

زمین‌شناسی، زمین شیمی و دماسنجی ایزوتوپ‌های پایدار در کانسار چندفلزی طلا دار شوی، شمال غرب بانه

محمد عبدالله پور^۱، مهرداد بهزادی^{۱*}، حسین علی تاج‌الدین^۲

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۲/۱۵، نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۴/۱۰)

چکیده: کانسار چندفلزی طلا دار شوی در شمال غرب پهنه سنندج- سیرجان و در ۷ کیلومتری شمال غرب بانه واقع است. واحدهای سنگی رخنمون یافته در گستره کانسار شامل یک توالی از سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی وابسته به پروتوزوئیک پایانی و کرتاسه هستند که از شیست، فیلیت، گدازه‌های با ترکیب متاآندزیت- بازالت و سنگ‌آهک‌های بلوری (مرمر) تشکیل شده‌اند. کانسنگ از کانی‌های فلزی اولیه گالن، اسفالریت، پیریت، تتراهدریت و طلا تشکیل شده است. بیشینه مقادیر طلا و نقره در کانسار به ترتیب ۳ و ۱۰۴ گرم در تن و بیشینه مقادیر عناصر مس، سرب و روی به ترتیب ۴/۲۲، ۰/۳۴ و ۰/۵۷ درصد در پرش‌ها و رگه و رگچه‌های سیلیسی- سولفیدی در سنگ میزبان آهکی رخ داده‌اند. طلا در اندازه‌های ۵ تا ۳۵ میکرون در همراهی با کوارتز و گاه تتراهدریت و نیز در لبه پیریت‌ها دیده شده است. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ در کانی‌های گالن و اسفالریت از ۱/۴ تا ۱۰/۴- در هزار اندازه‌گیری شده است و این کانسار در گستره کانسارهای کوهزایی قرار می‌گیرد. دماهای ایزوتوپی برای اغلب جفت کانه‌های گالن- اسفالریت در گستره ۱۴۴ تا ۳۳۶ درجه سانتی- گراد محاسبه شد که با دماهای به دست آمده از بررسی میانبارهای سیال همخوانی دارد. مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ سیال کانه‌ساز نیز در گستره ۹/۸ تا ۱۳/۷ در هزار محاسبه شده است. براساس ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌سازی، زمین شیمی و ایزوتوپ‌های پایدار در کانسار شوی، این کانسار بیشترین شباهت را با کانسارهای طلای کوهزایی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: طلای کوهزایی؛ پهنه دگرگونه سنندج- سیرجان؛ ایزوتوپ‌های پایدار؛ شوی.

مقدمه

۱:۲۵۰۰۰۰ زمین‌شناسی مهاباد [۱] و ورقه یکصد هزارم زمین- شناسی آلوت [۲] واقع است. مهم‌ترین فعالیت‌های پی‌جویی در این منطقه که در سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲ توسط شرکت آتی صنعت انجام شده، شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰، حفر ترانشه و گمانه‌های مغزه‌گیری است. در این پژوهش، ویژگی‌های کانی‌شناسی، دگرشکلی، دگرسانی، زمین شیمی عناصر معدنی و ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد و اکسیژن در کانسار شوی بررسی شده و باتوجه به ویژگی‌های

بررسی‌های پی‌جویی که در دو دهه گذشته توسط سازمان زمین‌شناسی و پی‌جویی معدنی کشور در شمال غرب پهنه سنندج- سیرجان (استان‌های کردستان و آذربایجان غربی) به انجام رسیده است، به پی‌جویی چند ذخیره طلا در گستره سقز- پیرانشهر منجر شده است. کانسار چندفلزی طلا دار شوی، در ۷ کیلومتری شمال غرب بانه (استان کردستان) و در شمال- غرب پهنه سنندج- سیرجان (شکل ۱) و در چارگوش

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۴۴۰۷۴۸۴، پست الکترونیکی: m_behzadi@sbu.ac.ir

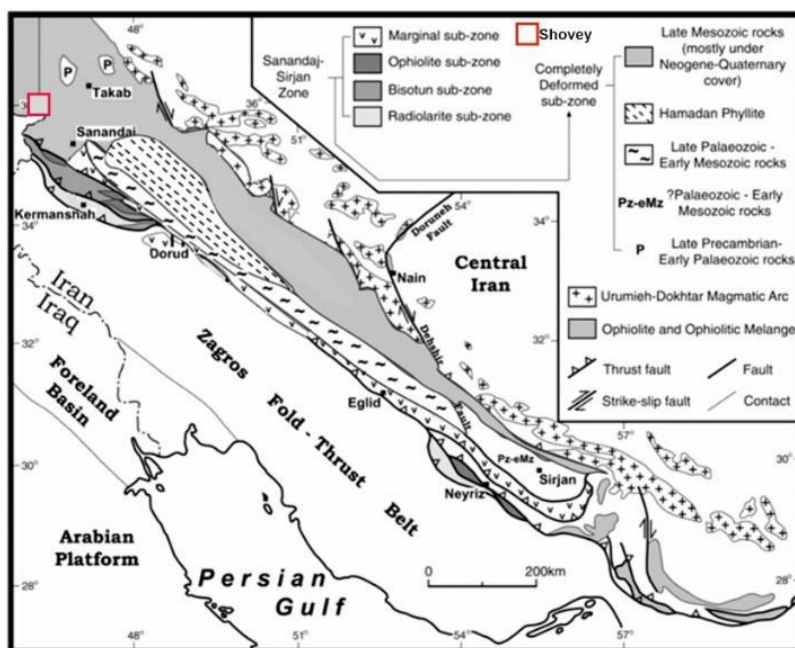


SO_2 تولید شده پس از تصفیه، وارد دستگاه IRMS می‌شود. بررسی کل روش و واسنجی گاز مرجع توسط اندازه‌گیری‌های تکراری بر مواد مرجع (IAEA-S-4) و یک استاندارد ثانویه آزمایشگاهی نسبت به مقیاس شهاب سنگ کانیون و یا بلور (VCDT) انجام شده است. برای بررسی‌های ایزوتوپی اکسیژن، ۴ نمونه کوارتز از رگه‌های سیلیسی-سولفیدی از منطقه شوی انتخاب و پس از پودر کردن و آماده‌سازی، به آزمایشگاه تحقیقاتی ایزوتوپ‌های پایدار دانشگاه اراک ارسال گردیده و سپس با طیف‌سنج جرمی مدل Isoprime100، نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند. نمونه‌های جامد در فرایند گرما کافت (تجزیه گرمایی در دمای بالا و جو خنثی) تجزیه شده و در اثر احیای کربن در دمای بالای ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد، گاز CO تولید می‌شود. گاز CO تولید شده از ستون آب عبور داده شده و در این فرایند، گازهای مزاحم حذف می‌شوند. در ادامه، گاز CO جدا شده تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گرمادهی شده که پس از فرایند واجذب، گاز CO آزاد همراه با گاز هلیوم به‌عنوان گاز حامل از سامانه IRMS عبور داده شده و مقادیر دقیق ایزوتوپی اندازه‌گیری می‌شود. در این روش، داده‌های ایزوتوپی $\delta^{18}O$ نسبت به استاندارد وین برای میانگین آب اقیانوس (V-SMOW) اندازه‌گیری می‌شود. مقدار خطای استاندارد اندازه‌گیری‌ها ± 0.2 است.

فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌ساز، چگونگی نهشت کانسنگ و نوع کانی‌سازی مشخص شده است. روشن است که نتایج بررسی این کانسار می‌تواند برای پی‌جویی این نوع از ذخایر، در بخش‌هایی از شمال‌غرب پهنه سنندج-سیرجان که شرایط زمین‌شناسی مشابهی دارند، استفاده شود.

