

مطالعات کانی‌سازی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی و تعیین کانه‌های فرعی در کانسار چندفلزی (سرب - مس - روی - نقره) پیرحاجات، شمال‌باختر طبس

بهنام یوسفی^۱، محمد معانی‌جو^{۲*}، ابراهیم طالع فاضل^۳ و مسلم اسدی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

۲- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

۳- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

۴- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بیرجند، خراسان جنوبی، ایران

نویسنده مسئول: mohammad@basu.ac.ir *

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۶

دریافت: ۱۴۰۲/۱/۸

چکیده

کانسار پیرحاجات در فاصله ۵ کیلومتری شمال‌خاور روستای پیرحاجات و ۱۲۰ کیلومتری شمال‌باختر طبس در رشته کوه‌های پیرحاجات واقع شده‌است. این کانسار در خرد قاره ایران مرکزی و ایالت فلززایی طبس- پشت‌بادام در بخش ازبک‌کوه- عشق‌آباد قرار دارد. زمین‌شناسی منطقه شامل واحد سنگی کربناته (دولومیت و آهک دولومیتی) سازند شتری متعلق به تریاس میانی و واحد سنگی ماسه‌سنگ سازند شمشک متعلق به ژوراسیک‌زیرین می‌باشد. واحد ماسه‌سنگی با ترکیب لیت‌آرنایت براساس نمودار K_2O/Na_2O در برابر SiO_2/Al_2O_3 در موقعیت ساختاری حاشیه غیرفعال قاره‌ای قرار می‌گیرد. کانی‌سازی در این کانسار به شدت تحت تأثیر فرآیندهای تکتونیکی بوده و در این میان، گسل اصلی با نام FM، از نوع امتدادلغز باروند خاوری- باختری و شیب ۸۰-۷۰ درجه به سمت جنوب از همه مهم‌تر است. کانی‌سازی هیپوزن در دو مرحله صورت گرفته و شامل سرب طبیعی، گالن، پیریت، تتراهدريت، کالکوپیریت و اسفالریت است و کانی‌سازی سوپوزن شامل اکسید سرب (پلاتنریت، ماسیکوت)، لیناریت، آنگلیت، کوپریت، مالاکیت، آزوریت، کریزوکلا، کولویت، تنوریت، گوتیت، سروزیت است. کانی‌های باطله اغلب شامل باریت، سیلیس، کلسیت و دولومیت می‌باشد. فلز اصلی قابل استخراج در این کانسار سرب است که بصورت سرب طبیعی، پلاتنریت (سرب اکسیدی) و به مقدار کم‌تری سرب سولفیدی (گالن) می‌باشد که براساس نتایج تجزیه دستگاهی ICP-OES (تعداد ۱۳ نمونه)، فلز سرب دارای عیار متوسط ۰.۳٪ و بیشترین عیار نقره در این کانسار ۲۷ ppm است که عیار نسبتاً بالای فلز سرب و وجود نقره، دورنمای اقتصادی این کانسار را امیدبخش نشان می‌دهد. هم‌چنین فلز روی، دارای عیار میانگین ۳۷۲ ppm است (تعداد ۱۳ نمونه). فلز مس در بعضی نمونه‌ها نیز دارای عیاری بیشتر از ۰.۵٪ است. بر پایه مطالعات و تجزیه‌های انجام شده، فاز کانی‌سازی غالب در این کانسار فاز اکسیدی می‌باشد که نکته حائز اهمیت در امر فرآوری است. از ویژگی‌های بارز کانسار وجود منطقه‌بندی در کانی‌سازی (تشکیل کانی‌های مس‌دار در پایین‌ترین تراز، سپس کانی‌های سرب‌دار و در سطح کانی باریت) به صورت عمقی و جانبی است.

واژه‌های کلیدی: سرب طبیعی، اکسید سرب، منطقه‌بندی، پلی‌متال، پیرحاجات، ایالت فلززایی، بلوک طبس، زون ایران مرکزی

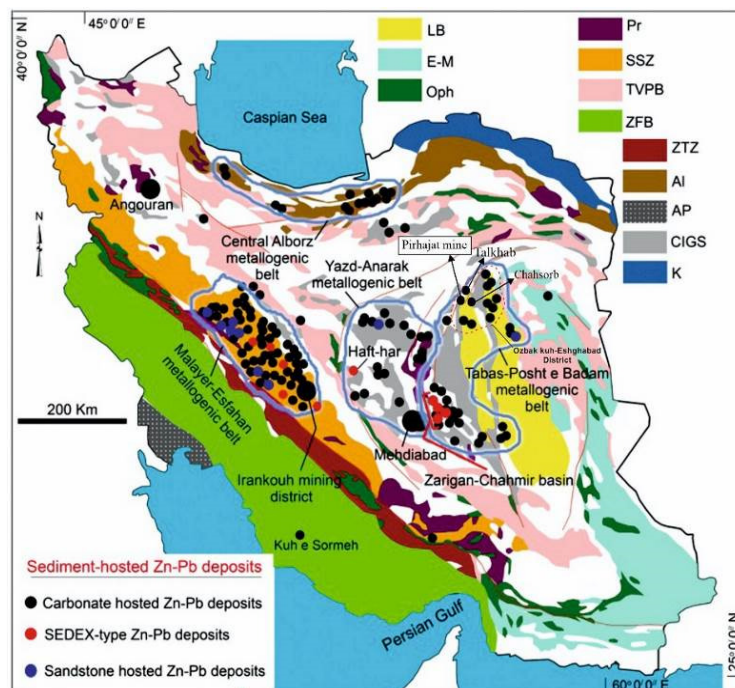
پیشگفتار

بلوک می‌باشد و از خاور به بلوک لوت، از شمال به رشته کوه‌های البرز و از جنوب به منطقه سندانج- سیرجان محدود می‌شود. بنا به نظر اشتوکلین (۱۹۶۸) چین‌خوردگی اصلی ایران مرکزی به فاز کوه‌زاد آلبی مربوط است به طوری که پنج فاز اصلی چین‌خوردگی آلپ در تریاس- لیاس، اوایل کرتاسه، اوایل، اواسط و اواخر دوران سنوزوئیک در این منطقه مشاهده شده‌است. روند عمومی چین‌خوردگی‌ها یکنواخت نیست، بلکه در شمال روند خاوری- باختری دارد، در خاور موازات بلوک لوت (شمالی

کانسار پیرحاجات در فاصله ۵ کیلومتری شمال‌خاور روستای پیرحاجات و ۱۲۰ کیلومتری شمال‌باختر طبس در بین مختصات $31^{\circ}56'12''$ و $56^{\circ}31'37.92''$ و طول‌خاوری $34^{\circ}07'53.76''$ و $34^{\circ}08'19.68''$ عرض‌شمالی در رشته کوه‌های پیرحاجات واقع شده‌است. این کانسار در تقسیمات ساختاری خرده قاره ایران مرکزی در شمال بلوک طبس و در ایالت فلززایی طبس پشت‌بادام در بخش ازبک‌کوه- عشق‌آباد قرار دارد (قربانی، ۲۰۱۳). محدوده ایران مرکزی به شکل مثلثی است که شامل ۵

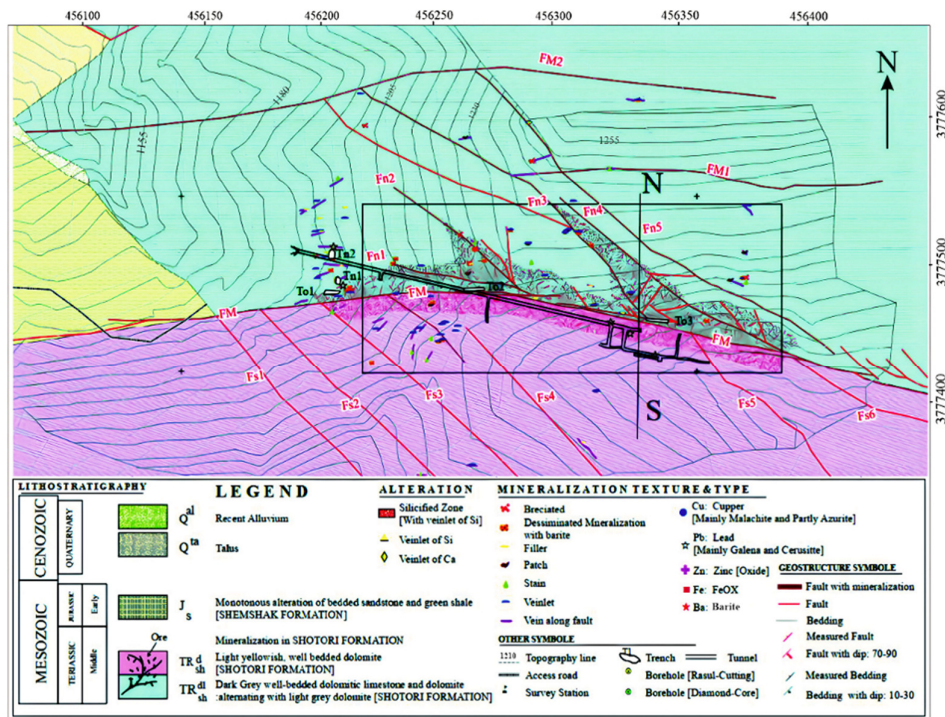
و ۱۲۳۸ متری از سطح دریا قرار دارد. کانی‌سازی اصلی در این کانسار سرب‌طبیعی، سرب‌اکسیدی و گالن می‌باشد. این منطقه در سال ۱۳۹۳ توسط شرکت معدنی رصام ثبت و مورد اکتشاف تفصیلی قرار گرفته است. بررسی‌های انجام شده نشان داد که علاوه بر بخش‌هایی با عیار متوسط که از فعالیت‌های قبلی باقی مانده است، رگه‌های کانه‌دار دیگری در قسمت‌هایی که حفاریات قدیمی بر روی آن‌ها انجام نشده است، نیز وجود دارد که دورنمای این محدوده را بسیار امیدبخش می‌کند. سلطانی و همکاران (۱۳۹۵) سرشته‌های کانی‌شناسی، ساختی، بافتی و ژئوشیمیایی معدن چاه‌سرب، طیس را مورد مطالعه قرار داده‌اند. هدف از این پژوهش بررسی دقیق کانی‌شناسی، مراحل کانی‌سازی، توالی پاراژنتیک، لیتوژئوشیمی و همچنین بررسی گسترش کانی‌سازی به‌صورت عمقی و جانبی در این کانسار می‌باشد.

- جنوبی) و در جنوب‌باختری به موازات پهنه سندانج-سیرجان (شمال‌باختر-شمال‌خاور) است. محدوده ازبک‌کوه-عشق‌آباد از نظر قابلیت کانی‌سازی سرب و روی از پتانسیل بالایی برخوردار است. اغلب معادن و نشانه‌های سرب و روی در شمال، جنوب و جنوب‌باختر عشق‌آباد پراکنده‌اند. مهم‌ترین معادن و نشانه‌های معدنی سرب و روی در این منطقه شامل معادن و یا نشانه‌های چاه‌سرب، کوه‌ماری، اوشک، گردو، ازبک‌کوه، شوره، قلعه، رقه، سیب‌زار، قوچ‌کوهی، کالار (پیرحاجات)، تلخ‌آب، دق سراجیو پشت کله، گوش‌کمر، نیگنان، بیدو، کوپرو، قواستو، گوه‌سیاه (قرشیرعلی) و کوه‌سیاه (خرمایو) هستند که سنگ‌میزبان این کانسارها اغلب مربوط به دوران مزوزوئیک است (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۵). کانسار پیرحاجات، یک معدن زیرسطحی شامل ۴ تونل اصلی می‌باشد که در ترازهای ۱۲۰۵، ۱۲۲۵، ۱۲۳۲



شکل ۱. نقشه توزیع کانسارهای سرب و روی با میزبان رسوبی و ایالت‌های فلززائی آن‌ها به همراه موقعیت کانسار پیرحاجات (با تغییرات اندک از رجبی و همکاران، ۲۰۱۲ا). Al: Alborz Zone, AP: Arabian Plate, CIGS: Geological and Structural Gradual Zone of Central Iran, E_M: Eastern Iran-Makran, K: Kopedagh, LB: Lut Block, Oph: Ophiolitic Belt, Pr: Precambrian Unit, SSZ: Sanandaj-Sirjan Zone, TVPB: Tertiary Volcanic-plutonic belt, ZFB: Zagros Fold Belt, ZTZ: Zagros thrust zone. زون زاگرس رورانده.

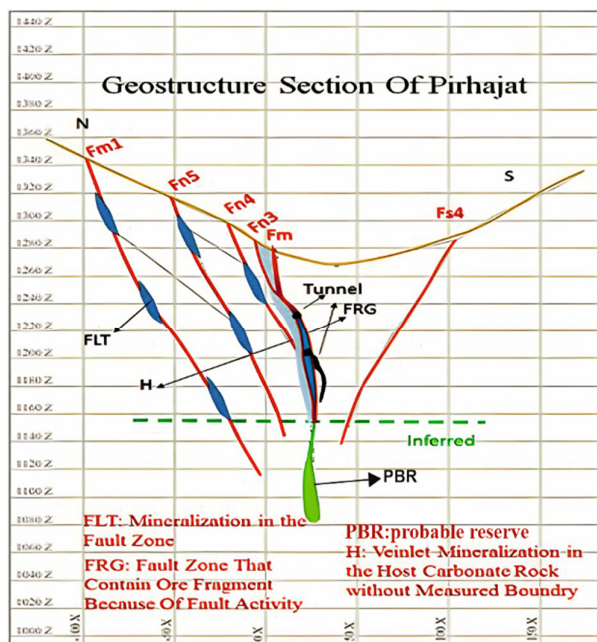
Fig 1. Distribution map of lead and zinc deposits with their sedimentary hosts and metallogenic provinces along with the location of the Pirhajat deposit (modified from Rajabi et al., 2012a). Al: Alborz Zone, AP: Arabian Plate, CIGS: Geological and Structural Gradual Zone of Central Iran, E_M: Eastern Iran-Makran, K: Kopedagh, LB: Lut Block, Oph: Ophiolitic Belt, Pr: Precambrian Unit, SSZ: Sanandaj-Sirjan Zone, TVPB: Tertiary Volcanic-plutonic belt, ZFB: Zagros Fold Belt, ZTZ: Zagros thrust zone.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ کانسار پیرحاجات، با تغییرات اندک از اسدی (۱۴۰۰). FM: گسل اصلی و انشعابات فرعی آن، Fn:

گسل‌های شمالی نسبت به گسل اصلی FM، Fs: گسل‌های جنوبی نسبت به گسل اصلی FM.

