

## بررسی نقش اختلاط شاره‌های ماقمایی و جوی در کانه‌زایی کانسار چند فلزی سوراب (جنوب فردوس) با استفاده از شواهد ژئوشیمی ایزوتوپی و میکرو دماسنجی

بهزاد مهرابی، ابراهیم طالع فاضل\*

گروه زمین‌شناسی دانشگاه تربیت معلم تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۸۸/۱۰/۱۳، نسخه نهایی: ۸۹/۵/۱۶)

**چکیده:** کانسار چندفلزی سوراب در ۷۷ کیلومتری جنوب شهرستان فردوس و در شمال زون ساختاری لوت قرار دارد. زمین‌شناسی منطقه شامل سنگ‌های رسوی ژوراسیک از جمله شیل و ماسه‌سنگ‌های سازند شمشک، سنگ‌آهک بادام و سنگ‌های آتش‌شانی و تووه‌های کم عمق آهکی-قليایی ترشیری به عنوان سنگ‌میزان کانی‌سازی گرمایی شامل آندزیت، داسیت، ریوداسیت و ریولیت است. کانی‌سازی در این سنگ‌ها با دو روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق و شرقی-غربی در گسل‌ها و شکستگی‌ها شکل گرفته است. مهمترین کانه‌های سولفیدی شامل گالن، اسفالریت، استیبنیت، کالکوپیریت و پیریت است که غالباً به صورت بافت شکافه‌پرکن، رگه‌ای و نواری دیده می‌شوند. به‌طور کلی، کانی‌سازی در منطقه طی دو مرحله شامل کانی‌سازی عنصر سولفیدی فلزات پایه ( $Pb>Zn>Cu$ ) به همراه پیریت‌های نسل اول و مرحله‌ی دوم شامل مجموعه کانی‌های آنتیموان (استیبنیت، کالکواستیبنیت، تترادریت و بورونویت) همراه با مقداری کم آرسن‌پیریت و پیریت نسل دوم دیده می‌شود. بررسی‌های شاره‌های درگیر بر روی کوارتز‌های همراه با کانی‌سازی و اسفالریت‌ها نشان‌دهنده‌ی دمای همگن شدن بین ۱۱۴ تا  $275^{\circ}\text{C}$  و شوری ۴,۲ تا ۱۷,۷ درصد وزنی نمک طعام است. ژئوشیمی ایزوتوپی اکسیژن (نسبت به SMOW) بین ۱۲,۵ تا ۱۴,۸٪ (با میانگین ۱۳,۶٪) قرار می‌گیرد که به نظر می‌رسد شاره‌ی کانه‌ساز حاصل اختلاط شاره‌های جوی و ماقمایی در منطقه است. بنابر این بررسی به‌نظر می‌رسد اختلاط، سردشده‌گی و واکنش آب-سنگ از مهمترین عوامل موثر در تشکیل کانسار چندفلزی سوراب هستند.