روش بررسی

این پژوهش شامل دو بخش بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی است. بخش صحرایی شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ در وسعت ۳۶ کیلومترمربع و نیز بررسی پهنه‌های کانی‌سازی (شامل بررسی دگرشکلی، دگرسانی، ساخت، بافت و کانی‌شناسی کانسنگ‌ها) می‌شود. در این مرحله، ۴۰ نمونه سنگی از مغزه‌ها و ترانشه‌ها برداشت و به آزمایشگاه‌ها ارسال شد. در بخش آزمایشگاهی، پس از بررسی‌های مقدماتی، از میان نمونه‌های برداشت‌شده، ۱۰ مقطع نازک، ۱۵ مقطع صیقلی، ۵ مقطع نازک-صیقلی و ۴ مقطع دوبر صیقلی تهیه و از نظر سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری، ساخت و بافت بررسی شدند. بررسی ایزوتوپی پایدار گوگرد بر ۱۰ جفت نمونه کانی‌های گالن-اسفالریت مربوط به برش‌های گرمایی کانه‌دار انجام شد. تجزیه ایزوتوپ‌های پایدار در آزمایشگاه تحقیقاتی ایزوتوپ‌های پایدار دانشگاه اراک و با طیف‌سنج جرمی نسبت ایزوتوپی (IR-) مدل ISOPRIME 100 انجام شد. برای این منظور، پس از احتراق نمونه جامد در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، گاز



شکل ۱. موقعیت کانسار شوی (مربع قرمز)، در شمال‌غرب پهنه سنندج سیرجان [۳] و در زیر پهنه با دگرشکلی پیچیده.

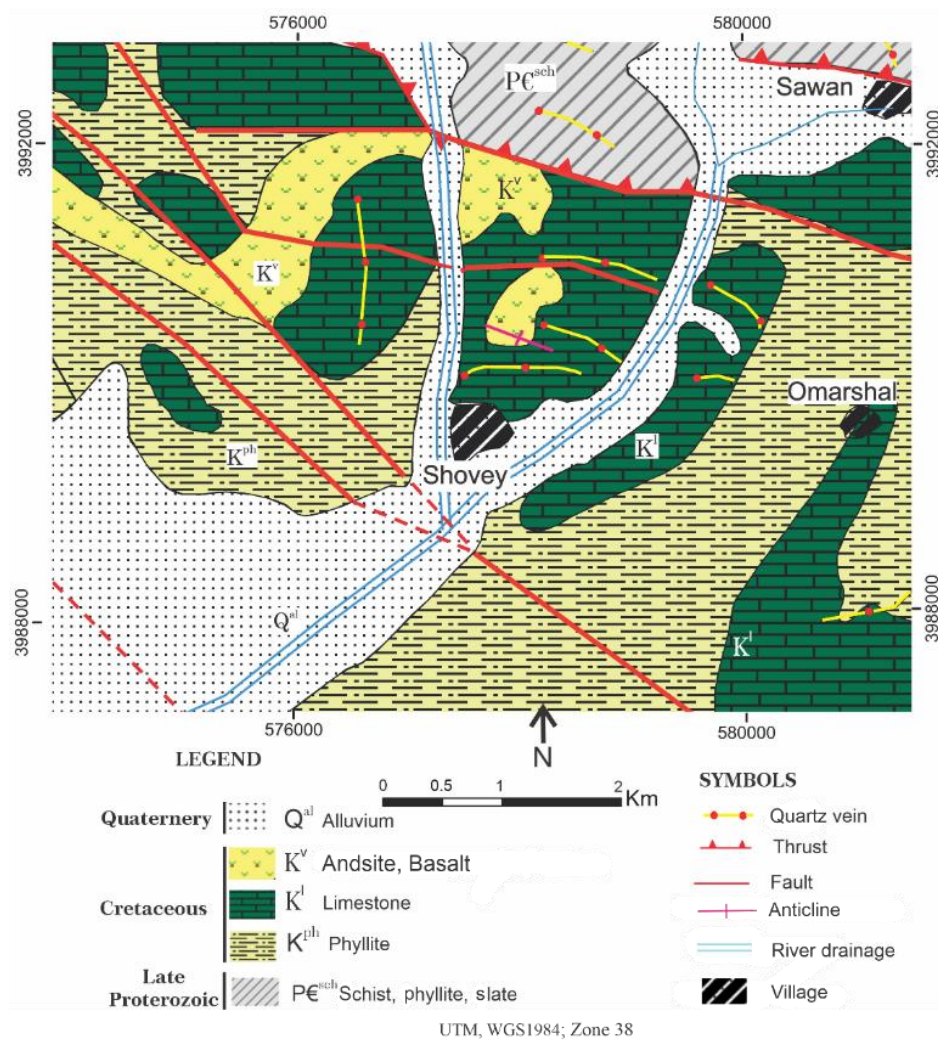
بحث و بررسی

زمین‌شناسی منطقه کانسار

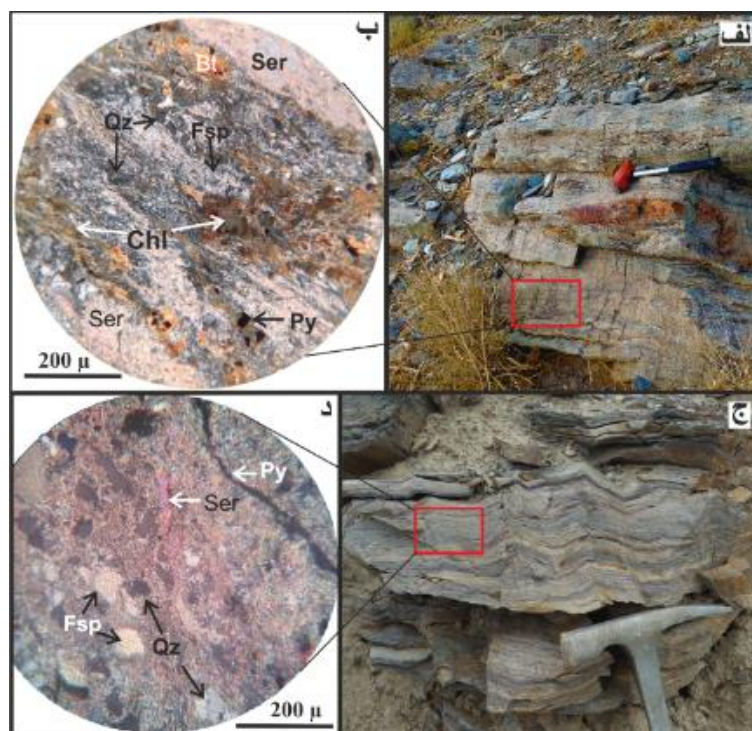
در کرتاسه پیشین، باز شدن یک کافت بزرگ باعث تشکیل حجم زیادی از سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی در منطقه مورد بررسی شده است. در بخش‌های عمیق این کافت، شیل‌ها (فیلیتی شده طی فرایندهای لارامید) با ضخامت چند هزار متر نهشته شده و در نواحی کم‌عمق و ساحلی این حوضه، آهک و در بخش‌های کمی عمیق آن، گدازه‌های آتشفشانی تشکیل شده‌اند [۲]. دگرگونی ناحیه‌ای در این بخش از پهنه سندانج-سیرجان از نوع پس‌رونده و در حد رخساره شیست سبز بوده است [۴]. واحدهای سنگی رخنمون یافته در نقشه زمین‌شناسی (مقیاس ۱:۵۰۰۰) گستره کانسار شوی (شکل ۲) از سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی دگرگون شده شامل شیست، فیلیت و اسلیت‌های پرکامبرین (واحد PC^{sch})، فیلیت (واحد

K^{ph})، سنگ آهک (واحد K^l)، سنگ آتشفشانی دگرگونه (متاآندزیت و متابازالت؛ واحد K^v) وابسته به کرتاسه و نهشته‌های کواترنری (Q^{al}) تشکیل یافته است. زمین‌شناسی واحدهای سنگی رخنمون یافته در گستره کانسار شوی به طور خلاصه در ادامه توصیف می‌شود.

واحد PC^{sch} ضخیم‌ترین و گسترده‌ترین واحد سنگ‌شناسی پرکامبرین در سرتاسر ناحیه ورقه آلوت به شمار می‌رود این واحد از شیست، اسلیت و فیلیت تشکیل شده است و موازی با راندگی‌های اصلی منطقه، در راستای غالب شمال‌غرب-جنوب-شرقی گسترش دارد. واحد PC^{sch} گسترش محدودی در شمال و شمال‌شرق منطقه دارد و از دیدگاه سنگ‌شناسی شامل کانی‌های کوارتز، فلدسپات، سریسیت، بیوتیت، کلریت و کلسیت است (شکل‌های ۳ الف و ب).