Fig 2. Geological map 1:1000 of the Pirhajat deposit, modified from Asadi (1400). FM: main faults, Fn: northern faults relative to FM main fault, Fs: southern faults relative to FM main fault.



شکل ۳. مقطع N_S در نقشه زمین‌شناسی کانسار پیرحاجات، اسدی (۱۴۰۰). FM: گسل‌های اصلی، Fn: گسل‌های شمالی نسبت به گسل

اصلی FM، Fs: گسل‌های جنوبی نسبت به گسل اصلی FM.

Fig 3. The N_S profile in the geological map of the Pirhajat deposit, Asadi (1400). FM: main faults, Fn: northern faults relative to FM main fault, Fs: southern faults relative to FM main fault.

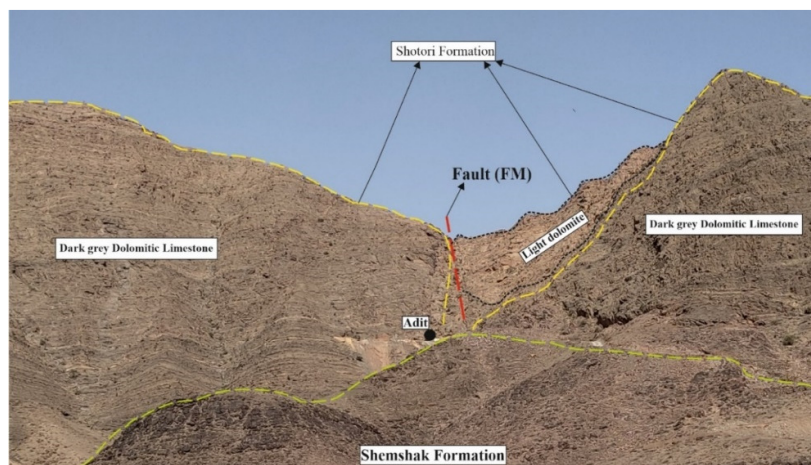
روش مطالعه

ابتدا بازدیدهای میدانی و پیمایش‌های متعددی برای شناسایی واحدهای سنگی و لیتولوژی در محدوده انجام شد. برای مطالعات کانی‌شناسی تعداد ۳۹ نمونه از ترازهای مختلف در تونل‌های کانسار سرب پیرحاجات برداشت شد که تعداد ۱۹ نمونه مقطع‌نازک، ۱۵ نمونه مقطع نازک صیقلی و ۵ نمونه مقطع صیقلی تهیه و مطالعه شده است. مطالعات کانی‌شناسی و سنگ‌نگاری مقاطع نازک و نازک صیقلی و تصویربرداری از آن‌ها در آزمایشگاه زمین‌شناسی دانشگاه پیام‌نور مرکز اصفهان توسط میکروسکوپ Olympus مدل BX41 انجام شده است. مطالعات کانه‌نگاری در آزمایشگاه زمین‌شناسی دانشگاه بوعلی‌سینا توسط میکروسکوپ زایس مدل Axioplan2 انجام گرفته است. به منظور مطالعات دقیق کانی‌شناسی و شناسایی کانی‌های کم‌یاب تعداد ۲ نمونه از مقاطع صیقلی برای مطالعات SEM-EDX به مرکز پژوهش متالورژی رازی کرج ارسال شد که پس از آماده‌سازی و اندود کردن مقاطع با پلاتین، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل VEGA/TESCAN با ولتاژ ۲۰ kv مورد بررسی قرار گرفت. تعداد ۱۶ نمونه از کانسنگ برای تجزیه شیمیایی و

دستیابی به عناصر و اکسیدهای اصلی با روش ICP-OES به آزمایشگاه زرآما تهران ارسال شد، که پس از آماده‌سازی تعداد ۱۳ نمونه کانسنگ به روش تخریب چهاراسید و ۳ نمونه ماسه‌سنگ به روش تخریب ذوب‌قلیا، مورد تجزیه قرار گرفت.

زمین‌شناسی کانسار

زمین‌شناسی محدوده معدنی شامل سازند شتری متعلق به تریاس میانی (TR_{sh}^d) و سازند شمشک متعلق به ژوراسیک پیشین (J_s) است. جدیدترین واحدهای شناسایی شده شامل؛ رسوبات واریزه‌ای (Q^{la})، آبرفت‌ها و پادگانه‌های عهد حاضر (Q^{al}) می‌باشد (شکل ۴). سازند شتری شامل دولومیت‌های زردرنگ و در بخش بالایی شامل عضو آهک اسپهک می‌باشد. سازند شمشک در محدوده شامل ماسه‌سنگ‌ها و سیلتستون‌های به شدت هوازده می‌باشد که در بعضی از نقاط با لایه‌های زغال‌دار همراه است. بخش آهکی محدوده تناوبی از آهک‌های تیره و روشن را به نمایش می‌گذارد. مرز بین سازند شمشک و شتری مشخص نبوده و به دلیل فرایندهای تکتونیکی پویا در منطقه این دوسازند توسط گسل در کنارهم و در مواردی سازند شمشک در زیر سازند شتری قرار گرفته است.



شکل ۴. نمایی از واحدهای سنگی منطقه و موقعیت دهانه تونل کانسار پیرحاجات در آن (دید به سمت خاور).

Fig 4. Lithology and location of the Pirhajat mine tunnel (looking to east).

آهکی می‌باشد که بخش بالایی، سیمایی خشن و صخره‌ساز دارد. ضخامت واحد آهکی در محدوده کانسار بیش از ۱۵۰ متر می‌باشد و ضخامت لایه‌های تیره و روشن آهک هر کدام از ۰/۵ متر تا ۱ متر متغیر است (شکل ۵). براساس مطالعات میکروسکوپی کانی‌های شناسایی شده در

سنگ‌نگاری سازند شتری (واحد TR_{sh}^d): لیتولوژی سازند شتری شامل دولواستون با سن تریاس میانی می‌باشد که بخش زیرین آن دولواستون یک‌نواخت زرد و منظم لایه و بخش بالایی آن سنگ‌آهک ضخیم لایه است و هم‌چنین دولواستون‌های تیره و خاکستری که شامل دولواستون‌های

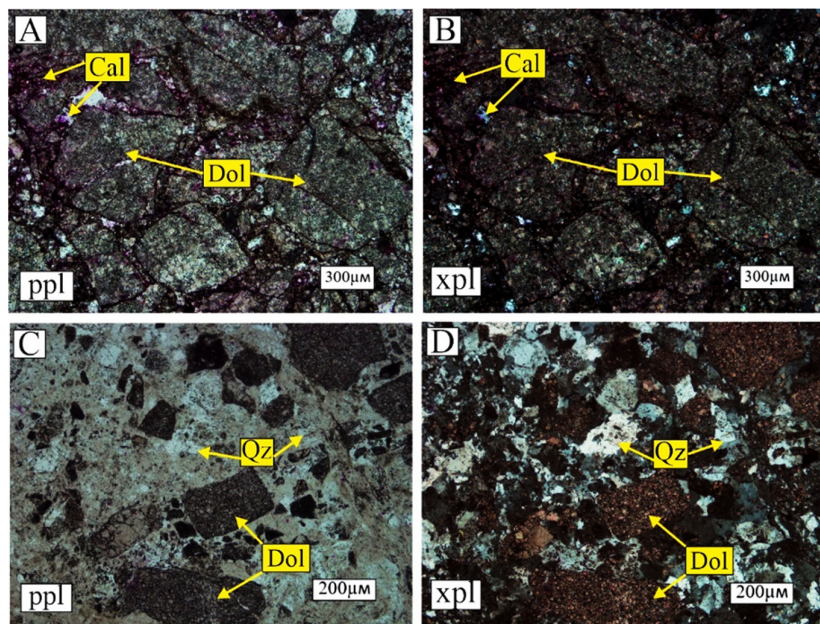
و کلسیت امکان‌پذیر نبوده به همین عنوان برای شناسایی از محلول آلیزارین استفاده شده است (شکل ۶). سیمان در این مقاطع کربنات ریزبلور بوده که حفره‌ها توسط کلسیت درشت‌بلور و شکستگی‌ها توسط کوارتز پر شده است.

سنگ‌میزبان کانسار شامل؛ کانی‌های کربناته دولومیت و کلسیت و کانی کوارتز می‌باشد. کانی‌های دولومیت و کلسیت تا حد زیادی تحت تأثیر عوامل تکتونیکی قرار گرفته و در مقاطع میکروسکوپی اغلب در قطعات برشی دیده می‌شود که به دلیل دانه‌ریز بودن شناسایی دقیق دولومیت



شکل ۵. نمایش واحد دولومیتی سازند شتری، کانسار پیرحاجات (دید به سمت شمال).

Fig 5. Dolomite unit of Shotori Formation, the Pirhajat deposit, Tabas (looking to north).



شکل ۶. A و B: تصویر میکروسکوپی سنگ میزبان برشی شده (تراز ۱۲۰۵ متر)، C و D: تصویر میکروسکوپی کانسنگ برشی با سیمان کوارتز و کلسیت (تراز ۱۲۲۵ متر)، کانسار پیرحاجات. Dol: دولومیت، Cal: کلسیت، Qz: کوارتز. PPL: نور عبوری عادی، XPL: نور عبوری متقاطع (حروف اختصاری از ویتنی و ایوانز، ۲۰۱۰)

Fig 6. A and B: Microscopic picture of breccia host rock (level 1205 m), C and D: Microscopic picture of breccia ore with quartz and calcite cement (level 1225 m), Pirhajat deposit. Dol: dolomite, Cal: calcite, Qz: quartz. PPL: transmitted light, XPL: cross-polarized light (abbreviations from Whitney and Evans, 2010).

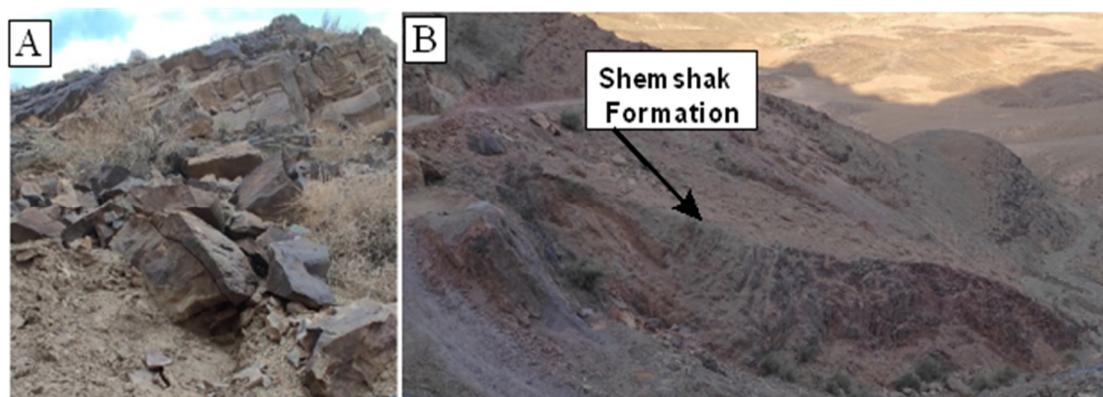
عضو B: ماسه‌سنگ بالایی: ترکیب سنگ‌شناسی همگن، حاوی دوکفه‌ای، آمونیت، نشانه یک محیط دریایی بوده و حاوی گلوکونیت می‌باشد.

عضو C: شیل + لایه زغال‌دار زیرین: بخش زغال‌دار پائینی حاوی آرژیلیت، مهم‌ترین ویژگی آن تناوب زغال‌سنگ است (محیط دلتایی-مردابی).

عضو D: ماسه‌سنگ زیرین: ماسه‌سنگ پائینی تغییر شدید ترکیبی در جهت قائم، نشانه شبکه‌ای از رودخانه‌های بریده بریده است.

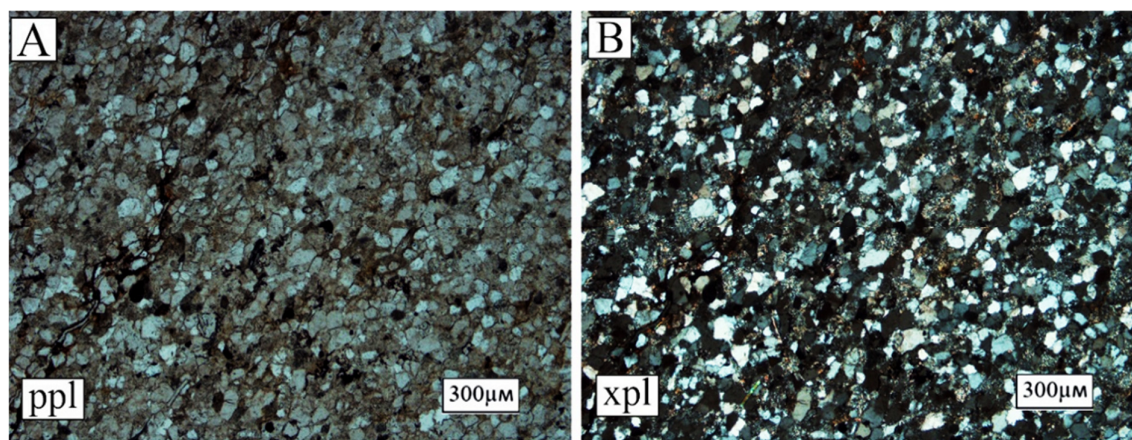
سنگ‌نگاری سازند شمشک (واحد Js): اگرچه مقطع تیپ این سازند در البرز مرکزی است، ولی در نواحی طبس و کرمان گسترش دارد و از ماسه‌سنگ، شیل، مارن، آهک و کنگلومرا تشکیل شده است. ماسه‌سنگ‌های این سازند در محدوده مورد مطالعه از درصد بالای سیلیس^۱ تشکیل شده است (شکل ۷). این سازند از ۴ عضو زیر تشکیل شده است:

عضو A: شیل + سیلتستون زغال‌دار بالایی: بخش زغال‌دار بالایی به خاطر داشتن لایه‌های زغالی فراوان شاخص بوده و لیتولوژی آن شامل شیل و سیلتستون است.



