geochemistry Series*, London, 352 pp.
- Sawkins, F.J., 1972. Sulfide ore deposits in relation to plate tectonics. *The Journal of Geology*, 80(4): 377–397.
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie, Glasgow, 239 pp.
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41.
- Simmonds, V. and Moazzen, M., 2015. Re–Os dating of molybdenites from Oligocene Cu–Mo–Au mineralized veins in the Qarachilar area, Qaradagh batholith (northwest Iran): implications for understanding Cenozoic mineralization in South

- Armenia, Nakhchivan, and Iran. *International Geology Review*, 57(3): 290–304.
- Sohrabi, G., 2003. Investigation on Cu–Mo–Fe mineralization in Ghoolan granitic intrusion, east of Siahrood. M.Sc. Thesis, University of Tabriz, Tabriz, Iran, 148 pp. (in Persian with English abstract)
- Taylor, R.D., Hammarstrom, J.M., Piatak, N.M. and Seal, R.R., 2012. Arc-related porphyry molybdenum deposit model. Chapter D of mineral deposit model for resource assessment, United States Geological Survey, Scientific Investigations Report 2010–5070–D, 16 pp.
- Van Den Kerkhof, A.M. and Hein, U.F., 2001. Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 55(1): 27–47.
- Wang, Q., Wyman, D.A., Xu, J.F., Zhao, Z.H., Jian, P., Xiong, X.L., Bao, Z.W., Li, C.F. and Bai, Z.H., 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu–Au mineralization. *Lithos*, 89(3–4): 424–446.
- Whitford, D.J., Korsch, M.J., Porritt, P.M. and Craven, S.J., 1988. Rare earth element mobility around the volcanogenic polymetallic massive sulfide deposit at Que River, Tasmania, Australia. *Chemical Geology*, 68(1–2): 105–119.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1): 229–272.
- Wilson, M., 2007. *Igneous petrogenesis*. Chapman and Hall, London, 411 pp.
- Wood, S.A., 1990a. The aqueous geochemistry of the rare earth elements and Yttrium. 1. Review of available low-temperature data for inorganic complexes and the inorganic REE speciation of natural waters. *Chemical Geology*, 82: 159–186.
- Wood, S.A., 1990b. The aqueous geochemistry of the rare earth elements and Yttrium. 2. Theoretical predictions of speciation in hydrothermal solutions to 350°C at station water vapor pressure. *Chemical Geology*, 88(1–2): 99–125.
- Zakeri, L., 2013. Investigation on geology, mineralization, alteration, geochemistry and genesis of Gharachilar ore deposit, Shah Jahan batholith (East Azarbaijan). Ph.D. Thesis, University of Tabriz, Tabriz, Iran, 282 pp.
- Zonouzi, R., 2006. Mineralogy and genesis of gold mineralization at Masjed-Daghi area, southeast of Jolfa. M.Sc. Thesis, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, 178 pp. (in Persian with English abstract)
- Zvedzov, V.S., Migachev, I.F. and Girfanov, M.M., 1993. Porphyry copper deposits of the CIS and the models of their formation. *Ore Geology Reviews*, 7(6): 511–549.



Geology, geochemistry and fluid inclusion of Qarachilar Cu-Mo-Au quartz veins, northeast of Kharvana, East Azerbaijan

Fariba Asiay Soufiani, Mir Ali Asghar Mokhtari, Hossein Kouhestani* and Amir Morteza Azimzadeh

Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Submitted: Aug. 13, 2016

Accepted: Feb. 28, 2017

Keywords: *Geology, geochemistry, fluid inclusion, Qarachilar, Kharvana, Arasbaran*

Introduction

The Qarachilar Cu-Mo-Au occurrence is located in the Arasbaran ore zone (AZ), NW Iran, some 70 km north of Tabriz. The AZ is characterized by occurrence of different types of mineralization and hosts many Cu-Mo porphyry (PCD), Cu skarn, and epithermal Au deposits (Jamali et al., 2010; Jamali and Mehrabi, 2015). The main rock unit exposed in the area is Qaradagh batholith (QDB). A variety of porphyry and vein-type Cu-Mo-Au mineralization are associated with QDB. The most pronounced occurrences are in Qarachilar, Qara-Dareh, Zarli-Dareh, Aniq and Pirbolagh. This type of mineralization can be followed in other parts of northwest Iran, such as Masjed-Daghi porphyry Cu-Au deposit and Mivehrood vein-type Au mineralization in the southwest of the QDB, the Sungun PCD and the related skarn in its southeast, and Astamal Fe skarn deposit in the south of the QDB. To date, no detailed study has been undertaken to understand the characteristics of the Qarachilar occurrence and its mineralization type is controversial. The recent work by Simmonds and Moazzen (2015) also did not present relevant information for an understanding of the Qarachilar occurrence. The Re-Os age data obtained in their work were compared with similar events along the Urumieh-Dokhtar magmatic arc (UDMA) and southern Lesser Caucasus in order to elucidate the temporal pattern of mineralization across the whole QDB and the UDMA. The present paper provides an overview of the geological framework, the mineralization characteristics, and the results of geochemistry and fluid inclusion studies of the

Qarachilar Cu-Mo-Au occurrence with an application to the ore genesis.

