

نوع و الگوی تشکیل رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ (شمال‌باختر زنجان): شواهد زمین‌شناسی، کانه‌زایی و زمین‌شیمی

شکوفه تارویردی‌زاده^۱، حسین کوهستانی^{۲*}، میرعلی‌اصغر مختاری^۳ و ناهید رحمتی^۴

۱ و ۴- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲ و ۳- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

نویسنده مسئول: kouhestani@znu.ac.ir *

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۹

دریافت: ۱۴۰۳/۳/۲۸

چکیده

رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ در فاصله ۱۱۰ کیلومتری شمال‌باختر زنجان واقع شده و بخشی از کمربند فلززایی طارم- هشتجین است. کانه‌زایی به‌صورت یک رگه کوارتز- سولفیدی سرب و روی (NE-SW/70-80NW) با درازای ۲۰۰ متر و پهنای ۱ تا ۲ متر درون واحدهای آتشفشانی و آذرآواری اتوسن رخ داده و توسط هاله‌های دگرسانی آرژیلیک حدواسط به ضخامت ۳ تا ۵ متر دربر گرفته شده است. دگرسانی گرمایی در منطقه مورد مطالعه شامل دگرسانی‌های سیلیسی، کربناتی، آرژیلیک حدواسط و پروپیلیتیک است. پیریت، کالکوپریت، گالن، اسفالریت، پیرولوسیت و پسیلوملان، کانی‌های فلزی و کوارتز، کلسیت، سیدریت و سربیسیت- ایلیت، کانی‌های باطله هستند. سروزیت، اسمیت‌زونیت، مالاکیت، کوولیت و گوتیت طی فرایندهای برون‌زاد شکل گرفته‌اند. بافت‌های کانسنگ شامل دانه‌پراکنده، رگه- رگچه‌ای، برشی، پوسته‌ای، گل‌کلمی، کاکلی، تیغه‌ای، پرماند، پُرکننده فضای خالی و جانشینی هستند. پنج مرحله کانه‌زایی در گوشه‌بلاغ قابل تفکیک است که کانه‌زایی سرب و روی به‌صورت رگه‌ها و برش‌های کوارتز- پیریت- کالکوپریت- گالن- اسفالریت در مرحله دوم رخ داده است. الگوی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی به‌نچارشده به‌کندریت برای نمونه‌های کانه‌دار و توف بلورین میزبان مشابه است. این امر نشان‌دهنده نقش دگرسانی و شسته‌شدن عناصر از سنگ‌های میزبان آتشفشانی و آذرآواری در تشکیل کانه‌زایی است. با توجه به کلیه شواهد، ویژگی‌های کانه‌زایی در رخداد معدنی گوشه‌بلاغ با کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط قابل مقایسه است.

واژه‌های کلیدی: کانه‌زایی سرب و روی، اپی‌ترمال، سولفیداسیون حدواسط، گوشه‌بلاغ، زنجان، طارم- هشتجین

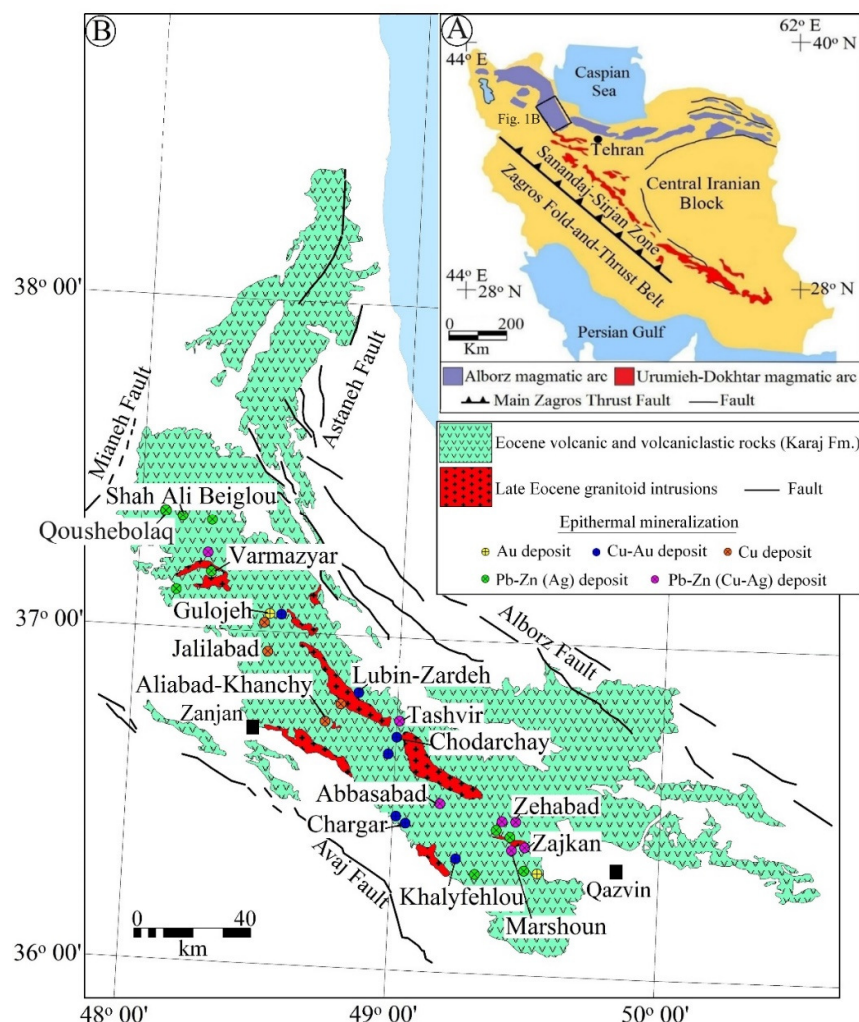
۱- پیشگفتار

کمربند فلززایی طارم- هشتجین به عنوان بخشی از کمان ماگمایی البرز (شکل ۱- A)، میزبان مهمی برای کانه‌زایی‌های فلزات پایه و گرانبه‌های تیپ اپی‌ترمال است. از کانسارها و رخداد‌های معدنی مهم در این کمربند می‌توان به کانسارهای علی‌آباد- خان‌چای (مختاری و همکاران، ۱۳۹۵؛ کوهستانی و همکاران، ۲۰۱۸)، آق‌کند (کوهستانی و همکاران، ۲۰۱۷)، زاجکان (محضی و همکاران، ۱۴۰۱؛ کوهستانی و همکاران، ۲۰۱۹a)، مرشون (محمدی و همکاران، ۱۴۰۱؛ کوهستانی و همکاران، ۲۰۱۹b)، عباس‌آباد (کوهستانی و همکاران، ۲۰۲۰)، زه‌آباد (شهبازی و همکاران، ۲۰۱۹)، خلیفه‌لو (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵؛ اسماعیلی و همکاران، ۲۰۱۵)، چرگر (موسوی مطلق و قادری، ۲۰۱۹؛ موسوی مطلق و همکاران، ۲۰۱۹)، شمال چرگر (ندرلو و همکاران،

۱۴۰۰)، باریک‌آب (بازرگانی گیلانی و پرچکانی، ۱۳۸۹)، چودرچای (یاسمی و همکاران، ۲۰۱۸؛ یاسمی و قادری، ۲۰۱۹)، لوبین- زرده (زمانیان و همکاران، ۲۰۱۹)، گلوچه (مهرابی و همکاران، ۲۰۱۶)، جلیل‌آباد و رشت‌آباد (کوهستانی و همکاران، ۲۰۲۲a)، تشویر (کوهستانی و همکاران، ۲۰۲۲b)، ورمزیار (قربانی و همکاران، ۱۴۰۰؛ کوهستانی و همکاران، ۲۰۲۲b)، چومالو (قاسمی‌سیانی و همکاران، ۲۰۲۲؛ افشاری و همکاران، ۲۰۲۳) و شاه‌علی بیگلو (میکائیلی و همکاران، ۲۰۱۸) اشاره کرد (شکل ۱- B). رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ یکی از کانه‌زایی‌های موجود در کمربند فلززایی طارم- هشتجین می‌باشد (شکل ۱- B) که آثار فعالیت‌های اکتشافی قدیمی در آن دیده می‌شود. با این وجود، تاکنون پژوهش علمی دقیقی بر روی این رخداد معدنی انجام نشده است. در این پژوهش، ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی،

مکانی برای اکتشاف کانه‌زایی‌های مشابه را معرفی کرده و به عنوان الگوی اکتشافی در کمربند فلززایی طارم-هشتجین مورد استفاده قرار گیرد.

دگرسانی و زمین‌شیمی در رخداد معدنی گوشه‌بلاغ بررسی شده و زایش و نوع کانه‌زایی آن تعیین شده است. مطالعه دقیق این نوع کانه‌زایی‌ها می‌تواند عوامل کلیدی توزیع



شکل ۱. A: زون‌های ساختاری مهم ایران و موقعیت کمربند فلززایی طارم-هشتجین بر روی کمان ماگمایی البرز (با تغییرات از علوی، ۱۹۹۱). B: نقشه زمین‌شناسی ساده شده کمربند فلززایی طارم-هشتجین (با تغییرات از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ایران، سازمان زمین‌شناسی ایران) نشان‌دهنده موقعیت رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ و دیگر کانسارهای اپی‌ترمال در کمربند فلززایی طارم-هشتجین.

Fig. 1. A: Major structural zones of Iran, showing the location of the Tarom-Hashtjin metallogenic belt within the Alborz magmatic arc (after Alavi, 1991). B: Simplified regional geology of the Tarom-Hashtjin metallogenic belt (modified from 1:100,000 geological maps of Iran, Geological Survey of Iran) showing the location of the Qoushebolag Pb-Zn occurrence and other epithermal precious and base metal deposits.

۲- مواد و روش‌ها

مطالعات سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری و ساخت و بافت، تهیه و مطالعه شد. در مرحله بعد، براساس مطالعات سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری، تعداد ۱۰ نمونه از بخش‌های کانه‌دار و سنگ‌های میزبان بدون دگرسانی، انتخاب و برای تعیین مقدار عناصر کمیاب و کمیاب خاکی به روش ICP-MS در آزمایشگاه شرکت زرآما در تهران تجزیه شدند. برای این منظور، ابتدا نمونه‌ها توسط سنگ‌شکن فولادی تا ابعاد

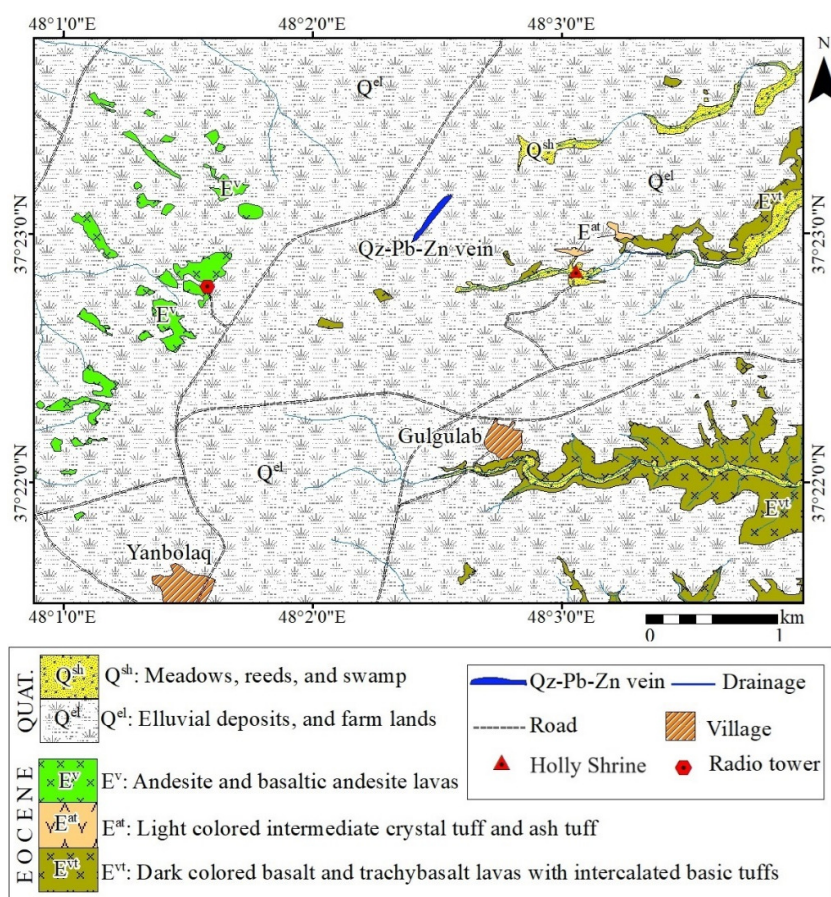
این پژوهش شامل دو بخش مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی می‌باشد. در مطالعات صحرایی، به منظور تهیه نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ منطقه و چگونگی ارتباط رگه کانه‌دار با سنگ‌های میزبان، تعداد ۴۰ نمونه برای مطالعات آزمایشگاهی برداشت شد. از این بین، تعداد ۶ عدد مقطع نازک و ۱۴ مقطع نازک-صیقلی برای

نقشه‌ها و مدل‌ها از نرم‌افزار ArcGIS10.6 استفاده شده است.

۳- زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه گوشه‌بلاغ

با توجه به نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ تهیه شده از منطقه گوشه‌بلاغ، واحدهای سنگی موجود در این منطقه مربوط به سنگ‌های آذرآواری و آتشفشانی ائوسن بوده و از قدیم به جدید شامل گدازه‌های بازالتی و تراکی‌بازالتی با میان‌لایه‌های توفی بازیک (واحد E^{vt})، توفهای با ترکیب حدواسط (واحد E^{at}) و گدازه‌های آندزیتی بازالتی و آندزیتی (واحد E^v) است (شکل ۲).

حدود ۵ مش (۴ میلی‌متر) خردایش شده و سپس توسط آسیاب به مدت ۲ دقیقه تا ابعاد حدود ۲۰۰ مش (۷۴ میکرون) پودر شدند. پس از آماده‌سازی، میزان ۲۰ گرم از پودر نمونه‌ها انتخاب و تجزیه شد. برای تعیین میزان عناصر کمیاب و کمیاب خاکی، حدود ۰/۲ گرم از هر نمونه به روش چند اسید و با استفاده از ماکروویو هضم شد. میزان دقت برای عناصر کمیاب و کمیاب خاکی بین ۰/۱ تا ۱ گرم در تن بوده است. برای تعیین میزان فلزات پایه، به‌صورت جداگانه حدود ۰/۵ گرم از هر نمونه در تیزاب سلطانی داغ (۹۵ درجه سانتی‌گراد) حل گردید. برای ترسیم نمودارها از نرم‌افزار Igp2007 و برای ترسیم



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ. ضخامت رگه کانه‌دار بزرگ‌نمایی شده است.