شکل ۷. A: واحد ماسه‌سنگی سازند شمشک، کانسار پیرحاجات (دید به سمت جنوب) و B: سازند شمشک، کانسار پیرحاجات (دید به سمت باختر).

Fig 7. A: Sandstone unit of Shemshak Formation, the Pirhajat deposit (looking to the south). B: the Shemshak Formation, the Pirhajat deposit (looking to the west).



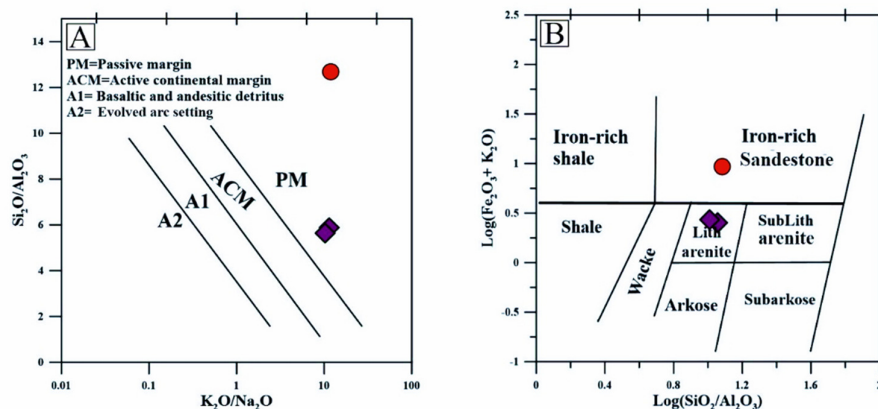
شکل ۸. A و B: تصویر میکروسکوپی نمونه ماسه‌سنگی سازند شمشک در کانسار پیرحاجات. PPL: نور عبوری عادی، XPL: نور عبوری متقاطع.

Fig 8. A and B: Photomicrographs of sandstone in the Shemshak formation, Pirhajat deposit. PPL: transmitted light, XPL: cross-polarized light.

¹ Silicification

از ذهن نیست. براساس نتایج تجزیه اکسیدهای اصلی بر روی تعداد ۳ نمونه ماسه‌سنگ (جدول ۱) از محدوده مورد مطالعه نمودارهایی تعیین جایگاه زمین‌ساختی و طبقه‌بندی ماسه‌سنگ‌های محدوده رسم شده است. در نمودار K_2O/Na_2O در برابر SiO_2/Al_2O_3 ماسه‌سنگ‌های این محدوده در حاشیه غیرفعال قاره‌ای قرار می‌گیرد و در نمودار $\log (Fe_2O_3 + K_2O)$ در برابر $\log (SiO_2 + Al_2O_3)$ در قسمت لیت‌آرنایت قرار می‌گیرد به غیر از نمونه دگرگون‌شده که در قسمت ماسه‌سنگ غنی از آهن قرار می‌گیرد (شکل ۹).

ماسه‌سنگ‌های مشاهده شده در کانسار پیرحاجات بسیار دانه‌ریز بوده و کانی اصلی تشکیل‌دهنده آن کوارتز با درصد نسبتاً بالا است (شکل ۸). این واحد در تقسیم‌بندی فولک در طبقه لیت‌آرنایت^۱ قرار می‌گیرد به جز یک نمونه ماسه‌سنگ دگرگون شده که غنی از آهن می‌باشد. لیت‌آرنایت سنگی است که بیش از ۲۵٪ ذرات آن در قطب R بوده و نسبت بین F/R از ۳/۱ کم‌تر است. در نمونه‌های ماسه‌سنگ منطقه به دلیل ریزدانه بودن بافت آن‌ها قطعات خرده‌سنگ‌ها قابل تشخیص نمی‌باشد اما به دلیل تکتونیک بسیار فعال محدوده وجود خرده‌سنگ در ماسه‌سنگ‌ها دور



شکل ۹. موقعیت ساختاری ماسه‌سنگ‌های کانسار پیرحاجات، A: جایگاه زمین‌ساختی نمونه‌ها بر روی نمودار (روزر و کورچ، ۱۹۸۸)، B: رده‌بندی سنگ به کمک نمودار (هرون، ۱۹۸۸). دایره قرمز؛ نمونه ماسه‌سنگ دارای آهن، لوزی بنفش؛ نمونه ماسه‌سنگ لیت‌آرنایت.

Fig 9. Characteristics of the sandstones of the Pirhajat mining area, A: Tectonic setting of the samples on the diagram (Roser and Korsch, 1988), B: Rock classification using the diagram (Heron, 1988). Red circle= Sandstone sample with iron; purple rhombus = Litharenite sandstone sample.

جدول ۱. نتایج حاصل از تجزیه اکسیدهای اصلی (برحسب درصد وزنی) بر روی ماسه‌سنگ‌های کانسار پیرحاجات.

Table 1. The analytical data of the main oxides (in wt%) on the sandstones of the Pirhajat deposit.

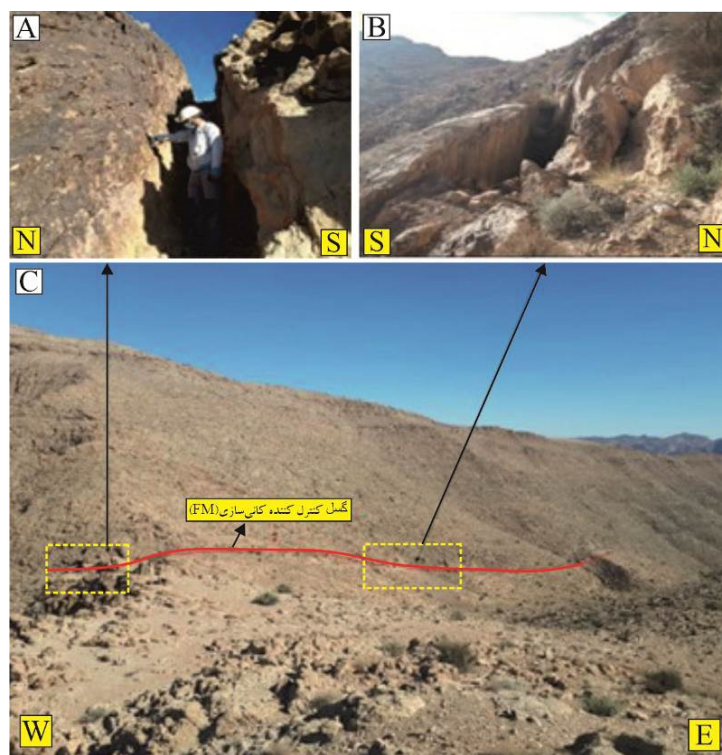
Element	PS-109-A	PS-111-A	PS-138
SiO ₂	86.4	79.56	85.34
Al ₂ O ₃	7.57	6.91	8.33
BaO	<0.05	< 0.05	< 0.05
CaO	0.35	0.42	0.38
Fe ₂ O ₃	1.11	7.9	1.12
K ₂ O	1.41	1.4	1.58
MgO	0.3	0.45	0.32
MnO	<0.05	<0.05	<0.05
Na ₂ O	0.24	0.11	0.28
P ₂ O ₅	0.07	0.24	0.05
SO ₃	0.11	0.26	0.08
TiO ₂	0.28	0.31	0.3
Sr	<0.05	0.09	<0.05
LOI	2.15	2.37	2.21
Total	99.99	100.2	99.99

¹ Litharenite

زمین‌شناسی ساختاری منطقه

در منطقه مورد مطالعه، سه دسته ساختار تکتونیکی وجود دارد که شامل؛ ۱- گسل‌ها، ۲- درزه و شکستگی‌ها، ۳- لایه‌بندی. هر سه عامل ذکر شده به عنوان سطوح ضعف، میزبان مناسبی برای کانی‌سازی هستند ولی فقط بعضی از این ساختارهای دارای کانی‌سازی است. براساس بررسی‌های میدانی لایه‌بندی‌ها فاقد آثار کانی‌سازی هستند. درزه‌ها و شکستگی‌ها نیز به دو دسته تقسیم می‌شوند که شامل؛ درزه‌های مرتبط با چین‌خوردگی ملایم در منطقه و عمود بر لایه‌بندی و درزه‌های مرتبط با گسل‌ها و شکستگی‌ها است. درزه‌های مرتبط با گسل‌ها و شکستگی‌ها در مواردی که با گسل کانه‌دار تداخل دارند

حاوی آثار کانی‌سازی هستند و آزمون ۱۲۰-۳۰۰ درجه دارند. گسل اصلی کانه‌دار نیز یک گسل خاوری-باختری باشیب ۷۰ تا ۸۰ درجه به سمت جنوب می‌باشد. این گسل امتدادلغز بوده و ساختارهای مرتبط با گسل‌های امتدادلغز از جمله فضاهای کششی و فشارشی به خوبی در امتداد آن قابل مشاهده است. گسل اصلی کانه‌دار و کلیه این ساختارها تحت تأثیر عملکرد گسل پی‌سنگی و اصلی، شمالی-جنوبی کلمرد (که از زمان فعالیت تکتونیکی کاتانگایی فعال است) می‌باشد. وجود آثار کانی‌سازی رگچه‌ای گالن و مالاکیت در اطراف گسل راهنمای حفر تونل‌های اکتشافی و استخراجی بوده است (شکل‌های ۱۰ و ۱۱).



شکل ۱۰. تصویر موقعیت گسل (FM)، کنترل‌کننده کانی‌سازی، کانسار پیرحاجات. A: قسمتی از گسل اصلی در غرب محدوده، B: قسمتی از گسل اصلی در قسمت خاوری محدوده، C: تصویر کلی از گسل اصلی محدوده با نام FM.

Fig 10. Photograph of fault location (FM), controlling mineralization, the Pirhajat deposit, A: Part of the main fault in the west of the region, B: Part of the main fault in the eastern part of the region, C: General picture of the main fault of the region named FM.

کانی‌شناسی سنگ‌میزبان و کانسنگ

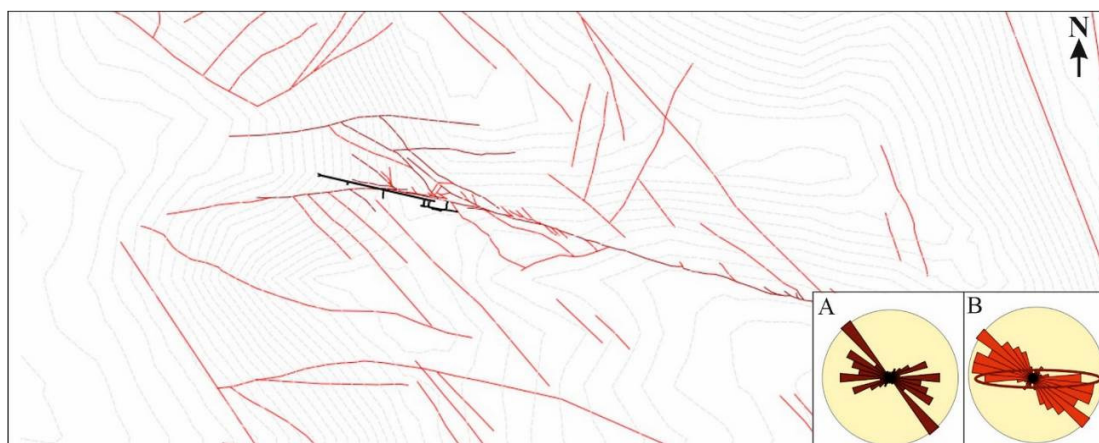
در کانسار سرب پیرحاجات باتوجه به دو سازند شتری و شمشک دارای رخنمون، کانی‌شناسی نیز پیچیده نبوده و اکثر تنوع کانی‌شناسی در کانی‌های فلزی می‌باشد. همچنین تحت تأثیر فرایندهای تکتونیکی متعدد و به دنبال

آن برشی شدن شدید در سنگ‌میزبان و کانسنگ، شناسایی و تفکیک برخی از کانی‌ها خصوصاً کانی‌های کربناته (تفکیک دولومیت و کلسیت) تا حدی دشوار است. به‌طور اجمالی کانی‌های اصلی شناسایی‌شده شامل کانی‌های کربناته (دولومیت و کلسیت)، کوارتز، سرب طبیعی،

کوارتز در این کانسار شناسایی شد. نسل اول کوارتزهای درشت‌بلور که بافت‌های دانه‌ای، تیغه‌ای را به نمایش می‌گذارد و میزبان کانی‌سازی سرب است. نسل دوم کوارتزهای ریزبلور (پلی کریستالین) هستند که توسط تبلور مجدد تشکیل شده‌اند (شکل ۱۲). در سنگ میزبان شکستگی‌های موجود در سنگ توسط کوارتزهای دانه‌ریز تا دانه‌متوسط پر شده و در کانسنگ به صورت سیمان تشکیل شده است. در اثر تغییر ناگهانی دما تحت‌تأثیر اختلاط آب‌های زیرزمینی داغ با آب‌های جوی، در لبه دیواره‌های شکستگی‌ها و حفره‌ها کوارتزهایی نیمه شکل‌دار تشکیل شده است.

