زمین‌شناسی، کانه‌زایی و مطالعه سیالات درگیر در کانسار طلای لخشک، جنوب غرب کمربند زمین‌درز سیستان

نسیم حیدریان دهکردی[۱]، شجاع‌الدین نیرومند[۲و*]، حسینعلی تاج‌الدین[۳] و رضا نوزعیم[۴]

۱. استادیار، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاددانشگاهی
۲. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران
۳. استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس
۴. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۱

چکیده

کانسار لخشک در ۲۸ کیلومتری شمال‌غرب زاهدان و در بخش جنوب‌غربی کمربند زمین‌درز سیستان واقع شده است. اصلی‌ترین رخنمون‌های گستره لخشک تناوبی از شیست‌ها شامل کالک‌شیست و کوارتز شیست با سن ائوسن هستند. این سنگ‌ها در حد رخساره شیست سبز دگرگون شده و توسط توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی و دایک‌های داسیتی-ریولیتی با سن الیگوسن قطع شده‌اند. کنترل‌کننده‌ی کانی‌سازی طلا-آنتیموان در کانسار لخشک ساختاری است و توسط گسل و کمربند برشی دگرسان با راستای شمال‌شرق-جنوب‌غرب، که در همبری توده گرانیتوئیدی و واحد کالک‌شیست رخ داده است، کنترل می‌شود. بالاترین عیار طلا (۳/۵ گرم در تن) با شدیدترین دگرسانی‌های سیلیسی و سولفیدی رخ داده در بخش‌های داخلی کمربند برشی لخشک همراه با دگرشکلی شکل‌پذیر و شکنا (درز، شکستگی و رگه-رگچه) مرتبط است. کانی‌شناسی کانسنگ ساده و شامل پیریت، پیریت آرسنیک‌دار، استیبنیت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت، پیروتیت، اسفالریت، طلا، الکتروم، گوتیت و استیبیکونیت است. مطالعه سیالات درگیر بر روی کوارتزهای کانسنگ‌های طلادار، نشان‌دهنده دمای همگن شدن در رگه و رگچه‌های کوارتز-سولفیدی همراه با کانه‌زایی بین ۲۰۰ تا ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد با درجه شوری هشت تا ۱۳ درصد وزنی معادل نمک طعام است که با فرایند اختلاط و رقیق شدگی سازگار است. بر اساس مطالعات زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و مطالعه سیالات درگیر، کانسار طلای لخشک در گروه کانسارهای تیپ کوهزایی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: دگرسانی سیلیسی-سولفیدی، کانسار طلای لخشک، کمربند برشی شکنا-شکل‌پذیر، مطالعات سیالات درگیر.

مقدمه

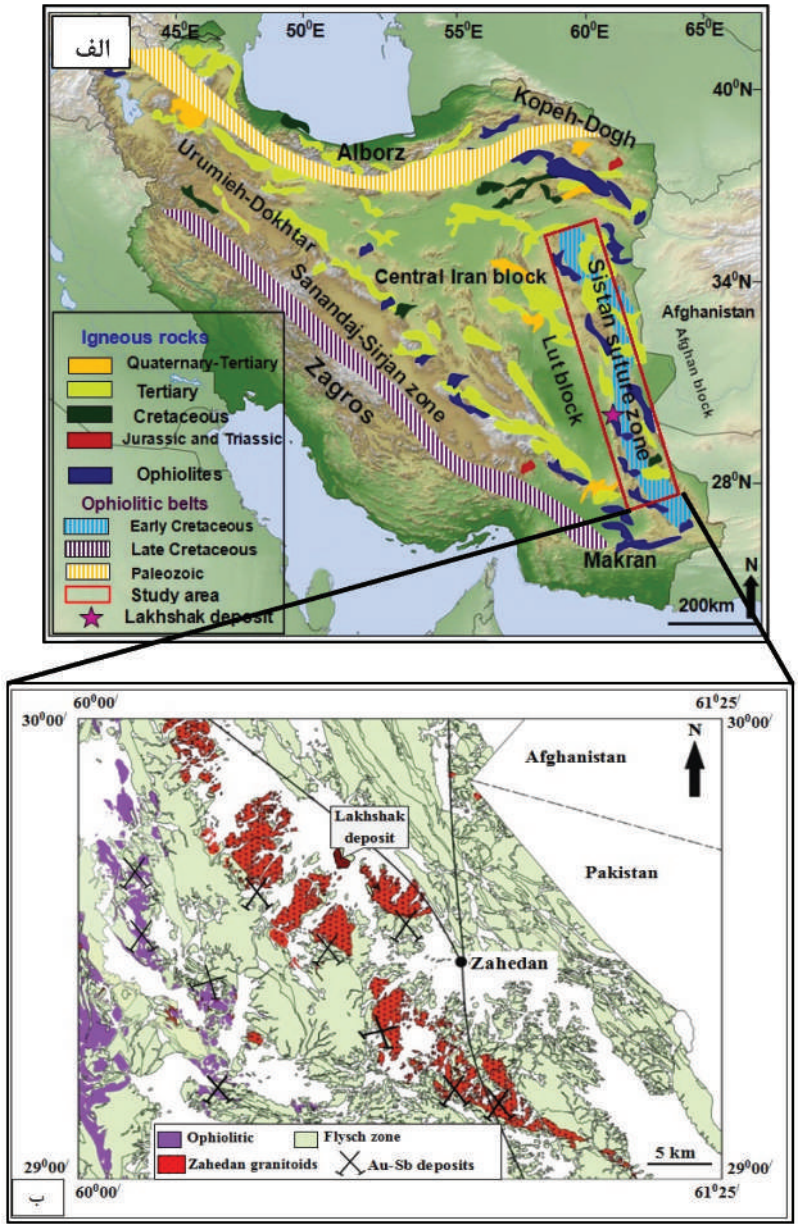
بر اساس نظرات گروز و گلدفارب (Groves and Goldfarb، 2003)، کانسارهای طلای کوهزایی، یکی از مهم‌ترین کانسارهای طلا هستند و بیش از نیمی از تولید طلای جهان را به خود اختصاص داده‌اند. موقعیت شکل‌گیری این تیپ از کانسارها بیشتر در کمربندهای کوهزایی-دگرگونی و موقعیت فرورانش حاشیه قاره‌ای است (Goldfarb and Santosh، 2014؛ Groves et al.، 2005).

* نویسنده مرتبط: niroomand@ut.ac.ir

این تیپ از کانسارها از نوع اپی‌ژنتیک است و کنترل‌کننده آنها عوامل ساختاری از جمله گسل، چین و پهنه برشی است (Pitcairn، 2021). کمربند زمین‌درز سیستان یکی از کمربندهای متالوژنیکی جوان و مهم واقع در جنوب شرق ایران و بین دو بلوک قاره‌ای لوت و افغان است (شکل ۱-الف) (Shafaii Moghadam and Stern، 2015؛ Tirrul et al.، 1983؛ Camp and Griffis، 1982) و میزبان بسیاری از کانسارهای فلزات پایه و طلا-آنتیموان است. این کمربند از نظر زمین‌شناسی، ساختاری و ژئودینامیکی، منطبق بر حاشیه فرورانش قاره‌ای است و می‌تواند پتانسیل میزبانی کانسارهای طلای تیپ کوهزایی را دارا باشد (Heydarian Dehkordi et al.، 2022؛ نیرومند، ۱۳۹۹). بر خلاف پهنه سنندج-سیرجان که کانسارهای تیپ کوهزایی متعددی در آن شناسایی و گزارش شده است، در کمربند زمین‌درز سیستان پژوهش چندانی در این خصوص انجام نشده است. بنابراین تاکنون کانسارهای طلای تیپ کوهزایی در این کمربند گزارش نشده است. کمربند زمین‌درز سیستان میزبان کانسارهای مهم آنتیموان و طلا-آنتیموان از جمله کانسار سفیدابه (الیاسپور و همکاران، ۱۳۸۹)، بائوت (مجددی مقدم و همکاران، ۱۴۰۰)، سفیدسنگ و درگیابان (بومری و همکاران ۱۳۹۷)، شورچاه و توزگی (مرادی، ۱۳۹۱) و کانسار لخشک (نیرومند، ۱۳۹۷؛ تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۹۶؛ مظلوم و همکاران، ۱۳۹۶) است (شکل ۱-ب). کانسار لخشک واقع در جنوب‌غرب کمربند زمین‌درز سیستان، یکی از کانسارهای مهم طلا-آنتیموان است (شکل ۱) و بر اساس شواهد موجود می‌تواند مستعد کانه‌زایی طلای تیپ کوهزایی باشد. مظلوم و همکاران در سال ۱۳۹۶، کانسار لخشک را از نوع تیپ اپی‌ترمال معرفی کردند. نیرومند در سال ۱۳۹۷، با توجه به شواهد موجود، احتمال حضور طلا را به‌صورت تیپ کوهزایی در گستره کانسار لخشک مطرح کرد. در این پژوهش، با توجه به نظرات متناقض و ابهامات موجود درخصوص ژنز و مکانیسم کانه‌زایی در این کانسار، ویژگی‌های زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌شناسی، سیالات درگیر و در نهایت تیپ و خاستگاه کانه‌زایی کانسار لخشک مورد بررسی قرار گرفتند. مطالعه ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زایی این کانسار می‌تواند برای اکتشاف این نوع از کانسارهای طلا در بخش‌هایی از جنوب غرب کمربند زمین‌درز سیستان، که شرایط زمین‌شناسی مشابهی دارند، مورد استفاده قرار گیرد.