Materials and methods

More than 37 polished thin sections from Qarachilar host rocks and mineralized and altered zones were studied by conventional petrographic and mineralogic methods at the University of Zanjan. In addition, 9 samples from non-altered and altered host rocks and mineralized veins were analyzed by ICP-MS for trace elements and REE at the Zarazma Co., Tehran, Iran. Microthermometric data were performed on primary fluid inclusions using the Linkam THMS600 heating-freezing stage at the Iranian Mineral Processing Research Center (IMPRC), Tehran, Iran.

Results

The rock units exposed in the Qarachilar area are different sets of magmatic phases of QDB including granodiorite-quartz monzodiorite, porphyritic granite, quartz monzonite and acidic-intermediate dikes. Granodiorite-quartz monzodiorite is the dominant phase which hosts the Qarachilar quartz-sulfide veins. Mineralization at Qarachilar occurs as three quartz-sulfide veins. The veins reach up to 700-m in length and average 1-m in width, reaching a maximum of 2-m. They are generally steeply-dipping to the NE at 80°. The reported grades of Mo, Cu and Au range from 20 ppm to 3.6 wt%, 0.7 wt% to 5 wt%, and 0.23 to 37.2 g/t, respectively. Four stages of mineralization can be distinguished at Qarachilar. Stage-1 is represented by quartz veins (ranging from centimeters up to ≤ 1 -m width) that

*Corresponding authors Email: kouhestani@znu.ac.ir

contain variable amounts of chalcopyrite and pyrite. Stage-2 is marked by <1-mm to 3-cm wide veins of quartz with molybdenite \pm pyrite that usually cut Stage-1 mineralization, and, in turn, are cut by Stage-3 veins. The Stage-2 veins usually show a banded appearance. Disseminated texture is also observed in this stage. Molybdenite (0–5%) occurs as large flakes or aggregates of anhedral, tiny shredded crystals, rosettes, or plates, with variable sizes of 200- μ m to 3-mm within the quartz veins-veinlets. Stage-3 is represented by 1 to 10-cm wide Au-bearing Fe-hydroxide quartz veinlets. Stage-4 is represented by individual or sets of late quartz-carbonate veinlets that usually cut previous stages. No sulfide minerals are recognized with Stage-4. The hydrothermal alteration assemblages at Qarachilar range from proximal quartz, sericite and carbonate to distal sericite, epidote and calcite (propylitic alteration). Potassic alteration occurs locally in 5-cm-wide, quartz-albite-secondary biotite veins within granodiorite-quartz monzodiorite pluton. The ore minerals composed of chalcopyrite, pyrite, molybdenite, galena and quartz, calcite and ankerite are present as gangue minerals. Chalcocite, covellite, malachite, azurite, ferromolybdenite and goethite are formed during the supergene stage. The ore minerals show vein-veinlet, brecciated, disseminated, vug infill, replacement and relict textures.

The comparison of Chondrite normalized (Nakamura, 1974) REE patterns of non-altered and altered host granodiorite-quartz monzodiorite pluton and the mineralized samples at Qarachilar indicate that altered pluton and especially mineralized samples show lower concentrations of REE relative to non-altered plutonic host rocks. This signature indicates the mobility of REE by Cl and F-rich magmatic-hydrothermal fluids during alteration and mineralization processes. Homogenization temperatures (T_h) of two-phase inclusions within

quartz varies from 182–532°C, and salinity varies from 9.2 to 23.5 wt% NaCl equiv. Three-phase halite-bearing type-1 ($T_h > T_{m-h}$) and type-2 ($T_{m-h} > T_h$) inclusions are homogenized in the range of 197–530°C and 203–375°C, respectively. They have a calculated bulk salinity of 29.5 to 55.1 and 32.4 to 45.6 wt% NaCl equiv., respectively. The variations in salinity and T_h could be explained by a combination of mixing and boiling hydrothermal fluids. These processes led to the deposition of Cu, Mo and Au in the veins. Geology, ore mineralogy, textures, geochemistry and microthermometric data of Qarachilar occurrence are comparable with vein-type Cu-Mo-Au mineralization related to Cu-Mo porphyry and intrusion related gold deposits.

References

- Jamali, H., Dilek, Y., Daliran, F., Yaghubpour, A.M. and Mehrabi, B., 2010. Metallogeny and tectonic evolution of the Cenozoic Ahar-Arasbaran volcanic belt, northern Iran. *International Geology Review*, 52(4–6): 608–630.
- Jamali, H. and Mehrabi, B., 2015. Relationships between arc maturity and Cu-Mo-Au porphyry and related epithermal mineralization at the Cenozoic Arasbaran Magmatic Belt. *Ore Geology Reviews*, 65(2): 487–501.
- Nakamura, N., 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary Chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(5): 755–773.
- Simmonds, V. and Moazzen, M., 2015. Re–Os dating of molybdenites from Oligocene Cu–Mo–Au mineralized veins in the Qarachilar area, Qaradagh batholith (northwest Iran): implications for understanding Cenozoic mineralization in South Armenia, Nakhchivan, and Iran. *International Geology Review*, 57(3): 290–304.