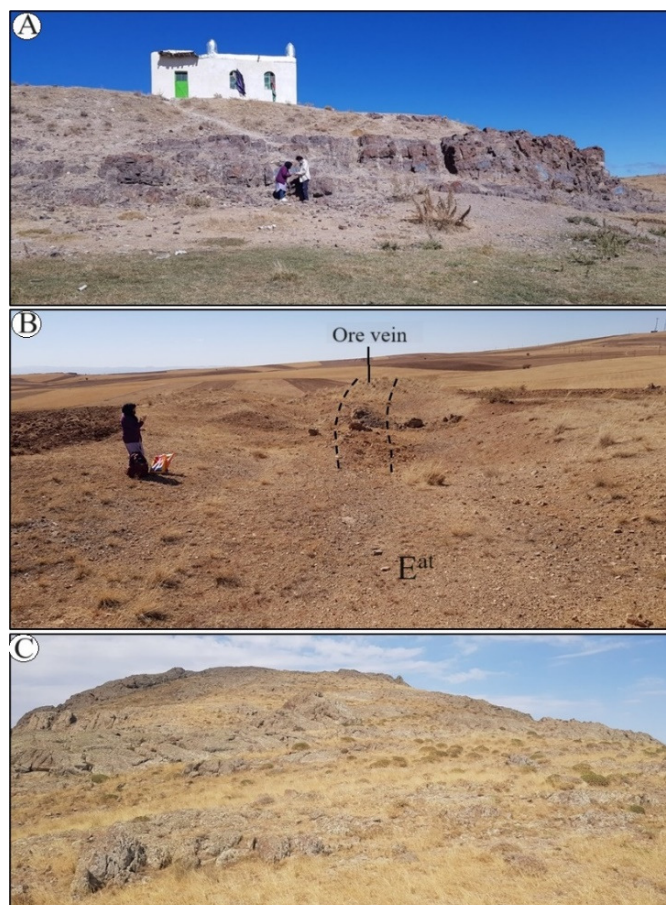
Fig. 2. Simplified geologic map of the Qousheholaq Pb-Zn occurrence. The thickness of the ore vein was exaggerated.

پوشیده شده است. نمونه‌های برداشت شده از گدازه‌های واحد E^{vt} ، ترکیب آن‌ها را از نوع بازالت آندزیتی و تراکی‌بازالت مشخص کرده است. گدازه‌های بازالت آندزیتی دارای بافت پورفیریستیک شامل درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، هورنبلند و کلینوپیروکسن در یک زمینه دانه‌ریز می‌باشند

واحد E^{vt} شامل گدازه‌های بازالتی و تراکی‌بازالتی با میان‌لایه‌های توفی بازیک به رنگ تیره می‌باشد (شکل ۳- A). روند عمومی لایه‌بندی در این واحد، خاوری- باختری با شیب تا ۲۰ درجه به سمت شمال است. واحد E^{vt} اغلب توسط رسوبات درج‌ازاد عهد حاضر و زمین‌های کشاورزی

یکسری بلورهای منشوری و تخت‌ای نیز در نمونه‌ها دیده می‌شود که به‌طور کامل توسط کلریت و کانی کدر جانشین شده‌اند. با توجه به شکل بلوری، به‌نظر می‌رسد کانی اولیه از نوع آمفیبول بوده باشد. کلینوپیروکسن‌ها به‌صورت بلورهای شکل‌دار تا بی‌شکل حضور داشته و ابعادشان تا ۱/۲ میلی‌متر نیز می‌رسد. برخی پیروکسن‌ها به کلریت دگرسان شده‌اند. کانی‌های کدر اغلب همراه با درشت‌بلورهای سنگ در تجمعات گلومروپورفیری دیده می‌شوند.

(شکل ۴-۱). در برخی از نمونه‌ها، تجمعات درشت‌بلورهای مختلف منجر به تشکیل بافت گلومروپورفیری شده است (شکل ۴-۲). پلاژیوکلازها به‌صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار مشاهده شده و ابعادشان تا ۳ میلی‌متر نیز می‌رسد. با توجه به زاویه خاموشی، پلاژیوکلازها از نوع لابرادوریت تا آندزین هستند. این کانی‌ها در مواردی به سرسیت دگرسان شده‌اند. آمفیبول‌ها به‌صورت بلورهای شکل‌دار و نیمه‌شکل‌دار حضور داشته و ابعاد آن‌ها تا ۱ میلی‌متر می‌رسد. برخی از آمفیبول‌ها اوپاسیته شده‌اند.



شکل ۳. تصاویر صحرایی از واحدهای سنگی در منطقه گوشه‌بلاغ. A: نمایی از گدازه‌های بازالتی و تراکی‌بازالتی (واحد E^{vt}) در بخش‌های مرکزی منطقه (دید به سمت شمال). B: نمایی از واحد توف حدواسط (واحد E^{at}) که میزبان رگه کانه‌دار در منطقه است (دید به سمت جنوب). C: نمایی از واحد گدازه‌های آندزیت بازالتی و آندزیتی (واحد E^v) در منطقه (دید به سمت شمال‌باختر).

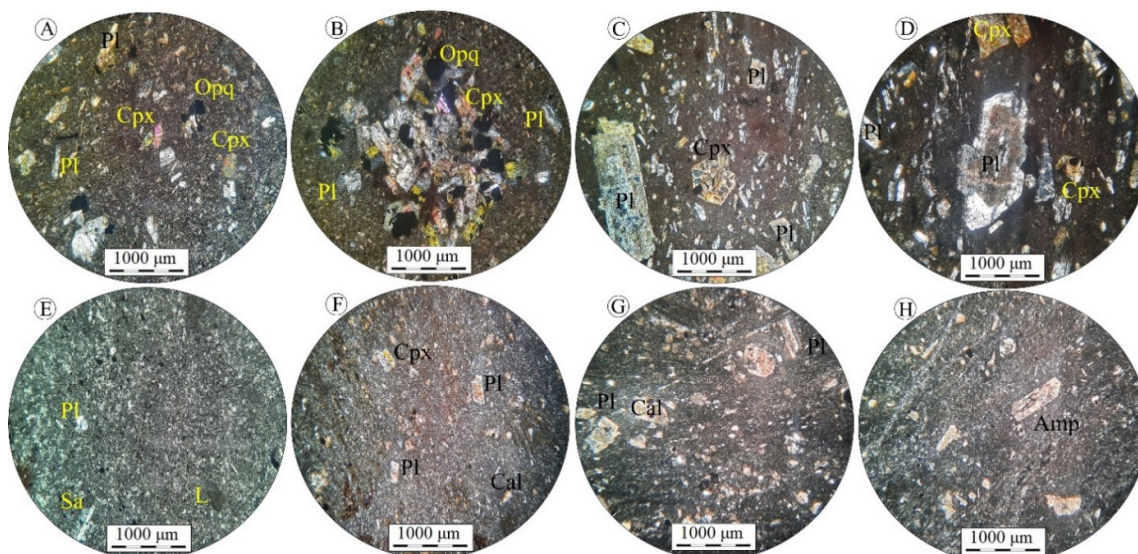
Fig. 3. Field photographs of rock units in the Qousheholaq area. A: A view of the basalt and trachybasalt lavas (E^{vt} unit) in the central parts of the area, looking to the north. B: A view of the intermediate tuff unit (E^{at} unit) that hosts ore vein in the area, looking to the south. C: A view of the basaltic andesite and andesite lavas (E^v unit) in the area, looking northwest.

پلاژیوکلاز به‌صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با ابعاد تا ۲ میلی‌متر دیده می‌شود. این کانی‌ها اغلب از نوع آندزین تا لابرادوریت بوده و در مواردی منطقه‌بندی نشان می‌دهند.

تراکی‌بازالت‌ها دارای بافت پورفیری‌تیک شامل درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن، آمفیبول و بیوتیت در یک زمینه دانه‌ریز می‌باشند (شکل ۴-۲ و ۴-۳).

میلی‌متر با دگرسانی به کلریت دیده می‌شوند. بعضی از بیوتیت‌ها به‌طور کامل توسط کلریت جانشین شده‌اند. هورنبلندها به تعداد کم در نمونه‌ها دیده شده و در مواردی به‌طور کامل به کلریت دگرسان شده‌اند. ابعاد هورنبلندها کمتر از ۰/۵ میلی‌متر است. کانی‌های کدر به‌صورت بلورهای اولیه شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار در متن سنگ پراکنده هستند.

برخی از بلورهای درشت پلاژیوکلاز به کلسیت و سریسیت دگرسان شده‌اند اما بلورهای کوچک تا حدودی سالم هستند. کلینوپیروکسن‌ها به‌صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار حضور داشته و ابعادی کمتر از ۱ میلی‌متر دارند. این کانی‌ها با درجات مختلفی به کلریت و گاه کلسیت و کانی‌های کدر دگرسان شده‌اند. بیوتیت‌ها به‌صورت بلورهای ورقه‌ای با ابعاد اغلب کمتر از ۰/۵



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از کانی‌شناسی و بافت واحدهای سنگی در منطقه گوشه‌بلاغ. A: بافت پورفیریتیک متشکل از بلورهای درشت پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن در زمینه دانه‌ریز در گدازه‌های بازالت آندزیتی. B: بافت گلوبروپورفیری در گدازه‌های بازالت آندزیتی. C: بافت پورفیریتیک متشکل از بلورهای درشت پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن در زمینه دانه‌ریز در گدازه‌های تراکی‌بازالتی. D: درشت‌بلور پلاژیوکلاز دارای منطقه‌بندی در گدازه‌های تراکی‌بازالتی. بخش‌های مرکزی بلور به کلسیت و سریسیت دگرسان شده است. E: بافت‌های پورفیریتیک تا پورفیروکلاستیک حاوی درشت‌بلورهای سانیدین و پلاژیوکلاز در زمینه دانه‌ریز در توف‌های حدواسط با ترکیب تراکی‌آندزیتی. F: بافت جریان متشکل از بلورهای پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن در زمینه دانه‌ریز در گدازه‌های آندزیت‌بازالتی. G و H: بافت پورفیریتیک متشکل از بلورهای درشت پلاژیوکلاز و آمفیبول‌های کربناتی‌شده در زمینه دانه‌ریز در گدازه‌های آندزیتی. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Amp: آمفیبول، Cal: کلسیت، Cpx: کلینوپیروکسن، L: قطعه سنگی، Opq: کانی کدر، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوآرتز، Sa: سانیدین)

Fig. 4. Photomicrographs (transmitted crossed-polarized light, XPL) of mineralogy and texture of the rock units in the Qoushebolag area. A: Porphyritic texture composed of coarse-grained plagioclase and clinopyroxene crystals within the fine-grained matrix in the andesitic basalt lavas. B: Glomerophytic texture in the andesitic basalt lavas. C: Porphyritic texture composed of coarse-grained plagioclase and clinopyroxene crystals within the fine-grained matrix in the trachybasalt lavas. D: Coarse-grained zoned plagioclase crystal in the trachybasalt lavas. Central parts of the crystal altered to calcite and sericite. E: Porphyritic to porphyroclastic textures composed of coarse-grained sanidine and plagioclase crystals within the fine-grained matrix in the intermediate tuffs with trachyandesite composition. F: Flow texture composed of plagioclase and clinopyroxene crystals within the fine-grained matrix in the andesitic basalt lavas. G and H: Porphyritic texture composed of coarse-grained plagioclase and carbonated amphibole crystals within the fine-grained matrix in the andesite lavas. Mineral abbreviations after Whitney and Evans (2010). (Amp: amphibole, Cal: calcite, Cpx: clinopyroxene, L: rock fragments, Opq: opaque mineral, Pl: plagioclase, Qz: quartz, Sa: sanidine)

در محل ترانشه‌های حفر شده رخنمون پیدا کرده است. توف‌های حدواسط ترکیب تراکی‌آندزیتی داشته و به رنگ قهوه‌ای روشن تا سبز رنگ دیده می‌شوند. این سنگ‌ها در نمونه دستی دارای لایه‌بندی مشخص حاوی قطعات سنگی می‌باشند. بخش‌های غنی از کانی‌های کدر و هیدروکسید آهن باعث ایجاد لایه‌بندی در این سنگ‌ها شده است. در

واحد E^{at} دربردارنده واحدهای توفی با ترکیب حدواسط است (شکل ۳-۳). این سنگ‌ها به‌دلیل نرم‌فرسا بودن، اغلب توسط زمین‌های کشاورزی پوشیده شده‌اند. رخنمون محدود این واحد به‌صورت هم‌شیب بر روی واحد گدازه‌ای-توفی E^{vt} در بخش‌های مرکزی محدوده دیده می‌شود. این واحد سنگی، میزبان رگه سرب-روی منطقه می‌باشد که

به‌طور معمول با درجات مختلفی به کلسیت دگرسان شده‌اند. ابعاد پلاژیوکلازها حدود ۱ میلی‌متر است. یکسری بلورهای تقریباً منشوری با ابعاد کمتر از ۰/۵ میلی‌متر در این سنگ‌ها دیده می‌شود که به‌طور کامل توسط کلسیت جانشین شده‌اند. با توجه به شکل بلوری، کانی اولیه احتمالاً آمفیبول بوده است. پیروکسن‌ها به‌صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار حضور دارند. این کانی‌ها با درجات مختلفی به کلریت دگرسان شده‌اند. در زمینه سنگ، بلورهای کوچک و بی‌شکل کوارتز دیده می‌شود که احتمالاً ثانویه هستند. در اطراف آن‌ها رگچه‌های کوارتزی متعددی قابل مشاهده است که سنگ را قطع کرده‌اند. کانی‌های کدر عمدتاً به‌صورت جریان‌ی دیده می‌شوند. این کانی‌ها بعضاً محصول دگرسانی کانی‌های مافیک اولیه هستند. گاه در اطراف کانی‌های کدر، کوارتز ثانویه دیده می‌شود.