روش مطالعه

این پژوهش شامل دو بخش مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی است. مطالعات صحرایی شامل مشاهدات زمین‌شناسی و برداشت نمونه از کمربندهای دگرسان و کانسنگی در گستره کانسار است. در این مرحله بالغ بر ۷۸ نمونه سنگی از رخنمون‌ها و ترانشه‌ها برداشت شده است. در مرحله مطالعات آزمایشگاهی، پس از بررسی‌های مقدماتی، از میان نمونه‌های برداشتی، تعداد ۲۲ مقطع نازک، ۲۶ مقطع نازک-صیقلی و نه مقطع دو بر صیقلی تهیه و به لحاظ ویژگی‌های سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری، ساخت، بافت و سیالات درگیر مطالعه شدند. به‌منظور مطالعات زمین‌شیمی کانسار، از کمربندهای کانسنگی رخنمون یافته در امتداد ترانشه‌ها ۱۰ نمونه برداشت شد. نمونه‌های برداشت شده با استفاده از روش Fire Assay (برای طلا) و ICP-OES (برای سایر عناصر) در مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران آنالیز شدند. همچنین به‌منظور شناسایی نوع و شیمی کانه‌های موجود در کانسنگ‌های طلادار، ۱۱ نمونه حاوی کانه‌های سولفیدی و طلا انتخاب و در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران، توسط دستگاه الکترون میکروپروب مدل EPMA Cameca SX-100، ساخت کشور فرانسه آنالیز و مطالعه شدند. مطالعات پتروگرافی و میکروترمومتری سیالات درگیر در کانسار لخشک به‌صورت هم‌زمان در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات و فراوری مواد معدنی ایران و آزمایشگاه میکروترمومتری دانشگاه تهران انجام شد. در هر دو آزمایشگاه نمونه‌ها با استفاده از صفحه گرمایش-سرمایش مدل Linkam (THMS600)، نصب شده بر روی میکروسکوپ نوری Zeiss، مطالعه شدند. دستگاه‌های مورد استفاده، به دو کنترل‌گر سرمایش (LNP)، گرمایش (TP94)، مخزن آب برای خنک‌سازی دستگاه و مخزن ازت برای پمپ نیتروژن، مجهز هستند. دامنه دمایی



شـــکل ۱. الـــف) موقعیت قرارگیـــری کمربندهای افیولیتی و کمربند زمین درز سیســـتان در جنوب شـــرق ایـــران، ب) موقعیت جغرافیایی کانســـارهای مهم آنتیموان و طلا-آنتیموان در کمربند زمین‌درز سیســـتان. موقعیت قرارگیری کانسار لخشـــک با ستاره مشخص شده است (Biabangard et al., 2019; Stampfli et al., 2002)

دســـتگاه‌ها ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه ســـانتی‌گراد و دقت آنها ۱± درجه سانتی‌گراد است. کالیبره شدن دستگاه‌ها با سیالات درگیـــر مصنوعی CO_2 در دمای ذوب حـــدود ۵۶/۶- درجه ســـانتی‌گراد و دمای همگن شدن نقطه بحرانی حدود ۳۷۴ درجه سانتی‌گراد (برای H_2O)، انجام شد. در این مطالعات، برای جلوگیری از ترکیدن میانبارها، ابتدا فرایند سرمایش و سپس گرمایش انجام شد.

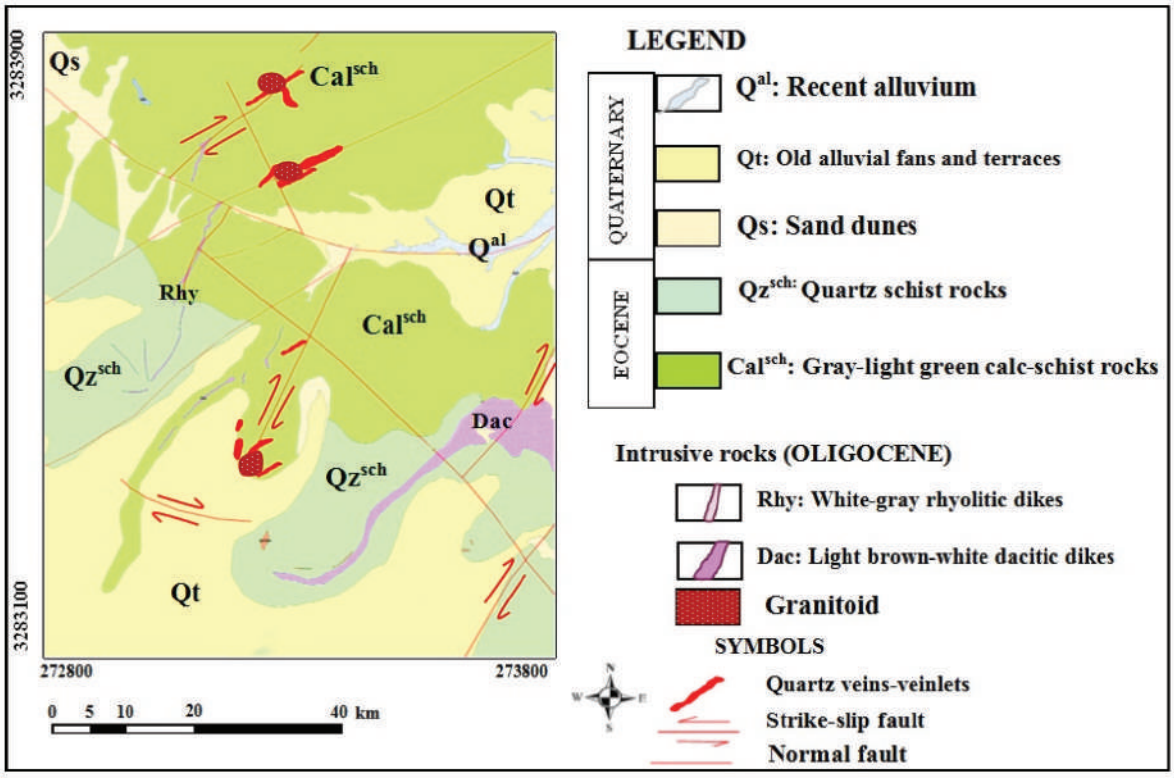
زمین‌شناسی

کانســـار لخشـــک بخشـــی از برگـــه ۱:۲۵۰/۰۰۰ زاهدان اســـت و به لحاظ ســـاختاری در بخش جنوب غربی کمربند زمین‌درز سیســـتان، ۲۸ کیلومتری شمال‌غرب زاهدان و در هفت کیلومتری غرب روســـتای لخشک در استان سیستان و بلوچســـتان و شـــهر زاهدان واقع شده اســـت (شکل ۱). رخنمون‌های سنگی گستره کانسار، مجموعه‌ای از شیست‌ها

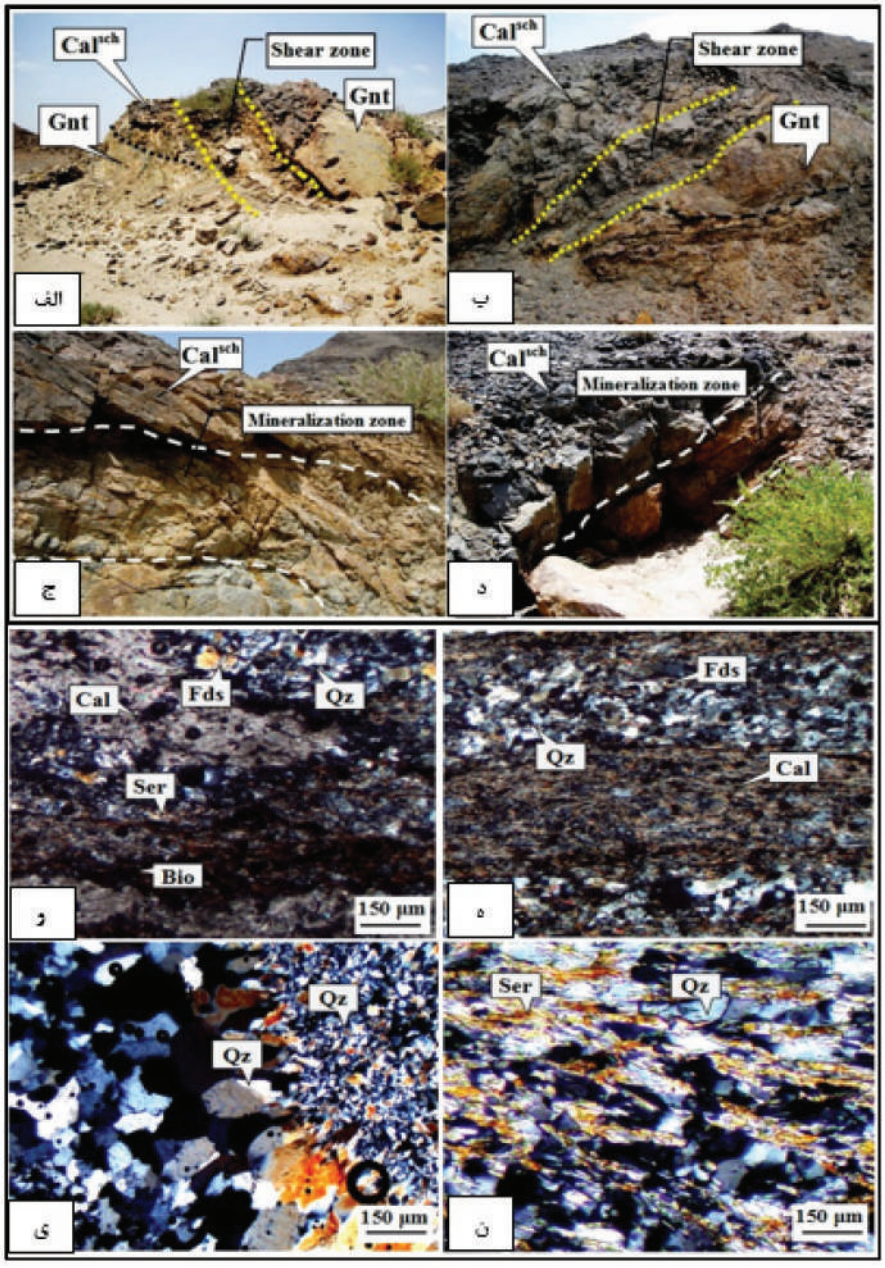
با ترکیب سنگ‌شناختی کالک‌شیست و کوارتز شیست مربوط به ائوسن هستند و در حد رخساره شیست سبز دگرگون شده و توسط توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی و دایک‌های با ترکیب ریولیتی و داسیتی مربوط به الیگوسن قطع شده‌اند (Tirrul et al., 1983). به‌طورکلی، بر اساس توالی ساختارها نسبت به یکدیگر، سه مرحله دگرشکلی در گستره لخشک قابل مشاهده است. دگرشکلی مرحله اول هم‌زمان با دگرگونی ناحیه‌ای رخ داده است و نتیجه آن ایجاد برگوارگی نسل اول (S1) و شکل‌گیری رگه‌های موازی است. مهم‌ترین مرحله دگرشکلی در گستره لخشک، مرحله دوم است. در طی این مرحله عمده‌ترین تغییرات ساختاری شامل توسعه و گسترش برگوارگی (S2) و خطوارگی کششی در واحدهای سنگی پهنه رخ داده است. به دنبال افزایش دگرشکلی ناشی از فاز دوم در گستره، علاوه بر چین‌خوردگی مجدد چین‌ها، رگه‌های کوارتزی کانه‌دار نیز هم‌روند با چین‌ها، چین‌خورده و در برخی موارد گسلیده شده‌اند. این مسأله بیانگر افزایش تنش و شدت دگرشکلی حاکم در گستره لخشک است. بر این اساس، می‌توان بیان داشت، میزبان کانه‌زایی طلا در پهنه لخشک، ساختارهای شکل‌پذیر مرتبط با فاز دگرشکلی می‌باشد. جوان‌ترین فاز دگرشکلی در گستره مورد مطالعه، دگرشکلی مرحله سوم است. ساختارهای ایجاد شده توسط این مرحله اغلب شکنا است و با تشکیل گسل، درز و شکستگی همراه است. بر اساس شواهد موجود، ساختارهای شکنای مرتبط با دگرشکلی مرحله سوم در پهنه مورد مطالعه، برای نهشت و تمرکز طلا از اهمیت بیشتری در مقایسه با مراحل قبلی برخوردار هستند. کمربند اصلی کانی‌سازی طلا در گستره کانسار لخشک، منطبق بر یک کمربند گسلی و کمربند برشی دگرشکل و دگرسان شده با ابعاد کمتر از ۵۰۰ متر با راستای شمال‌شرق-جنوب‌غرب با شیب عمومی کمتر از ۵۰ درجه به سمت شمال‌غرب است (Heydarian Dehkordi et al., 2022). به‌طور خلاصه زمین‌شناسی واحدهای سنگی در گستره کانسار لخشک به شرح زیر می‌باشد:

واحد کالک‌شیست (Cal^{sch}) (ائوسن)

واحد کالک‌شیست (Cal^{sch}) بیشترین گسترش را در گستره لخشک دارد (شکل ۲). در همبری این واحد با توده گرانیتوئیدی، کمربند گسلی-برشی رخ داده است.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ از گستره کانسار لخشک (برگرفته از نقشه تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۹۶، با کمی تغییرات)



شکل ۳. الف، ب، ج و د) رخنمون واحد کالک‌شیست که کانسنگ دربردارنده کانه‌زایی طلا-آنتیموان در گستره لخشک است و نمایی از کمربند گسلی-برشی میزبان کانه‌زایی طلا که در همبری واحد کالک‌شیستی و توده گرانیتوئیدی رخ داده است. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری با نیکول‌های متقاطع (XPL)) از واحد کالک‌شیست در گستره لخشک، و، ه) در مقاطع میکروسکوپی نوارهای روشن شامل کوارتز به همراه فلدسپات در تناوب با نوارهای تیره بیوتیت و سریسیت قابل مشاهده هستند، ی) ریز شدگی بلورهای کوارتز و ن) ساختار میکا ماهی در کانی سریسیت قابل مشاهده است. (Bio: بیوتیت؛ Cal: کربنات؛ Fds: فلدسپات؛ Qz: کوارتز و Ser: سریسیت) (نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از مقاله Whitney and Evans (2010) اقتباس شده است)

این واحد میزبان اصلی کانه‌زایی طلا-آنتیموان است و درجات مختلفی از دگرشکلی را متحمل شده است. بخش‌های پرعیار کانسنگ که با کانه‌زایی طلا-آنتیموان همراه هستند، مربوط به رگه و رگچه‌های کوارتز-سولفیدی می‌باشند. بخش‌های بیشتر دگرشکل و دگرسان شده از کمربند برشی در واحد کالک‌شیست و یا در همبری توده‌های گرانیتوئیدی با این واحد رخنمون دارند (شکل ۳-الف و ب). شواهد دگرشکلی پیشرونده از جمله برگوارگی، تفکیک کانی‌های تیره و روشن و ایجاد لایه‌بندی تفریقی یا ساختار نواری در رخنمون‌ها و مغزه‌های

حفاری واحدهای کالک‌شیستی گستره دیده می‌شوند (شکل ۳-الف، ب، ج). در طی فازهای دگرشکلی مرحله دوم، نوارهای تیره و روشن چین‌خورده‌اند (شکل ۳-د). در مقاطع میکروسکوپی نوارهای روشن شامل کوارتز به همراه فلدسپات در تناوب با نوارهای تیره بیوتیت و سریسیت می‌باشند (شکل ۳-و، ه) که کانی‌های اصلی از کوارتز، فلدسپات، سریسیت، آمفیبول (عمدتاً از نوع بلورهای کشیده اکتینولیت)، کلریت، بیوتیت و کربنات تشکیل شده است. کوارتز در این واحد کانی اصلی است و در اثر عملکرد کمربند برشی و دگرشکلی در گستره، خاموشی موجی، تبلور مجدد دینامیکی، رشد در سایه واتنشی و ریز شدگی را نشان می‌دهد (شکل ۳-ی). کانی‌های میکایی از جمله سریسیت نیز ساختارهای میکا ماهی را نمایش دادند (شکل ۳-ن).

واحد کوارتز شیست (Qzsch) (ائوسن)

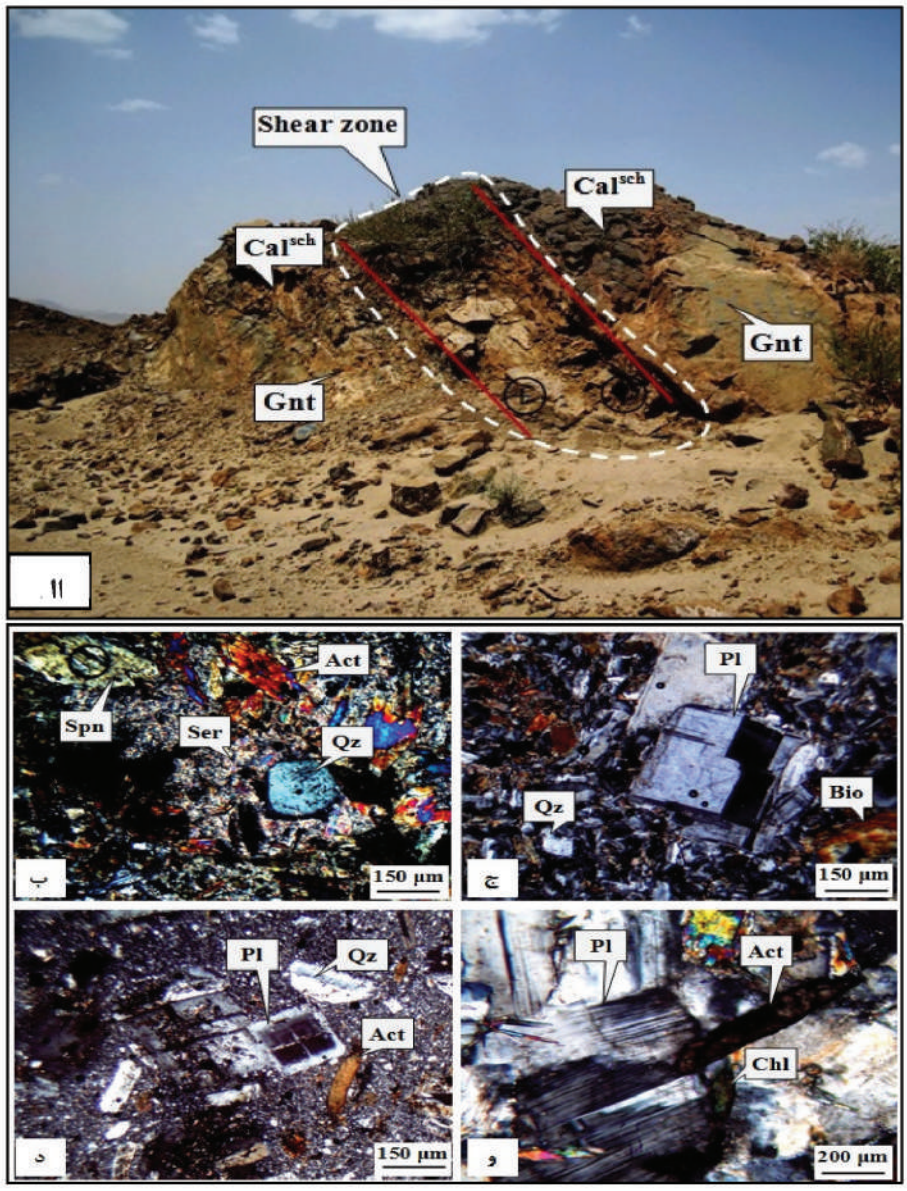
رخنمون واحد کوارتز شیست بیشتر در جنوب و غرب گستره مورد مطالعه گسترش دارد. در رخنمون‌های این واحد مشابه واحد کالک‌شیستی، آثار تورق و برگوارگی ناشی از جهت‌یافتگی ترجیحی کانی‌های به‌شدت دگرشکل شده به‌خوبی قابل مشاهده است. بر مبنای مطالعات میکروسکوپی، واحد کوارتز شیست بیشتر شامل سریسیت، کوارتز-کلریت و کوارتز-مسکویت است و کوارتز بیشتر به‌صورت پورفیروکلاست دیده می‌شود. کوارتز در این واحد از نظر حجمی، سازنده اصلی است و تناوب نوارهای روشن متشکل از کوارتز و فلدسپات و نوارهای تیره متشکل از میکا و سریسیت در نمونه‌های میکروسکوپی قابل مشاهده است. در این واحد نیز مشابه واحد کالک‌شیست، کوارتز خاموشی موجی و ریز شدگی را نشان می‌دهد.