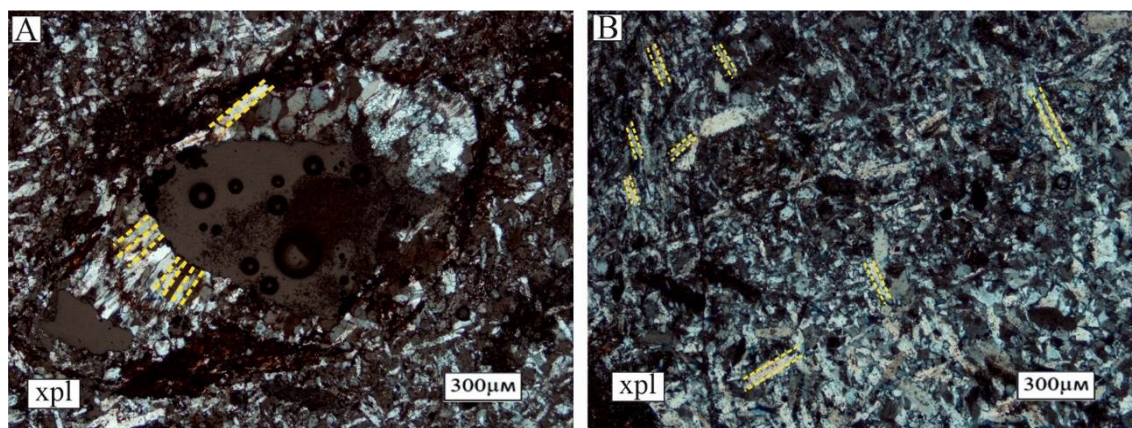
سرب اکسیدی، گالن، کالکوپیریت، اسفالریت، باریت، ملاکیت، آزوریت و اکسیدهای آهن (گوسان) می‌باشد. پیریت که کانی همراه معمول در کانسارهای سرب و روی با میزبان کربناتی است، در این جا کم‌یاب است. نقره با عیار متوسط در شبکه بلوری سرب و گالن و همراه کانی‌های سولفوسالت مانند تتراندريت وجود دارد. هم‌چنین طلا به مقدار ناچیز به همراه کالکوپیریت نیز وجود دارد.

کوارتز: از اصلی‌ترین و فراوان‌ترین کانی‌های مشاهده شده در این کانسار کانی سیلیکاته کوارتز می‌باشد که کانه‌سازی اصلی گالن و سرب طبیعی نیز همراه با میزبان کوارتزی رخ داده است. براساس مشاهدات میکروسکوپی دو نسل



شکل ۱۱. نقشه گسل‌های برداشت شده به همراه رزدياگرام، A: رزدياگرام روند ماده معدنی، B: رزدياگرام گسل‌های محدوده، با تغییرات اندک از اسدی (۱۴۰۰). کانسار پیرحاجات.

Fig 11. The map of the extracted faults along with the rose diagram, A: The rose diagram of mineral trend, B: The rose diagram of aults of the region, modified from Asadi (1400), the Pirhajat deposit.

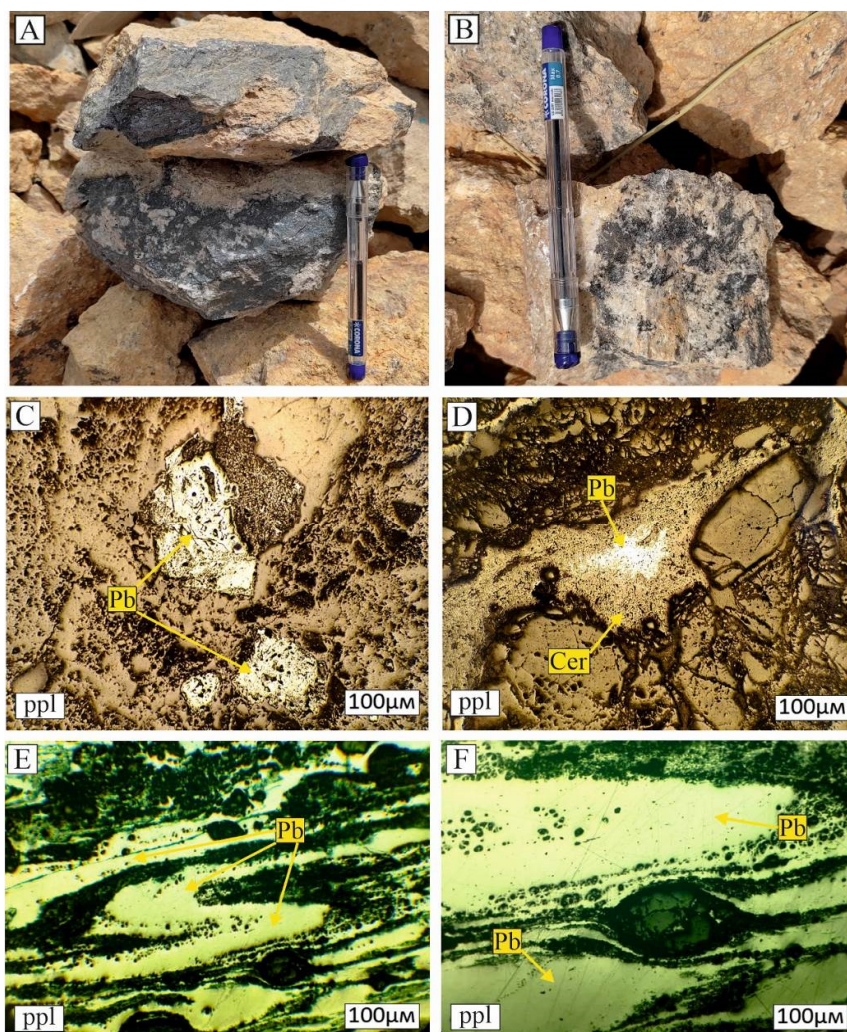


شکل ۱۲. A: تصویر میکروسکوپی (نمونه از تراز ۱۲۳۵ متر)، تشکیل کوارتزهای تیغه‌ای در اطراف حفره، B: تصویر میکروسکوپی (نمونه تراز ۱۲۳۰ متر)، کوارتزهای تیغه‌ای نسل اول. کانسار پیرحاجات. XPL: نور عبوری متقاطع.

Fig 12. A: Photomicrographs (sample level 1235 m), formation of lamellar quartz around the cavity, B: Photomicrographs (sample level 1230 m), first generation lamellar quartz. Pirhajat deposit. XPL: cross-polarized light.

سنگ‌میزبان و اختلاط با آب‌های سطحی و جوی است (معانی‌جو و همکاران، ۲۰۲۰). بافت‌های مشاهده شده در سرب‌طبیعی بیشتر شامل بافت پرکننده فضای خالی و جانشینی می‌باشد (شکل ۱۳، C و D). همچنین بافت‌های خاص (شبهه بافت‌های دگرگونی) در سرب‌طبیعی نیز مشاهده شد که گمان می‌رود این نوع بافت به دلیل تکتونیک بسیار فعال محدود شده است (شکل ۱۳، E و F). کانی روی‌دار در کانسار پیرحاجات مختص به اسفالریت می‌باشد که فراوانی چندانی ندارد. اسفالریت به صورت رگچه‌ای و ادخال‌های ریز و منفرد در زمینه‌ای از سرب‌طبیعی وجود دارد.

سرب‌طبیعی: سرب‌طبیعی، فلز اولیه و اصلی در کانسار سرب پیرحاجات می‌باشد که اغلب به صورت ریزبلور و پرکننده فضاهای خالی در بین قطعات برشی و شکستگی‌های گسلی تشکیل شده است. سرب‌طبیعی نزدیک به سطح تشکیل شده و تحت تأثیر تکتونیک منطقه کانی‌سازی در کانسنگ پراکنده شده است. سرب‌طبیعی به صورت ریزبلور و نازک‌لایه به صورت قشری بر روی برش‌ها، سطوح شکاف‌ها و فضاهای خالی تشکیل شده است (شکل ۱۳، A و B). این حالت از کانی‌سازی به دلیل کاهش ناگهانی دما و واکنش سریع سیال کانسار ساز با



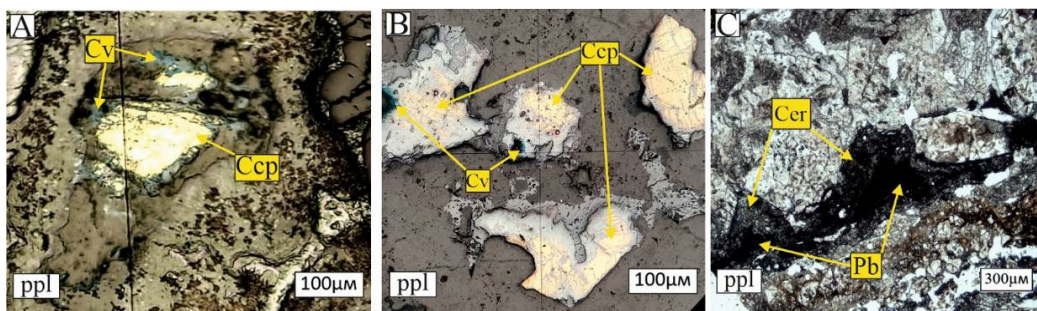
شکل ۱۳. A: نمونه دستی از سرب‌طبیعی ریز بلور، B: نمونه دستی از کانه‌سازی سرب در میزبان سیلیسی، کانسار پیرحاجات. C: نمایش بافت پرکننده فضای خالی توسط کانی سرب‌طبیعی، D: نمایش کانی سرب‌طبیعی با بافت جانشینی با سروزیت، E و F: بافت خاص سرب‌طبیعی، شبهه به بافت‌های دگرگونی تحت تأثیر فرآیندهای تکتونیک. Pb: سرب‌طبیعی، Cer: سروزیت. (حروف اختصاری کانی‌ها از ویبناز، ۲۰۱۰)

Fig 13. A: Hand specimen of microcrystalline native lead, B: Hand specimen of lead mineralization in siliceous host, the Pirhajat deposit. C: Open-space filling texture by native lead mineral, D: Native lead mineral with replacement texture with cerussite, E and F: Special texture of native lead, similar to metamorphic textures affected by tectonic processes. Pb: Native lead, Cer: cerussite. (Mineral abbreviations from Whitney and Evans, 2010).

وجود سنگ‌میزبان کربناته حضور سروزیت هرچند به مقدار کم را توجیه می‌کند و طبق واکنش ۱ تشکیل می‌شود (گیلبرت و پارک، ۱۹۹۷) و (جزی و شهاب‌پور، ۲۰۱۰):

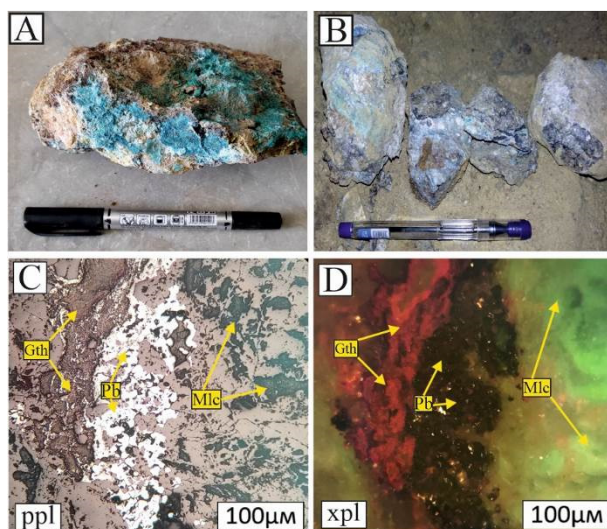
$$\text{PbS} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{PbCO}_3 + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+ (1)$$

سروزیت: سروزیت در کانسارهای سرب شناخته شده، فراوان‌ترین کانی ثانویه سرب است، اما در کانسار پیرحاجات، سروزیت دارای فراوانی چشم‌گیری نمی‌باشد. لذا سروزیت موجود در مقاطع میکروسکوپی به شکل جانشینی با سرب طبیعی مشاهده شده است (شکل ۱۴.C).



شکل ۱۴. A و B: جانشینی کانی کالکوپیریت و کولیت، C: جانشینی کانی سرب طبیعی و سروزیت، کانسار پیرحاجات. Ccp: کالکوپیریت، Cv: کولیت، pb: سرب طبیعی، Cer: سروزیت. (حروف اختصاری کانی‌ها از ویتنی و ایوانز، ۲۰۱۰).

Fig 14. A and B: Replacement of chalcopyrite by covellite, C: Native lead mineral replaced by cerussite, the Pirhajat deposit. Ccp: chalcopyrite, Cv: covellite, pb: Native lead, Cer: cerussite. (Mineral abbreviations from Whitney and Evans, 2010).



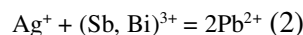
شکل ۱۵. A: نمونه دستی از کانی مالاکیت، آزوریت و کریزوکلا، B: نمونه دستی از کانی‌سازی آزوریت همراه با سرب طبیعی در زمینه سیلیسی، C و D: تصویر میکروسکوپی از مالاکیت، سرب طبیعی و گوتیت، کانسار پیرحاجات. Pb: سرب طبیعی، Gth: گوتیت، Mlc: مالاکیت. PPL: نور طبیعی، XPL: نور پلاریزه. (حروف اختصاری کانی‌ها از ویتنی و ایوانز، ۲۰۱۰)

Fig 15. A: Hand specimen of malachite, azurite and chrysocolla, B: Hand specimen of azurite mineralization with native lead in silica context, C and D: The photomicrograph of malachite, native lead and goethite, the Pirhajat deposit. Pb: native lead, Gth: Goethite, Mlc: Malachite. PPL: natural light, XPL: polarized light. (Mineral abbreviations from Whitney and Evans, 2010).