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ گستره کانسار چندفلزی طلا دار شوی.



شکل ۳ الف) تصویر رخنمون و ب) تصویر میکروسکوپی از شیت‌های پرکامبرین PCsch، که در آن نوارهای کانیاپی در راستای برگوارگی میلیونیتی-الترامیلیونیتی کشیده شده‌اند. پ) تصویر رخنمون و ت) تصویر میکروسکوپی از فیلیت‌های کرتاسه (واحد Kph). تصاویر میکروسکوپی در نور عبوری با نیکول‌های متقاطع (XPL) برداشت شده‌اند. Chl: کلریت، Fsp: فلدسپارهای آلکان، Py: پیریت، Qz: کوارتز و Ser: سریسیت.

این واحد به شدت در معرض فرآیندهای دگرشکلی قرار گرفته و آثار سنگواره‌ای در آن یافت نشده است [۵]. در مقاطع میکروسکوپی، آهک‌های تیره‌رنگ و کانی‌های تیره‌رنگ رسی دیده می‌شوند که به نظر می‌رسد در اثر اسیدشویی آهک‌ها و دگرسانی رسی شدن به وجود آمده باشند (شکل‌های ۴ الف و ب). افزون بر دگرشکلی شکل‌پذیر (شکل ۵)، دگرشکلی شکنا (شکل ۶) نیز به صورت شکستگی و خردشدگی در این واحد دیده می‌شود.

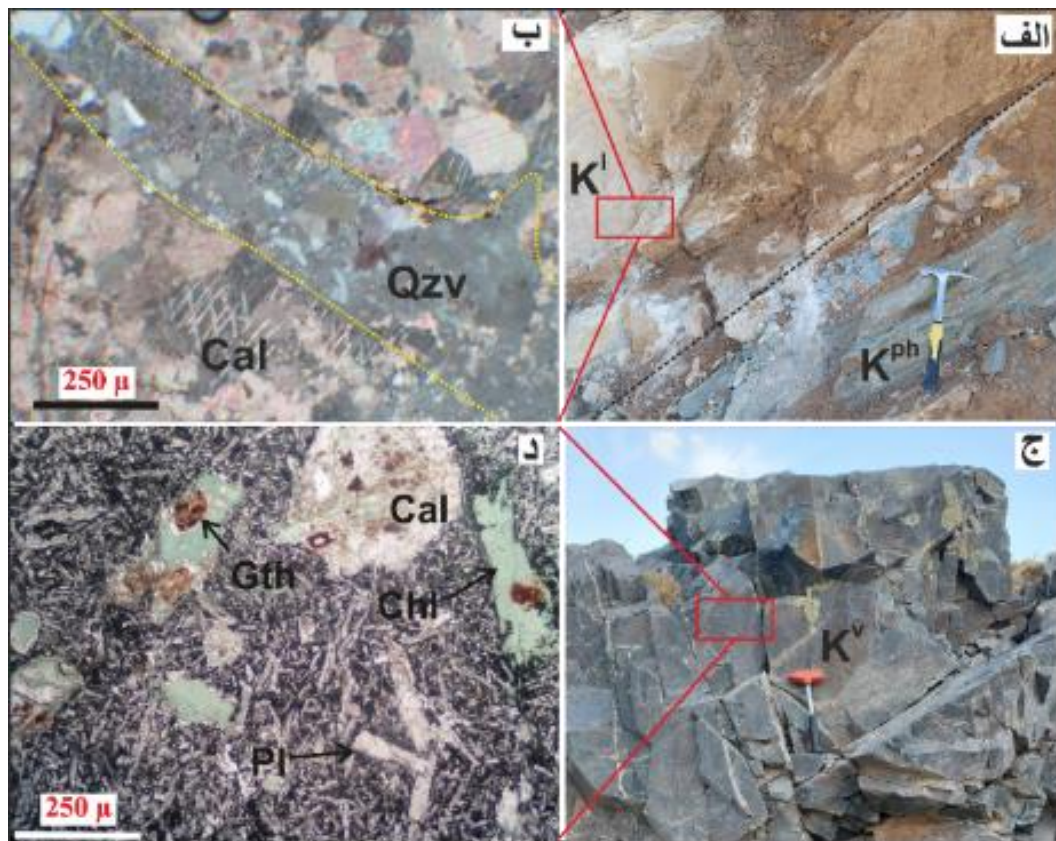
سنگ‌های آتشفشانی (واحد K^V) منطقه مورد بررسی که در شرق سردشت میزبان کانسار سولفید توده‌ای-غنی از طلای باریکاست [۶]، ماهیت آهکی قلیایی دارد [۷] و از گدازه‌های بازالت و آندزیت همراه با توف‌های معادل و نیز میان لایه‌های سنگ‌های رسوبی چون ماسه‌سنگ و سنگ آهک تشکیل شده است. واحد K^V گسترش محدودی در بخش میانی و شمال غرب گستره کانسار شوی دارد و در اصل از سنگ‌های آتشفشانی سبز (به دلیل حضور گسترده کانی دگرگونی کلریت) تا خاکستری با بافت نیمه بلوری و پورفیری تا اینترسرتال در یک زمینه ریزسنگی مرکب از بلورهای ریز پلاژیوکلاز تشکیل

واحد K^{ph} از گسترده‌ترین و ضخیم‌ترین واحدهای رخنمون یافته سنوزوئیک در گستره سقز-سردشت فیلیت‌های کرتاسه است. این واحد بیشتر از کانی‌های کوارتز، فلدسپات، سریسیت و میکا تشکیل شده است این واحد همراه با میان لایه‌های آهک دگرگون و بلوری در مقیاس رخنمون چین‌خوردگی نشان می‌دهد (شکل‌های ۳ پ و ت و ۴ الف). اثر عمده دگرگونی در این واحد بیشتر پویا بوده و دگرگونی سنگ مادر شیلی آن تا فیلیت و به‌ندرت تا شیت می‌رسد [۲]. این مجموعه ضخیم‌ترین و گسترده‌ترین ردیف رسوبی کرتاسه بوده که دارای روند غالب در منطقه است و گسترش زیادی در منطقه مورد بررسی و جنوب غرب ورقه آلوت دارد.

واحد آهکی با سن کرتاسه (واحد K^I): از مهم‌ترین واحدهای سنگی رخنمون دار در گستره کانه‌زایی شوی است که در اثر نیروهای غالب، ساختارهای لازم برای تشکیل کانه‌زایی در آن‌ها به وجود آمده‌اند و در بسیاری موارد نیز با سنگ‌های پیرامون دارای ارتباط گسله است (شکل‌های ۴ الف و ب). این واحد بیشتر از آهک‌های بلورین ضخیم تا متوسط لایه و توده‌ای تشکیل شده که در بعضی بخش‌ها به دولومیت تبدیل شده است.

و حفره‌دار بالشی هستند که حفره‌های آن‌ها با کانی‌های ثانویه چون کلسیت و کلریت پر شده‌اند (شکل‌های ۴ پ و ت).

شده است، کانی‌های عمده تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها فلدسپار قلیایی، کلریت، اپیدوت و پلاژیوکلازهای دگرسان شده هستند. گدازه‌ها کم و بیش دگرگون شده و گاه دارای ساخت‌های برشی



شکل ۴ الف) رخنمون مرز گسله واحدهای آهکی (واحد K^I) و فیلیت‌ها (K^{ph}) و ب) تصویر میکروسکوپی از سنگ آهک (واحد K^I) سیلیسی شده که در آن بلورهای کلسیت با رگچه کوارتزی قطع شده‌اند، پ) رخنمون و ت) تصویر میکروسکوپی از سنگ‌های آتشفشانی (K^v) که از شکفته بلور-های پلاژیوکلاز و کانی‌های کلریت تشکیل شده‌اند و دگرسانی سربستی شدن بر پلاژیوکلازها و گوتیت به صورت رگچه‌ای دیده می‌شود. تصاویر میکروسکوپی در نور عبوری با نیکول‌های متقاطع (XPL) برداشت شده‌اند. Cal: کلسیت، Gth: گوتیت، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز و Chl: کلریت.