توده نفوذی گرانیتوئیدی (Gnt) (الیگوسن)

رخنمون توده‌های گرانیتوئیدی مربوط به گرانیت زاهدان به سن الیگوسن بیشتر در همبری واحدهای کالک‌شیستی در گستره لخشک گسترش دارند (شکل ۲). بر مبنای موقعیت ژئودینامیکی، زمین‌شناسی و شواهد صحرایی گستره لخشک، می‌توان گفت شکل‌گیری توده گرانیتوئیدی نتیجه فعالیت ماگمایی حاصل از فرورانش اقیانوس سیستان به زیر بلوک افغان است (Fotoohi Rad et al., 2005). توده نفوذی بیان شده دارای امتداد شمال‌شرق-جنوب‌غرب است و به شکل دوکی و کشیده در واحدهای شیستی پهنه مورد مطالعه به‌ویژه در کالک‌شیست‌ها نفوذ کرده و در برخی از بخش‌ها با واحد کالک‌شیست همبری نشان می‌دهد (شکل ۴-الف). کنترل‌کننده کانه‌زایی در گستره لخشک ساختاری است و توسط کمربند برشی و گسل کنترل می‌شود (حیدریان دهکردی و همکاران، ۱۳۹۸). بر مبنای مطالعات سنگ‌شناسی، توده نفوذی متشکل از پلاژیوکلاز، فلدسپات، کوارتز، آمفیبول و بیوتیت است و در گستره گرانودیوریت قرار دارد (شکل ۴-ب). عمده‌ترین کانی‌های فرعی مشاهده شده در این توده اسفن و اکسیدهای آهن هستند. بر اساس مقاطع میکروسکوپی، توده گرانیتوئیدی دارای بافت گرانولار-میکروگرانولار است و بیانگر جایگیری توده نفوذی در عمق کم است. در این توده، پلاژیوکلاز به شکل فنوکریست‌های شکل‌دار تا نیمه‌شکل، فراوان‌ترین کانی سنگ‌ساز است و بافت صفحه شطرنجی، ماکل پلی‌سنتتیک و کارلسباد را نشان می‌دهد (شکل ۴-ب، ج و د). پلاژیوکلازها در برخی از مقاطع به سریسیت و کلریت تبدیل شده‌اند و سریسیت فراوان‌ترین کانی ثانویه است (شکل ۴-ب و د). کلریت نیز در برخی از مقاطع در نتیجه دگرسان شدن آمفیبول و بیوتیت در توده گرانیتوئیدی تشکیل شده است (شکل ۴-د). مهم‌ترین کانی مافیک در توده گرانیتوئیدی نیز آمفیبول و بیشتر به شکل اکتینولیت است (شکل ۴-ب، ج، د، و).

دایک‌ها (الیگوسن)

دایک‌های گستره با سن الیگوسن و ترکیب ریولیتی و داسیتی در مجموعه کالک‌شیست و کوارتز شیست در گستره لخشک تزریق شده‌اند (Tirrul et al., 1983) (شکل ۲). بر مبنای مشاهدات صحرایی و میکروسکوپی، در دایک‌های پهنه لخشک برگوارگی ناشی از عملکرد کمربند برشی مشاهده نشد. بر این اساس می‌توان گفت که نفوذ دایک‌های ریولیتی-داسیتی هم‌زمان با تکتونیک نیست و بعد از رخداد



شـــکل ۴. الف) تصویر دورنما از کمربند گســـلی و برشی با روند شمال‌شرق-جنوب‌غرب در همبری توده‌های گرانیتوئیدی و واحد کالک‌شیست در گستره لخشک (دید به سمت جنوب غرب)، ب، ج، د، و) تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری با نیکول‌های متقاطع (XPL)) از توده نفوذی گرانیتوئیدی در گســـتره لخشک، ب) بر مبنای کانی‌های تشـــکیل‌دهنده، توده نفوذی در گستره‌ی گرانودیوریت قرار دارد، ج، د، و) در مقاطع میکروسکوپی، پلاژیوکلاز به شکل فنوکریست‌های شکل‌دار تا نیمه شکل، بافت صفحه شطرنجی، ماکل پلی‌سنتتیک و کارلسباد نشان می‌دهند، ب، و) برخی از پلاژیوکلازها به سریسیت و کلریت تبدیل شده‌اند و سریسیت فراوان‌ترین کانی ثانویه است، د، و) مهم‌ترین کانی مافیک در توده گرانیتوئیدی آمفیبول و بیشـــتر به شـــکل اکتینولیت اســـت، و) کلریت در برخی از مقاطع در نتیجه دگرسان شدن آمفیبول و بیوتیت در توده گرانیتوئیدی تشکیل شده است. (Act: اکتینولیت؛ Bio: بیوتیت؛ Cal: کربنات؛ Chl: کلریت؛ Fds: فلدسپات؛ Pl: پلاژیوکلاز؛ Qz: کوارتز، Ser: سریسیت و Spn: اسفن) (نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از مقاله Whitney and Evans (2010) اقتباس شده است)

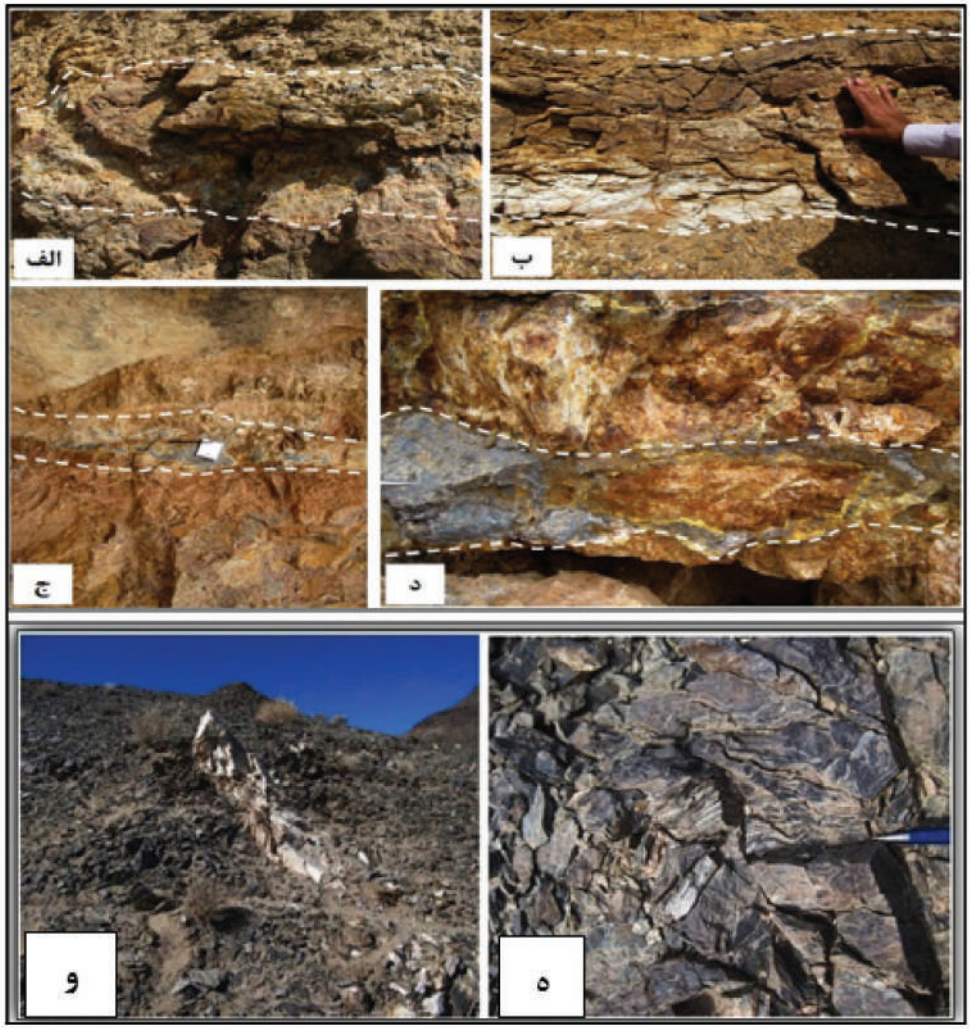
کانه‌زایی طلا رخ داده اســـت. دایک‌های ریولیتی (Rhy) با رونـــد NE-SW و ضخامت کمتر از ۱/۵ متر، در بخش‌های شمال، غرب و مرکز گستره مورد مطالعه گسترش یافته‌اند (شـــکل ۲). در نمونه‌های صحرایی و دســـتی، دایک‌های ریولیتی دانه‌ریز تا متوســـط دارای رنگ خاکســـتری تا سبز هستند. دایک‌های بیان شده در نمونه‌های میکروسکوپی، بافت گرانولار نشان داده و بیشـــتر از پلاژیوکلاز، بیوتیت و هورنبلند تشکیل شده‌اند. رخنمون دایک داسیتی (Dac) با رنگ خاکستری بیشتر در بخش شرقی گستره مورد مطالعه گسترش یافته است (شکل ۲). این دایک با روند NE-SW

و ضخامت یک تا ۱۰ متر در گستره رخنمون دارد. دایک داسیتی دارای بافت گرانولار است و فنوکریست‌های کوارتز و پلاژیوکلاز در ماتریکسی غنی از فلدسپات، بیوتیت/سریسیت، کوارتز و مقدار جزئی هورنبلند دیده می‌شوند.