۴- کانه‌زایی و دگرسانی

براساس مشاهدات صحرایی، کانه‌زایی سرب و روی در رخداد معدنی گوشه‌بلاغ به‌صورت یک رگه کوارتز-سولفیدی درون توالی توف و گدازه ائوسن رخ داده است (شکل ۵-A تا C). رگه کانه‌دار دارای روند شمال‌خاوری-جنوب‌باختری با شیب حدود ۷۰ الی ۸۰ درجه به سمت شمال‌باختری بوده و حدود ۲۰۰ متر درازا و ۱ تا ۲ متر ستبراً دارد. آثار فعالیت‌های اکتشافی به‌صورت حفر چند ترانشه بر روی این رگه دیده می‌شود. دگرسانی آرژیلیک حدواسط به ضخامت ۳ تا ۵ متر در اطراف رگه کانه‌دار قابل مشاهده است (شکل ۵-A تا C). در مقیاس رخنمون، ساخت و بافت ماده معدنی بیشتر از نوع برشی، گل‌کلمی، تیغه‌ای و پرکننده فضاهای خالی است (شکل ۵-E و F). عیار نمونه‌های برداشت‌شده از رگه کانه‌دار تا بیش از ۳ درصد سرب، بیش از ۳ درصد روی، ۱/۵ درصد مس، بیش از ۲ درصد منگنز و تا ۳۸۵ گرم در تن نقره را مشخص کرده است. براساس نتایج مطالعات صحرایی و میکروسکوپی، دگرسانی گرمابی در رخداد معدنی گوشه‌بلاغ شامل دگرسانی‌های سیلیسی، کربناتی، آرژیلیک حدواسط و پروپیلیتیک می‌باشد. دگرسانی سیلیسی در ارتباط نزدیک با بخش‌های کانه‌دار بوده و عمدتاً به‌صورت رگه-رگچه‌ای و سیمان سیلیسی پرش‌های گرمابی رخ داده است (شکل ۶-A و B). ستبرای رگچه‌های کوارتزی در این دگرسانی بیشینه تا ۵ میلی‌متر می‌رسد. در مطالعات

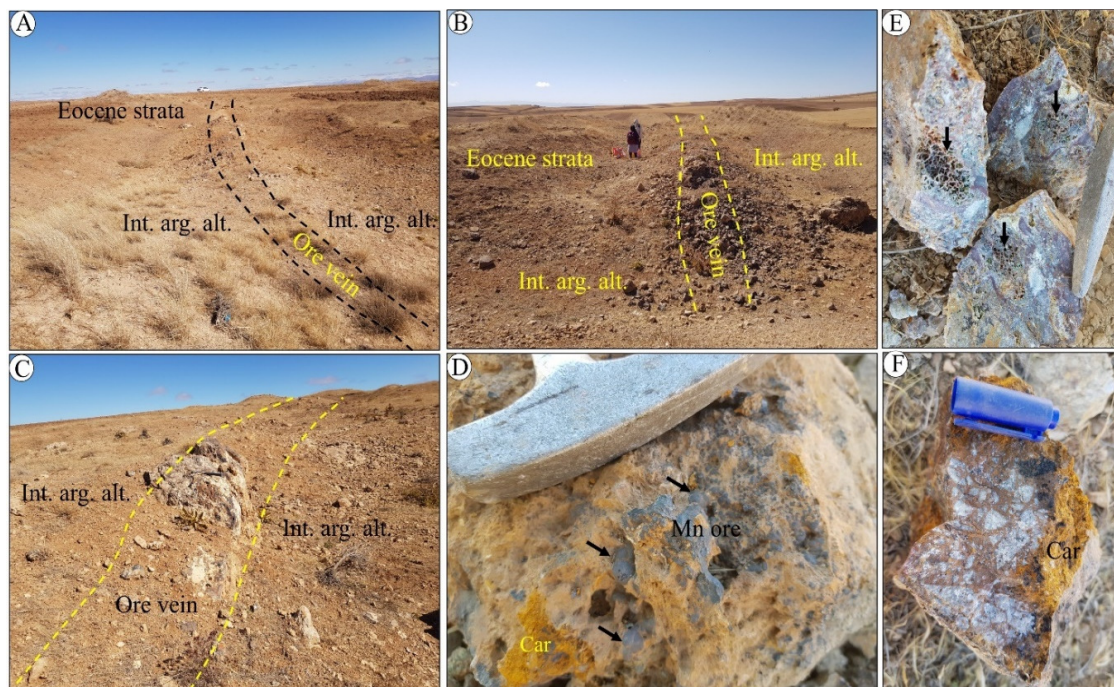
مقیاس میکروسکوپی، این سنگ‌ها بافت‌های پورفیریستیک تا پورفیروکلاستیک نشان می‌دهند (شکل ۴-E). تعداد کمی درشت‌بلور آلکالی فلدسپار (سانیدین) و پلاژیوکلاز در این سنگ‌ها قابل مشاهده است که در یک زمینه دانه‌ریز پراکنده هستند. ابعاد این درشت‌بلورها کمتر از ۰/۵ میلی‌متر است. این کانی‌ها در مواردی دارای گوشه‌های شکسته هستند. رگه-رگچه‌های کوارتزی این سنگ‌ها را قطع کرده‌اند. در حاشیه رگچه‌های کوارتزی، آغشتگی به هیدروکسیدهای آهن دیده می‌شود. کانی‌های کدر با فراوانی به نسبت زیاد در متن سنگ پراکنده هستند. زمینه سنگ تا حدودی به کانی‌های رسی دگرسان شده است.

واحد E^۷ جوان‌ترین رخنمون سنگی واحدهای ائوسن در منطقه گوشه‌بلاغ بوده و بر روی آن، واحد سنگی جوان‌تری نهشته نشده است. این واحد شامل گدازه‌های آندزیت بازالتی و آندزیتی به رنگ خاکستری است که به‌صورت تپه‌هایی با مورفولوژی ملایم قابل مشاهده هستند (شکل ۳-C). براساس مطالعات سنگ‌شناسی، گدازه‌های آندزیت بازالتی دارای بافت جریان‌ی متشکل از پلاژیوکلاز و کانی‌های مافیک (آمفیبول و کلینوپیروکسن) در یک زمینه دانه‌ریز از پلاژیوکلاز هستند (شکل ۴-F). درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز به‌صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار حضور داشته و ابعاد آن‌ها کمتر از ۱ میلی‌متر و اغلب کوچک‌تر از ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد. این کانی‌ها با شدت‌های متوسط تا به نسبت شدید به کلسیت دگرسان شده‌اند. بلورهای کوچک پلاژیوکلاز موجود در زمینه دانه‌ریز، جهت‌یافتگی سنگ را ایجاد کرده‌اند. یکسری کانی‌ها که به‌طور کامل با کلسیت جانشین شده‌اند نیز در نمونه‌ها قابل تشخیص است. ابعاد این بلورها کوچک‌تر از ۰/۳ میلی‌متر است. با توجه به شکل منشوری، احتمالاً کانی اولیه از نوع آمفیبول بوده است. کلینوپیروکسن‌ها به‌صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار حضور دارند. این کانی‌ها با درجات مختلفی به کلریت دگرسان شده‌اند. در نتیجه دگرسانی آمفیبول به کلسیت و پیروکسن به کلریت، کوارتزهای ثانویه هم تشکیل شده است.

آندزیت‌ها دارای بافت پورفیریستیک و جریان‌ی متشکل از بلورهای درشت پلاژیوکلاز و آمفیبول در یک زمینه دانه‌ریز می‌باشند (شکل ۴-G و H). زمینه این سنگ‌ها دانه‌ریز و متشکل از بلورهای ریز پلاژیوکلاز است. پلاژیوکلازها به‌صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار دیده شده و

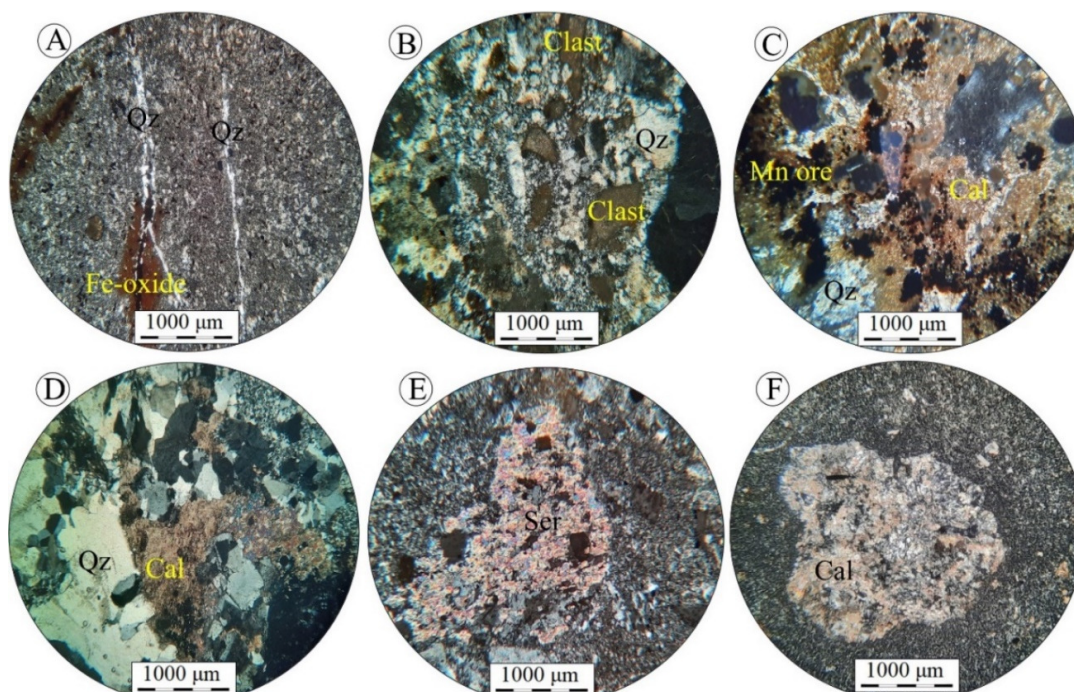
و قرمز آجری شده است. در مطالعات میکروسکوپی، دگرسانی آرژلیک حدواسط شامل دگرسانی پلاژیوکلاز به مجموعه ایلیت و سیرسیت (شناسایی توسط آنالیز پراش پرتو ایکس) است که عموماً با اندکی کوارتز و کلسیت همراهی می‌شوند (شکل ۶-۵). دگرسانی پروپیلیتیک در رخنمون‌های صحرایی به رنگ سبز دیده شده و معمولاً در حاشیه‌های خارجی پهنه کانه‌زایی رخ داده است. این دگرسانی دارای شدت کم تا متوسط بوده و بافت کانی‌ها در آن معمولاً حفظ شده است. دگرسانی پروپیلیتیک اغلب با دگرسانی پلاژیوکلاز، آمفیبول و پیروکسن به مجموعه‌ای از کانی‌های کلریت، اپیدوت، سیرسیت و یا کلسیت همراه است (شکل ۶-۴). در این دگرسانی، مقادیر اندکی کوارتز در زمینه سنگ تشکیل شده است.

میکروسکوپی، کوارتز به صورت بلورهای ریز تا درشت اغلب نیمه‌شکل‌دار و بی‌شکل دیده می‌شود. دگرسانی کربناتی به دو صورت قابل مشاهده است. دگرسانی کربناتی نوع اول شامل کلسیت و سیدریت‌هایی است که در رگه و رگچه‌های کوارتز- کربناتی منگنزدار دیده می‌شوند (شکل ۶-۳). دگرسانی کربناتی نوع اول معمولاً ارتباط نزدیکی با رگه‌های کانه‌دار دارد. نوع دوم دگرسانی کربناتی شامل رگچه‌های کلسیت تأخیری و کلسیت با بافت پرکننده فضای خالی است (شکل ۶-۴). رگچه‌های کلسیتی معمولاً رگچه‌های کانه‌دار را قطع می‌کنند که نشان‌دهنده تشکیل آن‌ها در مراحل پایانی دگرسانی گرمایی است. دگرسانی آرژلیک حدواسط با پهنای ۳ تا ۵ متر در اطراف رگه کانه‌دار دیده می‌شود (شکل ۵-۵ تا ۵-۳). این دگرسانی معمولاً سبب تغییر رنگ رخنمون‌های سنگی به سفید، زرد



شکل ۵. تصاویر صحرایی و نمونه دستی از رگه کانه‌دار در رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ. A تا C: نماهایی از رگه کانه‌دار که توالی سنگی آئوسن میزبان خود را قطع کرده است (دید تصاویر به ترتیب به سمت شمال‌خاور، جنوب‌باختر و شمال). در هر سه تصویر، هاله دگرسانی آرژلیک حدواسط (Int. arg. alt.) در اطراف رگه کانه‌دار قابل مشاهده است. D تا F: نماهایی نزدیک از بافت‌های گل‌کلی، تیغه‌ای (فلش‌های مشکی)، برشی و پرکننده فضای خالی ماده معدنی در مقیاس رخنمون و نمونه دستی. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Car: کربنات، Mn ore: کانه منگنز)

Fig. 5. Field and hand specimen photos of the mineralized vein in the Qoushebolag Pb-Zn occurrence. A–C: Views of the ore vein that cut its host Eocene strata, looking northeast, southwest, and north, respectively. In the three photos, intermediate argillic alteration (Int. Arg. Alt.) halo is observed around the ore vein. D–F: Close-up views of the colloform, bladed (black arrows), breccia, and vug infill textures of the ore in outcrop and hand specimen scale. Mineral abbreviations after Whitney and Evans (2010). (Car carbonate, Mn ore: manganese ore)



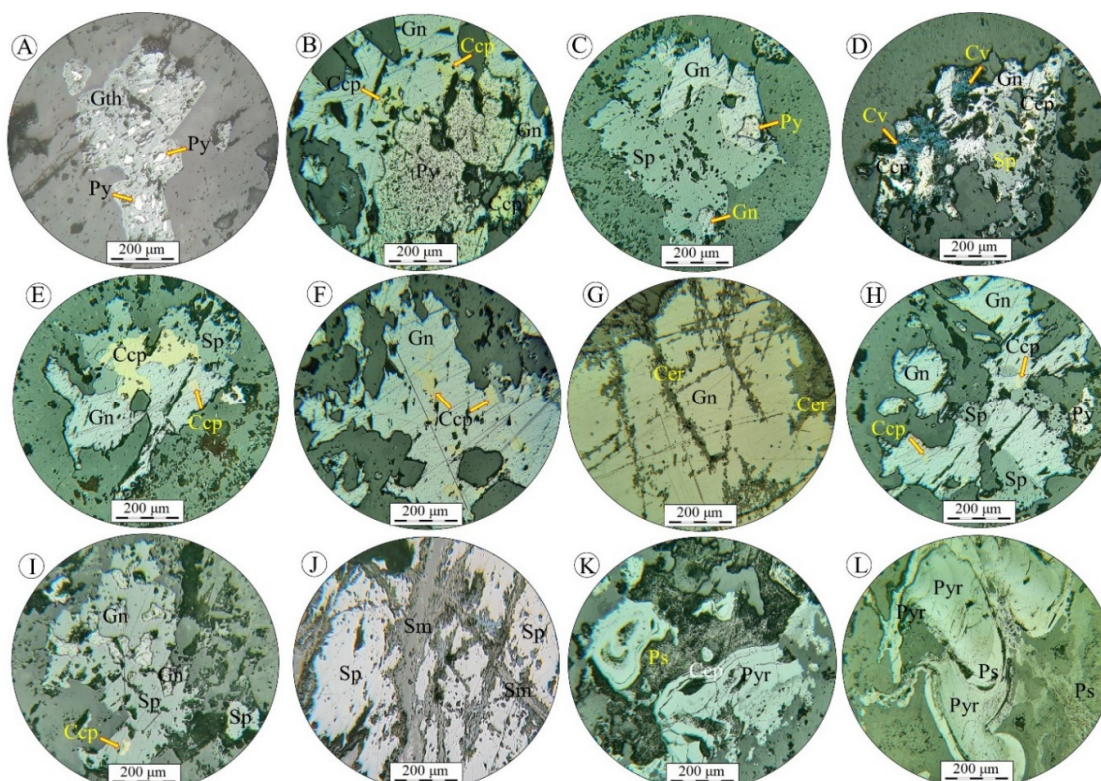
شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از انواع دگرسانی‌ها در رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ. A و B: دگرسانی سیلیسی شامل کوارتز با بافت‌های رگه- رگچه‌ای (A) و سیمان برش‌های گرمایی (B). C: کلسیت موجود در رگه- رگچه‌های کوارتز- کربناتی منگن‌دار در دگرسانی کربناتی نوع اول. D: کلسیت با بافت پرکننده فضای خالی در دگرسانی کربناتی نوع دوم. E: دگرسانی آرزبلیک حدواسط شامل جانشینی پلاژیوکلاز توسط سریسیت. F: دگرسانی پروپیلیتیک شامل جانشینی پلاژیوکلاز توسط کلسیت. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Cal: کلسیت، Fe-oxide: اکسیدهای آهن، Mn ore: کانه منگنز، Qz: کوارتز، Ser: سریسیت)

Fig. 6. Photomicrographs (transmitted crossed-polarized light, XPL) of hydrothermal alteration types in the Qoushebolag Pb-Zn occurrence. A and B: Silica alteration as quartz with vein-veinlets (A) and hydrothermal breccia cement (B). C: Calcite within the Mn-bearing quartz-carbonate vein-veinlets in the type 1 carbonate alteration. D: Calcite with vug infill texture in the type 2 carbonate alteration. E: Intermediate argillic alteration as replacement of plagioclase by sericite. F: Propylitic alteration as replacement of plagioclase by calcite. Mineral abbreviations after Whitney and Evans (2010). (Cal: calcite, Fe-oxide: iron oxides, Mn Ore: manganese ore, Qz: quartz, Ser: sericite)