شکل ۵ الف) چین‌های بسته و یال موازی نسل اول و ب) چین‌های باز و ایستاده نسل دوم در واحدهای آهکی K^I .



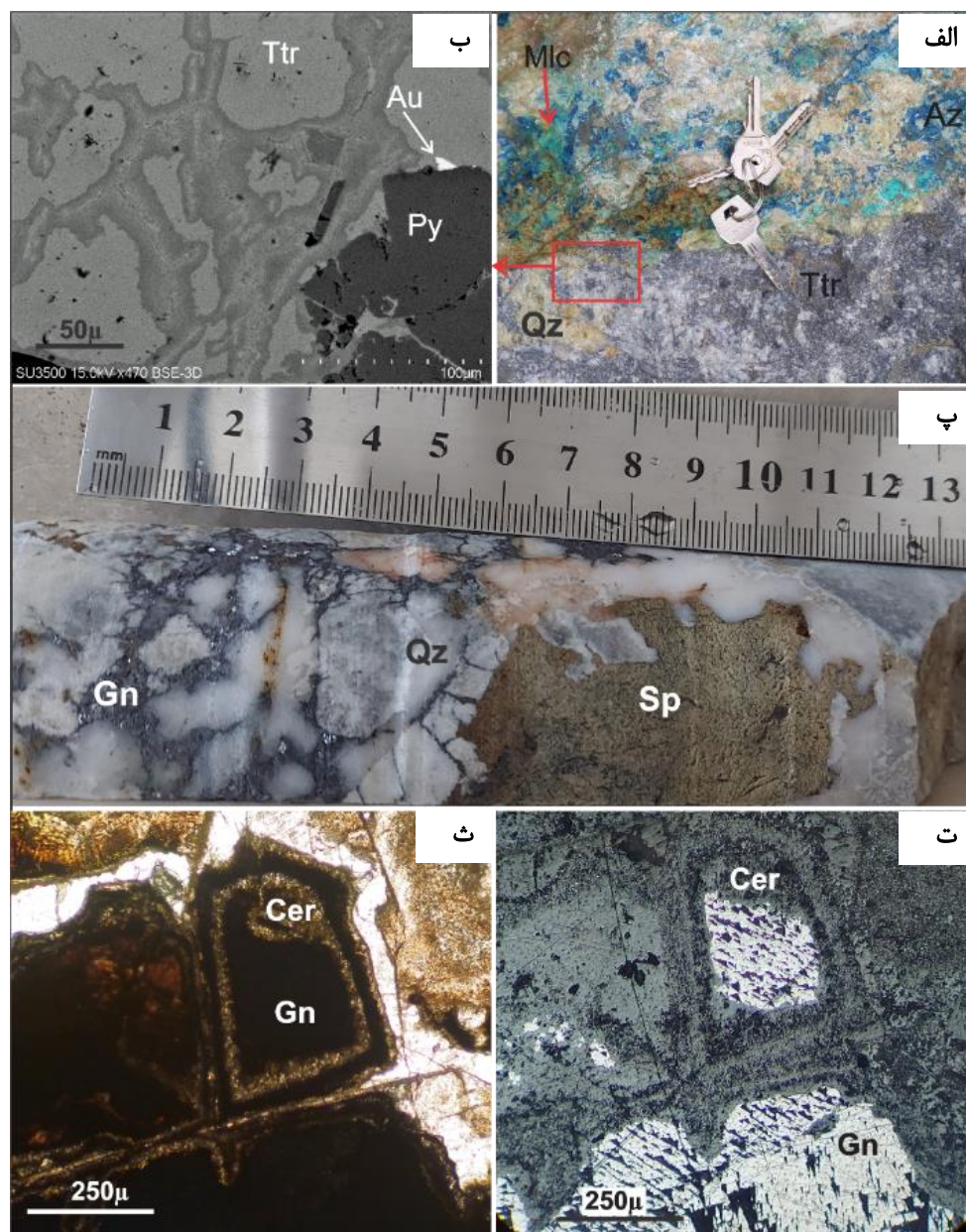
شکل ۶ الف) گسل عادی منطبق بر رگه‌های کوارتزی طلا دار (Qzv) در محل لولای طاق‌دیس شوی و ب) گسل معکوس در نزدیکی برش‌های کانه-دار واقع در لایه‌های داخلی طاق‌دیس شوی.

کانه‌زایی

بر اساس بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی، کانی‌های فلزهای پایه (سرب، روی و مس) و طلای منطقه شوی در ساختارهای شکننا- شکل‌پذیر تشکیل شده است. ساخت غالب در کانسنگ رگه- رگچه‌ای و برشی (سیلیسی- سولفیدی) است و کانسنگ از کانی‌های هم‌رشد کوارتز، تتراهدریت (شکل‌های ۷ الف و ب)، طلا (در اندازه‌های ۵ تا ۳۵ میکرون؛ شکل ۷ ب)، گالن، اسفالریت و کالکوپریت درون چینه‌های آهکی کرتاسه (واحد K^1) تشکیل شده است. راستای غالب رگه‌های سیلیسی کانه‌دار موازی با سطح محوری طاق‌دیس و هم‌راستا با ساختارهای اصلی منطقه و کوهزاد زاگرس (شمال غربی- جنوب شرقی) است (شکل ۶ الف). کانسنگ‌های تشکیل شده در مرحله درونزاد، اغلب با رگه و رگچه‌های تأخیری انباشته از کوارتز و کانی‌های ثانویه (اسمیت‌زونیت، همی‌مورفیت، سروزیت، ملاکیت و آزوریت) ناشی از فرایندهای دگرسانی و اکسایش کانی‌های سولفیدی جانشین و یا قطع شده‌اند (شکل ۷). کانسنگ‌های دارای کانی‌های سولفیدی و سولفوسالتی (گالن، اسفالریت و تتراهدریت) که در پهنه مرکزی و یال‌های طاق‌دیس تشکیل شده‌اند، اغلب در همراهی با رگه و رگچه‌های کوارتزی و دگرسانی سیلیسی پیرامون آن‌ها رخداد دارند. این در حالی است که کانی‌های کربناتی که فراورده هوازدگی و اکسایش کانی‌های سولفیدی سرب و روی هستند و در درز و شکستگی- های تأخیری انباشته شده‌اند، در پهنه مرکزی و یال شمالی طاق‌دیس گسترش کمتری دارند.

براساس شواهد ساختاری، دو زمان برای برخورد بین صفحه عربستان و صفحه ایران، طی بسته‌شدن اقیانوس تتیس جوان پیشنهاد شده [۸] و دو مرحله از دگرشکلی شامل چین‌ها و گسل‌ها در منطقه شوی شناسایی شده است:

چین‌خوردگی‌ها که باعث شکل‌گیری طاق‌دیس و ناودیس‌ها شده‌اند، در دو نسل هم‌محور در مجموعه سنگ‌های دگرگونی گستره شوی رخداد دارند؛ چین‌های نسل اول در اثر سازوکار خمشی- برشی تا خمشی- جریانی، به‌صورت بسته تا یال موازی در سنگ‌های آهکی شکل‌گرفته‌اند، به‌طوری‌که در اثر این سازوکار، لایه‌ها در یال‌ها نازک‌تر و در لولا ضخیم‌تر شده‌اند. در این دسته از چین‌ها، برگوارگی موازی با سطح محوری چین‌ها (S_1) گسترش‌یافته است (شکل ۵ الف). چین‌های نسل دوم به‌صورت چین‌های باز و ایستاده هستند که چین‌های یال موازی مرحله اول را دوباره چین داده‌اند. محور این چین خوردگی با میل کم به سمت شمال‌غرب و به‌صورت موازی تا شبه موازی با محور چین‌های مرحله اول قرار دارد. برگوارگی سطح محوری موازی با سطح محور چین‌ها (S_2) و به‌صورت گسستگی‌های موازی دیده می‌گردد. براساس شواهد ساختاری در چین‌خوردگی مرحله دوم، گسل‌های کششی (عادی)، در منطقه لولایی و در راستای عمود بر محور چین‌خوردگی تشکیل شده‌اند؛ این امر مشخص می‌کند که در جریان چین- خوردگی در راستای عمود بر محور چین‌ها، کشیدگی ایجاد شده است (شکل‌های ۵ ب و ۶ الف).