بحث

کانی‌سازی

تمرکز و رخداد کانه‌زایی در گستره لخشک به‌صورت رگه و رگچه‌ای است. در گستره مورد مطالعه، رگه‌ها به دو تیپ شامل رگه و رگچه‌های کوارتز-سولفیدی کانه دار حاصل از دگرسانی و رگه‌های کوارتزی فاقد کانه‌زایی حاصل از دگرگونی تقسیم شدند. رگه و رگچه‌های کانه دار با روند شمال‌شرق-جنوب‌غرب، به‌صورت گسسته گسسته با حداکثر گسترش در حد ۱۰۰ متر در گستره مورد مطالعه گسترش دارند (شکل ۵-الف و د). رگه و رگچه‌های کوارتز-سولفیدی بیشتر در بخش‌های داخلی کمربند برشی و گسلی و یا در مجاورت آنها گسترش قابل توجهی دارند. این نوع از رگه و رگچه‌ها در اصل سیلیسی است و متشکل از کوارتز همراه با مقادیر فرعی فلدسپات، بیوتیت-سریسیت و سولفید هستند. در گستره مورد مطالعه، بیشترین مقادیر کانه‌زایی طلا و سولفیدهای همراه، در رگه و رگچه‌های کوارتز-سولفیدی رخ داده است. به بیان دیگر، شدت دگرشکلی رابطه مستقیمی با رگه‌های بیان شده و عیار طلا داشته و کانه‌زایی اصلی طلا و سولفیدهای همراه در کانسار لخشک مرتبط با این گروه از رگه‌ها می‌باشند. با توجه به شواهد موجود، مقدار طلا در این گروه از رگه‌ها، از بخش‌های خارجی کمربند برشی لخشک با شدت دگرشکلی کم، به سمت بخش‌های داخلی کمربند برشی با درجه بالای دگرشکلی، افزایشی از ۰/۵ گرم در تن به ۳/۵ گرم در تن را نشان می‌دهد. رگه و رگچه‌های کوارتزی فاقد کانه‌زایی محصول دگرگونی ناحیه‌ای است و جایگیری آن‌ها عمدتاً در بخش‌های اتساعی رخ داده است (شکل ۵-و، ه). این رگه‌ها تأخیری و فاقد کانه‌زایی است و از نظر کانی‌شناسی شامل کوارتز، کربنات، سریسیت-بیوتیت، همراه با مقادیر جزئی کانی‌های سولفیدی هستند. تهیه و تولید مواد معدنی ایران در سال ۱۳۹۶، میانگین عیار طلا در ترانشه‌های حفر شده کانسار لخشک با ذخیره ۵۸۳۳ تن، را حدود ۳/۵ گرم در تن و میزان ذخیره آنتیموان با عیار متوسط ۱/۳۵ درصد را حدود ۸۰۱۷ تن ارزیابی کرد. مطالعه نتایج آنالیز نمونه‌های کانسنگی بیانگر آن است، علاوه بر طلا و آنتیموان، نقره (تا ۳۵۰ گرم در تن) و روی (تا ۲۳۳۲ گرم در تن) در کانسنگ‌های طلادار کانسار لخشک، ناهنجاری نشان می‌دهند (تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۹۶). در گستره کانسار لخشک، لیتولوژی غالب نمونه‌های سنگ میزبان از نوع کالک‌شیست است که با توجه به درجه پایین شدت دگرگونی (در حد رخساره شیست سبز)، به‌شدت دگرشکل شده و بیشتر فابریک‌های شکل‌پذیر را نشان می‌دهند. کمربند اصلی کانی‌زایی طلا در گستره لخشک بر یک کمربند برشی دگرسان و دگرشکل با راستای شمال‌شرق-جنوب‌غرب و شیب عمومی کمتر از ۵۰ درجه به سمت شمال‌غرب منطبق است. این کمربند برشی در همبری واحد کالک‌شیست و توده گرانیتوئیدی رخ داده است و میزبان بخش قابل توجهی از کانه‌زایی طلا و آنتیموان در کانسار لخشک است. بر این اساس، می‌توان بیان داشت، کانه‌زایی طلا در کانسار لخشک توسط این کمربند برشی کنترل شده است. اگرچه واحد کالک‌شیست دگرسان و دگرشکل حجم قابل توجهی از کانسنگ طلا را در گستره لخشک در بر دارد، اما بخشی از کانه‌زایی طلا (به میزان کمتر) نیز در توده نفوذی گرانیتوئیدی رخ داده است (حیدریان دهکردی و همکاران، ۱۴۰۰). مهم‌ترین ساخت و بافت کانسنگ‌های طلادار در گستره لخشک و در بخش‌های داخلی کمربند برشی، از نوع شکل‌پذیر و به شکل رگه و رگچه‌های کوارتز-سولفیدی در واحد کالک‌شیست و توده گرانیتوئیدی رخ داده است. بر مبنای مطالعه ترانشه‌ها و نتایج آنالیز نمونه‌ها، کانی‌زایی در گستره لخشک به‌صورت رگه و رگچه‌ای و تناوبی از نوارهای کم‌عیار (تا ۰/۵ گرم در تن) مربوط به بخش‌های خارجی و پر عیار (تا ۳/۵ گرم در تن) مربوط به بخش‌های داخلی کمربند برشی است.



شـــکل ۵. الف، د) رخنمونی از رگه و رگچه‌های کوارتز-ســـولفیدی کانه‌دار در واحد کالک‌شیســـت و توده گرانیتوئیدی در گســـتره لخشـــک، و، ه) رخنمونی از رگه و رگچه‌های فاقد کانه‌زایی در گستره مورد مطالعه

دگرسانی

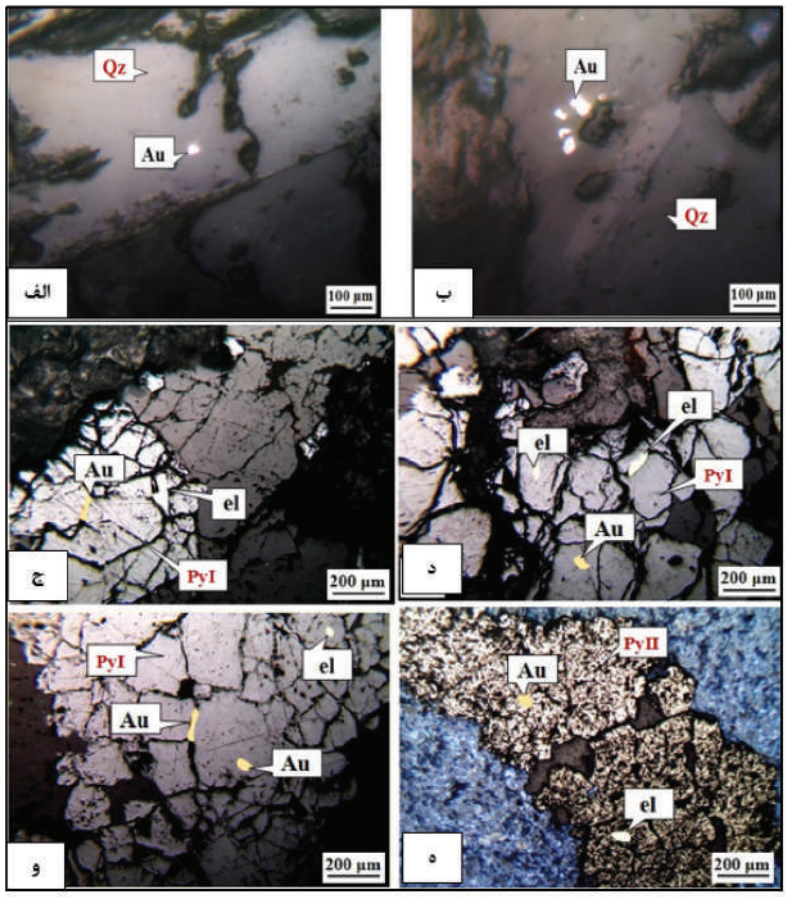
از مهم‌ترین دگرسانی‌ها در گستره کانسار لخشک می‌توان به دگرسانی سولفیدی، سریسیتی، سیلیسی و کربناتی اشاره کرد. در گستره مورد مطالعه، دگرسانی سولفیدی و سیلیسی همراه با کمربند کانه‌دار در بخش‌های مرکزی کمربند برشی رخ داده‌اند. دگرسانی سولفیدی بیشتر به‌صورت رخداد کانی‌های سولفیدی از جمله پیریت، پیریت آرسنیک‌دار، استیبنیت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت، پیروتیت و اسفالریت مشاهده شد. در بین کانه‌های سولفیدی پیریت با فراوانی بیشتر به شکل سه نسل شامل پیریت‌های شکل‌دار با اندازه درشت، پیریت نیمه‌شـــکل با اندازه متوسط و پیریت نیمه‌شکل تا بی‌شکل به‌صورت رگه-رگچه‌ای قابل مشاهده هستند. سولفیدها به شکل بافت دانه پراکنده، پرکننده فضاهای خالی و هم‌روند با برگوارگی‌ها قابل مشاهده هستند. فابریک‌های شکل‌پذیر در کمربند برشی لخشک، فضاها و موقعیت مناسبی را برای رخداد تبلور کانی کوارتز از ســـیال اشباع از سیلیس فراهم کرده است. دگرسانی سیلیسی همراه با شکل‌گیری بلورهای کوارتز و به‌صورت رگه و رگچه‌های کوارتز-ســـولفیدی سفید رنـــگ در واحدهای میزبان کانه‌زایی رخ داده اســـت. کوارتز در گستره لخشـــک به‌صورت سه نسل شامل کوارتز قبل از دگرشکلی، کوارتز فاز اول گرمابی و کوارتز فاز گرمابی تأخیری همراه با سولفید می‌باشد.