۴-۱- کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ

پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، پیرولوسیت و پسیلوملان، کانی‌های فلزی تشکیل‌دهنده کانسنگ در رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ هستند. سروزیت، اسمیت‌زونیت، مالاکیت، کوولیت و گوتیت طی فرایندهای برون‌زاد به‌وجود آمده‌اند. کوارتز، کلسیت، سیدریت و سریسیت-ایلیت، مواد باطله همراه با کانی‌سازی می‌باشند. انواع بافت کانسنگ شامل دانه‌پراکنده، رگه- رگچه‌ای، برشی، پوسته‌ای، گل‌کلمی، کاکلی، تیغه‌ای، پرماند، جزیره‌ای، پرکننده فضای خالی و جانشینی است. پیریت به‌صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار و بعضاً شکل‌دار ریز تا درشت (اندازه بین ۱۰ میکرون تا ۱ میلی‌متر) با بافت دانه‌پراکنده در رگه‌های کانه‌دار دیده می‌شود. پیریت معمولاً از حاشیه‌ها و در امتداد شکستگی‌ها

به گوتیت دگرسان شده است (شکل ۷-A). در برخی از نمونه‌ها، پیریت با کالکوپیریت و گالن هم‌رشدی نشان می‌دهد (شکل ۷-B). در بخش‌هایی از پهنه کانه‌دار، ادخال‌هایی ریز از پیریت درون گالن دیده می‌شود (شکل ۷-C). کالکوپیریت معمولاً به‌صورت بلورهای متوسط تا درشت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل با اندازه بعضاً تا ۲ سانتی‌متر و با بافت دانه‌پراکنده در رگه‌های کانه‌دار دیده می‌شود. در بخش‌های کانه‌دار، کالکوپیریت توسط گوتیت و کوولیت جانشین شده است (شکل ۷-D). در بیشتر نمونه‌ها، کالکوپیریت معمولاً با پیریت، گالن و اسفالریت هم‌رشدی نشان می‌دهد (شکل ۷-B، D و E). در برخی از نمونه‌ها، ادخال‌هایی از کالکوپیریت درون گالن و اسفالریت دیده می‌شود (شکل ۷-E و F).



شکل ۷. تصاویر میکروسکوپی (نور بازتابی) از کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ در رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ. A: دگرسانی بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار پیریت به گوتیت. B: هم‌رشدی پیریت، کالکوپیریت و گالن. C: ادخال کالکوپیریت درون گالن نیز دیده می‌شود. D: ادخال پیریت درون گالن. هم‌رشدی گالن و اسفالریت نیز دیده می‌شود. E و D: هم‌رشدی کالکوپیریت با گالن و اسفالریت. در تصویر D، دگرسانی کالکوپیریت به کولیت و در تصویر E، ادخال کالکوپیریت درون گالن نیز دیده می‌شود. F: ادخال‌های کالکوپیریت درون گالن. G: دگرسانی گالن به سروزیت. H: هم‌رشدی گالن، پیریت و اسفالریت. ادخال‌های کالکوپیریت درون گالن نیز دیده می‌شود. I: ادخال‌های گالن و کالکوپیریت داخل اسفالریت. J: دگرسانی اسفالریت به اسمیت‌زونیت. K و L: پیرولولوسیت و پسیلوملان با بافت گل‌کلمی. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (۲۰۱۰) اقتباس شده‌اند. (Ccp: کالکوپیریت، Cer: سروزیت، Gth: گوتیت، Ps: پسیلوملان، Py: پیریت، Pyr: پیرولولوسیت، Sm: اسمیت‌زونیت، Sp: اسفالریت)

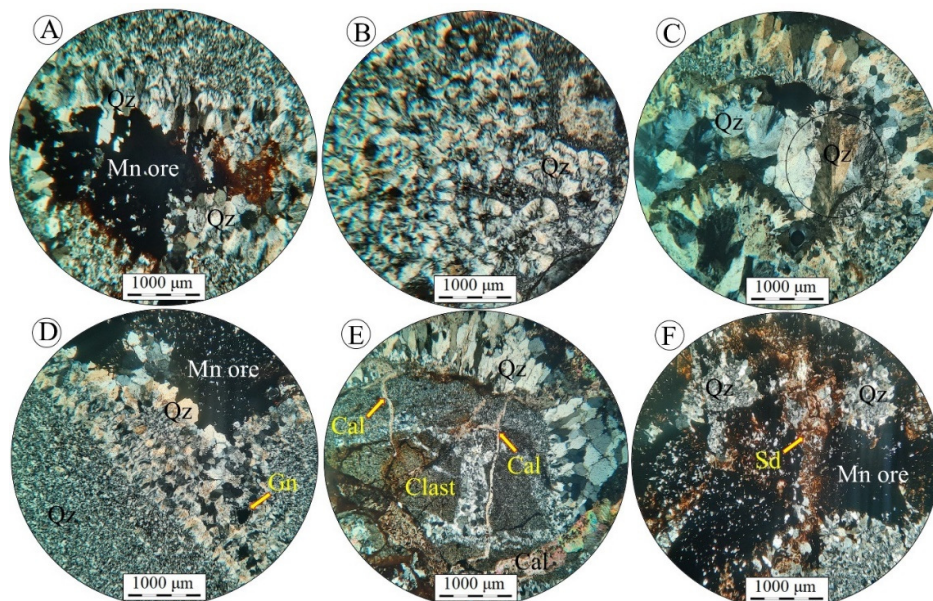
Fig. 7. Photomicrographs (reflected light) of the ore mineralogy and texture in the Qoushebolag Pb-Zn occurrence. A: Alteration of subhedral to euhedral pyrite crystals to goethite. B: Intergrowth of pyrite, chalcopyrite, and galena. Chalcopyrite inclusion within galena is also observed. C: Pyrite inclusions within galena. Intergrowth of galena and sphalerite is also observed. D and E: Intergrowth of chalcopyrite and galena. In D, alteration of chalcopyrite to covellite, and in E, chalcopyrite inclusion within galena are also observed. F: Chalcopyrite inclusions within galena. G: Alteration of galena to cerussite. H: Intergrowth of galena, pyrite, and chalcopyrite. Chalcopyrite inclusions within galena are also observed. I: Chalcopyrite and galena inclusions within sphalerite. J: Alteration of sphalerite to smithsonite. K and L: Pyrolusite and psilomelane with colloform texture. Mineral abbreviations after Whitney and Evans (2010). (Ccp: chalcopyrite, Cer: cerussite, Cv: covellite, Gn: galena, Gth: goethite, Ps: psilomelane, Py: pyrite, Pyr: pyrolusite, Smt: smithsonite, Sp: sphalerite)

گالن عمدتاً به صورت بلورهای درشت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل تا اندازه ۳ سانتی‌متر در رگه‌های کانه‌دار حضور دارد. در بیشتر نمونه‌ها، گالن‌ها از حاشیه و در امتداد شکستگی‌ها به سروزیت دگرسان شده است (شکل ۷-G). گالن با کالکوپیریت و اسفالریت و در موادی با پیریت هم‌رشدی نشان می‌دهد (شکل ۷-B تا E و H). در برخی از نمونه‌ها، ادخال‌های ریزی از کالکوپیریت داخل گالن دیده می‌شود (شکل ۷-E و F). گالن به صورت ادخال‌های ریز درون اسفالریت نیز قابل مشاهده است (شکل ۷-I). اسفالریت اغلب در امتداد شکستگی‌ها به اسمیت‌زونیت دگرسان شده است (شکل ۷-J). پیرولولوسیت و پسیلوملان با فراوانی نسبتاً فراوان در رگه و رگچه‌های کوارتز-کربناتی منگن‌دار حضور دارند. این کانی‌ها اغلب به صورت بلورهای بی‌شکل با بافت‌های پرکننده فضای خالی، گل‌کلمی (شکل ۷-K و L) و رگچه‌ای دیده می‌شوند.

گالن عمدتاً به صورت بلورهای درشت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل تا اندازه ۳ سانتی‌متر در رگه‌های کانه‌دار حضور دارد. در بیشتر نمونه‌ها، گالن‌ها از حاشیه و در امتداد شکستگی‌ها به سروزیت دگرسان شده است (شکل ۷-G). گالن با کالکوپیریت و اسفالریت و در موادی با پیریت هم‌رشدی نشان می‌دهد (شکل ۷-B تا E و H). در برخی از نمونه‌ها، ادخال‌های ریزی از کالکوپیریت داخل گالن دیده می‌شود (شکل ۷-E و F). گالن به صورت ادخال‌های ریز درون اسفالریت نیز قابل مشاهده است (شکل ۷-I). اسفالریت در نمونه دستی به رنگ عسلی (احتمالاً فقیر از آهن) و به صورت بلورهای متوسط تا درشت بی‌شکل تا

سیلیسی و سیمان برش‌های گرمایی دیده می‌شود. در مقاطع میکروسکوپی، کوارتزها اغلب بافت‌های رگه-رگچه‌ای و پُرکننده فضای خالی نشان می‌دهند (شکل ۸-A). در برخی از نمونه‌ها، کوارتزها بافت‌های گل‌کلمی، پوسته‌ای، کاکلی و پَرمانند نشان می‌دهند (شکل ۸-B تا E). در نمونه‌های رخنمون، جانشینی کوارتز در قالب کلسیت‌های تیغه‌ای سبب تشکیل بافت تیغه‌ای شده است (شکل ۸-E). کلسیت عمدتاً به‌صورت بلورهای بی‌شکل دیده شده و معمولاً بافت‌های رگچه‌ای و پُرکننده فضای خالی نشان می‌دهد (شکل‌های ۶-C و D و ۸-E). سیدریت با بافت پُرکننده فضاهای خالی و رگچه‌ای در مقاطع میکروسکوپی قابل مشاهده است (شکل ۸-F). سیرسیت و ایلیت به‌صورت بلورهای ریز (کمتر از ۲۰۰ میکرون) تا درشت (تا ۱ سانتی‌متر) بی‌شکل تا شکل‌دار در رگه و رگچه‌های

سروزیت، اسمیت‌زونیت، مالاکیت، کوولیت و گوتیت کانی‌های برون‌زاد در رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ می‌باشند که در بخش‌های سطحی بخش‌های کانهدار دیده می‌شوند. سروزیت و اسمیت‌زونیت به‌ترتیب جانشین گالن و اسفالریت شده‌اند (شکل ۷-G و J). اسمیت‌زونیت معمولاً به‌صورت بلورهای شعاعی و رشته‌ای دیده می‌شود. مالاکیت معمولاً بافت پُرکننده فضای خالی نشان می‌دهد. کوولیت اغلب جانشین کالکوپیریت شده است (شکل ۷-D). گوتیت در اثر دگرسانی پیریت و کالکوپیریت تشکیل شده است (شکل ۷-A). کوارتز، کلسیت، سیدریت و سیرسیت-ایلیت کانی‌های باطله در رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ می‌باشند. کوارتز اصلی‌ترین و فراوان‌ترین کانی باطله است که به‌صورت بلورهای ریز (کمتر از ۲۰۰ میکرون) تا درشت (تا ۱ سانتی‌متر) بی‌شکل تا شکل‌دار در رگه و رگچه‌های



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از کانی‌های باطله و بافت آن‌ها در رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ. A: کوارتز با بافت پُرکننده فضای خالی. B: بافت گل‌کلمی کوارتز. C: بافت‌های گل‌کلمی و پَرمانند کوارتز. D: بافت پوسته‌ای کوارتز. E: رشد کوارتز با بافت کاکلی بر روی قطعه سنگی. کلسیت با بافت‌های پُرکننده فضای خالی و رگچه‌ای نیز دیده می‌شود. F: سیدریت با بافت رگچه‌ای. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (۲۰۱۰) اقتباس شده‌اند. (Cal: کلسیت، Gn: گالن، Qz: کوارتز، Sd: سیدریت، Mn ore: کانه منگنز)

Fig. 8. Photomicrographs (transmitted crossed-polarized light, XPL) of gangue minerals and textures in the Qoushebolag Pb-Zn occurrence. A: Quartz with vug infill texture. B: Colloform texture of quartz. C: Colloform and plumose textures of quartz. D: Crustiform texture of quartz. E: Development of quartz with cockade texture on the rock fragment. Calcite with vug infill and veinlet textures is also observed. F: Siderite with veinlet texture. Mineral abbreviations after Whitney and Evans (2010). (Cal: calcite, Gn: galena, Qz: quartz, Sd: siderite, Mn ore: manganese ore).

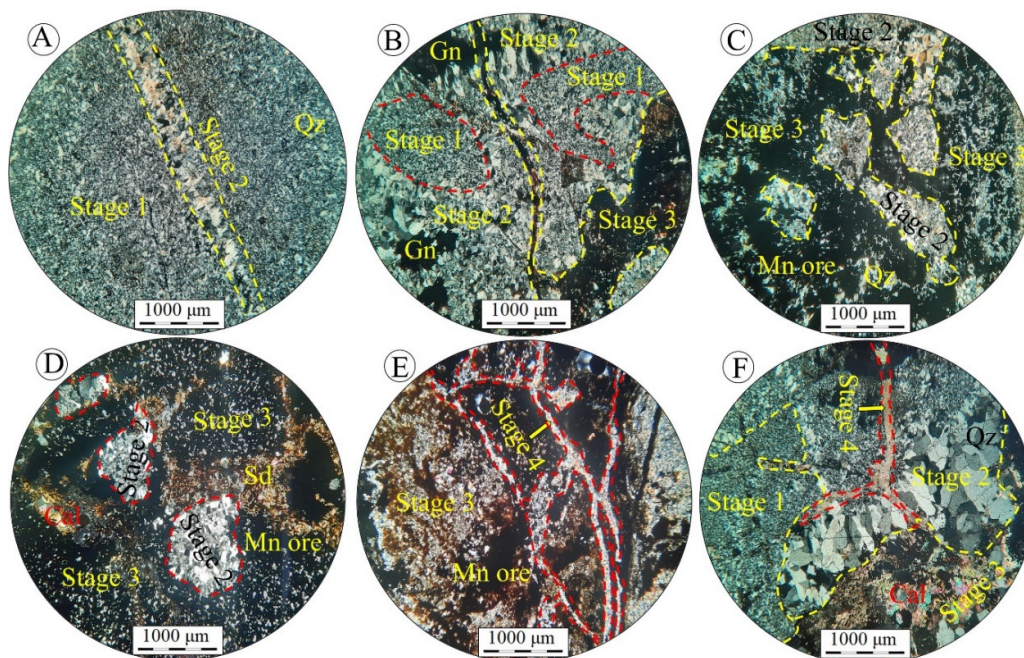
کانه‌زایی با دگرسانی سیلیسی سنگ‌های میزبان همراه با مقادیر کمی پیریت ریز و بی‌شکل (اغلب اکسیده) با بافت دانه‌پراکنده مشخص می‌شود. این مرحله از کان‌زایی بیشتر توسط مراحل بعدی کانی‌سازی قطع و برشی شده است