شکل ۷ (الف) رخداد تتراهدریت با ساخت و بافت رگه و رگچه‌ای در واحد آهکی سیلیسی‌شده، (ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با الکترون های پس پراکنده (SEM-BSE) از رخداد طلا و تتراهدریت، (پ) تصویر نمونه‌دستی از برش‌های کانه‌دار در پهنه مرکزی طاق‌دیس شوی، (ت) تصویر میکروسکوپی در نور بازتابی قطبیده صفحه‌ای، (PPL) از رخداد کانه اولیه گالن در زمینه کوارتز و کانی ثانویه سروزیت، (ث) تصویر میکروسکوپی در نور عبوری PPL از تصویر (ت)، (Au: طلا، Az: آزوریت، Cer: سروزیت، Gn: گالن، Gth: گوتیت، Mlc: مالاکیت، Qz: کوارتز، Sp: اسفالریت و Ttr: تتراهدریت).

زمین شیمی

۰/۵۷ درصد و سرب تا ۰/۳۴ درصد در همراهی با کانسنگ‌های طلا‌دار گزارش شده‌اند (جدول ۱). محاسبه ضرایب همبستگی طلا و عناصر همراه نشان می‌دهد که طلا بالاترین همبستگی مثبت را با آرسنیک (۰/۹) و سپس با نقره (۰/۸) و کادمیم (۰/۸) دارد و با عناصر بیسموت، روی و مس نیز همبستگی به نسبت بالایی را نشان می‌دهد؛ در میان باقی عناصر، آنتیموان با

به‌منظور بررسی‌های زمین شیمیایی، داده‌های تجزیه زمین شیمیایی ۳۲ نمونه کانسنگی در مترهای ۴۲ تا ۸۵ متر مربوط به گمانه مغزه‌گیری شماره BH1 پردازش شدند. بیشینه مقادیر عناصر طلا و نقره به ترتیب ۳/۱۵ و ۱۰۴/۵ گرم در تن اندازه‌گیری شدند. همچنین مقدار مس تا ۴/۲ درصد، روی تا

عناصر آرسنیک، نقره، کادمیم، بیسموت، روی و مس کم‌وبیش هماهنگ با تغییرهای مقدار طلا در نمونه‌های برداشت شده از عمق ۴۲ تا ۸۵ متر گمانه BH1 است.

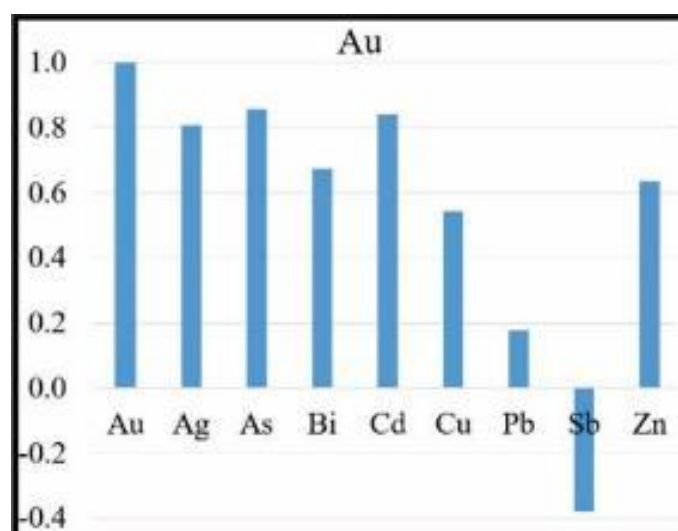
ضریب همبستگی ۰/۴- کمترین همبستگی را با طلا دارد (جدول ۲ و شکل ۸). شکل ۹ به صورتی دیگر ارتباط و همبستگی مثبت طلا با عناصر نقره، مس، روی، آرسنیک، بیسموت و کادمیم را نشان دهد، بطوریکه تغییرهای فراوانی

جدول ۱ خلاصه داده‌های زمین شیمیایی نمونه‌های کانسنکی برداشت شده از عمق ۴۲ تا ۸۵ متر مربوط به مغزه حفاری BH1.

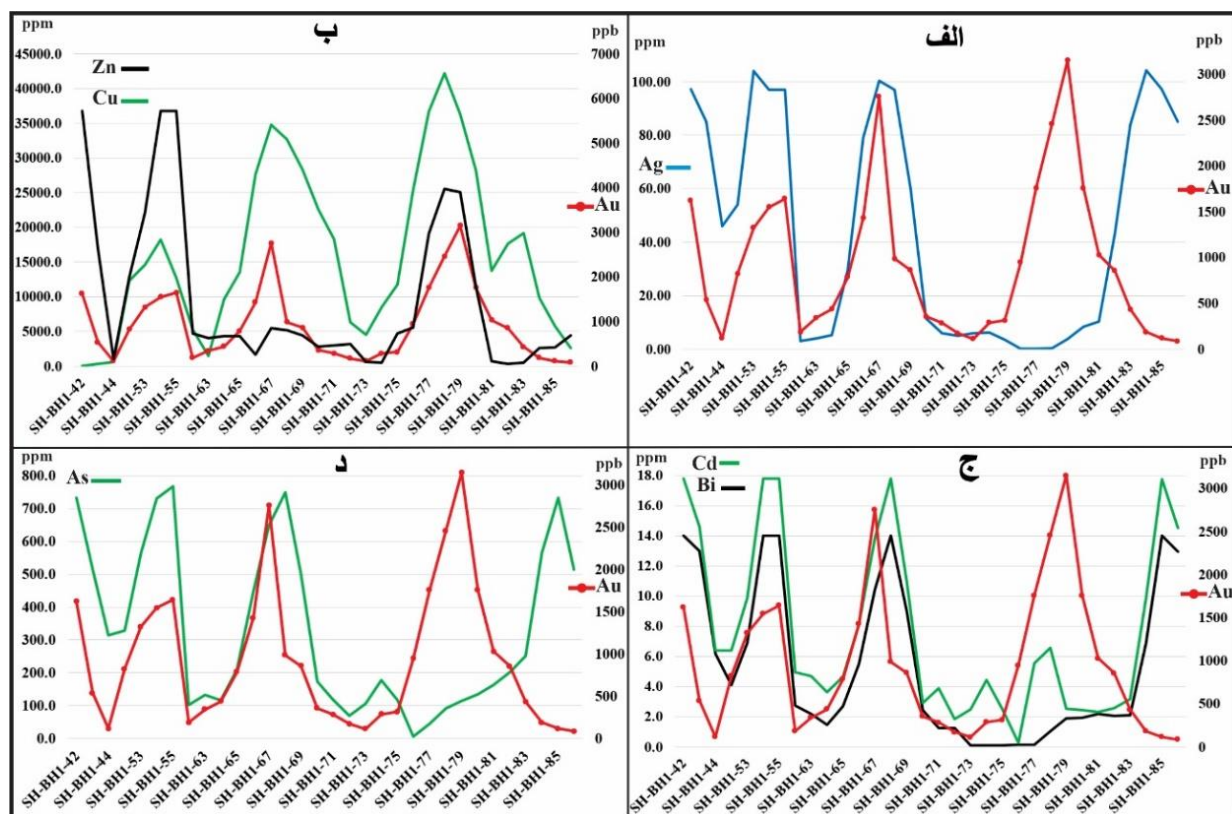
عنصر (ppm) پارامتر	Au(ppb)	Ag	As	Bi	Cd	Cu	Pb	Sb	Zn
ماکسیمم	۳۱۴۹/۰	۱۰۴/۴	۷۶۸/۰	۱۴/۰	۵/۶	۴۲۲۰۰/۰	۳۴۲۱/۰	۶۳/۰	۵۷۲۴/۰
مینیمم	۸۵/۰	۰/۱	۶/۶	۰/۱	۰/۱	۶۲/۰	۵۶/۳	۱/۳	۵۱/۶
میانه	۸۲۴/۰	۳۴/۴	۲۱۱/۰	۲/۷	۲/۴	۱۳۷۰۰/۰	۱۷۰۱/۰	۱/۳	۶۴۸/۷
میانگین	۹۲۷/۴	۴۴/۸	۳۲۶/۵	۵/۳	۲/۳	۱۶۳۰۱/۴	۱۵۹۴/۱	۵/۵	۱۵۰۷/۳

جدول ۲ همبستگی عناصر مهم کانسنکی در نمونه‌های برداشت شده از عمق ۴۲ تا ۸۵ متر مربوط به مغزه حفاری BH1.