این که ادخال‌های پیریت و کالکوپیریت غالباً اکسید شده‌اند و به صورت کولیت و اکسیدهای آهن درآمدند (شکل A، B۱۴). از کانی‌های مس‌دار مشاهده شده در کانسار، کانی‌های مالاکیت، آزوریت و کریزوکلا می‌باشد (شکل ۱۵). این کانی‌ها طی فرآیندهای سوپرژن تشکیل شده است و قاعداً باید نزدیک به سطح باشند اما در کانسار

پیریت و کالکوپیریت: کانی پیریت برخلاف دیگر کانسارهای سرب با میزبان کربناته که فراوان‌ترین کانی در کانسار می‌باشد (هی و همکاران، ۲۰۲۰)، در کانسار سرب پیرحاجات کم‌یاب و گسترش چندانی ندارد. کانی کالکوپیریت نیز دارای فراوانی قابل‌ملاحظه‌ای نمی‌باشد اما نسبت به پیریت در مقاطع بیشتر مشاهده شده‌است ضمن

به شعاع یونی ($Pb^{2+} = 1.20 \text{ \AA}$, $Ag^+ = 1.26 \text{ \AA}$) امکان‌پذیر است اما مقدار جانشینی متفاوت بوده و به حضور عناصر واسطه‌ای همچون آنتیموان و بیسموت بستگی دارد (جزی و شهاب‌پور، ۲۰۱۰). این جانشینی به شکل رابطه ۲ قابل انجام است:



شکل دیگر تمرکز نقره در گالن و سرب به صورت حضور در کانی‌های نقره‌دار مانند؛ تتراندريت-تانانتیت و آکانتیت است که به صورت ادخال در گالن و سرب حضور دارند. بالا بودن آنتیموان و نقره، حضور احتمالی تتراندريت-تانانتیت را نشان می‌دهد و کم بودن آنتیموان و بیسموت و بالا بودن نقره حضور احتمالی آکانتیت در گالن و سرب را نشان می‌دهد (کبودمهری و همکاران، ۲۰۲۲).

سرب پیرحاجات به واسطه گسل‌های متعدد و ایجاد مسیر و مجرا برای حرکت آب‌های سطحی و سیال، کانی‌سازی سوپرژن مس به لحاظ ارتفاعی در ترازهای پایین‌تر از تشکیل کانه‌سازی سرب رخ داده است که کانی‌سازی مس در این کانسار دارای غنی‌شدگی نسبتاً بالایی می‌باشد. در ترازهای نزدیک به کانه‌سازی سرب، کانی‌سازی مس همراه با سرب در زمینه سیلیسی رخ داده است.

نقره: عنصر نقره را می‌توان مهم‌ترین عنصر پس از سرب به عنوان فرآورده جانبی در نظر گرفت. میانگین نقره در سرب طبیعی کانسار پیرحاجات برابر ۲۷ ppm است. نقره به شکل‌های مختلفی می‌تواند در گالن و سرب متمرکز شود که از آن جمله به صورت محلول جامد و ادخال کانی‌های مختلف است. جانشینی نقره به جای سرب باتوجه

جدول ۲. نتایج آنالیز SEM، نمونه PT.05.116، کانسار پیرحاجات.

Table 2. Results of SEM analysis, sample PT.05.116, Pirhajat deposit.

Sample PT.05.116						
Zone	Zone 1			Zone 2		
Point	P. A	P. B	P.C	P. A	P. B	P. C
Mineral	Goethite	Chrysocolla	Goethite	Cuprite	Chrysocolla	?
Element (Wt.%)						
Pb	0.13	0	0.28	0	0	2.59
Ag	0	0	0	0	0	0
Cu	2.44	26.83	0.74	70.86	37.93	33.14
Au	0.01	0	0	0	0	0
Al	0	0.15	0	0	0.44	0
Fe	57.68	24.1	67.42	1.47	1.51	21.8
Zn	1.44	0.44	0.26	0	0	0
Sb	0	0	0	0	0	0.28
As	0	0	0	0	0	0
Cd	0	0	0	0	0	0.31
C	0	0	0	0	3.68	0
S	0	0	0	27.67	0.78	1.16
Si	1.66	13.94	1.28	0	14.53	3.18
O	36.63	34.54	30.02	0	40.05	37.56
Total	99.99	100	100	100	98.92	100.02

Sample PT.05.116						
Zone	Zone 3			Zone 4		
Point	P. A	P. B	P.C	P. A	P. B	P.C
Mineral	Galena	Covellite	Goethite	Covellite	Goethite	Tenorite
Element (Wt.%)						
Pb	79.88	0	1.35	1.47	0.14	0
Ag	0	0	0	0	0.09	0
Cu	1.16	69.09	0.86	68.84	0.96	16.36
Au	0	0	0	0	0	0
Al	0	0	0	0	0	0
Fe	5.69	0.59	65.16	0.53	69.1	0.22
Zn	0	0	0	0	0	0
Sb	0	0.26	0.53	0	0.26	0
As	0	0	0	0	0	0
Cd	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0
S	13.26	30.07	0	28.88	0	0.21
Si	0	0	1.45	0.28	1.77	0
O	0	0	30.65	0	27.68	83.21
Total	99.99	100.01	100	100	100	100

لیناریت، ماسیکوت (لیتارژ)، پلاتنریت، آنگلزیت، گالن، تنوریت، کوپریت و هم‌چنین سرب‌طبیعی شناسایی شد (شکل‌های ۱۶ و ۱۷). لذا وجود چنین کانی‌های اکسیدی از جمله اکسیدهای سرب بیان‌گر غالب بودن فاز اکسیدی در این کانسار نسبت به فاز سولفیدی می‌باشد. این فاز اکسیدی می‌تواند به دلیل سطحی بودن شرایط تشکیل کانسار و فعالیت فرآیندهای سوپرژن در محدوده معدنی پیرحاجات باشد. کانی‌هایی چون گوتیت، کوولیت، کریزوکلا، کوپریت و تنوریت نیز در نتایج SEM مشاهده شد.

در کانسار پیرحاجات باتوجه به بالا بودن مقدار آنتیموان و نقره و کم بودن بیسموت، عنصره نقره در کانی گروه فهلور، تترائدریت- تنانتیت متمرکز شده و به‌صورت ادخال درون سرب‌طبیعی وجود دارد. آنتیموان به مقدار بالا معمولاً در کانسارهای با دمای تشکیل پایین تمرکز می‌یابد (احمدی و افضلی، ۱۳۹۸). شناسایی کانی تترائدریت در کانسار پیرحاجات توسط تحلیل نتایج SEM انجام شده است.

مطالعات SEM-EDX: با تحلیل نتایج حاصل از مطالعات SEM-EDX (جدول ۲)، کانی‌هایی چون تترائدریت،

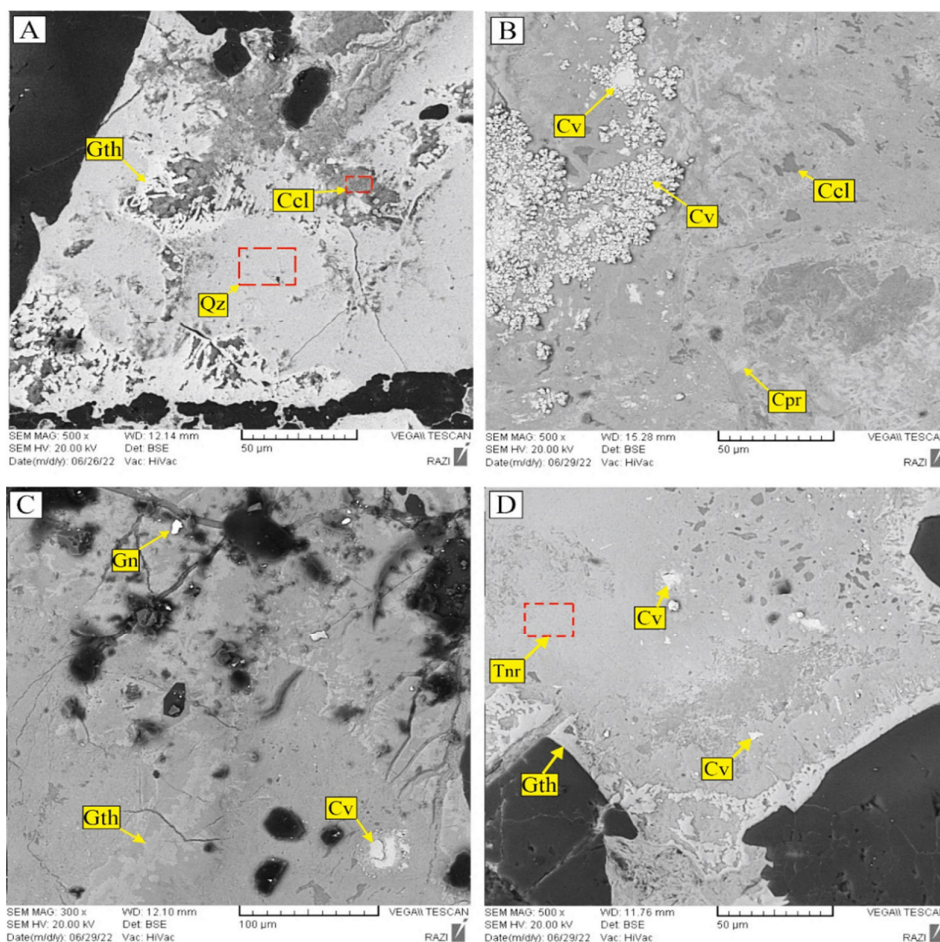
ادامه جدول ۲. نتایج آنالیز SEM، نمونه PT.30.123، کانسار پیرحاجات.

Continued Table 2. Results of SEM analysis, sample PT.30.123, Pirhajat deposit.

Sample	PT.30.123					
Zone	Zone 1			Zone 2		
Point	P. A	P. B	P. C	P. A	P. B	P. C
Mineral	Pb	Plattnerite	Tetrahedrite	Plattnerite	Pb	Anglesite
Element (Wt.%)						
Pb	98.18	60.68	0	72.69	100	82.39
Ag	0.3	0	2.3	0	0	0
Cu	0.52	1.22	36.08	0	0	0
Au	0	0	0	0	0	0
Al	0	0	0	0	0	0
Fe	0	0	0.64	0	0	0
Zn	0	0	4.21	0	0	0
Sb	0.99	0	24.53	0	0	0
As	0	0	2.86	0	0	0
Cd	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0
S	0	0	29.38	0	0	10.1
Si	0	0	0	0	0	0
O	0	38.1	0	27.31	0	7.51
Total	99.99	100	100	100	100	100
Sample	PT.30.123					
Zone	Zone 3			Zone 4		
Point	P. A	P. B	P. C	P. A	P. B	P. C
Mineral	Pb	Plattnerite	Linarite	Pb	Plattnerite	Chalcopyrite
Element (Wt.%)						
Pb	100	63.57	3.89	99.69	64.94	0
Ag	0	0	0	0	0	0
Cu	0	0	63.31	0.31	0.5	34.67
Au	0	0	0	0	0	1.7
Al	0	0	0.34	0	0	0
Fe	0	0	0	0	0.24	28.98
Zn	0	0	0	0	0	0
Sb	0	0	0	0	0	0
As	0	0	0	0	0	0
Cd	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0
S	0	0	32.45	0	0	34.65
Si	0	0	0	0	0	0
O	0	36.43	0	0	34.32	0
Total	100	100	99.99	100	100	100

پلاتنریت: این کانی به صورت پوشش خاکی سیاه‌رنگی در سطوح تونل‌ها، دیول‌ها و کارگاه‌های بهره‌برداری شده قدیمی و در بخش‌هایی با مقدار اکسیژن بالا به عنوان اصلی‌ترین کانی اکسیدی سرب در کانسار پیرحاجات حضور دارد. این کانی خاص مناطق با آب و هوای خشک است. این کانی در محیط‌های اسیدی، در پتانسیل اکسایشی (Eh) بالا به وجود می‌آید و با افزایش pH این کانی می‌تواند در پتانسیل اکسایش پایین‌تر نیز تشکیل شود (صباحی و همکاران، ۲۰۲۱).

تترائدریت - تنانتیت: تترائدریت با فرمول تجربی $(Cu_{12}Sb_4S_{13})$ و تنانتیت با فرمول تجربی $(Cu_{12}As_4S_{13})$ مهم‌ترین کانه‌های نقره و آنتیموان‌دار در کانسار سرب پیرحاجات می‌باشد که در این میان تترائدریت از سهم بیشتری برخوردار است. این کانی به صورت ادخال‌های بی‌شکل در داخل سرب طبیعی دیده شده است.
لیناریت: لیناریت با فرمول تجربی $PbCu(OH_2 - SO_4)$ یک کانی سوپرژن از گروه سولفوسالت می‌باشد که در کانسار سرب پیرحاجات به مقدار کم مشاهده شده است.