۴-۲- مراحل کان‌زایی و توالی پاراژنتیک کانی‌ها

بر مبنای ترکیب کانی‌شناسی، ساخت و بافت و ارتباط قطع‌کنندگی رگه و رگچه‌ها، کان‌زایی در رخداد معدنی گوشه‌بلاغ به پنج مرحله قابل تفکیک است. مرحله اول

قطع و برشی کرده (شکل ۹-B تا D و F) و خود توسط رگچه‌های مرحله چهارم قطع شده است (شکل ۹-E و F). مرحله چهارم کانه‌زایی با حضور کوارتز و کلسیت به صورت رگچه‌ای (ضخامت تا ۵ میلی‌متر) و پرکننده فضاهای خالی مشخص می‌شود (شکل ۹-E و F). این مرحله از کانه‌زایی به آخرین فعالیت‌های گرمایی در رخداد معدنی گوشه‌بلاغ ارتباط داشته و هیچ کانی سولفیدی و اکسیدی با آن تشکیل نشده است. مرحله پنجم کانه‌زایی مربوط به فرایندهای برون‌زاد است و طی آن کانی‌های ثانویه مانند سرویت، اسمیت‌زونیت، مالاکیت، کولیت و گوتیت با بافت‌های پرکننده فضای خالی و جانشینی تشکیل شده‌اند. مراحل کانه‌زایی و توالی پاراژنری کانی‌ها در رخداد معدنی گوشه‌بلاغ در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

(شکل ۹-A، B و F). مرحله دوم کانه‌زایی با حضور رگه-رگچه‌ها و برش‌های گرمایی با سیمان کوارتز و سولفید مشخص می‌شود که دارای مقادیر متغیری پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت هستند. ضخامت رگه-رگچه‌های کوارتزی کانه‌دار این مرحله تا ۱۰ سانتی‌متر نیز می‌رسد. مرحله دوم کانه‌زایی معمولاً مرحله اول کانه‌زایی را قطع کرده (شکل ۹-A) و خود توسط مراحل بعدی کانه‌زایی قطع و برشی شده است (شکل ۹-B تا D و F). مرحله سوم کانه‌زایی با حضور کوارتز و کربنات (کلسیت و سیدریت) همراه با کانه‌های منگنز (پیرولوسیت و پسیلوملان) در رگه‌ها و سیمان برش‌های گرمایی مشخص می‌شود. هیچ کانی سولفیدی در این مرحله تشکیل نشده است. مرحله سوم کانه‌زایی عمده‌تاً مراحل قبلی کانه‌زایی را



شکل ۹. مراحل کانه‌زایی در رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ. A: مرحله اول کانه‌زایی به صورت سیلیسی شدن سنگ میزبان که توسط رگچه‌های مرحله دوم قطع شده است. B: قطعات برشی مرحله اول کانه‌زایی درون رگه مرحله دوم کانه‌زایی. رگه‌های مرحله دوم توسط رگچه‌های مرحله سوم قطع شده‌اند. C و D: برشی شدن مرحله دوم کانه‌زایی توسط رگچه‌های مرحله سوم. E: قطع شدن مرحله سوم کانه‌زایی توسط رگچه‌های کوارتزی مرحله چهارم کانه‌زایی. F: قطع شدن رگه‌های مرحله دوم توسط رگچه‌های مرحله سوم و چهارم کانه‌زایی. قطعات برشی مرحله اول کانه‌زایی درون رگه‌های مرحله دوم نیز دیده می‌شود. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Cal: کلسیت، Gn: گالن، Mn ore: کانه منگنز، Qz: کوارتز، Sd: سیدریت)

Fig. 9. Mineralization stages in the Qoushebolaq Pb-Zn occurrence. A: Stage 1 mineralization as silicification of the host rock which crosscuts by stage 2 veinlets. B: Breccia clasts of stage 1 mineralization within the vein of stage 2 mineralization. Stage 2 veins are crosscut by stage 3 veinlets. C and D: Brecciation of stage 2 mineralization by stage 3 veinlets. E: Stage 2 mineralization crosscut by quartz veinlets of stage 4 mineralization. F: Stage 2 veins crosscut by stages 3 and 4 veinlets. Breccia clasts of stage 1 mineralization within stage 2 veins are also observed. Mineral abbreviations after Whitney and Evans (2010). (Cal: calcite, Gn: galena, Mn ore: manganese ore, Qz: quartz, Sd: siderite).

		Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	Supergene
Ore	Pyrite					
	Chalcopyrite					
	Galena					
	Sphalerite					
	Pyrolusite					
	Psilomelane					
	Cerussite					
	Smithsonite					
	Malachite					
	Covellite					
	Goethite					
Gangue	Quartz					
	Calcite					
	Siderite					
	Sericite-Illite					
Texture	Disseminated					
	Brecciated					
	Vein-Veinlets					
	Cockade					
	Colloform-Crustiform					
	Plumose					
	Vug Infill					
	Replacement					

شکل ۱۰. توالی پاراژنتیک و ساخت و بافت کانسنگ در رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ.

Fig. 10. Paragenetic sequences showing the structure and texture of ore at the Qousheblaq Pb-Zn occurrence.

۴-۳- زمین‌شیمی

نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های برداشت‌شده از رخداد معدنی گوشه‌بلاغ در جدول ۱ ارائه شده است. براساس این جدول، مقادیر سرب، روی، مس و منگنز در نمونه‌های تجزیه شده به‌ترتیب از ۲۶۵ گرم در تن تا بیش از ۳ درصد وزنی، ۶۷۳ گرم در تن تا بیش از ۳ درصد وزنی، ۱۴۱ گرم در تن تا ۱/۶ درصد وزنی و ۴۹ گرم در تن تا بیش از ۲ درصد وزنی اندازه‌گیری شده است. مقدار نقره از ۳/۷ تا ۳۸۴/۷ گرم در تن متغیر است.

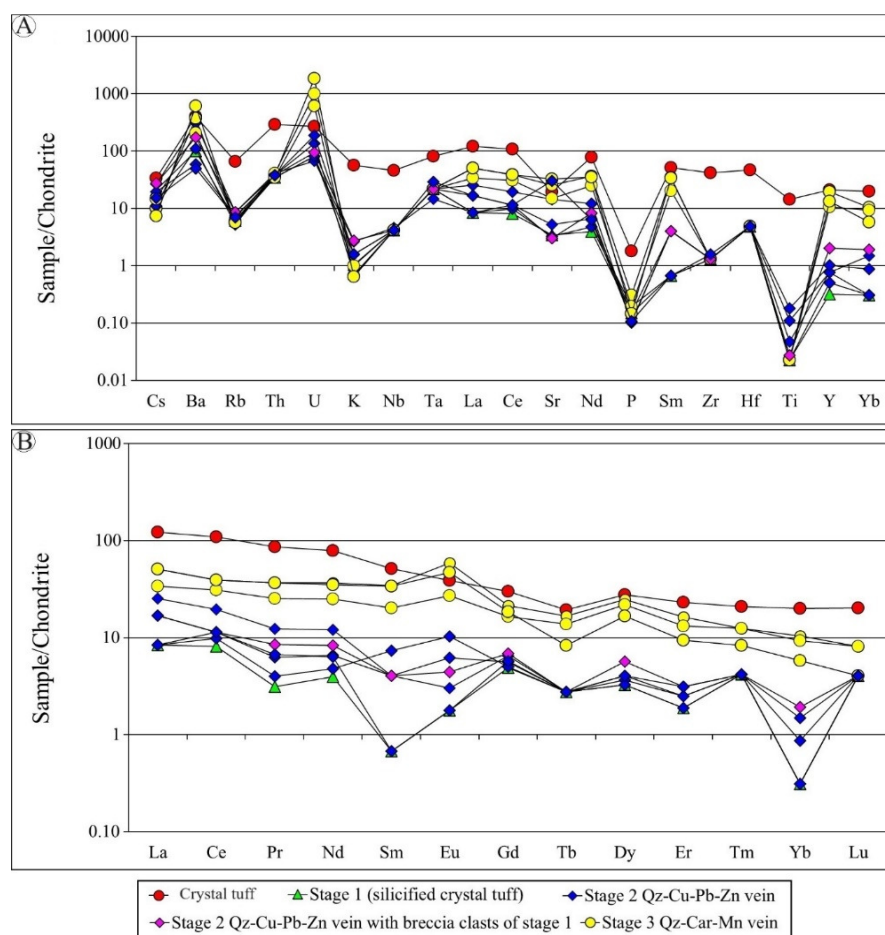
۵- بحث و بررسی

۵-۱- الگوی توزیع عناصر کمیاب و کمیاب خاکی

الگوی عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانسنگ و توف بلورین میزبان که نسبت به کندریت (تامپسون، ۱۹۸۲) به‌نجار شده‌اند در شکل ۱۱-A نشان داده شده است. بر اساس این شکل، نمونه‌های کانسنگ دارای الگوی عناصر کمیاب مشابه هستند که می‌تواند به تشکیل آن‌ها طی یک فرایند کانه‌زایی مرتبط باشد. علاوه بر این، الگوی عناصر کمیاب در توف بلورین میزبان تا حدودی مشابه با الگوی این عناصر در نمونه‌های کانسنگ است. این امر می‌تواند بیانگر نقش سنگ‌های میزبان در تأمین عناصر کانه‌ساز باشد. از طرف دیگر، نمونه‌های

کانسنگ در مقایسه با توف بلورین میزبان، از عناصر کمیاب تهی شده‌اند (نمونه‌های مربوط به رگه‌های کوارتز-کربناتی منگنزدار از باریم و تا حدودی اورانیم غنی شده‌اند) که می‌تواند در ارتباط با خروج این عناصر از محیط طی فرایندهای دگرسانی و کانه‌زایی باشد.

در الگوی عناصر کمیاب خاکی به‌نجار شده به کندریت (مک‌دوناف و سان، ۱۹۹۵) نمونه‌های کانسنگ دارای الگوی تقریباً مشابه با توف بلورین میزبان هستند (شکل ۱۱-B). این امر نیز می‌تواند نشان‌دهنده نقش سنگ‌های میزبان در تشکیل رگه‌های کانه‌دار باشد. بر اساس این شکل، نمونه‌های کانسنگ دارای الگوی عناصر کمیاب خاکی با نسبت متوسط تا پایین عناصر کمیاب خاکی سبک به سنگین و الگوی تا حدودی مسطح در عناصر کمیاب خاکی سنگین هستند. غنی‌شدگی نسبی عناصر کمیاب خاکی سبک در نمونه‌های کانسنگ را می‌توان به قابلیت تحرک این عناصر در مقایسه با عناصر کمیاب خاکی سنگین نسبت داد که منجر به غنی‌شدگی بیشتر آن‌ها در رگه‌های کانه‌دار شده است (رولند و همکاران، ۲۰۰۳). نمونه‌های کانسنگ در مقایسه با توف بلورین میزبان از عناصر کمیاب خاکی تهی‌شدگی نشان می‌دهند که این امر مرتبط با خروج این عناصر از محیط طی فرایندهای دگرسانی و کانه‌زایی است.



شکل ۱۱. A: الگوی تغییرات عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانسنگ و توف بلورین میزبان در رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ که نسبت به کندریت (تامپسون، ۱۹۸۲) به‌نجار شده‌اند. B: الگوی تغییرات عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانسنگ و توف بلورین میزبان در رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ که نسبت به کندریت (مک‌دوناف و سان، ۱۹۹۵) به‌نجار شده‌اند. در هر دو نمودار، مقادیر حد آشکارسازی برای مقادیر کمتر و بیشتر از حد آشکارسازی انتخاب شده است.

Fig. 11. A: Chondrite-normalized (Thompson, 1982) rare elements pattern for the ore samples, and host crystal tuff in the Qoushebolag Pb-Zn occurrence. B: Chondrite-normalized (McDonogh and Sun, 1995) REE pattern for the ore samples, and host crystal tuff in the Qoushebolag Pb-Zn occurrence. In both diagrams, detection values were chosen for below and above the detection limit values.

تانتالیم، زیرکونیوم، هافنیم و استرانسیم تهی و از عناصر نقره، آرسنیک، کادمیم، مس، سرب، روی، گوگرد، آنتیموان، منگنز و مولیبدن غنی شده‌اند. به‌صورت محدود، برخی از نمونه‌های کانسنگ به‌ویژه نمونه‌های مربوط به رگه‌های کوارتز-کربناتی منگنزدار مرحله سوم از عناصر باریوم، اورانیوم و استرانسیم غنی شده‌اند. نمونه‌های کانسنگ نسبت به توف بلورین میزبان از عناصر کمیاب خاکی تهی شده‌اند (شکل ۱۲-B). دو نمونه برداشت‌شده از رگه‌های کوارتز-کربناتی منگنزدار مرحله سوم از عنصر یوروپیم غنی شده‌اند. غنی‌شدگی از عنصر یوروپیم در این نمونه‌ها می‌تواند به شرایط اکسیدی محیط نهشت کانه‌های منگنز مرتبط باشد (ویتفورد و همکاران، ۱۹۸۸).

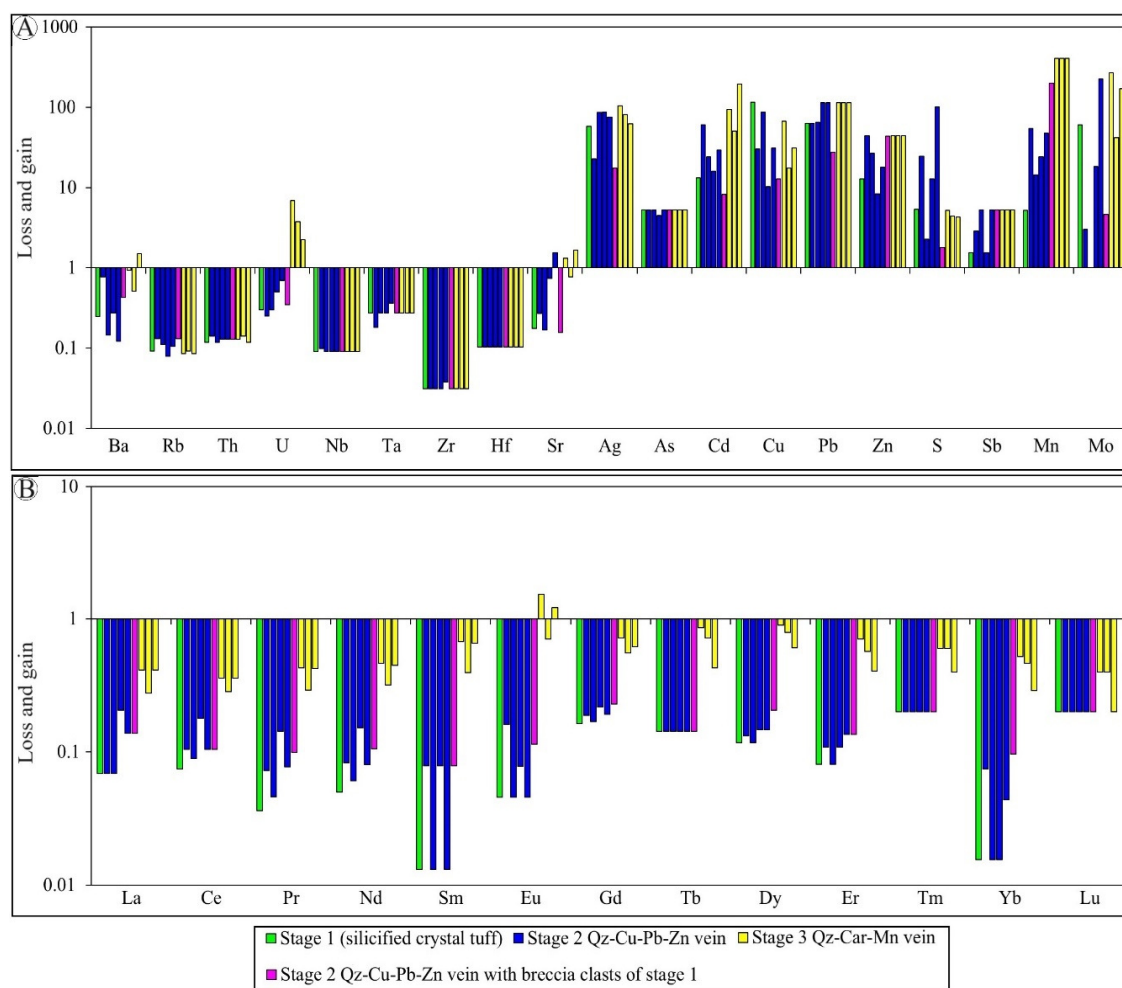
۵-۲- تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر

برای بررسی غنی‌شدگی و تهی‌شدگی عناصر در ارتباط با کانه‌زایی و دگرسانی در رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ، داده‌های مربوط به نمونه‌های کانسنگ بر داده‌های مربوط به توف بلورین میزبان به‌نجار شد تا عناصر اضافه و یا کم شده به سنگ طی دگرسانی و کانه‌زایی مشخص شود (شکل ۱۲). لازم به ذکر است که 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.