	Au	Ag	As	Bi	Cd	Cu	Pb	Sb	Zn
Au	۱/۰								
Ag	۰/۸	۱/۰							
As	۰/۹	۰/۹	۱/۰						
Bi	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۱/۰					
Cd	۰/۸	۰/۶	۰/۸	۰/۶	۱/۰				
Cu	۰/۵	۰/۴	۰/۲	۰/۰	۰/۴	۱/۰			
Pb	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۲	۰/۵	-۰/۳	۱/۰		
Sb	-۰/۴	-۰/۵	-۰/۷	-۰/۸	-۰/۲	۰/۲	-۰/۱	۱/۰	
Zn	۰/۶	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۰	۰/۶	-۰/۴	۱/۰



شکل ۸ نمودار غنی‌شدگی و تهی‌شدگی عناصر مهم کانسنکی در مقایسه با عنصر طلا در نمونه‌های برداشت شده از عمق ۴۲ تا ۸۵ متر مربوط به مغزه حفاری BH1.



شکل ۹ تغییرهای فراوانی برخی از عناصر مهم کانسنکی نسبت به عنصر طلا (Au) در نمونه‌های برداشت شده از عمق ۴۲ تا ۸۵ متر (گمانه شماره BH1) در کانسار شوی، الف) تغییر فراوانی عنصر طلا (Au) نسبت به نقره (Ag)، ب) تغییر فراوانی عنصر طلا (Au) نسبت به عنصر روی (Zn) و مس (Cu)، پ) تغییر فراوانی عنصر طلا (Au) نسبت به عناصر کادمیم (Cd) و بیسموت (Bi) و ت) تغییر فراوانی عنصر طلا (Au) نسبت به آرسنیک (As).

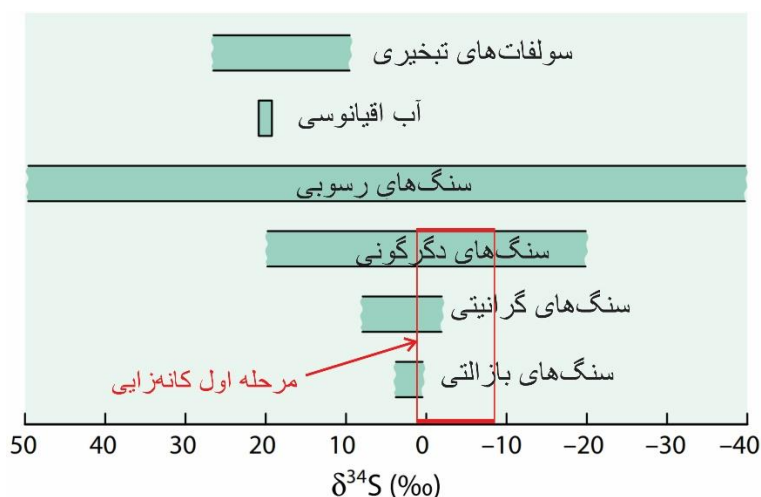
بررسی ایزوتوپ‌های پایدار

اکسیژن $\delta^{18}\text{O}$ برای کانی‌های کوارتز اندازه‌گیری شد و ترکیب ایزوتوپی اکسیژن سیال در تعادل با کوارتز براساس روش شارپ و همکاران [۱۲] و با استفاده از دمای همگن شدگی میانبارهای سیال [۱۱] محاسبه شد. مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ برای سیال کانه ساز از ۹٫۸ تا ۱۳٫۷ در هزار برای کانه‌زایی اولیه (جدول ۴) و از ۲۴٫۹۳ تا ۳۶٫۸۷- در هزار برای کانه‌زایی ثانویه متغیر است (جدول ۵). محدوده تغییرهای $\delta^{18}\text{O}$ کانه‌زایی اولیه در گستره تغییرهای ایزوتوپی سنگ‌های دگرگونی و برای کانه‌زایی ثانویه در گستره تغییرهای ایزوتوپی آب‌های جوی قرار دارند (شکل ۱۱). مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ محاسبه شده برای سیال کانه‌ساز اولیه با دیگر کانسارهای کوهزایی در پهنه سهندج - سیرجان و دیگر کانسارهای شاخص طلای کوهزایی در جهان قابل مقایسه است.

ایزوتوپ‌های پایدار ابزار مناسبی برای بررسی دمای سامانه‌های کانه ساز، خاستگاه یا منابع تأمین‌کننده سیال‌های و فلزها، مقدار و حجم واکنش سیال‌های کانه ساز با سنگ‌های دیواره و سازوکارهای نهشت کانسنگ هستند [۹]. برای تجزیه ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد، ۲۰ نمونه از کانی‌های هم‌زیست گالن (۱۰ نمونه) و اسفالریت (۱۰ نمونه) به منظور تعیین خاستگاه گوگرد و دماسنجی ایزوتوپی برداشت شدند که مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ در گستره ۱۰٫۴- تا ۱۴٫۴ در هزار اندازه‌گیری شدند (جدول ۳ و شکل ۱۰). مقدار $\delta^{34}\text{S}$ H_2S سیال در تعادل با گالن و اسفالریت، براساس روش مرجع [۱۰] و با استفاده از دمای همگن شدگی میانبارهای سیال [۱۱] محاسبه شد (جدول ۳). مقادیر ایزوتوپ

جدول ۳ ترکیب ایزوتوپی گوگرد $\delta^{34}\text{S}$ برای نمونه‌های کانسنکی و سیال کانه ساز.

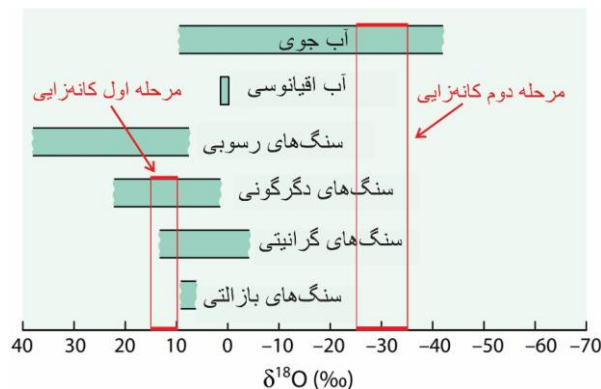
شماره نمونه	کانی	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ VCDT	دمای متوسط $^{\circ}\text{C}$	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ سیال H_2S
ISO-1S	گالن	-۱۰٫۴	۲۲۵	-۷٫۸
ISO-2S	اسفالریت	-۵٫۷	۲۲۵	-۶٫۱
ISO-3S	گالن	-۱۰٫۱	۲۲۵	-۷٫۵
ISO-4S	اسفالریت	-۷٫۲	۲۲۵	-۷٫۶
ISO-5S	گالن	-۹٫۲	۲۲۵	-۶٫۶
ISO-6S	اسفالریت	-۶٫۵	۲۲۵	-۶٫۹
ISO-7S	گالن	-۱۰٫۳	۲۲۵	-۷٫۷
ISO-8S	اسفالریت	-۸٫۱	۲۲۵	-۸٫۵
ISO-9S	گالن	-۶٫۵	۲۲۵	-۳٫۹
ISO-10S	اسفالریت	-۳٫۴	۲۲۵	-۴٫۷
ISO-11S	گالن	-۸٫۶	۲۲۵	-۶
ISO-12S	اسفالریت	-۵٫۳	۲۲۵	-۵٫۷
ISO-13S	گالن	-۸	۲۲۵	-۵٫۴
ISO-14S	اسفالریت	-۸٫۳	۲۲۵	-۸٫۷
ISO-15S	گالن	-۹٫۱	۲۲۵	-۶٫۵
ISO-16S	اسفالریت	-۵٫۹	۲۲۵	-۶٫۳
ISO-17S	گالن	-۸٫۱	۲۲۵	-۵٫۵
ISO-18S	اسفالریت	-۴٫۷	۲۲۵	-۵٫۱
ISO-19S	گالن	-۷٫۸	۲۲۵	-۵٫۲
ISO-20S	اسفالریت	۱٫۴	۲۲۵	۱

شکل ۱۰ گستره تغییر ترکیب ایزوتوپی گوگرد $\delta^{34}\text{S}$ سیال کانه‌ساز کانسنک‌های طلا دار کانسار شوی بر اساس هوفز [۱۳].جدول ۴ ترکیب ایزوتوپی اکسیژن ($\delta^{18}\text{O}$) برای نمونه‌های کوارتز کانه‌زایی اولیه.