ساخت، بافت و کانی‌شناسی

اصلی‌ترین ساخت و بافت کانسنگ‌های طلادار، شکل‌پذیر می‌باشند و با فابریک‌های غالب شکنا به‌صورت رخداد رگه و رگچه‌های کوارتز-سولفیدی در واحدهای میزبان دگرشکل و دگرسان شده میزبان رخ داده‌اند. براساس مطالعات پتروگرافی و کانه‌نگاری نمونه‌های کانسنگی، کانی‌های فلزی موجود در کانسار ساده است و شامل پیریت، پیریت آرسنیک‌دار، استیبنیت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت، پیروتیت، اسفالریت، الکتروم و طلا است. بر اساس شواهد و مطالعات کانه‌نگاری و مشاهدات بافتی، طلا بیشتر در همراهی با کانه‌های سولفیدی قابل مشاهده است. در این پژوهش برای تعیین مقادیر نقره در طلا (الکتروم) و تعیین نسبت طلا به نقره، شناسایی نوع و شیمی کانه‌های سولفیدی میزبان طلا و نیز شناسایی نحوه توزیع طلا در این کانه‌ها، مطالعات الکترون میکروپروب بر روی نمونه‌های کانسار لخشک انجام شد. بالاترین عیار طلا و نقره در کانسنگ‌های طلادار کانسار لخشک، به ترتیب ۳/۵ و ۱/۵ گرم در تن و با نسبت متوسط طلا به نقره حدود دو اندازه‌گیری شده است. این همبستگی مثبت میان طلا و نقره، شاید به دلیل همراهی این دو فلز به فرم الکتروم است. پیریت به‌عنوان فراوان‌ترین کانه سولفیدی، معمولاً تا پنج درصد از حجم کانسنگ و بیش از ۹۰ درصد محتوای کانه‌های سولفیدی را تشکیل داده است. پیریت‌ها با توجه به فضای تشکیل، به‌صورت بی‌شکل تا خود شکل و گاه به‌صورت کشیده و طویل مشاهده شدند. استیبنیت معمول‌ترین کانه آنتیموان‌دار است و بیشتر در کمربندهای برشی و سنگ میزبان‌های دگرگونی (درجات پایین دگرگونی ناحیه‌ای و در حد رخساره شیست سبز) شکل می‌گیرد. استیبنیت یکی از مهم‌ترین کانه‌های سولفیدی آنتیموان در کمربندهای کانه‌دار کانسار لخشک است و در مقیاس رخنمون بیشتر به شکل رگه و رگچه‌ها هم‌روند با برگوارگی، همراه با پیریت در واحدهای میزبان کانه‌زایی و کمربندهای دگرسان رخنمون دارد. بافت غالب در استیبنیت‌ها از نوع شکافه پر کن و شعاعی است. کالکوپیریت از دیگر کانه‌های سولفیدی در واحدهای میزبان کانه‌زایی و کمربندهای کانه‌دار کانسار لخشک است. این کانه به‌صورت بلورهای ریز تا متوسط، در اندازه‌های۵۰ تا ۲۰۰ میکرون به شکل هم‌رشد با پیریت و یا به‌صورت ادخال در آن قابل مشاهده است. پیروتیت با بلورهای نیمه‌شکل تا بی‌شکل، با اندازه‌های بین ۱۰ تا ۲۰۰ میکرون، به‌صورت هم‌رشد با پیریت و کالکوپیریت و یا به‌صورت ادخال در پیریت در مقاطع میکروسکوپی کانسار لخشک مشاهده شد. آرسنوپیریت با ابعاد بین ۲۰ تا ۲۰۰ میکرون، از دیگر کانه‌های سولفیدی در کانسار لخشک است. این کانه بیشتر به‌صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل دانه پراکنده، هم‌رشد و یا به‌صورت ادخال در پیریت رخ داده است. کانه اسفالریت با اندازه‌های ۲۰ تا ۲۰۰ میکرون، بیشتر به‌صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل، در مقاطع میکروسکوپی لخشک دیده شد. بر مبنای روابط بافتی و مینرالوگرافی، اسفالریت به‌صورت هم‌رشد و هم‌زمان با پیریت تشکیل شده است. طلا و الکتروم به سه فرم آزاد در زمینه کوارتز، ادخال (میانبار) در پیریت و رگه-رگچه‌ای و قطع کننده کانه میزبان (بیشتر پیریت) مشاهده شدند (شکل ۶). بر اساس مطالعات میکروسکوپی و بر مبنای نتایج الکترون میکروپروب، طلا به فرم الکتروم در کانسنگ‌های طلادار به‌ویژه در کالک‌شیست‌ها در زمینه‌ای از کوارتز و به فرم ادخال و رگه-رگچه‌ای قطع کننده در پیریت رخ داده است. با توجه به کانی‌شناسی ساده در کانسار لخشک می‌توان بیان داشت که مشابه اکثر کانسارهای تیپ کوهزایی، سیال کانه‌ساز از نوع سولفید پایین است و ماهیت خنثی تا قلیایی داشته است. بر اساس رابطه بین دگرسانی، دگرشکلی و کانه‌زایی، توالی پاراژنزی در گستره لخشک شامل دو مرحله اصلی گرمابی و هوازدگی در نظر می‌گیرند (جدول ۱). فاز گرمابی (دگرسانی) به‌صورت هم‌زمان با دگرسانی واحدهای کالک‌شیست و توده گرانیتوئیدی اتفاق افتاده است. این فاز بر اساس گسترش رگه و رگچه‌های کوارتز-سولفیدی هم‌روند با برگوارگی گستره لخشک قابل تشخیص است.

مطالعه سیالات درگیر

به‌منظور شناخت ماهیت فیزیکوشیمیایی و روند تحول سیالات کانه‌ساز، از کانسنگ‌های کوارتزی کانسار لخشک، نه مقطع دوبر صیقل تهیه شد و مورد مطالعات پتروگرافی و ریز دماسنجی قرار گرفت. مطالعات سیالات درگیر بر روی



شکل ۶. الف، ب) تصاویر میکروسکوپی (نور انعکاسی) از ذرات طلا (Au) به فرم آزاد و دانه پراکنده در کوارتز، ج، د، و، ه) تصاویر میکروسکوپی (نور انعکاسی) از طلا (Au) و الکتروم (el) در کانسنگ‌های طلادار کانسار لخشک که به دو صورت ادخال در پیریت و رگه-رگچه‌های قطع کننده پیریت رخ داده‌اند

جدول ۱. توالی پاراژنزی و مراحل تشکیل کانه‌ها، کانی‌ها و بافت ماده معدنی در کانسار لخشک

Minerals		Pre-deformation	Hydrothermal			Weathering
			Stage I	Stage II	Stage III	
Pyrite	Type I		▬	▪▪▪▪▪		
	Type III		▪▪▪▪▪	▬		
	Type III				▬	
Stibnite			▪▪▪▪▪	▬		
Chalcopyrite			▪▪▪▪▪	▬		
Arsenopyrite			▪▪▪▪▪	▬		
Pyrrhotite			▪▪▪▪▪	▬		
Sphalerite			▪▪▪▪▪	▬		
Gold			▪▪▪▪▪	▬		
Electrum			▪▪▪▪▪	▬		
Goethite						▬
Stibiconite						▬
Sericite/Illite and muscovite			▬	▪▪▪▪▪		
Calcite and Ankerite			▬	▪▪▪▪▪		
Quartz	Type I	▬	▪▪▪▪▪			
	Type II	▪▪▪▪▪	▬			
	Type III				▬	
Feldspar		▬	▪▪▪▪▪			
Textures	*Disseminated*		▬	▪▪▪▪▪		
	Brecciated	▪▪▪▪▪	▬			
	Vein and veinlet type	▪▪▪▪▪	▬			

فاز فرعی ▪▪▪▪▪ فاز اصلی ▬

کانی کوارتز، که به لحاظ روابط بافتی هم رشـد و هم‌زمان با کانه‌های سولفیدی و طلا تشکیل شده است، انجام شد. سیالات درگیر موجود در نمونه‌های کوارتز کانسار لخشک به سه شـکل اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب و به‌صورت بی‌شکل، کروی و تخم‌مرغی شـکل، باریک و کشیده مشاهده شدند. سیالات بی‌شـکل، کروی و تخم‌مرغی شـکل فراوان‌ترین سیالات درگیر در کانسـار لخشک هستند. در این مطالعه برای اطمینان از درسـت بودن نتایج به‌دست‌آمده، تمامی اندازه‌گیری‌ها بر روی سـیالات درگیر اولیه انجام شـد. بر مبنای مطالعات پتروگرافی، اندازه سـیالات درگیر مطالعه شـده در کانسار لخشک نیز در بازه بین چهار تا ۱۹ میکرون اسـت (جدول ۲). سـیالات درگیر اولیه موجود در کوارتز شکل‌دهنده کانسنگ‌های طلادار در گستره کانسار لخشک به چهار تیپ شامل سیالات درگیر تک فازی گازی (V) (تیپ I)، سیالات درگیر تک فازی مایع (L) (تیپ II)، سیالات درگیر دوفازی غنی از مایع (آبگین) (LV) (تیپ III) و سیالات سه فازی غنـی از CO_2 (کربنی-آبگین) ($L_{CO2}+LH_2O+V_{CO2}$) (تیپ IV) تقسیم شدند. در این پژوهش فقط سیالات درگیر تیـپ III و IV به لحاظ انـدازه و اولیه بودن مورد مطالعه میکروترمومتـری قرار گرفتند. مطالعـات میکروترمومتری شامل سه روش سرمایش، گرمایش (هیتینگ) و طیف‌سنجی رامان (رامان اسپکترومتری) است. در کانسار لخشک، این مطالعات بر روی ۹۶ سیال درگیر اولیه از تیپ‌های III و IV انجام شـد. لازم به ذکر است که هر دو تیپ سیالات بیان شده، در رگه و رگچه‌های کوارتز-سولفیدی طلادار و هم‌روند با برگوارگی‌های گستره لخشـک دیده شدند. در مطالعات میکروترمومتری، پارامترهایـی از جمله آخرین دمای ذوب یخ (T_{mice}) و دمای همگن شـدن کل (T_h) برای سـیالات درگیر تیپ III و پارامترهای (T_{hCO2}) دمای همگن شـدن CO_2، (T_{mCO2}) دمـای ذوب CO_2 و (T_{mclath}) دمای ذوب کلاتریت برای سـیالات درگیر تیپ IV اندازه‌گیری شدند. نتایج مطالعـات میکروترمومتری در جـدول ۲، به‌صورت خلاصه ارائه شده است.