براساس شکل ۱۲-A، نمونه‌های کانسنگ نسبت به توف بلورین میزبان از باریوم، روییدیم، توریم، اورانیوم، نیوبیم،

کمپلکس‌های هالوژنی و کربنیک عامل اصلی انتقال و تحرک عناصر کمیاب خاکی هستند. تهی‌شدگی مشخص در میزان عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های کانه‌دار نسبت به سنگ‌های میزبان در منطقه گوشه‌بلاغ نشان می‌دهد که حجم و یا شیمی سیالات گرمایی برای تحرک این عناصر در این کانسار کافی بوده و می‌تواند بیانگر میزان نسبتاً بالای واکنش بین سیالات کانه‌زا و سنگ‌های میزبان باشد. این امر با رخداد‌های دگرسانی در اطراف رگه‌های کانه‌دار مطابقت دارد.

رفتار عناصر کمیاب خاکی در بخش‌های کانه‌زایی و دگرسانی تحت تأثیر فرایندهایی مانند واکنش سیال-سنگ، نهشت سیال، جذب، تجزیه به اجزاء، تغییرات دما، فشار، pH، Eh، آلکالینیتی و تمرکز سیال می‌باشد (هامفرایز، ۱۹۸۴، لوترموزر، ۱۹۹۲؛ رولند و همکاران، ۲۰۰۳). در فرایندهای دگرسانی و کانه‌زایی، سیالات غنی از کلر، فلوئور و دی اکسید کربن در نسبت‌های بالای سیال/سنگ، موجب تحرک عناصر کمیاب خاکی می‌شوند (مورفی و هاینس، ۱۹۸۶؛ ویتفورد و همکاران، ۱۹۸۸؛ باینوینیو، ۱۹۹۰). طبق نظر این پژوهش‌گران،



شکل ۱۲. A: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانسنگ در رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ که نسبت به توف بلورین میزبان (نمونه شماره GB-05، جدول ۱) به‌نجار شده‌اند. B: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانسنگ در رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ که نسبت به توف بلورین میزبان (نمونه شماره GB-05، جدول ۱) به‌نجار شده‌اند. در هر دو نمودار، مقادیر حد آشکارسازی برای مقادیر کمتر و بیشتر از حد آشکارسازی انتخاب شده است.

Fig. 12. A: Loss and gain histogram of rare elements of ore samples in the Qoushebolag Pb-Zn occurrence that normalized against host crystal tuff (sample GB-05, Table 1). **B:** Loss and gain histogram of rare earth elements of ore samples in the Qoushebolag Pb-Zn occurrence that normalized against host crystal tuff (sample GB-05, Table 1). In both diagrams, detection values were chosen for below and above the detection limit values.

جدول ۱. داده‌های تجزیه ICP-MS (گرم در تن) نمونه‌های کانسنگ و سنگ‌های میزبان در رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ.

Table 1. ICP-MS data (ppm) of ore samples and host rocks from the Qoushebolag Pb-Zn occurrence.

	Ag	As	Ba	Cd	Ce	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	Fe	Gd
D.L.	0.1	0.5	1	0.1	0.5	0.5	1	0.1	0.1	0.1	100	0.05
GB-03	214	>100	243	10.6	5	4	16421	0.8	0.3	<0.1	10802	0.97
GB-05	3.7	19	977	0.8	67	6.4	141	6.8	3.7	2.18	31536	5.93
GB-06	83.9	>100	751	48.5	7	5	4242	0.9	0.4	0.35	30112	1.12
GB-12	316.7	>100	141	19.4	6	3.7	12352	0.8	0.3	<0.1	7913	1
GB-19	384.7	>100	910	75	24	1.9	9490	6.1	2.6	3.32	67916	4.26
GB-31	323.6	85.1	268	12.7	12	2.1	1450	1	0.4	0.17	7470	1.29
GB-32	299.4	>100	498	40.2	19	2.8	2446	5.4	2.1	1.53	57683	3.28
GB-33	228.6	>100	1467	154.1	24	1.4	4384	4.1	1.5	2.65	71616	3.67
GB-34	65	>100	417	6.6	7	5.2	1801	1.4	0.5	0.25	27927	1.36
GB-35	279.5	>100	119	23.3	7	2.9	4360	1	0.5	<0.1	15326	1.14
	Hf	In	K	La	Li	Lu	Mg	Mn	Mo	Nb	Nd	P
D.L.	0.5	0.5	100	1	1	0.1	100	5	0.5	1	0.5	10
GB-03	<0.5	<0.5	695	2	77	<0.1	292	255	66	<1	1.8	162
GB-05	4.8	<0.5	37300	29	13	0.5	1026	49	1.1	11.1	36.1	1947
GB-06	<0.5	<0.5	1751	2	69	<0.1	558	2666	3.3	1.1	3	162
GB-12	<0.5	<0.5	1046	2	68	<0.1	367	710	1.1	<1	2.2	212
GB-19	<0.5	<0.5	435	12	19	0.2	558	>20000	293.4	<1	16.8	332
GB-31	<0.5	<0.5	462	6	41	<0.1	318	1190	20.1	<1	5.5	110
GB-32	<0.5	<0.5	660	8	39	0.2	694	>20000	46.1	<1	11.5	211
GB-33	<0.5	<0.5	425	12	9	0.1	511	>20000	185.5	<1	16.1	159
GB-34	<0.5	<0.5	1804	4	78	<0.1	536	9784	5.1	<1	3.8	115
GB-35	<0.5	<0.5	1054	4	28	<0.1	282	2322	246	<1	2.9	116
	Pb	Pr	Rb	S	Sb	Sc	Sm	Sr	Ta	Tb	Te	Th
D.L.	1	0.05	1	50	0.5	0.5	0.1	1	0.1	0.1	0.5	0.1
GB-03	16694	0.29	14	1169	29.7	<0.5	<0.1	25	0.3	<0.1	<0.5	1
GB-05	265	7.99	152	217	19.1	18.6	7.6	141.6	1.1	0.7	<0.5	8.5
GB-06	16606	0.58	20	5350	54.8	0.6	0.6	38.4	0.2	<0.1	<0.5	1.2
GB-12	17302	0.37	17	492	>100	0.5	<0.1	23.8	0.3	<0.1	<0.5	1
GB-19	>30000	3.42	13	1131	>100	7.7	5.1	186.4	0.3	0.6	<0.5	1.1
GB-31	>30000	1.14	12	2787	29.7	1	0.6	104.5	0.3	<0.1	<0.5	1.1
GB-32	>30000	2.34	14	960	>100	12	3	108.8	0.3	0.5	<0.5	1.2
GB-33	>30000	3.4	13	935	>100	1.3	5	234.8	0.3	0.3	<0.5	1
GB-34	7289	0.79	20	388	>100	0.8	0.6	22.1	0.3	<0.1	<0.5	1.1
GB-35	>30000	0.62	16	22051	>100	1.6	<0.1	220.5	0.4	<0.1	<0.5	1.1
	Ti	Tl	Tm	U	V	Y	Yb	Zn	Zr			
D.L.	10	0.1	0.1	0.1	1	0.5	0.05	1	5			
GB-03	<10	0.2	<0.1	0.6	2	<0.5	<0.05	8637	<5			
GB-05	6355	1.4	0.5	2	89	33.1	3.21	673	159			
GB-06	21	0.2	<0.1	0.5	24	1.2	0.24	>30000	5			
GB-12	<10	0.2	<0.1	0.6	11	0.8	<0.05	18034	<5			
GB-19	<10	1.8	0.3	13.8	43	30.8	1.67	>30000	<5			
GB-31	48	0.7	<0.1	1	1	1.2	<0.05	5620	5			
GB-32	<10	2.4	0.3	7.5	78	16.8	1.49	>30000	5			
GB-33	<10	3.4	0.2	4.5	5	20.8	0.93	>30000	<5			
GB-34	12	0.3	0.1	0.7	18	3.2	0.31	29317	<5			
GB-35	79	0.4	<0.1	1.4	6	1.6	0.14	12133	6			

GB-03: Stage 1 (silicified crystal tuff), GB-05: Crystal tuff; GB-06, GB-12, GB-31, GB-35: Stage 2 Qz-Cu-Pb-Zn vein; GB-34: Stage 2 Qz-Cu-Pb-Zn vein with breccia clasts of stage 1, GB-19, GB-32, GB-33: Stage 3 Qz-Car-Mn vein

۵-۳- تیپ کانه‌زایی و الگوی تشکیل

در مقایسه با کنسارهای رگه‌ای فلزات پایه و گرانبها، ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی، دگرسانی، کانی‌شناسی و ساخت و بافت در رخداد معدنی گوشه‌بلاغ بیشترین شباهت را با کنسارهای اپی‌ترمال (کوک و سیمونز، ۲۰۰۰؛ جان،

۲۰۰۱؛ سیمونز و همکاران، ۲۰۰۵) دارد. نتایج مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی در رخداد معدنی گوشه‌بلاغ نشان می‌دهد: ۱- کانه‌زایی سرب و روی در رخداد معدنی گوشه‌بلاغ به‌صورت رگه‌ای رخ داده و دارای سنگ میزبان توفی و گدازه‌ای اتوسن است. ۲- دگرسانی‌های گرمایی در رخداد

نتایج مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، مراحل تحول کانه‌زایی در رخداد معدنی گوشه‌بلاغ به‌صورت یک توالی سه مرحله‌ای است (شکل ۱۳). مرحله اول با تشکیل توالی‌های آتشفشانی و آتشفشانی- رسوبی ائوسن در کمربند فلززایی طارم- هشتجین همراه است (شکل ۱۳- A). در مرحله دوم، همزمان با فاز کوهزایی پیرنه در زمان ائوسن پایانی، واحدهای سنگی ائوسن چین خورده و گسل‌ها و شکستگی‌های فراوانی در آن‌ها تشکیل شده است (شکل ۱۳- B). این مرحله در کمربند فلززایی طارم- هشتجین اغلب با نفوذ توده‌های گرانیتوئیدی کم‌عمق ائوسن پایانی به درون واحدهای سنگی ائوسن همراه است (شکل ۱۳- B). به‌طور معمول، این توده‌ها به‌عنوان موتور حرارتی عمل کرده و سبب چرخش آب‌های جوی و توسعه پهنه‌های دگرسانی و تشکیل رگه‌های اپی‌ترمال فلزات قیمتی و پایه در اعماق کم می‌شوند (کوهستانی و همکاران، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹a, b؛ ۲۰۲۰، ۲۰۲۲a, b). احتمال اینکه بخشی از ماده معدنی و سیالات گرمایی از توده‌های گرانیتوئیدی منشأ گرفته باشد نیز وجود دارد. هرچند در منطقه گوشه‌بلاغ رخنمونی از توده‌های گرانیتوئیدی مشاهده نمی‌شود اما در منطقه کانه‌زایی شاه علی بیگلر در فاصله حدود ۱۱ کیلومتری جنوب‌خاور گوشه‌بلاغ، توده‌های نیمه‌عمیق کوارتزموئزونیتهی ائوسن پایانی عامل کانه‌زایی در نظر گرفته شده‌اند (میکائیلی و همکاران، ۲۰۱۸). مرحله سوم با بالاآمدگی منطقه و توسعه فرایندهای هوازدگی و فرسایش همراه بوده و طی آن ریخت‌شناسی امروزی منطقه حاصل شده است (شکل ۱۳- C).

۶- نتیجه‌گیری

کانه‌زایی در رخداد معدنی گوشه‌بلاغ به‌صورت رگه کوارتزی سرب و روی‌دار با بافت‌های دانه‌پراکنده، رگه- رگچه‌ای، برشی، پوسته‌ای، گل‌کلمی، کاکلی، تیغه‌ای، پرماند، پُرکننده فضای خالی و جانیشینی درون واحدهای توفی و گدازه‌ای ائوسن رخ داده است. مواد معدنی و باطله در این رخداد معدنی شامل پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، پیرولوسیت، پسیلوملان، کوارتز، کلسیت، سیدریت و سربیسیت- ایلیت می‌باشد. تشابه روند الگوی بهنجار شده عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در نمونه‌های کانسنگ و توف بلورین میزبان بیانگر نقش سنگ‌های میزبان در تأمین عناصر کانه‌ساز است.