شماره نمونه	کانی	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ vs VSMOW	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ سیال
ISO-01	کوارتز	۲۰٫۷	۱۳٫۷
ISO-03	کوارتز	۱۸٫۳	۱۱٫۳
ISO-05	کوارتز	۱۸٫۹	۱۱٫۳
ISO-07	کوارتز	۱۶٫۸	۹٫۸

جدول ۵ نتایج تجزیه ترکیب ایزوتوپی اکسیژن ($\delta^{18}\text{O}$) برای نمونه‌های کوارتز کانه‌زایی ثانویه

سیال $\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ vs VSMOW	کانی	شماره نمونه
-۲۴٫۹۳	-۱۰٫۵۳	کوارتز	ISO-02
-۳۰٫۲۱	-۱۵٫۸۱	کوارتز	ISO-04
-۲۸٫۰۳	-۱۳٫۶۳	کوارتز	ISO-06
-۳۶٫۸۷	-۲۲٫۴۷	کوارتز	ISO-08



شکل ۱۱ گستره تغییر ترکیب ایزوتوپی اکسیژن در نمونه‌های کوارتزی برداشت شده از دو مرحله کانی‌سازی (اولیه و ثانویه) در کانسار شوی بر اساس مرجع [۱۳].

دماسنجی ایزوتوپی

تفکیک ایزوتوپی گوگرد بین فازهای سولفیدی هم‌زیست به‌عنوان تابعی از دما، براساس بررسی‌های نظری و تجربی تعیین شده است. مناسب‌ترین جفت کانی برای تعیین دما، اسفالریت-گالن است و بهترین همخوانی را با دماهای به دست آمده از میانبرهای سیال در گستره ۱۲۵ تا ۳۷۰°C ارائه می‌دهد [۱۴]. بررسی مغزه‌ها و مقاطع صیقلی نشان داده است که در پرش‌های سیلیسی-سولفیدی شوی، کانی‌های گالن و اسفالریت هم‌زیستی و تعادل بافتی بالایی دارند و به طور هم‌زمان تشکیل شده‌اند. از این رو آنها به‌عنوان جفت کانی‌های سولفیدی برای بررسی‌های دماسنجی انتخاب شدند. برای

محاسبه‌های دماسنجی ایزوتوپی در این پژوهش از رابطه زیر

[۱۵] استفاده شده است:

$$1000\ln\alpha = A \cdot 10^6/T^2 + 0 \cdot 10^3/T + 0$$

که در آن، A ثابت تعادلی و T دمای تفکیک ایزوتوپی گوگرد هستند. در این بررسی، دمای سیال‌های کانه‌ساز در گستره ۱۴۴ تا ۳۳۶ (با میانگین ۲۵۵) درجه سانتی‌گراد برآورد شده است (جدول ۶). دماهای ۲۵ و ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد خارج از گستره دماهای میانبرهای سیال به دست آمده‌اند و این امر می‌تواند ناشی از تبادل ایزوتوپی پس‌رونده بین فازهای هم‌زیست و یا با سیال‌های گذرا باشد و در اثر این عوامل تنظیم دوباره ایزوتوپ‌ها می‌تواند رخ دهد [۱۴].

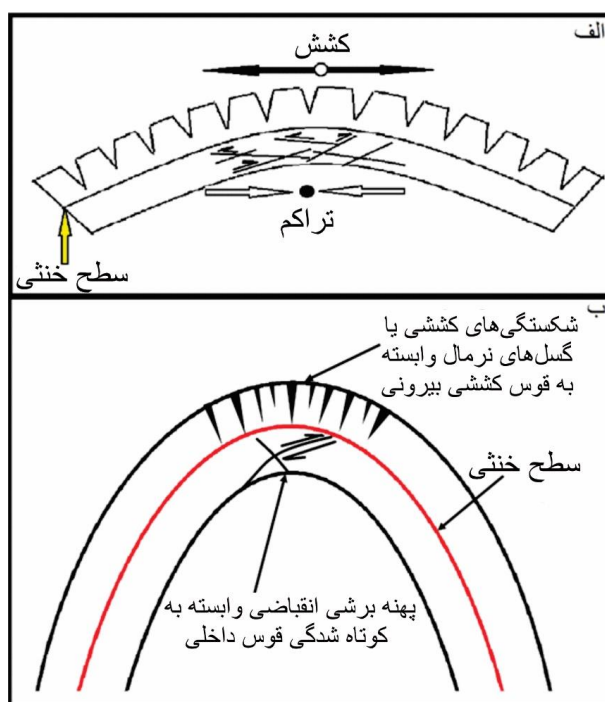
جدول ۶ دماهای ایزوتوپی محاسبه شده برای جفت کانی‌های گالن-اسفالریت برداشت شده از پرش‌های گرمایی کانه‌دار در کانسار شوی

دما (°C)	$\Delta^{34}\text{S}(\text{‰})$	جفت کانی	شماره نمونه
۱۴۴	۴٫۷	گالن-اسفالریت	ISO (1S-2S)
۲۵۸	۲٫۹	گالن-اسفالریت	ISO (3S-4S)
۲۷۷	۲٫۷	گالن-اسفالریت	ISO (5S-6S)
۳۳۶	۲٫۲	گالن-اسفالریت	ISO (7S-8S)
۳۳۶	۲٫۲	گالن-اسفالریت	ISO (9S-10S)
۲۲۵	۳٫۳	گالن-اسفالریت	ISO (11S-12S)
۱۳۰۰	۰٫۳	گالن-اسفالریت	ISO (13S-14S)
۲۳۲	۳٫۲	گالن-اسفالریت	ISO (15S-16S)
۲۱۷	۳٫۴	گالن-اسفالریت	ISO (17S-18S)
۲۵	۹٫۲	گالن-اسفالریت	ISO (19S-20S)

برداشت

منطقه مورد بررسی در معرض مجموعه فرایندهای دگرگونی ناحیه‌ای، فرورانش، فعالیت ماگمایی آهکی قلیایی و زمین ساخت برخوردی (صفحه عربی و ایران) در اواخر کرتاسه و اواسط ترشیری [۱۶، ۱۷] بوده و پیامد آن ایجاد پهنه‌های برشی (شکل‌پذیر و شکنا) همراه با بالآمدگی ناحیه‌ای بوده است. سازوکار دو مرحله چین‌خوردگی در منطقه مورد بررسی به این صورت بوده است که چین‌های مرحله اول به صورت بسته تا یال موازی با آثار خمشی-جریانی در محیط شکل‌پذیر تشکیل شده‌اند (شکل ۵ الف)، در حالی که چین‌های باز و ایستاده مرحله دوم با آثار برش‌های سیلیسی-سولفیدی درون لایه‌های داخلی طاق‌دیس شوی (در اثر نیروهای فشارشی) و رگه‌های سیلیسی کانه‌دار منطبق بر گسل‌های عادی در بخش-های خارجی لولای طاق‌دیس شوی (در اثر نیروهای کششی) محیط تشکیل شکنا را از خود نشان داده‌اند (شکل‌های ۵ ب، ۶، ۷ و ۱۲). با توجه به بررسی‌های صحرائی، آزمایشگاهی، میکروسکوپی و همچنین نتایج تجزیه زمین شیمیایی نمونه‌ها، دگرشکلی شکنا و دگرسانی‌های سیلیسی، سولفیدی و کربناتی را می‌توان عوامل اصلی کنترل‌کننده کانه‌زایی در طاق‌دیس