سـیالات درگیر دو فـازی غنی از مایع یا سـیالات دو فازی آبگین، با شـکل‌های مستطیلی، کشیده، تخم‌مرغی و تـا حدودی نامنظم، با ابعادی در گسـتره بین پنج تا ۱۷ میکرون در رگه و رگچه‌های کوارتز-سـولفیدی دیده شدند. سـیالات درگیر تیپ III، بر اسـاس وجود یک حباب بخار در یک فاز مایع آبگین تشـخیص داده شدند. در این تیپ، فاز مایع غالب اسـت و حدود ۷۰ تا ۹۰ درصد حجم میانبار را دارد. ۱۰ تـا ۳۰ درصد باقی مانده حجـم این تیپ را فاز بخار تشـکیل داده است. سیالات درگیر تیپ IV (سیالات سه فازی کربنی-آبگین)، در شـرایط دمای اتاق، به‌صورت سـه فازی، با اندازه‌های بین چهار تا ۱۹ میکرون و به شکل تخم‌مرغی و نامنظم در رگه و رگچه‌های کوارتز-سـولفیدی طـلادار و کوارتز میزبان در کانسـار لخشـک رخ داده‌اند. این سـیالات درگیر دارای CO_2 اسـت و نشان‌دهنده غنی بودن سـیال اولیه از CO_2 است. سیالات درگیر تیپ IV، متشـکل از دو فاز CO_2 مایع (L_{CO2}) و H_2O مایع (L_{H2O}) غیرقابل امتزاج و یک حباب بخار (V_{CO2}) هسـتند. در این تیپ، حباب بخار حدود ۳۰ درصد حجم کل میانبار را در بر دارد. فاز مایع (L_{CO2}) CO_2، اطراف حباب گاز (V_{CO2}) و فاز مایع (L_{H2O}) H_2O نزدیک به دیواره حفره تمرکزیافته است. بر اساس نظر سیبسون (Sibson، 2004)، علت تمرکز CO_2 در حاشیه فاز گازی، تبدیل آن به CO_2 مایع است.

جدول ۲. خلاصه نتایج مطالعات میکروترمومتری سیالات درگیر دو فازی تیپ III و سه فازی تیپ IV در کانی کوارتز کانسار لخشک

Incl.type	Size (μm)	Salinity (%NaCl)	Th (°C)	T_{mCO2} (°C)	T_{hCO2} (°C)	T_{mclath} (°C)	T_{mice} (°C)
Type III (LV)	۵-۱۷	۹-۱۱	۲۰۰-۲۸۰	-	-	-	۴- تا ۷-
Type IV ($L_{CO2}+L_{H2O}+V_{CO2}$)	۴-۱۹	۸-۱۳	۳۰۰-۳۳۰	۵۸/۸- تا ۵۶/۸-	۶/۱ تا ۱۶/۲	۱/۳ تا ۴/۶	-

نتایج مطالعات میکروترمومتری

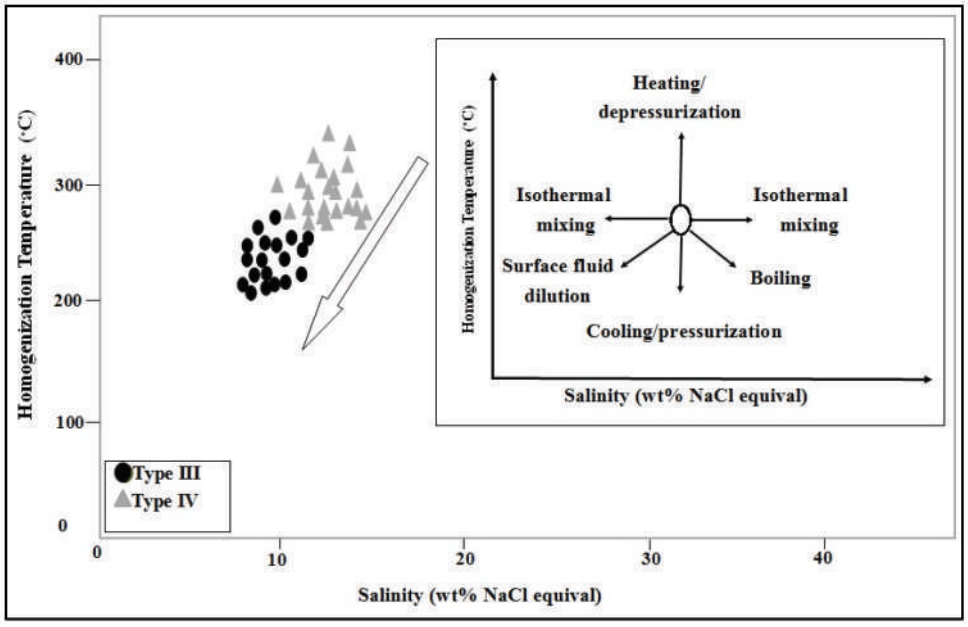
بر اساس نتایج مطالعات میکروترمومتری بر روی سیالات درگیر غنی از مایع (LV)، دمای همگن شدن در گستره بین ۲۰۰ تا ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد با فراوانی مشخص در دمای ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد رخ داده است. دمای ذوب آخرین قطعه یخ (T_{mice}) در گستره ۴- تا ۷- درجه سانتی‌گراد با فراوانی مشخص در ۶- درجه سانتی‌گراد است و نشان‌دهنده درجه شوری در گستره بین نه تا ۱۱ درصد وزنی نمک طعام است. لازم به ذکر است که در این تیپ از سیالات درگیر، فاز دختر مشاهده نشد. دمای همگن شدن میانبارهای سیال تیپ IV کانسار لخشک در گستره بین ۳۰۰ تا ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد با فراوانی مشخص در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ داده است و به‌عنوان حداقل دمای سیال کانه‌دار در کانسار لخشک محسوب می‌شود. بر اساس نتایج مطالعات میکروترمومتری بر روی سیالات درگیر غنی از CO_2، دمای ذوب CO_2 (T_{mCO2}) در گستره بین ۵۶/۸- تا ۵۸/۸- درجه سانتی‌گراد است. در سیالات غنی از دی‌اکسید کربن کانسار لخشک، همگن شدن فاز کربنی به فاز مایع (T_{hCO2}) در بازه دمایی بین ۶/۱ تا ۱۶/۲ درجه سانتی‌گراد (با میانگین ۱۱/۱۵)، رخ داده است (جدول ۲). دمای ذوب کلاتریت (T_{mclath}) در این تیپ از سیالات درگیر در گستره بین ۱/۳ تا ۴/۶ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد (جدول ۲). شوری در سیالات درگیر غنی از CO_2، بر مبنای دمای ذوب کلاتریت در بازه بین ۸ تا ۱۳ درصد وزنی نمک طعام اندازه‌گیری شد.

پارامترهای اساسی در نهشت و تمرکز کانسنگ‌های طلادار کانسار لخشک

براساس نظر گلدفارب و همکاران (Goldfarb et al., 2014)، به‌دنبال تغییر شرایط فیزیکو-شیمیایی سیالات کانه‌ساز در طی رخداد پدیده‌هایی از جمله اختلاط سیالات، جوشش، جدایش فازی، سرد شدن و رقیق شدن، تبلور کانه‌ها رخ می‌دهد. بر این اساس، در بسیاری از کانسارها به‌ویژه در کانسارهای کوهزایی و مرتبط با کمربندهای برشی، اختلاط و جدایش فازی پارامترهای مهمی در تمرکز ماده معدنی و شکل‌گیری کانسار هستند.

به علت فراوانی بالای میانبارهای سیال LV و فراوانی کم میانبارهای غنی از گاز و با توجه به همگن شدن تمام میانبارهای سیال به فاز مایع، می‌توان گفت که در سیالات طلادار کانسار لخشک فرایند اختلاط رخ داده است. در نمودار شکل ۷، روند تحول سیالات کانه‌ساز در کانسنگ‌های طلادار کانسار لخشک ارائه شده است. نمودار تغییرات دمای همگن شدن/شوری، روندی از اختلاط یک سیال با دما-شوری پایین (سیال با منشأ جوی)، با یک سیال گرمابی با شوری-دمای متوسط-بالا (سیال با منشأ دگرگونی و CO_2 دار) را نشان می‌دهد. بر اساس نمودار شکل ۷، همچنین می‌توان گفت که علاوه بر اختلاط، فرایند رقیق‌شدگی نیز رخ داده است. بر این اساس، سیالات با منشأ جوی می‌توانند به‌عنوان سیال رقیق‌کننده باشند و در محل تمرکز و ته‌نشست کانسنگ‌های طلا در کانسار لخشک، علاوه بر اختلاط با سیالات گرمابی کانه‌دار دگرگون‌زاد CO_2 دار، سبب رقیق‌شدگی و ته‌نشست سیالات کانه دار در گستره لخشک شده باشند. از سوی دیگر، با توجه به گستره بازه دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال، می‌توان گفت که به دنبال رخداد فرایند اختلاط بین سیال جوی و سیال دگرگونی، به علت اختلاط یک سیال دمای پایین با یک سیال دما متوسط-بالا، پدیده سرد شدن تدریجی سیال کانه‌دار و کاهش درجه حرارت نیز رخ داده است. بر این اساس، سردشدگی از دیگر عوامل اساسی در ته‌نشست سیال طلادار است و سبب تمرکز و نهشته شدن کانسنگ طلا در کانسار لخشک شده است. بر اساس مطالعات میکروترمومتری، فرایند کاهش دمای همگن شدن سیالات درگیر در کانسار لخشک از دمای ۳۳۰ درجه به ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، همراه با افزایش چگالی سیال رخ داده است. بر اساس نتایج حاصل با توجه به همگن شدن اغلب سیالات درگیر به فاز مایع و همچنین موقعیت کانسار لخشک در کمربند برشی، می‌توان گفت پدیده جدایش فازی نیز رخ داده است. بر این اساس، می‌توان بیان داشت، فرایند جدا شدن یک فاز بخار (چگالی پایین)، از یک سیال فوق بحرانی همگن شده به فاز مایع (چگالی بالا)، در کانسار لخشک منجر به بالا رفتن چگالی فاز سیال باقیمانده شده است.