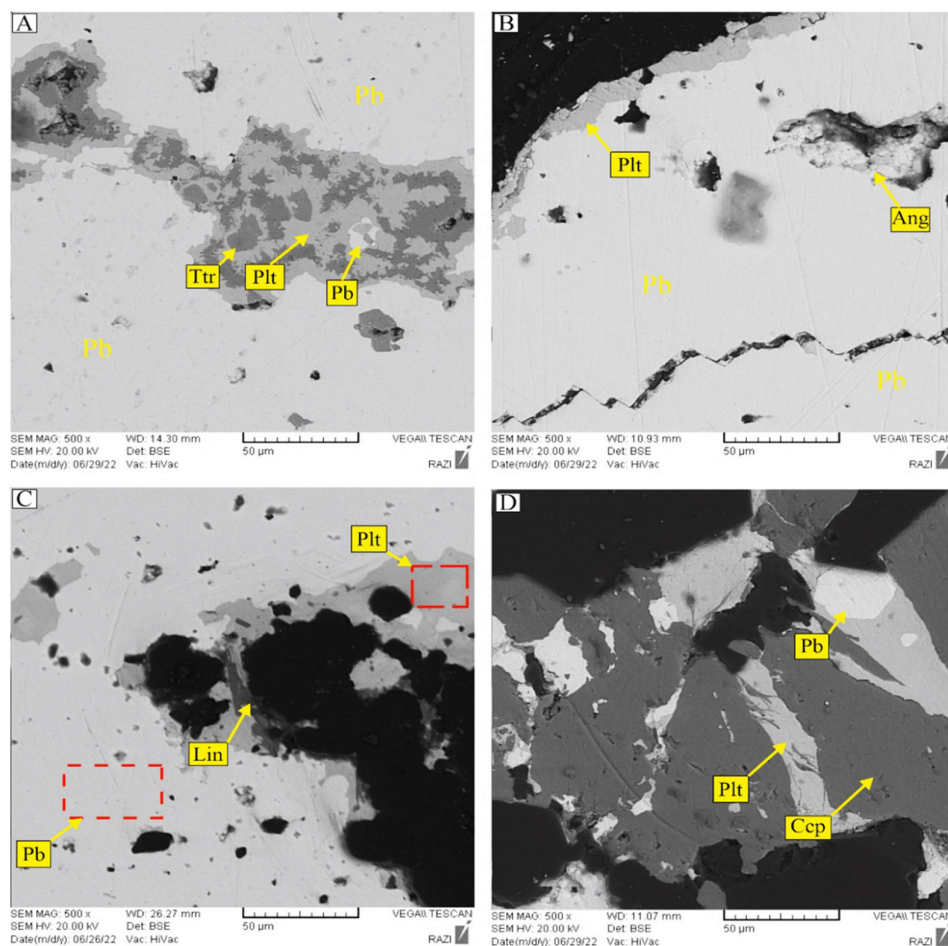
شکل ۱۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (BS) نمونه PT.05.116: A: Zone 1: کانی‌های کوارتز (Qz)، کریزوکلا (Ccl)، گوتیت (Gth)، B: Zone 2: کانی‌های کوولیت (Cv)، کریزوکلا (Ccl)، کوپریت (Cpr)، C: Zone 3: کانی‌های کوولیت (Cv)، گوتیت (Gth)، گالن (Gn)، D: Zone 4: کانی‌های کوولیت (Cv)، گوتیت (Gth)، تنوریت (Tnr)، کانسار پیرحاجات. (حروف اختصاری کانی‌ها از ویتنی و ایوانز، ۲۰۱۰)
Fig 16. Back-scattered image (BS) of sample PT.05.116, A: Zone 1 picture, Quartz minerals (Qz), Chrysocolla (Ccl), Goethite (Gth), B: Zone 2 picture, Covellite minerals (Cv), Chrysocolla (Ccl), Cuprite (Cpr), C: picture of Zone 3, Minerals Covellite (Cv), Goethite (Gth), Galena (Gn), D: picture of Zone 4, Minerals Covellite (Cv), Goethite (Gth), Tenorite (Tnr), Pirhajat deposit. (Mineral abbreviations from Whitney and Evans, 2010)

می‌باشد. این کانی زردرنگ بوده که در سطوح تونل مشاهده شده است. از کانی‌های شبیه به ماسیکوت، کانی

ماسیکوت (لیتارژ): ماسیکوت یک کانی اکسیدی سرب با فرمول تجربی PbO می‌باشد. نام دیگر این کانی لیتارژ

براساس شواهد میدانی، بررسی‌های ژئوشیمیایی و استنتاج فاز اکسیدی غالب از نتایج SEM_EDX مورد تأیید است.

مینوم می‌باشد که این کانی نیز ممکن است در این کانسار به مقدار کم وجود داشته باشد. وجود کانی ماسیکوت



شکل ۱۷. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (BS) از نمونه PT.30.123، Zone 1: A، کانی‌های تتراهدریت (Ttr) و پلاتنریت (Plt) و سرب طبیعی (Pb) که به صورت زمینه است، Zone 2: B، کانی‌های پلاتنریت (Plt) و آنگلزی (Ang) و سرب طبیعی (Pb)، Zone 3: C، کانی‌های لیناریت (Lin)، پلاتنریت (Plt) و سرب طبیعی (Pb)، Zone 4: D، کانی‌های پلاتنریت (Plt)، کالکوپیریت (Ccp) و سرب طبیعی (Pb)، کانسار پیرحاجات. (حروف اختصاری کانی‌ها از ویباز، ۲۰۱۰)

Fig 17. Back scattered image (BS) of sample PT.30.123, A: Zone 1 picture, Tetrahedrit (Ttr) and Plattnerite (Plt) minerals and Native lead (Pb) which is the background, B: Zone 2 picture, Plattnerite minerals (Plt) and Anglesite (Ang) and Native lead (Pb), C: Zone 3 picture, Linarite (Lin), Plattnerite (Plt) and Native lead (Pb) minerals, D: Zone 4 picture, Plattnerite (Plt) minerals, Chalcopyrite (Ccp) and Native lead (Pb), Pirhajat deposit. (Mineral abbreviations from Whitney and Evans, 2010)

عناصر سرب، نقره، مس، آنتیموان دارای غنی‌شدگی بالا و عناصر روی، کادمیم و آرسنیک دارای غنی‌شدگی متوسطی می‌باشد. وجود عناصر سرب، نقره، مس و آنتیموان نشان‌دهنده وجود کانی‌های سولفوسالت می‌باشد. براساس نتایج آنالیز شیمیایی از توده کانسنگی و با در نظر گرفتن عناصر کانسار ساز مهم در کانسارهای سرب و روی، نموداری جهت تعیین افق‌های دارای بیشترین کانی‌سازی تهیه شده (شکل ۱۹) که بیشترین کانی‌سازی در تونل‌های

ژئوشیمی

پس از دریافت نتایج تجزیه‌ی شیمیایی (جدول ۳)، مقدار میانگین خطای ۱۰٪ براساس نتایج آنالیز نمونه GSP_2 که نمونه استاندارد سازمان زمین‌شناسی آمریکا می‌باشد، محاسبه شد. با در نظر گرفتن نتایج عناصر کانی‌ساز، افق‌های اصلی کانی‌سازی شده شناسایی شد و با در نظر گرفتن عناصر مهم کانسارهای سرب ضرایب همبستگی برای این کانسار نیز محاسبه شد. بر طبق نتایج جدول ۴

از بررسی نتایج آنالیزهای شیمیایی و نمودار می‌توان نتیجه گرفت که کانی‌سازی در کانسار پیرحاجات دارای منطقه‌بندی و گسترش هم به صورت عمقی و هم به صورت جانبی می‌باشد (معانی جو و همکاران، ۲۰۱۲).

تراز ۱۲۲۶ تا ۱۲۳۰ و ۱۲۳۸ به صورت کانی‌سازی سرب و نقره (Horizon 1, Horizon2) و تراز ۱۲۰۵ تا ۱۲۱۰ کانی‌سازی سرب و نقره به همراه کانی‌سازی مس (Horizon 3) و در پایین‌ترین تراز (تراز ۱۱۹۵) نیز کانی‌سازی سرب، نقره و مس رخ داده است (Horizon 4).

شکل ۱۸. توالی پاراژنتیک در کانسار پیرحاجات.

Fig 18. Paragenetic sequence in the Pirhajati deposit.

Minerals	Pre-Mineralization	Mineralization Stage		Supergene
		Stage 1	Stage 2	
Ore minerals				
Native Lead		[Stage 1 to Stage 2]		
Galena		[Stage 1 to Stage 2]		
Tetrahedrit		[Stage 1]	[Stage 2]	
Sphalerite		[Stage 1]	[Stage 2]	
pyrite		[Stage 1 to Stage 2]		
Chalcocopyrite		[Stage 1]	[Stage 2]	
Cerussite				[Supergene]
Malachite				[Supergene]
Azurite				[Supergene]
Goethite				[Supergene]
Covellite				[Supergene]
Plattnerite				[Supergene]
Linarite				[Supergene]
Anglesite				[Supergene]
Cuprite				[Supergene]
Tenorite				[Supergene]
Gangue mineral				
Quartz	[Pre-Mineralization]	[Stage 1 to Stage 2]		
Calcite	[Pre-Mineralization]	[Stage 1 to Stage 2]		
Dolomite	[Pre-Mineralization]	[Stage 1]	[Stage 2]	
Barite			[Stage 2]	
Textures				
Brecciation		[Stage 1 to Stage 2]	[Stage 2]	
Open-Space Filling		[Stage 1]	[Stage 2]	
Veinlet		[Stage 1]	[Stage 2]	
Disseminated			[Stage 2]	
Replacement			[Stage 2]	

همبستگی ۰/۵۵۷، نقره-مس با ضریب ۰/۲۰۰، نقره-آنتیموان با ضریب ۰/۶۷۰، مس-آنتیموان با ضریب ۰/۵۶۹ و روی-کادمیم با ضریب همبستگی ۰/۸۹۶ دارای ارتباط معنی‌دار می‌باشند (جدول ۴). با بررسی‌های آماری، بیشترین ضریب همبستگی بین جفت عناصر سرب-نقره، نقره-مس و سرب-مس می‌باشد که به ارتباط ژنتیکی سه عنصر در محلول کانی‌ساز اشاره دارد. همبستگی قوی بین

بررسی همبستگی عناصر کانی‌ساز

به منظور بررسی رفتار ژئوشیمیایی عناصر داده‌ها توسط نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و همچنین برای بررسی همبستگی عناصر از روش پیرسون بهره گرفته شد. بر این اساس زوج عناصر سرب-نقره با ضریب همبستگی ۰/۶۵۳، سرب-مس با ضریب ۰/۳۳۲، سرب-روی با ضریب ۰/۱۳۰، سرب-آنتیموان با ضریب

جفت عناصر نقره- آنتیموان نیز همبستگی قابل توجهی را نشان می‌دهد.

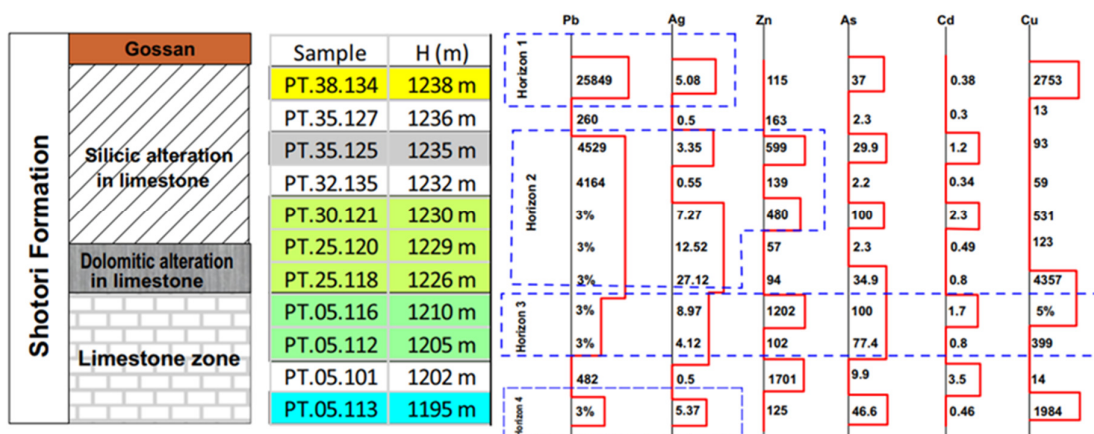
جفت عناصر سرب- نقره دلالت بر حضور نقره در شبکه بلوری گالن دارد و همبستگی قوی بین جفت عناصر نقره- مس و سرب- مس وجود سولفوسالت را نشان می‌دهد.

جدول ۳. نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی ICP-OES (برحسب ppm) بر روی نمونه کانسنگ در کانسار پیرحاجات.
Table 3. Results of chemical analysis by ICP-OES method (in ppm) on ore samples, Pirhajat deposit.