شوی دانست. براساس بررسی‌های ایزوتوپی انجام شده بر کانسارهای طلای کوهزایی، مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ در ذخایر طلای کوهزایی بین ۶ تا ۱۳ در هزار پیشنهاد شده است [۱۸، ۱۹] و مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ برای ذخایر کوهزایی بسیار متغیر است [۲۰، ۲۱]. در کانسار شوی، گستره تغییرهای ترکیب ایزوتوپی اکسیژن ($\delta^{18}\text{O}$) و گوگرد ($\delta^{34}\text{S}$) سیال کانه ساز به ترتیب، ۸،۹ تا ۱۳،۷ در هزار، ۸،۶- تا ۱۰،۱ در هزار، محاسبه شده است که با مقادیر ارائه شده برای سنگ‌های دگرگونی همخوانی دارند و سیال کانی‌ساز، به احتمال بسیار از یک سیال دگرگونی شکل گرفته است [۲۲، ۲۳]. باتوجه به شواهدی چون محیط زمین پویایی فرورانشی و برخورد قاره‌ای، قرارگیری در پهنه دگرگونی سندانج-سیرجان، ماهیت سنگ میزبان، وجود کنترل‌کننده‌های ساختاری از جمله دگرشکلی‌های میلیونی، همبرزایی کانی‌شناسی و زمین شیمی کانسنگ‌های طلا‌دار، ماهیت فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌ساز و ترکیب ایزوتوپ‌های پایدار به نظر می‌رسد که کانه‌زایی طلا و فلزهای همراه در کانسار شوی بیشترین شباهت را با ذخایر طلای کوهزایی نوع فراگرمایی نشان می‌دهد [۲۲، ۲۴، ۲۵].



شکل ۱۲ چگونگی تشکیل رگه‌های کوارتزی در اثر کرنش طولی تانژانتی (الف) از مرجع [۲۶] و (ب) از مرجع [۲۷]. ساز و کار تشکیل رگه‌ها هم‌زمان با تشکیل چین‌ها به صورتی است که فضاهای کششی و گسل‌های عادی در لایه‌های بیرونی و پهنه‌های به شدت خرد شده در لایه‌های داخلی امکان نفوذ سیال‌های کانه‌دار را فراهم می‌آورند.

قردانی

نویسندگان از مسئولان آزمایشگاه دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی برای تهیه مقاطع میکروسکوپی و آماده‌سازی نمونه‌های زمین‌شیمیایی قردانی نموده و از مدیریت شرکت آتی صنعت به دلیل در اختیار قراردادن مغزه‌های حفاری سپاسگزاری می‌کنند.

مراجع

- [1] Eftekhari-Nezhad J., "The Mahabad Quadrangle map (scale 1:250,000)", Geological Survey and Mineral Exploration of Iran. Tehran (1973).
- [2] Omrani J., Khabaznia A.R., "Geological map 1:100000 Alut sheets", Iran Geological Survey (2003).
- [3] Mohajjel, M., Fergusson, C. L., Sahandi, M. R., 2003, Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan zone, western Iran. J. Asian Earth Sci., 21: 397-412.
- [4] Mohajjel M., "Structure and tectonic evolution of Paleozoic-Mesozoic rocks, Sanandaj-Sirjan zone, Western Iran", PhD thesis, Uni. of Wollongong, Australia (1997).
- [5] Mohajjel M., "Geological and structural report of the Alut area", Iran Geological Survey (2003).
- [6] Tajeddin H.A., Rastad E., Yaghoupour A., Maghfouri S., Peter J. M., Goldfarb R., Mohajjel M., "The Barika gold-bearing Kuroko-type volcanogenic massive sulfide (VMS) deposit, Sanandaj-Sirjan zone, Iran", Ore Geology Reviews (2019).
- [7] Azizi H., Moinevaziri H., "Review of the tectonic setting of Cretaceous to Quaternary volcanism in northwestern Iran", Journal of Geodynamics 47 (2009) 167- 179.
- [8] Eliasadeh R., Mohajjel M., Biralvand M., "Structure of Zagros collision zone in north western Iran (in Persian)", Iran Geological Quarterly, 4th year, 16th issue, pages 25-36 (2011).
- [9] Pirajno F., "hydrothermal mineral deposits, principle and fundamental concept for the explorationgeologist", Springer, 706 p. (2009).
- [10] Li Y., Liu J., "Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides", Geochimica et Cosmochimica Acta 70 (2006) 1789- 1795.
- [11] Abdollahpour M., Niroomand Sh., Tajeddin H.A., "Geology, mineralization and fluid inclusions study in the Shovey orogenic gold deposit, northwest of Baneh, northwest of Sanandaj-Sirjan zon (in Persian)", Journal of Advanced Applied Geology, Volume 7, Number, 6 (2017) pp. 66-78.
- [12] Sharp Z.D., Gibbons J.A., Maltsev O., Atudorei V., Pack A., Sengupta S., Shock E.L., Knauth L.P., "A calibration of the triple oxygen isotope fractionation in the SiO₂-H₂O system and applications to natural samples", Geochimica et Cosmochimica Acta 186 (2016)105-119.
- [13] Hofes J., "Stable Isotope Geochemistry", Springer, 6th edn (2009).
- [14] Hoefs J., "Stable isotope geochemistry", Springer (2004).
- [15] Liu S., Li Y., Liu J., Shi Y., "First-principles study of sulfur isotope fractionation in pyrite-type disulfides", American Mineralogist 100 (2015) 203-208.
- [16] Agard P., Omrani J., Jolivet L., Mouthereau F., "Convergence history across Zagros (Iran): Constraints from collisional and earlier deformation", Int J Earth Sci 94 (2005) 401-419.
- [17] Omrani J., "the geodynamic evolution of Zagros: Tectonic and petrological constraints from internal zones", PhD thesis, Universite Paris, France (2008).
- [18] McCuaig T.C., Kerrich R., "P-T-t-deformation-fluid characteristics of lode gold deposits: Evidence from alteration systematics", Ore Geology Reviews, v. 12 (1998) p. 381- 454.
- [19] Bierlein F.P., Crowe D.E., "Phanerozoic Orogenic lode gold deposits", Rev. Econ. Geol., 13 (2000) 103-139.
- [20] Goldfarb R.J., Groves D.I., "Orogenic gold: common or evolving fluid and metal sources through time", Lithos 233 (2015) 2-26.
- [21] Groves D. I., Santosh M., "The giant Jiaodong gold province: the key to a unified model for orogenic gold deposits? Geoscience Frontiers", (73) (2016) 409-417.
- [22] Goldfarb R.J., Baker T., Dube B., Groves D.I., Hart C.J.R., Gosselin P., "Distribution, character and genesis of gold deposits in metamorphic terranes", Econ Geol, 100th Anniv Vol (2005) p 407-450.
- [23] Dubinina E.O., Baskina V.A., Avdeenko A.S., "Nature of ore-forming fluids of the Dal'negorsk deposit: Isotopic and geochemical parameters of

and origins. In: Hagemann", S. G., Brown, P.E., Rev. in Economic Geology., 13 (2000) 501-551.

[26] Cox S.F., "coupling between deformation, fluid pressures and fluid flow in ore-producing hydrothermal environments. *Economic Geology*", 100th Anniversary Volume (2005) 39-75.

[27] Price N.J., Cosgrove J.W., "Analysis of geological structures", Cambridge University Press, Cambridge (1990) 502 pp.

the altered host rocks", *Geol. Ore Deposit* 53 (2011) 58-73.

[24] Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre M.M., Hagemann S.G., Robert F., "Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types", *Ore Geol Rev* 13 (1998) 7-27.

[25] Kerrich R., Goldfarb R.J., Groves D.I., Garwin "the geodynamic of world-class gold deposits: characteristics, space-time distribution