معدنی گوشه‌بلاغ شامل کانی‌های دگرسانی دما پایین تا متوسط مانند کلسیت، کلریت و مجموعه سربیسیت- ایلیت می‌باشد. ۳- کانه‌های معدنی در رخداد معدنی گوشه‌بلاغ شامل پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، پیرولوسیت و پسیلوملان است که با کانی‌های باطله کوارتز، کلسیت، سیدریت و سربیسیت- ایلیت همراهی می‌شوند. ۴- ساخت و بافت‌های موجود در ذخایر اپی‌ترمال مانند دانه‌پراکنده، رگه- رگچه‌ای، برشی، پوسته‌ای، گل‌کلمی، کاکلی، تیغه‌ای، پرماند و پُرکننده فضای خالی به خوبی در رخداد معدنی گوشه‌بلاغ توسعه یافته است. مقایسه این ویژگی‌ها با انواع کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون بالا، سولفیداسیون پایین و سولفیداسیون حدواسط (واپت و هدنکوئیسیت، ۱۹۹۰؛ کوک و سیمونز، ۲۰۰۰؛ جان، ۲۰۰۱؛ اینودی و همکاران، ۲۰۰۳؛ گمل، ۲۰۰۴؛ سیمونز و همکاران، ۲۰۰۵؛ اندریو و همکاران، ۲۰۱۳؛ ساندرس و همکاران، ۲۰۱۴؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۹) نشان می‌دهد که این مجموعه کانی‌شناسی و ساخت و بافت و الگوی دگرسانی‌های گرمایی بیشترین شباهت را با کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط (هدنکوئیسیت و همکاران، ۲۰۰۰؛ اینودی و همکاران، ۲۰۰۳؛ گمل، ۲۰۰۴؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۹) داشته و قابل مقایسه با این نوع از کانسارهای اپی‌ترمال موجود در کمربند فلززایی طارم- هشتجین (مهرابی و همکاران، ۲۰۱۶؛ کوهستانی و همکاران، ۲۰۱۷، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹a, b؛ ۲۰۲۰، ۲۰۲۲a, b؛ میکائیلی و همکاران، ۲۰۱۸؛ شهبازی و همکاران، ۲۰۱۹؛ زمانیان و همکاران، ۲۰۱۹؛ قاسمی‌سیانی و همکاران، ۲۰۲۲)، کمربند آتشفشانی مردآباد- بوئین‌زهر (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۱؛ طالع‌فاضل و همکاران، ۲۰۲۳؛ مددی و همکاران، ۱۴۰۳) و دیگر نقاط جهان (آلبینسون و همکاران، ۲۰۰۱؛ جان، ۲۰۰۱؛ سیمونز و همکاران، ۲۰۰۵؛ ییلماز و همکاران، ۲۰۱۰؛ سابو و همکاران، ۲۰۱۷) است. علاوه بر این، کانی‌های دگرسانی (کلسیت، کلریت و مجموعه سربیسیت- ایلیت) در رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ جزء دگرسانی‌های گرمایی حرارت پایین تا متوسط هستند که شاخص کانی‌های دگرسانی در کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط محسوب می‌شوند (هدنکوئیسیت و همکاران، ۲۰۰۰؛ آلبینسون و همکاران، ۲۰۰۱؛ اینودی و همکاران، ۲۰۰۳). در جدول ۲، ویژگی‌های اصلی رخداد معدنی گوشه‌بلاغ با برخی از کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط در کمربند فلززایی طارم- هشتجین مقایسه شده است. براساس

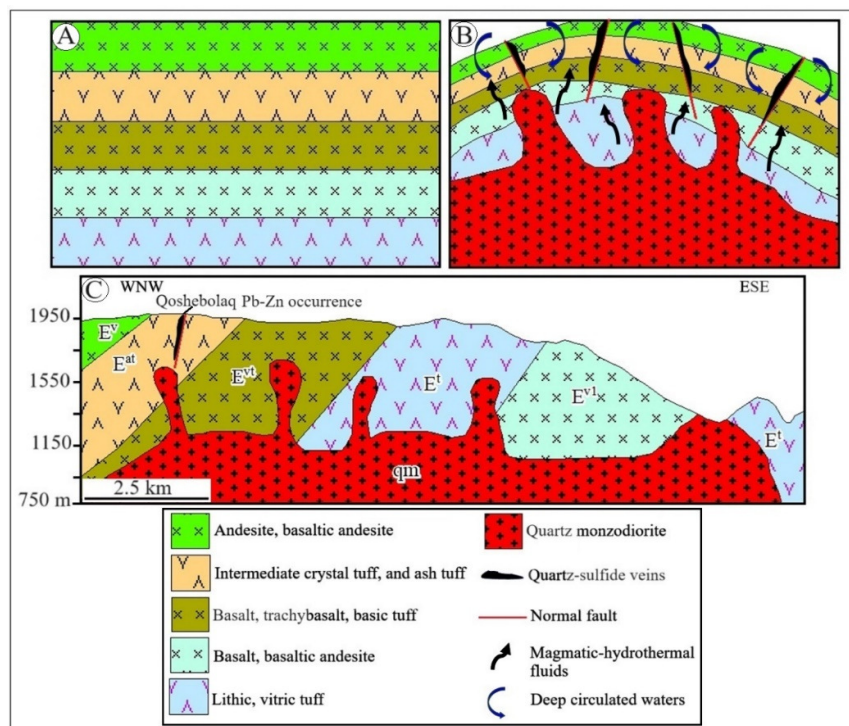
مناطق که توسط توده‌های گرانیتوئیدی ائوسن پایانی قطع شده‌اند، از نظر اکتشاف کانسارهای اپی‌ترمال در کمربند فلززایی طارم- هشتجین حائز اهمیت بوده و احتمال اینکه این کانی‌سازی‌ها مربوط به یک سیستم ماگمایی- گرمایی باشند را تقویت می‌کند. شواهد زمین‌شناسی، کانه‌زایی، الگوی دگرسانی‌ها، کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ در رخداد معدنی گوشه‌بلاغ نشان می‌دهد که این رخداد معدنی از نوع کانسارهای اپی‌ترمال فلزات پایه بوده و احتمال می‌رود قابل مقایسه با سایر کانه‌زایی‌های اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط در کمربند فلززایی طارم- هشتجین باشد.

نمودارهای تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر بیانگر تمرکز عناصر کانه‌ساز و تهی‌شدگی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در بخش‌های کانه‌دار است. این امر می‌تواند بیانگر میزان به نسبت بالای واکنش بین سیالات کانه‌زا و سنگ میزبان در رخداد معدنی گوشه‌بلاغ باشد. ژئومتری رگه‌ای کانه‌زایی در رخداد معدنی گوشه‌بلاغ و دیگر کانه‌زایی‌های اپی‌ترمال در کمربند فلززایی طارم- هشتجین نشان می‌دهد که معابر گسلی محل اصلی عبور جریان سیالات کانه‌ساز بوده‌اند. از طرفی، این کانه‌زایی‌ها اغلب درون توالی‌های توف و گدازه ائوسن رخ داده و دارای ارتباط فضایی و زمانی نزدیکی با توده‌های گرانیتوئیدی ائوسن پایانی هستند. لذا، بررسی پهنه‌های گسلی موجود در توالی سنگی ائوسن به‌ویژه در

جدول ۲. مقایسه ویژگی‌های اصلی رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ با برخی از کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط در کمربند فلززایی طارم- هشتجین.

Table 2. Comparison of main characteristics of the Qoushebolag Pb-Zn occurrence with some intermediate-sulfidation type of epithermal deposits in the Tarom-Hashtjin metallogenic belt.

موقعیت جغرافیایی	گوشه‌بلاغ	شاه علی بیگلو	ورمزیار	گلپجه	تشویر	زاجکان
سنگ میزبان	توف و گدازه	دایک کوارتز مونزونیتی	توف‌های حدواسط و اسیدی	آندزیت و واحدهای پیروکلاستیک	توف و گدازه	جنوب‌خاور زنجان توف‌های حدواسط و اسیدی
کنترل‌کننده ساختاری	گسل‌ها و شکستگی‌ها	گسل‌ها و شکستگی‌ها	گسل‌ها و شکستگی‌ها	گسل‌ها و شکستگی‌ها	گسل‌ها و شکستگی‌ها	گسل‌ها و شکستگی‌ها
کانی‌شناسی	پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، پیرولووسیت، پسیلوملان	اسفالریت، گالن، کالکوپیریت، پیریت، تنانتیت- تتراهدريت	گالن، اسفالریت، پیریت، پیرولووسیت، پسیلوملان	پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، تتراهدريت- تنانتیت	کالکوپیریت، کالکوسیت، بورنیت، گالن، اسفالریت	پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، هماتیت
ساخت و بافت	رگه- رگچه‌ای، پرشی، پوسته‌ای، گل‌کلمی، کاکلی، تیغه‌ای، پرماند، پرکننده فضای خالی	رگه- رگچه‌ای، پرشی، شانه‌ای، پوسته‌ای، گل‌کلمی، کاکلی، پرماند، تیغه‌ای، پرکننده فضای خالی	رگه- رگچه‌ای، پرشی، شانه‌ای، پوسته‌ای، گل‌کلمی، کاکلی، پرماند، تیغه‌ای، پرکننده فضای خالی	رگه- رگچه‌ای، شانه‌ای، پوسته‌ای، گل‌کلمی، کاکلی، پرمانند، تیغه‌ای، پرکننده فضای خالی	رگه- رگچه‌ای، پرشی، پوسته‌ای، گل‌کلمی، پرماند، پرکننده فضای خالی	رگه- رگچه‌ای، پرشی، شانه‌ای، پوسته‌ای، کاکلی، گل‌کلمی، پرماند، پرکننده فضای خالی
دگرسانی	سیلیسی، کربناتی، آرژیلیک حدواسط، پروپیلیتیک	سیلیسی، کربناتی، سریسیتی، کلریتی، پروپیلیتیک	سیلیسی، آرژیلیک حدواسط، کربناتی، پروپیلیتیک	سیلیسی، آرژیلیک حدواسط، پروپیلیتیک	سیلیسی، آرژیلیک حدواسط، کربناتی، کلریتی، پروپیلیتیک	سیلیسی، آرژیلیک حدواسط، کربناتی، پروپیلیتیک
تیپ کانه‌زایی	اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط	اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط	اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط	اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط	اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط	اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط
منبع	نتایج حاصل از این پژوهش	میکائیلی و همکاران (۲۰۱۸)	قربانی و همکاران (۱۴۰۰)	خداپنده‌لو و همکاران (۱۳۹۷)	مختاری (۱۳۹۷)، کوهستانی و همکاران (۲۰۲۲b)	محضی و همکاران (۱۴۰۱) کوهستانی و همکاران (۲۰۱۹a)



شکل ۱۳. A تا C: تصاویر شماتیک از مراحل تحول کانه‌زایی در رخداد معدنی سرب و روی گوشه‌بلاغ. برای توضیح به متن مراجعه شود.
Fig. 13. A-C: Schematic representation of mineralization evolution stages at Qoushebolag Pb-Zn occurrence. See text for details.

- Andreeva, E., Matsueda, H., Okrugin, V. M., Takahashi, R., One, S (2013) Au-Ag-Te mineralization of the low-sulfidation epithermal Aginskoe deposit, Central Kamchatka, Russia. *Resource Geology*, 63 (4): 337–349. <https://doi.org/10.1111/rge.12013>.
- Bazargani-Guilani, K. and Parchekani, M (2011) Metallogenic properties of Barik-Ab Pb–Zn (Cu) ore deposit with acidic tuff host rock, west Central Alborz, northwest of Iran. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 20 (78): 97–104 (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22071/GSJ.2010.54611>.
- Bienvenu, P., Bougault, H., Joron, J. L., Treuil, M., Dmitriev, L (1990) MORB alteration: Rare earth element/non-rare hydromagmaphile element fractionation. *Chemical Geology*, 82: 1–14. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(90\)90070-N](https://doi.org/10.1016/0009-2541(90)90070-N).
- Cooke, D. R. and Simmons, S. F (2000) Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. *Gold in 2000* (Eds, Hagemann, S. G. and Brown, P. E.) Society of Economic Geologists, 221–244. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.06>.
- Einaudi, M. T., Hedenquist, J. W., Inan, E. E (2003) Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. Volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: rulers and witnesses of processes within the earth (Eds, Simmons, S. F. and Graham, I.) Society of Economic Geologists, 285–313. <https://doi.org/10.5382/SP.10.15>.

۷- قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوهش و از سردبیر و داوران محترم مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی به‌خاطر راهنمایی‌های علمی که منجر به غنای بیشتر مقاله شده است، تشکر می‌نمایند.

References

- Afshari, M., Nabatian, Gh., Honarmand, M., Ebrahimi, M., Li, X. H (2023) Shoshonitic pluton and an associated base-metal deposit in the Tarom-Hashtjin metallogenic zone, NW Iran: implication for tectono-magmatic evolution and metallogenic considerations. *Australian Journal of Earth Sciences*, 71 (2): 251–276. <https://doi.org/10.1080/08120099.2023.2273974>
- Alavi, M (1991) Tectonic map of the Middle East, scale: 1:5,000,000. Geological Survey of Iran.
- Albinson, T., Norman, D. I., Cole, D., Chomiak, B (2001) Controls on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: Constraints from fluid inclusion and stable isotope data. *New Mines and Discoveries in Mexico and Central America* (Eds, Albinson, T. and Nelson, C. E.) Society of Economic Geologists, 1–32. <https://doi.org/10.5382/SP.08.01>.

- Esmaeli, M., Lotfi, M., Nezafati, N (2015) Fluid inclusion and stable isotope study of the Khalyfehlou copper deposit, southeast Zanjan, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 8 (11): 9625–9633. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-1907-3>.
- Gemmell, J. B (2004) Low- and intermediate-sulfidation epithermal deposits. 24 Ct Gold Workshop (Eds, Cooke, D. R. Deyel, C. L., Pongratz J.) University of Tasmania, 57–63.
- Ghasemi Siani, M., Mehrabi, B., Nazarian, M., Lotfi, M., Corfu, F (2022) Geology and genesis of the Chomalu polymetallic deposit, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 143: 104763.
- Ghorbani, A., Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A (2022) Genesis of the Varmazyar Pb–Zn (Ag) occurrence, Tarom-Hashtjin metallogenic belt: Insights from ore geology, geochemistry and fluid inclusion studies. *Journal of Economic Geology*, 14 (1): 1–38 (in Persian with extended English abstract).
- Goodarzi, Z., Moghaddasi, S. J., Barzegar, H (2012) The formation and evolution of Lak polymetal ore deposit based on fluid inclusion studies, southwest of Boein Zahra, Qazvin province. *New Findings in Applied Geology*, 6 (12): 74–89.
- Hedenquist, J. W., Arribas, A., Gonzalez-Urien, E. (2000) Exploration for epithermal gold deposits. *Gold in 2000* (Eds, Hagemann, S. G. and Brown, P. E.) Society of Economic Geologists, 245–277. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.07>.
- Hosseinzadeh, M. R., Maghfouri, S., Moayyed, M., Rahmani, A (2016) Khalyfehlou deposit: High-sulfidation epithermal Cu–Au mineralization in the Tarom magmatic zone, north Khoramdareh. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 25 (99): 179–194 (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22071/GSJ.2016.40910>.
- Humphries, S. E (1984) The mobility of the rare earth elements in the crust. *Developments in Geochemistry* (Ed, Henderson, P.) Elsevier, 317–342. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50014-9>.
- John, D. A (2001) Miocene and early Pliocene epithermal gold-silver deposits in the northern Great Basin, western USA: Characteristics, distribution, and relationship to magmatism. *Economic Geology*, 96 (8): 1827–1853. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.8.1827>.
- Kouhestani, H. and Mokhtari, M. A. A (2019) Tashvir ore occurrence, NE Zanjan: Intermediate-sulfidation style of epithermal base metal (Ag) mineralization in the Tarom-Hashtjin zone. *Scientific Quarterly Journal of Geoscience*, 28 (110): 97–108 (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22071/gsj.2018.91903.1193>.
- Kouhestani, H., Azimzadeh, A. M., Mokhtari, M. A. A., Ebrahimi, M (2017) Mineralization and fluid evolution of epithermal base metal veins from the Aqkand deposit, NW Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen (Journal of Mineralogy and Geochemistry)*, 194 (2): 139–155. <https://doi.org/10.1127/njma/2017/0036>.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A., Chang, Z., Johnson, A. C (2018) Intermediate-sulfidation type base metal mineralization at Aliabad–Khanchy, Tarom-Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 93: 1–18.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A., Qin, K. Z., Zhao, J. X (2019a) Fluid inclusion and stable isotope constraints on ore genesis of the Zajkan epithermal base metal deposit, Tarom-Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 109: 564–584. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.05.014.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A., Qin, K. Z., Zhao, J. X (2019b) Origin and evolution of hydrothermal fluids in the Marshoun epithermal Pb–Zn–Cu (Ag) deposit, Tarom-Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 113: 103087. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103087.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A., Qin, K. Z., Zhang, X. N (2020) Genesis of the Abbasabad epithermal base metal deposit, NW Iran: Evidences from ore geology, fluid inclusion and O–S isotopes. *Ore Geology Reviews*, 126: 103752.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A., Chang, Z. (2022a) Fluid inclusion and stable isotope constraints on the genesis of epithermal base metal veins in the Armaqaan Khaneh mining district, Tarom-Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Australian Journal of Earth Sciences*, 69 (6): 844–860. doi.org/10.1080/08120099.2022.2033320.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A., Chang, Z., Qin, K. Z., Aghajani Marsa, S (2022b) Fluid inclusion, zircon U–Pb geochronology, and O–S isotopic constraints on the origin and evolution of ore-forming fluids of the Tashvir and Varmazyar epithermal base metal deposits, NW Iran. *Frontiers in Earth Science*, 10: 990761. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.990761>.
- Lottermoser, B. G (1992) Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes. *Ore Geology Reviews*, 7 (1): 25–41.
- Madadi, A., Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A., Rahmati, N (2024) Ipak polymetal deposit (south Eshtehard): Intermediate-sulfidation epithermal style mineralization in the Mardabad–Bouinzahra volcanic belt. *New Findings in Applied Geology*, in press. <https://doi.org/10.22084/nfag.2024.29004.1606>.
- Mahzi, B., Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A (2022) Investigation of type and genesis of base metal mineralization in the Zajkan deposit (Tarom-e-Sofla, Qazvin Province) using geology, geochemistry, and fluid inclusions data. *Journal of Advanced Applied Geology*, 12 (3): 365–392 (in Persian with extended English abstract).