Element	PT. 05.113	PT. 05.101	PT. 05.112	PT-05- 116	PD. 1215	PR. 25.118	PR. 25.120	PT. 30.121	PT. 32.135	PT. 35.125	PT. 35.127	PT- 38.134	PS. 141.139
Ag	5.37	<0.5	4.12	8.97	<0.5	27.12	12.52	7.27	0.55	3.35	<0.5	5.08	<0.5
Al	2849	718	2609	6014	2181	2294	2076	7091	1956	1596	1107	26723	1333
As	46.6	9.9	77.4	>100	2.3	34.9	2.3	>100	2.2	29.9	2.3	37	4
Ba	>1%	48	4746	139	2551	198	33	1742	214	215	219	2623	24
Be	<1	<1	<1	1.6	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Ca	3174	>10%	3327	14699	27816	3358	66450	25570	73113	99375	>10%	1255	>10%
Cd	0.46	3.5	0.8	1.7	0.27	0.8	0.49	2.3	0.34	1.2	0.3	0.38	0.25
Ce	2	1	3	4	2	1	3	12	2	3	3	47	2
Co	2.6	<1	<1	4.8	<1	<1	<1	2.7	<1	<1	<1	2.6	<1
Cr	81	15	103	44	59	28	15	39	32	13	6	84	4
Cu	1984	14	399	>5%	103	4357	123	531	59	93	13	2753	34
Fe	9714	3701	7276	64013	7225	9133	4038	19257	4131	3658	1630	23359	1568
K	654	187	384	2527	364	307	590	1119	267	388	410	14089	355
La	1	1	1	2	1	1	2	10	1	2	2	38	2
Li	78	15	38	37	75	72	69	68	66	39	4	99	4
Mg	1637	>2%	2007	8233	14143	1916	>2%	13004	>2%	>2%	>2%	2310	>2%
Mn	72	120	32	26	65	38	59	56	74	91	44	28	35
Mo	35.9	0.57	116	270	0.64	5.5	1.6	224	0.67	19.2	0.58	3.8	0.67
Na	216	383	421	539	272	230	255	252	204	268	206	793	327
Ni	4	4	5	9	2	8	5	6	3	5	3	15	5
P	24	39	52	<10	41	<10	44	104	34	54	45	237	43
Pb	>3%	482	>3%	>3%	721	>3%	>3%	>3%	4164	4529	260	25849	749
S	3685	418	1997	2187	816	7968	9478	941	601	581	346	1040	488
Sb	95.09	9.84	84.59	>0.01%	1.15	>0.01%	21.27	>0.01%	1.02	1.5	0.96	36.87	0.86
Sc	<0.5	<0.5	<0.5	1	<0.5	<0.5	<0.5	1.2	<0.5	0.5	<0.5	3.6	<0.5
Sr	124	69	76	83	48	122	65	436	38	63	46	99	75
Th	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Ti	154	26	203	242	86	65	87	469	32	82	48	1728	74
U	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
V	9	6	11	14	3	3	6	13	3	5	5	44	11
Y	0.5	0.8	0.6	1.1	0.6	<0.5	0.6	1.6	0.6	1.2	0.8	4.7	0.6
Yb	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2	<0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.9	0.2
Zn	125	1701	102	1202	59	94	57	480	139	599	163	115	1
Zr	6	<5	6	15	<5	<5	<5	14	<5	<5	<5	54	<5

جدول ۴. ضرایب همبستگی عناصر کانه‌ساز به روش Pearson.
Table 4. Correlation coefficients of ore-forming elements by Pearson method.

Element	Ag	Pb	Cd	Cu	Zn	Sb
Ag	1					
Pb	0.653	1				
Cd	0.014	0.012	1			
Cu	0.200	0.332	0.204	1		
Zn	0.133	-0.130	0.896	0.457	1	
Sb	0.670	0.577	0.352	0.569	0.229	1



شکل ۱۹. نمودار افق‌های کانی‌سازی (Horizon1, Horizon2, Horizon3, Horizon4) در کانسار پیرحاجات (یوسفی و همکاران، ۱۴۰۱).
 Fig 19. Diagram of mineralization horizons (Horizon1, Horizon2, Horizon3, Horizon4) in Pirhajat deposit (Yousefi et al., 2022).

بحث

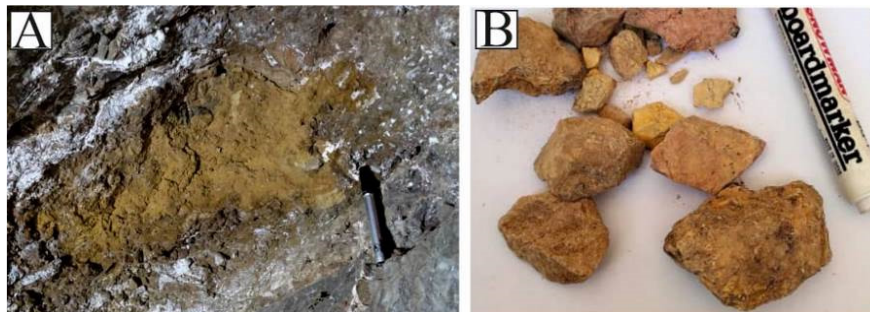
سازند شمشک شده است. کانی ماسیکوت (لیتارژ) در بررسی‌های صحرایی و براساس نتایج آزمایش SEM-EDX شناسایی شده است لذا باتوجه به مقادیر اندازه‌گیری شده عناصر اکسیژن و سرب در آنالیز SEM-EDX، ترکیب شیمیایی نزدیک به هم کانی‌های پلاتنیت، ماسیکوت، شواهد صحرایی و فاز اکسیدی غالب در کانی‌سازی، وجود هر سه کانی را در کانسار پیرحاجات تأیید می‌کند (شکل ۲۰). باتوجه به کانی‌های اکسیدی فراوان و تشکیل کانی‌ها در محل شکستگی‌ها و درزه‌ها نزدیک به سطح، می‌توان گفت که تشکیل کانسنگ پیرحاجات در ارتباط نزدیک با فرایند برون‌زاد بوده که حاصل هوازگی کانسنگ سولفیدی اولیه است. در نتیجه قرارگیری کانسنگ سولفیدی اولیه در شرایط اکسیدان سطحی، به کانسنگ اکسیدی تبدیل می‌شود و کانی‌های اکسیدی تشکیل می‌شود. هوازگی کانسنگ سولفیدی و تبدیل آن به کانسنگ اکسیدی معمولاً تحت‌تأثیر آب‌های زیرزمینی و هم‌چنین آب‌های جوی می‌باشد که وجود گسل‌های متعدد محدوده شرایط و مجرای مناسب برای ورود آب‌های سطحی و زیرزمینی را فراهم کرده است. بر اثر هوازگی پیریت‌های کانسنگ سولفیدی اولیه، کلاک آهنی^۱ نیز تشکیل شده است که به عنوان یک راهنمای اکتشافی مناسب برای این تیپ کانسارها در واحدهای دولومیتی ناحیه می‌باشد (شکل ۲۱). کانسار پیرحاجات در مقایسه با کانسار چاه‌سرب دارای کانی‌سازی تقریباً مشابه می‌باشد.

کانسار پیرحاجات یک کانسار چندفلزی سرب، روی، مس و نقره می‌باشد، که کانی‌زائی آن‌ها در یک پهنه گسلی در مرز دو واحد دولومیتی و دولومیت آهنکی شکل گرفته است. مهم‌ترین ماده معدنی در کانسار پیرحاجات که در حال استخراج می‌باشد فلز سرب می‌باشد. باتوجه به مقدار بالای سیلیس در نتایج شیمیایی نمونه‌های ماسه‌سنگی، بالا بودن مقدار سیلیس در توده کانسنگی و وجود فلز سرب همراه و در مواردی با میزبانی سیلیس، بنظر می‌رسد سرب از ماسه‌سنگ‌ها و ماسه‌سنگ‌های شیلی سازند شمشک مشتق شده باشد. کانی‌سازی در کانسار پیرحاجات به شدت تحت تأثیر فرآیندهای تکتونیکی و گسلی است، به نوعی که کانی‌سازی در محل تقاطع گسل‌های عرضی (Fn3, Fn4, Fn5) با گسل اصلی خاوری-باختری (Fm) تشکیل شده است. ضمن این‌که حفر تونل‌ها در این کانسار در راستای گسل اصلی انجام شده است. باتوجه به بافت‌های افشان و دانه‌ریز و پراکندگی رگه-رگچه‌ای در پهنه کانی‌سازی، بیش از دو فاز تکتونیکی در محدوده حاکم بوده است. وجود تکتونیک فعال و گسل‌های محدوده سبب ایجاد مجراهای متعدد برای نفوذ سیالات سطحی و جوی و اختلاط آن‌ها با سیالات زیرسطحی شده که به دنبال آن اکسیدی شدن سیال و ته‌نشست کانه‌ها از سیال در منافذ و شکستگی‌ها می‌شود. یک راندگی کلی به سبب عملکرد گسل فعال کلمرد، باعث رانده‌شدن سازند شتری بر روی

^۱Gossan

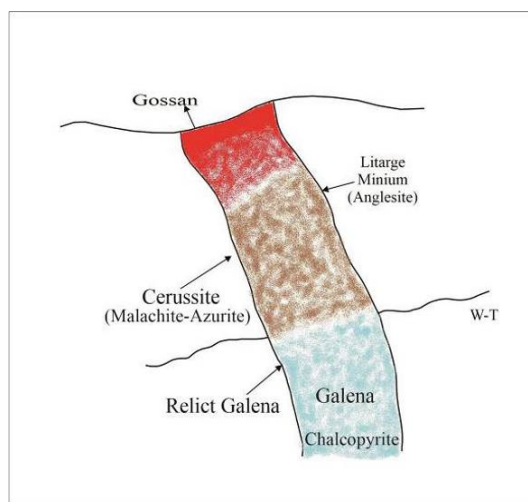
اکسیدی در کانسار پیرحاجات و کانسار چاهسرب می‌توان به عنوان رهیافتی برای وجود ذخایر غیرسولفیدی سرب در کمر بند فلززائی طبس- پشت‌بادام در بخش ازبک‌کوه- عشق‌آباد استفاده کرد.

در کانسار چاهسرب نیز کانی‌های اکسیدی (مانند: پلاتنیت، مینیوم) نیز تشکیل شده است که نشان دهنده فعالیت فرآیندهای برون‌زاد در این کانسار می‌باشد. لذا باتوجه به فرآیندهای برون‌زاد و تشکیل کانی‌سازی



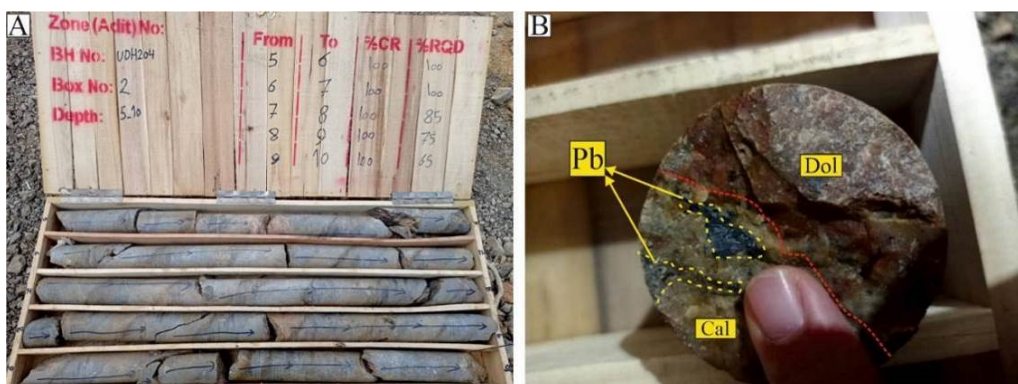
شکل ۲۰. A: رخنمون از کانی‌سازی ماسیکوت (لیتارژ)، B: نمونه دستی کانی ماسیکوت، کانسار پیرحاجات.

Fig 20. A: Outcrop from Massicot mineralization (Litarge), B: Hand specimen of Massicot mineralization, the Pirhajat deposit.



شکل ۲۱. مدل شماتیک از رخداد فرایند کانی‌سازی برون‌زاد در کانسار پیرحاجات.

Fig 21. Schematic model of supergene mineralization, Pirhajat deposit.



شکل ۲۲. A: مغزه‌های مربوط به یک جعبه حفاری، B: کانی‌سازی سرب در مغزه‌های حاصل از حفاری، گمانه UDH204، کانسار پیرحاجات، طبس.

Fig 22. A: Core from a core box, B: Lead mineralization in cores from drilling, borehole UDH204, the Pirhajat deposit, Tabas.

نتیجه‌گیری

وجود عناصر سرب، نقره، آنتیموان با غنی‌شدگی بالا بر اساس نتایج تجزیه شیمیایی ICP-OES و همبستگی قابل توجه بین این ۳ عنصر تمرکز عنصر نقره در کانی تتراندريت را تأیید می‌کند. کانی‌های اکسیدی بیانگر کانی‌سازی در فاز اکسیدی به عنوان فاز غالب و هم‌چنین وجود سرب طبیعی این کانسار را از دیگر کانسارهای سرب شناخته شده در ایران، متمایز می‌کند. فاز اکسیدی غالب و وجود خاک سرب‌اکسیدی نکته‌ای حائز اهمیت به لحاظ استخراج و فرآوری با سهولت بیشتر و سازگار با محیط‌زیست و بدون آلاینده‌گی ناشی از گوگرد کانی‌های سولفیدی می‌باشد که این نکته خود توجیهی از اقتصادی بودن این کانسار می‌باشد. هم‌چنین با توجه به کانی‌سازی اکسیدی در تیپ سوپرژن و مدل ارائه شده، انتظار وجود کانسنگ سولفیدی در عمق دور از ذهن نیست. با استناد به نتایج آنالیز شیمیایی و بررسی شواهد میدانی، وجود منطقه‌بندی در کانی‌سازی هم به صورت عمقی و هم به صورت جانبی مشاهده شد که می‌توان نتیجه گرفت کانی‌سازی دارای گسترش جانبی و عمقی می‌باشد، لذا با در نظر گرفتن این نکته و هم‌چنین عیار بالای سرب و وجود نقره دورنمای این کانسار را بسیار امیدبخش می‌کند. با توجه به این که تاکنون برای اثبات این موضوع عملیات و آنالیز خاصی صورت نگرفته، لذا نقطه حفاری مغزه‌گیری UDH204 در متر ۱۳۰ متری تونل ۱۲۰۵ در انتهای دومین دستک این تونل با شیب ۵۵ درجه به سمت بالا (نزدیک به سطح) با جهت جنوب‌خاوری در کمر بالای گسل اصلی با امتداد خاوری-باختری با عمق ۳۰ متر حفر شده که پس از شروع حفاری در متر ۱۴ متری به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر کانی‌سازی سرب در مغزه‌ها مشاهده شد که نتیجه امیدبخش این حفاری، نکته ذکر شده در خصوص گسترش جانبی در این کانسار را تأیید می‌کند (شکل ۲۲). به استناد نتایج حاصل از بررسی انجام شده در این پژوهش، مراحل کانی‌سازی در کانسار پیرحاجات به شرح زیر است:

- ۱) گسلش و برشی شدن واحد دولومیتی و آهک‌های دولومیتی (سازند شتری).
- ۲) انحلال بخشی از آهک‌های دولومیتی و ایجاد فضای کارستی.
- ۳) تشکیل سیالات گرمابی.