همچنین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، جدایش فازی در گستره لخشک به دنبال کاهش فشار و کاهش دما رخ داده است. بر این اساس، فرایند اختلاط سیال، رقیق‌شدگی، سرد شدن تدریجی و جدایش فازی، پارامترهای اساسی در نهشت و تمرکز کانسنگ‌های طلادار در کانسار لخشک می‌باشند. به‌طورکلی، بر مبنای مطالعات میکروترمومتری سیالات درگیر کانسار لخشک، دمای همگن شدن در رگه و رگچه‌های کوارتز-سولفیدی همراه با کانه‌زایی بین ۲۰۰ تا ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد با گستره چگالی سیال کانه‌دار بین ۰/۷۶ gr/cm^3 تا ۰/۹۶ و عمق کانه‌زایی حدود هفت کیلومتر است. بر اساس مطالعات سیالات درگیر متشکل از $CO_2 \pm CH_4 \pm N_2 + H_2O$ و نبود فاز دختر در سیالات درگیر دوفازی، می‌توان گفت، کانسار لخشک در شرایط رخساره شیست سبز با عمق به دام افتادن سیالات با منشأ دگرگونی در گستره بین عمق پنج تا ۱۰ کیلومتری (هفت کیلومتری) و رژیم تکتونیکی شکنا-شکل‌پذیر رخ داده است.



شکل ۷. نمودار روند تغییرات دمای همگن شدن و شوری سیالات درگیر تیپ III و IV در کانسار لخشک. روندها بیانگر رخداد رقیق‌شدگی و اختلاط در زمان تحول سیالات گرمابی در کانسار لخشک است (After Wilkinson، 2001)

نتیجه‌گیری

کمربند زمین درز سیستان، به لحاظ موقعیت ژئودینامیکی و قرار داشتن در حاشیه قاره‌ای، پتانسیل بالایی در میزبانی ذخایر طلای کوهزایی دارا است. با توجه به ویژگی‌های شاخص زمین‌شناسی و کانی‌سازی از جمله جایگاه زمین‌ساختی، عملکرد کمربند برشی در کنترل کانی‌سازی، ساخت، بافت، پاراژنز کانی‌شناسی، ویژگی‌های دما و شوری میانبارهای سیال، کانسار طلای لخشک بیشترین شباهت را با ذخایر تیپ کوهزایی نشان می‌دهد. مجموع مشاهدات صحرایی و مطالعات آزمایشگاهی نشان داد، کانسنگ طلادار در کانسار لخشک مشابه با اغلب کانسارهای طلای کوهزایی در ارتباط با کمربند برشی به‌شدت دگرشکل و دگرسان شده است. کانسنگ طلا در همراهی با دگرشکلی‌های غالب شکل‌پذیر ایجاد شده در اثر عملکرد کمربند برشی در گرانیتوئید میزبان، تشکیل شده است. دگرسانی‌های گرمابی شامل سیلیسی، کربناتی، سریسیتی و سولفیدی، کانسنگ‌های طلا را همراهی می‌کنند. از طرف دیگر کانه‌زایی طلا و دگرسانی‌های گرمابی همراه با آن، ارتباط مستقیمی با شدت دگرشکلی سنگ‌های میزبان نشان می‌دهند، به‌طوری‌که در بخش‌های مرکزی کمربند برشی، که به‌شدت دگرشکل شده و به‌خوبی فابریک‌های شکل‌پذیر را نشان

می‌دهند، سیالات گرمابی در حجم وسیع‌تری عملکرد داشته و پس از آن به‌شدت دگرسان و حجم و عیار کانی‌سازی طلا بالاتر است. مطالعات ریزساختاری و پتروگرافی نمونه‌های کانسنگی در بخش‌های مختلف کمربندهای کانه‌دار نشان داد و بالاترین عیار طلا با ظهور فابریک‌های شکل‌پذیر، که به‌شدت دگرسان شده و حاوی مقادیر قابل توجهی کانه‌های سولفیدی هستند، منطبق است. بیشینه مقادیر طلا و نقره در کانسنگ‌های طلادار کانسار لخشک به ترتیب ۳/۵ و ۱/۵ گرم در تن و با نسبت متوسط طلا به نقره حدود دو اندازه‌گیری شده است. این همبستگی مثبت میان طلا و نقره، شاید به دلیل همراهی این دو فلز به فرم الکتروم است.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران به خاطر پشتیبانی و حمایت‌های مالی برای انجام مطالعات ژئوفیزیکی تشکر کنند.

منابع

- الیاس‌پور، ن.، ۱۳۸۹. مطالعه زمین‌شناسی اقتصادی و کانی‌زایی فلزی در پهنه سفیدابه، شرق ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان. ۲۴۶.

- بومری، م.، مجددی‌مقدم، ح. و بیابانگرد، ح.، ۱۳۹۷. سنگ‌شناسی و زمین‌شناسی سنگ‌های آذرین و کانی‌زایی آنتیموان طلا در پهنه سفیدسنگ و درگیابان. فصلنامه پترولوژی، ۹، ۳۵، ۱۹۳-۲۱۶.

- تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۹۶. گزارش نهایی عملیات اکتشاف تکمیلی کانسار آنتیموان لخشک (استان سیستان و بلوچستان). ۲۳۵.

- حیدریان دهکردی، ن.، نیرومند، ش.، تاج‌الدین، ح.ع.، ادیب، ش. و میرزایی، س.، ۱۴۰۰. زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، دگرسانی و پتانسیل‌سنجی کانسار لخشک، کمربند زمین‌درز سیستان بر مبنای مطالعات ژئوفیزیکی (IP/RS). فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۵، ۵۸، ۲۵-۳۹.

- حیدریان دهکردی، ن.، نیرومند، ش.، تاج‌الدین، ح.ع. و نوزعیم، ر.، ۱۳۹۸. بررسی عوامل کنترل‌کننده کانی‌زایی در کانسار طلای لخشک (کمربند زمین‌درز سیستان). هفتمین همایش ملی زمین‌ساخت و زمین‌شناسی ساختاری ایران، دانشگاه تهران. ۱۲.

- مجددی مقدم، ح.، بومری، م. و بیابانگرد، ح.، ۱۴۰۰. پتروگرافی و ژئوشیمی سنگ‌های آذرین و کانی‌زایی آنتیموان در لخشک، شمال غرب زاهدان، جنوب‌شرق ایران. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۵، ۵۷، ۸۷-۱۰۶.

- مرادی، ر.، ۱۳۹۱. سبک و منشأ کانی‌زایی آنتیموان و طلا در شورچاه، جنوب شرق زاهدان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ۱۵۸.

- مظلوم، غ.، فردوست، ف. و کهرازهی، م.، ۱۳۹۶. کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار آنتیموان لخشک، شمال‌غرب زاهدان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۸۴.

- نیرومند، ش.، تاج الدین، ح.ع. و حقیری قزوینی، س.، ۱۳۹۹. زمین‌شناسی و کانه‌زایی طلا در محدوده غرب کسنزان، جنوب سقز، استان کردستان فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۵۵، ۱۴.

- نیرومند، ش.، ۱۳۹۷. گزارش بررسی زمین‌شناسی و شواهد ساختاری کانسار لخشک در کمربند زمین‌درز سیستان. ۶۸.

- Biabangard, H., Moridi, A.A. and Irani, Z., 2019. Dikes Deformation in Lakhshak Pluton: Microscopic Evidence from the Northeast of Zahedan, Southeastern Iran. Geotectonics, 53, 271-279.

- Camp, V.E. and Griffis, R.J., 1982. Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, Eastern Iran. Lithos, 15, 221-239.

- Fotoohi Rad, GH., Kurzawa, T. and Bröcker, M., 2005. Cretaceous high-pressure metamorphism and Low pressure overprint in the Sistan Suture Zone, eastern Iran. DOI: 10.1016/j.jseaes.2017.07.051. 332-344.

- Goldfarb, R.J. and Santosh, M., 2014. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: are they unique? Geoscience Frontiers, 5, 139-153.

- Goldfarb, R.J., Taylor, R.D., Collins, G.S., Goryachev, N.A. and Orlandini, O.F., 2014. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia. Gondwana Research, 25,

48-102.

- Groves, D. and Goldfarb, R., 2003. Gold deposits in metamorphic belts: Overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration Significance. Economic Geology, 98, 1-29.

- Groves, D. and Condie, K.C. and Goldfarb, R.J., 2005. Secular changes in global tectonic processes and their influence on the temporal distribution of gold-bearing mineral deposits. Economic Geology, 100, 203-224.

- Heydarian Dehkordi, N., Niroomand, S., Tajeddin, H.A. and Nozaem, R., 2022. Integrated geophysical study of the Lakhshak gold-antimony deposit in the Sistan suture zone, southeastern Iran. Arabian Journal of Geosciences. https://doi.org/10.1007/s12517-022-09628-9. 1-12.

- Pitcairn, I., Leventis, N. and Beaudoin, G., 2021. A meta-sedimentary source of gold in Archean orogenic gold deposits. Geological Society of American. https://doi.org/10.1130/G48587.1. 862-866.

- Shafaii Moghadam, H. and Stern, R.J., 2015. Ophiolites of Iran: Keys to understanding the tectonic evolution of SW Asia: (II) Mesozoic ophiolites. Journal of Asian Earth Sciences, 100, 31-59.

- Sibson, R.H., 2004. Control on maximum fluid overpressure defining conditions for mesozonal mineralization. Journal of Structural Geology, 26, 1127-1136.

- Stampfli, G.M., Raumer, J.F. and Borel, G.D., 2002. Paleozoic evolution of pre-Variscan terranes: From Gondwana to the Variscan collision. In Catalán, M.; Hatcher, R.D., Jr.; Arenas, R.; et al. Variscan-Appalachian dynamics: The building of the late Paleozoic basement. Boulder, Colorado. Geological Society of America Special Paper. https://doi:10.1130/0-8137-2364-7.263. 46, 263-280

- Tirrul, R., Bell, I.R. and Griffis, R.J., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. Geological Society of America Bulletin, 9, 134-150.

- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusion in hydrothermal ore deposits. Lithos, 55, 229-272.

- Whitney, D. and Evans, B.D., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, 95, 1, 185-187.