- McDonough, W. F. and Sun, S (1995) Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).
- Mehrabi, B., Ghasemi Siani, M., Goldfarb, R., Azizi, H., Ganerod, M., Marsh, E. E (2016) Mineral assemblages, fluid evolution and genesis of polymetallic epithermal veins, Gulojeh district, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 78: 41–57. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.03.016.
- Mikaeili, K., Hosseinzadeh, M. R., Moayyed, M., Maghfouri, S (2018) The Shah-Ali-Beiglou Zn–Pb–Cu (Ag) deposit, Iran: An example of intermediate-sulfidation epithermal type mineralization. *Minerals*, 8 (4): 148. <https://doi.org/10.3390/min8040148>.
- Mohammadi, S., Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A (2022) Intermediate-sulfidation epithermal Cu (Pb and Zn) mineralization in the Marshoun 2 occurrence (SE Zanjan): Mineralization, geochemistry, and fluid inclusions evidence. *Petrological Journal*, 13 (1): 143–168 (in Persian with extended English abstract). <https://doi.org/10.22108/ijp.2021.128215.1229>.
- Mokhtari, M. A. A., Kouhestani, H., Saeedi, A (2016) Investigation on type and origin of cooper mineralization at Aliabad Mousavi–Khanchy occurrence, east of Zanjan, using petrological, mineralogical, and geochemical data. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 25 (100): 259–270 (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22071/GSJ.2016.40756>.
- Mousavi Motlagh, S. H., Ghaderi, M (2019) The Chargar Au–Cu deposit: an example of low-sulfidation epithermal mineralization from the Tarom subzone, NW Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen (Journal of Mineralogy and Geochemistry)*, 196 (1): 43–66. <https://doi.org/10.1127/njma/2019/0158>.
- Mousavi Motlagh, S. H., Ghaderi, M., Yasami, N., Alfonso, P (2019) Stable isotope geochemistry of Chargar epithermal deposit: Constraints on epithermal systems in the Tarom metallogenic belt, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 205: 106331. doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.06.013.
- Murphy, J. B. and Hynes, A. J (1986) Contrasting secondary mobility of Ti, P, Zr, Nb, and Y in two meta-basaltic suites in the Appalachians. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 23 (8): 1138–1144. <https://doi.org/10.1139/e86-112>.
- Naderlou, F., Mokhtari, M. A. A., Kouhestani, H., Nabatian, Gh. (2021) Type and origin of the north Chargar Cu–Au mineralization, southeast Zanjan: Using petrological, mineralogical, and geochemical data. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 31 (2): 149–162 (in Persian with English abstract).
- Rolland, Y., Cox, S., Boullier, A. M., Pennacchioni, G., Mancktelow, N (2003) Rare earth and trace element mobility in mid-crustal shear zones: insights from the Mont Blanc Massif (Western Alps). *Earth Planet Scientific Letters*, 214 (1): 203–219. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00372-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00372-8).
- Sabeva, R., Mladenova, V., Mogessie, A (2017) Ore petrology, hydrothermal alteration, fluid inclusions, and sulfur stable isotopes of the Milin Kamak intermediate sulfidation epithermal Au–Ag deposit in Western Srednogorie, Bulgaria. *Ore Geology Reviews*, 88: 400–415. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.013.
- Saunders, J. A., Hofstra, A. H., Goldfarb, R. J., Reed, M. H (2014) *Geochemistry of hydrothermal gold deposits. Treatise on Geochemistry* (Eds, Holland, H. D. and Turekian, K. K.) Elsevier-Pergamon, 33–424. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01117-7>.
- Shahbazi, S., Ghaderi, M., Alfonso, P (2019) Mineralogy, alteration, and sulfur isotope geochemistry of the Zehabad intermediate-sulfidation epithermal deposit. NW Iran. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 28 (6): 882–901. <https://doi.org/10.3906/yer-1902-1>.
- Simmons, S. F., White, N. C., John, D. A (2005) Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. One Hundredth Anniversary Volume (Eds, Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J., Richards, J. P.) *Society of Economic Geologists*, 485–522. <https://doi.org/10.5382/AV100.16>.
- Tale Fazel, E., Nevolko, P. A., Păsava, J., Xie, Y., Alaei, N., Oroji, A (2023) Geology, geochemistry, fluid inclusions, and H–O–C–S–Pb isotope constraints on the genesis of the Atash-Anbar epithermal gold deposit, Urumieh–Dokhtar magmatic arc, central-northern Iran. *Ore Geology Reviews*, 153: 105285. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105285>.
- Thompson, R. N (1982) Magmatism of the British Tertiary Volcanic Province. *Scottish Journal of Geology*, 18 (1): 49–107. <https://doi.org/10.1144/sjg18010049>.
- Wang, L., Qin, K. Z., Song, G. Y., Li, G. M (2019) A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews*, 107: 434–456. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.023>.
- White, N. C. and Hedenquist, J. W (1990) Epithermal environments, and styles of mineralization: Variations and their causes, and guidelines for exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 36 (1–3): 445–474. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90063-G](https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90063-G).
- Whitford, D. J., Korsch, M. J., Porritt, P. M., 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. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90090-3](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90090-3).
- Whitney, D. L. and Evans, B. W (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95 (1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>.

- Yasami, N., Ghaderi, M (2019) Distribution of alteration, mineralization, and fluid inclusion features in porphyry-high sulfidation epithermal systems: The Chodarchay example, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 104: 227–245. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.11.006>.
- Yasami, N., Ghaderi, M., Alfonso, P (2018) Sulfur isotope geochemistry of the Chodarchay Cu-Au deposit, Tarom, NW Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen (Journal of Mineralogy and Geochemistry)*, 195 (2): 101–113. <https://doi.org/10.1127/njma/2018/0097>.
- Yilmaz, H., Oyman, T., Sonmez, F. N., Arehart, G. B., Billor, Z (2010) Intermediate-sulfidation epithermal gold-base metal deposits in Tertiary subaerial volcanic rocks, Sahinli/Tespil Dere (Lapseki/Western Turkey). *Ore Geology Reviews*, 37 (3–4): 236–258. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.04.001.
- Zamanian, H., Rahmani, S., Zareisahameih, R (2019) Fluid inclusion and stable isotope study of the Lubin-Zardeh epithermal Cu–Au deposit in Zanjan Province, NW Iran: Implications for ore genesis. *Ore Geology Reviews*, 112: 103014.

Type and genetic model of mineralization in the Qoushebolaq Pb-Zn occurrence (NW Zanjan): Evidence from geology, mineralization, and geochemistry

Sh. Tarvirdizadeh¹, H. Kouhestani^{2*}, M. A. A. Mokhtari³ and N. Rahmati⁴

1, 4- M. Sc. student, Dept., of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2, 3- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

* kouhestani@znu.ac.ir

Received: 2024.6.17 Accepted: 2024.9.9

Abstract

The Qoushebolaq Pb-Zn occurrence, located 110 km northwest of Zanjan, is part of the Tarom-Hashtjin metallogenic belt. The mineralization occurred as a 200-meter long and 1-to-2-meters wide Pb-Zn-bearing quartz-sulfide vein (NE-SW/70-80NW) hosted by Eocene volcanic and volcanoclastic strata and is enclosed by 3-to-5-meters intermediate argillic alteration halos. Hydrothermal alteration in the study area comprises silicification, carbonate, intermediate argillic, and propylitic alteration. Pyrite, chalcopyrite, galena, sphalerite, pyrolusite, and psilomelane are ore minerals, and quartz, calcite, siderite, and sericite-illite are gangue minerals. Cerussite, smithsonite, malachite, covellite, and goethite are formed during supergene processes. The ore minerals formed as disseminated, vein-veinlets, brecciated, crustiform, colloform, cockade, bladed, plumose, vug infill, and replacement textures. Five mineralization stages can be distinguished at Qoushebolaq, where Pb-Zn mineralization occurred as quartz-pyrite-chalcopyrite-galena-sphalerite veins and breccias in the second stage. The Chondrite-normalized trace elements and REE patterns of ore samples, and host crystal tuff are comparable. This reveals that alteration and leaching of elements from the host volcanic and volcanoclastic are involved in mineralization. According to all the evidence, the mineralogical characteristics of the Qoushebolaq occurrence are similar to the intermediate-sulfidation type of epithermal deposits.

Keywords: Pb-Zn mineralization, Epithermal, Intermediate-sulfidation, Qoushebolaq, Zanjan, Tarom-Hashtjin

Introduction

The Tarom-Hashtjin metallogenic belt, as a part of the Alborz magmatic arc, hosts important epithermal base and precious metal deposits in Iran. The important deposits and occurrences in this belt are Aliabad-Khanchy (Mokhtari et al., 2016; Kouhestani et al., 2018), Aqkand (Kouhestani et al., 2017), Zajkan (Kouhestani et al., 2019a; Mahzi et al., 2022), Marshoun (Kouhestani et al., 2019b; Mohammadi et al., 2022), Abbasabad (Kouhestani et al., 2020), Zehabad (Shahbazi et al., 2019), Khalyfehlou (Esmali et al., 2015; Hosseinzadeh et al., 2016), Chargar (Mousavi Motlagh and Ghaderi, 2019; Mousavi Motlagh et al., 2019), North of Chargar (Naderlou et al., 2021), Barik-Ab (Bazargani-Guilani and Parchekani, 2011), Chodarchay (Yasami et al., 2018; Yasami and Ghaderi 2019), Lubin-Zardeh (Zamanian et al., 2019), Gulojeh (Mehrabi et al., 2016), Jalilabad and Rashtabad (Kouhestani et al., 2022a), Tashvir (Kouhestani et al., 2022b),

Varmazyar (Kouhestani et al., 2022b; Ghorbani et al., 2022), Chomalou (Ghasemi Siani et al., 2022; Afshari et al., 2023), and Shah Ali Beiglou (Mikaeili et al., 2018).

The Qoushebolaq Pb-Zn occurrence, located 110 km northwest of Zanjan, is part of the Tarom-Hashtjin metallogenic belt. Despite the existence of old exploration activities in the Qoushebolaq occurrence, no detailed works have been carried out on the geology, mineralogy, geochemistry, and genesis of the Qoushebolaq occurrence. In this contribution, we examine the comprehensive geology, mineralogy, structure and texture, geochemistry, and alteration types of the Qoushebolaq occurrence to compel its ore genesis and type of mineralization. The results could be useful for the further exploration of epithermal precious and base metal deposits in the Tarom-Hashtjin metallogenic belt and other parts of the Alborz magmatic arc.

Materials and methods

This research includes two parts, field and laboratory studies. During the fieldwork, the geological map, scale 1:20000, of the Qoushebolaq occurrence was prepared, and approximately forty samples were collected from different rock units and ore veins and breccias. Among these, six thin and fourteen polished thin sections were examined using a transmitted and reflected polarized light microscope in the mineralogy laboratory of the University of Zanjan, Zanjan, Iran. The chemical composition of ore samples ($n = 9$), and fresh and barren host rocks ($n = 1$) was analyzed at the Zarazma Analytical Laboratories, Tehran, Iran using the ICP-MS method.

Results and Discussion

The rock units outcropped in the Qoushebolaq occurrence belong to Eocene volcanic and volcanoclastic units and include basalt and trachybasalt lavas with basic tuff intercalation (E^{vt} unit), intermediate tuffs (E^{at} unit), and basaltic andesite and andesite lavas (E^v unit).

Mineralization at Qoushebolaq occurred as a quartz-sulfide vein within the Eocene volcanic and volcanoclastic sequence covered by 3-to-5-meter intermediate argillic alteration halos. The ore vein has an NE-SW/70-80NW trend and is about 200 meters in length and 1-to-2 meters in width. Hydrothermal alteration comprises silicification, carbonate, intermediate argillic, and propylitic alteration; the first three are closely associated with mineralization. Pyrite, chalcopyrite, galena, sphalerite, pyrolusite, and psilomelane, are the main ore minerals, and quartz, calcite, siderite, and sericite-illite are gangue minerals. Cerussite, smithsonite, malachite, covellite, and goethite are formed during supergene processes. The ore minerals formed as disseminated, vein-veinlets, brecciated, crustiform, colloform, cockade, bladed, plumose, vug infill, and replacement textures.

The mineralization processes at the Qoushebolaq occurrence can be divided into five stages. Stage 1 is represented by the silicification of host rocks and minor disseminated pyrite (often oxidized). Stage 2 is categorized by vein-veinlets (up to 10 cm thickness) and hydrothermal breccias with quartz and sulfide cement that carry varying volumes of pyrite, chalcopyrite, galena, and sphalerite. Stage 3 is characterized by quartz, carbonate (calcite and siderite), manganese ores (psilomelane, pyrolusite) veins, and hydrothermal breccia cement with no sulfide minerals. Stage 4 is signified by quartz and calcite as veinlets (up to 5 mm thickness) and vug infill texture with no sulfide and oxide minerals. Stage 5 is related to supergene processes.

The Chondrite-normalized trace elements and REE patterns of ore samples and host crystal tuff are comparable and show that host rocks are possibly elaborate in mineralization. These patterns are almost similar for ore samples indicating they formed by the same mineralization system.

Conclusions

Pb-Zn mineralization at Qoushebolaq occurs as NE-SW/70-80NW-trending quartz-sulfide vein within Eocene volcanic and volcanoclastic sequence that shows disseminated, vein-veinlets, brecciated, crustiform, colloform, cockade, bladed, plumose, vug infill, and replacement textures. Ore and gangue minerals at this occurrence include pyrite, chalcopyrite, galena, sphalerite, pyrolusite, psilomelane, quartz, calcite, siderite, and sericite-illite. A comparison of the main characteristics of the Qoushebolaq Pb-Zn occurrence with different types of Pb-Zn deposits reveals that the geology, alteration, mineralization, mineralogy, and texture of Qoushebolaq are similar to the intermediate-sulfidation type of epithermal deposits.