- ۴) نفوذ سیالات گرمابی غنی از Si در فضای درزه‌ها و شکستگی‌ها.
- ۵) تشکیل رگه‌ها و رگچه‌های سیلیسی و سیلیسی‌شدن سنگ میزبان.
- ۶) نفوذ محلول کانه‌دار (سیالات گرمابی) و واکنش سیالات با آهک و دولومیت و شرایط ترمودینامیکی و به دنبال آن ناپایداری کمپلکس‌های فازی و نهشت کانی‌ها.
- ۷) سپس فعالیت مجدد گسل‌هایی که در آن‌ها کانی‌سازی رخ داده و برشی شدن کانسار اولیه و اختلاط سنگ‌های باطله با ماده معدنی اولیه.
- ۸) نفوذ سیالات جوی از طریق مجراهای تکتونیکی و گسل‌ها و انحلال ماده معدنی و تشکیل محلول‌های اسیدی (غنی از عنصر سرب) و مهاجرت به سنگ میزبان (آهک و دولومیت).
- ۹) واکنش محلول اسیدی کانه‌دار با آهک و دولومیت و تشکیل کانی‌های ثانویه و اکسیدی و هم‌چنین سرب طبیعی در فضاها برشی به صورت رگچه‌ها و رگه‌های پراکنده.

تشکر و قدردانی

از تمامی عزیزانی که ما را در انجام این پژوهش یاری رسانند، کمال تشکر و قدردانی را داریم. از معاونت پژوهشی دانشگاه بوعلی‌سینا بابت حمایت مالی سپاسگزاریم.

References

- Asadi, M (2021) Geological map 1:1000, Zarin Kanyab Holding.
- Ghorbani, M (2013) Economic Geology Ore Deposits of Iran, Springer-Verlag, 640 pp.
- Guilbert, J. and Park, Ch (1997) The Geology of Ore deposits, W.H. Freeman and Company Publication, New York, 985 pp.
- Herron, M (1988) Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data, Journal of Sedimentary Petrology, 58(5): 820-829. <https://doi.org/10.1306/212F8E77-2B24-11D7-8648000102C1865D>.
- He, Y., Wu, T., Huang, Z., Ye, L., Deng, P. and Xiang, Z (2020) Genesis of the Maoping carbonate hosted Pb-Zn deposit, northeastern Yunnan Province, China: evidences from geology and C-O-S-Pb isotopes, Acta Geochimica, <https://doi.org/10.1007/s11631-020-00424-4>.
- Jazi, M. A. and Shahabpour, J (2010) Mineralogical, Textural, Structural and Geochemical Aspects of Nakhlak Lead mine,

- Whitney, D. L. and Evans, B. W (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals, *American Mineralogist*, 95: 185-187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>.
- Yousefi, B., Maanijou, M., Tale Fazel, E. and Balaei Chikan Olia, H (2022) Geology and mineralogy of Pirhajat Pb (Zn-Cu-Ag) deposit (N-W) Tabas. 14th Symposium of Iranian Society of Economic Geology. 296-303, in Persian.
- Isfahan, *Journal of Economic Geology*, 2(3): 131-151.
- Kaboudmehri, N., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A. and Zohdi, A (2022) Type and genetic model of the Toryan sediment – hosted Pb-Zn occurrence, NW Zanjan. *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES*, 32(1): 103-118. <https://doi.org/10.22071/gsj.2021.263678.1874>.
- Maanijou, M., Rasa, I. and Lentz, D (2012) Petrology, Geochemistry, and Stable Isotope Studies of the Chehelkureh Cu-Zn-Pb deposit, Zahedan, *Economic Geology*, 107 (4): P 683–712. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.4.683>.
- Maanijou, M., Fazel, E. T., Hayati, S., Mohseni, H. and Vafaei, M (2020) Geology, fluid inclusions, C–O–S–Pb isotopes and genesis of the Ahangaran Pb-Ag (Zn) deposit, Malayer-Esfahan Metallogenic Province, western Iran, *Journal of Asian Earth Sciences*, 195, P 104339. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104339>.
- Ahmadi, R. and Afzali, N (2019) Inversion of geophysical data and potential mapping of Robat-Arregijeh Pb-Zn deposit, Khomein, Markazi province, using integration of exploratory information in GIS, *Two Quarterly Journals of New Findings in Applied Geology*, 25(13): 17-32. In Persian. <https://doi.org/10.22084/nfag.2018.16097.1304>
- Roser, B. and Korsch, R (1988) Provenance signatures of sandstone- mudstone suites determined using discriminant function analysis of major element data, *Chemical Geology*, 67(1–2): 119–139.
- Rutner, A., Saeidi, A., Nabavi, M. H. and Hajain, J (1991) Geological Quadrangle of Eshgh-Abad 1:250000, Geological Survey and Mineral exploration of Iran, Series N. 7358.
- Rutner, Nabavi, M. H. and Hajian, J (1994) Geological Sheet of Shirgesht 1:100000, Geological Survey and Mineral exploration of Iran, Series N. 16.
- Sabahi, F., Lotfi, M., Afzal, P, and Nezafati, N (2021) Mineralization, fluid inclusion and sulfur stable isotope studies in the Gardane-Shir Pb-Zn deposit, Ardestan, Isfahan province, *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES*, 31(1): 177-186. <https://doi.org/10.22071/gsj.2018.115540.1377>.
- Soltani, S., Karimpour, M. H., Hommam, M. and Heydarian Shahri, M. R (2016) Mineralogical, textural, structural and geochemical aspects of the of Chahsorb Lead mine, Tabas, 24 (2): 231-242, in Persian. <http://ijcm.ir/article-1-95-fa.html>.
- Stocklin, J (1968) Structural history and tectonics of Iran. a review, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52(7): 1229-1258. <https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>

Mineralization studies using electron microscope and determination of minor minerals in multi-metallic deposit (lead-copper-zinc-silver) Pirhajat, north west of Tabas

B. Yousefi¹, M. Maanijou^{2*}, E. tale fazel³ and M. Asadi⁴

1- M. Sc., student. Dept., of Geology, Faculty of Science, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran

2-Prof., Dept., of Geology, Faculty of Science, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran

3- Assist. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Science, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran

4- M. Sc., (graduated), Dept., of Geology, Faculty of Sciences, Birjand University, South Khorasan, Iran

* mohammad@basu.ac.ir

Received: 2023/3/28 Accepted: 2023/6/27

Abstract

The Pirhajat deposit is 5 km northeast of Pirhajat, 120 km northwest of Tabas in the Pirhajat mountain range. This deposit is in the Central Iranian subcontinent and the Tabas-Poshtbadam metallogenical province in Uzbakkoh-Eshghabad section. The geological units of the region include two carbonate rock units (dolostone and dolomitic limestone) belonging to the Middle Triassic Shotori Formation and the sandstone of the Lower Jurassic Shemshak Formation. On the basis of K_2O/Na_2O versus SiO_2/Al_2O_3 diagram, the sandstone unit with lith-arenite lithology is plotted in the passive continental margin area. The mineralization in this deposit is strongly controlled by tectonic processes in which the main fault named FM is the most important, with an east-west strike-slip extension and a slope of 70-80 degrees to the south. The mineralization occurred in two hypogene stages including native lead, galena, pyrite, tetrahedrite, chalcocopyrite, and sphalerite, and a supergene stage includes lead oxide minerals (plattnerite, massicot-minium), linarite, anglesite, cuprite, malachite, azurite, chrysocolla, covellite, tenorite, goethite, cerusite and gangue minerals consist of barite, quartz, calcite and dolomite. The main mineable metal that can be extracted in this deposit is lead as native lead, plattnerite (lead oxide) and to a lesser extent lead sulfide (galena). On the basis of the results of ICP-OES analysis (13 samples), lead has an average grade of 3% and the maximum silver in this deposit is 27 ppm, which shows the relatively high grade of lead and the presence of silver, that show a promising economic outlook. Also, zinc has an average grade of 372 ppm (in 13 samples). Copper also has a grade of more than 5% in some samples. On the basis of these studies and analyses, the dominant mineralization phase in this deposit is the oxide phase, which is important to know for processing, as well as the existence of zoning in mineralization (formation of copper-bearing minerals at the lowest level, then lead-bearing minerals and to the surface the barite mineral) in depth and laterally. Extending of mineralization in depth and margins will be significant.

Keywords: Native lead, Lead oxide, Zoning, Polymetal, Pirhajat, Tabas block, Central Iran zone

Introduction

The Pirhajat deposit is 5 km northeast of Pirhajat, 120 km northwest of the Tabas city at 56°31'26"E longitude and 34°13'08"N latitude in the Pirhajat mountain range in the Central Iran zone and in the Tabas-Pushtbadam metallogenical belt. The most important mines and occurrences of lead and zinc in this region include Kohmari, Ushk, Gardo, Uzbakkuh, Shore, Qale, Raqqe, Sibzar, Qochkuhi, Pirhajat (Kalar), Chahsorb, Talkhab, Deq Sarajiv Pusht kale, Gushkamar, Nignan, Bidu, Koiro, Qavastu, Govehsiah (Qarshir Ali) and Kuhsiah

(Khormayu). The geology of the mining area includes the Middle Triassic Shotori Formation (TR_{sh}^d) and the Early Jurassic Shemshak Formation (Js). The most recently identified units include alluvial sediments (Q^{la}), alluviums and fluvial terrace of the present era (Q^{al}) (Figure 3). The Shotori Formation includes yellowish dolostones, and the upper part includes the Spehak limestone member. The Shemshak Formation in the area includes highly weathered sandstones and siltstones that are associated with coal layers in some places.

The Pirhajat mine is an underground mine consisting of 4 main tunnels at 1205, 1225, 1232 and 1238 m elevations above sea level, that was extracted by Russian miners about 70 years ago (about 1945-1950). The main mineralization in this deposit is native lead, lead oxides and galena. This area in 2013 was subjected to detailed exploration by the Rasam Mining Company. So far, there is no information about the Pirhajat deposit in geologic literature, so the objective of this research is to investigate the mineralization, paragenetic sequence and litho geochemistry of the deposit.

Research methodology

Several field visits and surveys were done to identify lithology units in the area. Forty samples from different levels were collected in the tunnels of the Pirhajat deposit, among them 19 thin sections, 15 thin-polished sections, and 5 polished sections were made. Mineralogical and petrological studies of thin and thin-polished sections were done in the geological laboratory of the Payamenoor University of Isfahan using an Olympus microscope model BX41. Two samples were studied for mineral chemistry in the Razi Karaj Metallurgical Research Center by SEM-EDX analysis, which were examined by VEGA/TESCAN scanning electron microscope with 20 kv voltage. Sixteen samples of ore were analyzed in the Zarazma laboratory in Tehran by ICP-OES method. Preparation method for 13 powdered ore samples was four acid digestions and for that of 3 powdered sandstone samples was lithium metaborate fusion.

Result

Ore minerals identified in the Pirhajat deposit include native lead, galena, anglesite, plattnerite, massicot, linarite, tetrahedrite, sphalerite, chalcopryrite, goethite, tenorite, cuprite, cerussite, barite, malachite, azurite, chrysocolla. Silver is present in the crystal network of galena along with sulfosalt minerals such as tetrahedrite. Small amount of gold also occurred associated with chalcopryrite. One important point in this deposit is the presence of lead oxide mineralization as well as native lead. The area has been affected by tectonic processes and so the mineralization has occurred in many places at the intersection of accessory faults with the main fault. On the basis of the field surveys, mineralization in this

deposit has a zoning that indicates the continuation of mineralization laterally and in depth. Drilling of the UDH204 borehole (Figure 16) and the observation of mineralization in the cores confirms this. Based on the results of chemical analysis, the average grade of lead is 3%, and copper has a grade of more than 5%; the average grade of zinc is 372 ppm, and the highest grade of silver is 27 ppm (Table 4). According to the results of the analysis of the main oxides of the sandstone samples of the Shemshak Formation and on the basis of the diagram of K_2O/Na_2O versus SiO_2/Al_2O_3 , this sandstone unit is placed in the passive margin, and also on the basis of the diagram of $Log (Fe_2O_3 + K_2O)$ versus $Log (SiO_2 + Al_2O_3)$ they are plotted in the litharenite area.

Discussion

If the elemental contents in different parts are considered, the main mineralized horizons were identified (Figure 15) and on the basis of the important elements of lead deposits, correlation coefficients were also calculated for this deposit (Table 5). Lead, silver, copper, and antimony elements have high enrichments and zinc, cadmium, and arsenic have medium enrichments (Table 4). The presence of lead, silver, copper and antimony indicate the presence of sulfosalt mineral (tetrahedrite). On the basis of statistical analysis, the highest correlation coefficient is between the pairs of lead-silver, silver-copper and lead-copper, which indicate the genetic relationship of these three elements in the mineralizing fluids. The strong correlation between lead-silver elements indicates the presence of silver in the crystal lattice of galena, and the strong correlation between the pairs of silver-copper and lead-copper elements indicate the presence of sulfosalt. The pair of silver-antimony also shows a significant correlation. Very active tectonic movements have created numerous conduits for the penetration of surface and atmospheric fluids and their mixing with subsurface fluids, which is followed by the oxidation of the fluid and the forming of minerals from the fluid in the pores and fractures.

Conclusion

One of the most important achievements of this research is the identification of native lead and the identification of the dominant oxide phase

in mineralization in this deposit. The presence of natural lead in the Pirhajat deposit is the distinguishing feature of this deposit from other lead deposits, as well as the Chah Sorb deposit and the Talkhab deposit near the Pirhajat deposit.

Mineralization in the Pirhahajat deposit was strongly influenced by tectonic and faulting processes and included hypogene minerals that

occurred during two stages and then supergene mineralization.

Acknowledgments

We are grateful to all those who helped us in this research. We are grateful to the research department of the Bu-Ali Sina University, Hamedan, for the financial support of this research.