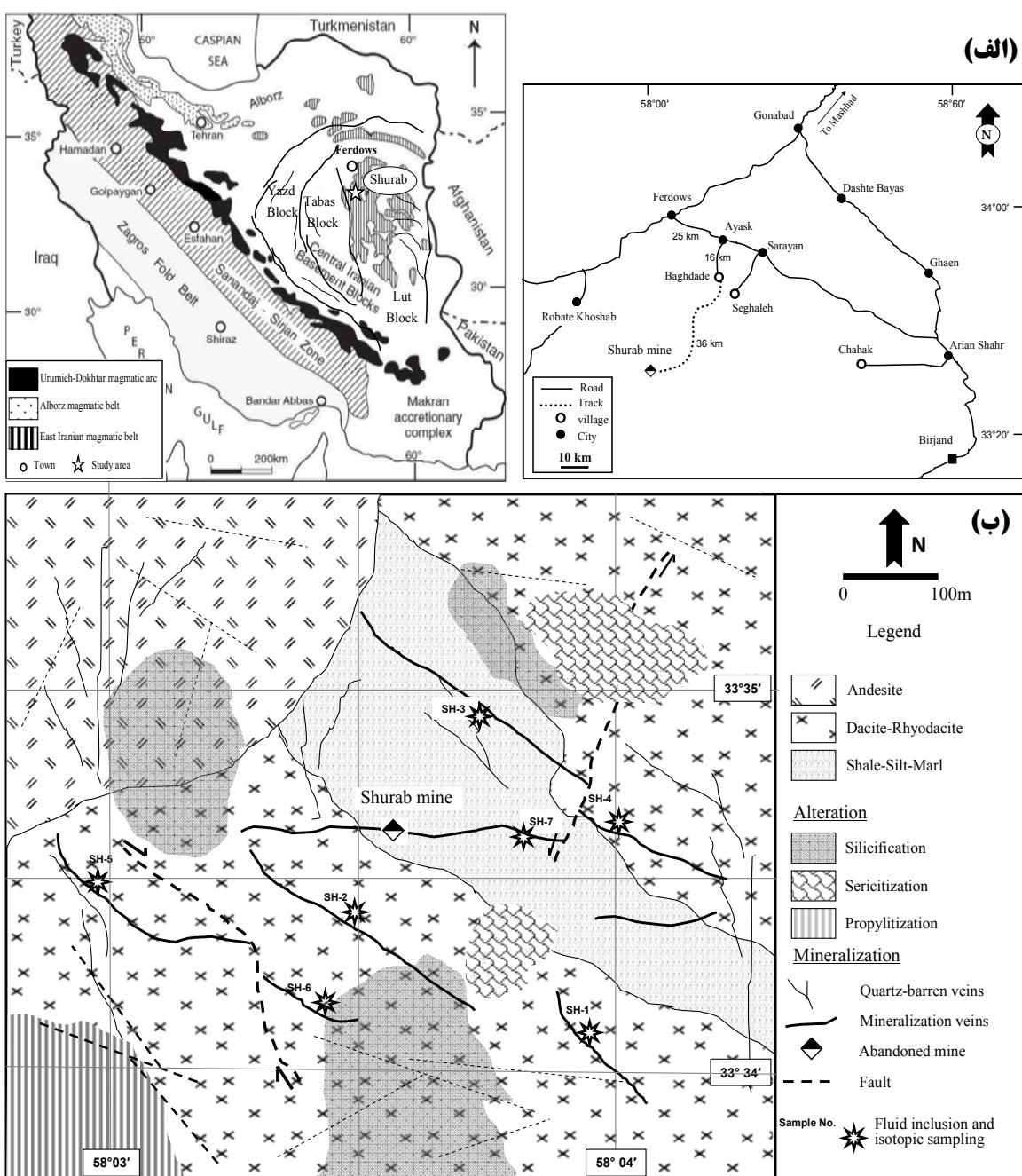
**واژه‌های کلیدی:** کانی‌سازی چندفلزی، شاره‌های درگیر، ژئوشیمی ایزوتوپی، آمیزش، سوراب.

طول میانگین ۹۰ تا ۱۳۰ متر و استخراج مجموع ۸۵۰ متر مغزه‌ی حفاری در منطقه‌ی مورد بررسی کرده است که نمونه‌برداری از آنها انجام گرفته است. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، منطقه‌ی معدنی دارای دودسته رگه‌ای اصلی یکی با روند شرقی-غربی و دیگری با روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی است که بخش عمده‌ای از کارهای قدیمی بر روی رگه‌ای اول انجام گرفته و دارای ۲۰۰ متر طول و ۳۰ متر عرض است. در این گستره، ماده‌ی معدنی به صورت رگه‌های چندفلزی و برشی در مرز داسیت، شیل و ماسه‌سنگ‌های ژوراسیک دیده می‌شوند.

مقدمه

منطقه‌ی معدنی سوراب در شرق ایران با مختصات "۴۳° ۰' ۵۸° طول شرقی و "۳۳° ۳۳' ۳۴° عرض شمالی در ۷۷ کیلومتری جنوب شهرستان فردوس قرار دارد. این منطقه بخش کوچکی از گوشه‌ی شمال‌شرقی ایالت ساختاری لوت است (شکل ۱). این منطقه از سال ۱۳۱۷ با استفاده از تونل و گزنه‌ها به صورت دنباله‌ی رگه‌ای مورد استخراج سطحی و از سال ۱۳۶۲ از سوی سازمان زمین‌شناسی کشور مورد پی‌جوانی‌های چکشی قرار گرفته است [۱]. شرکت تحقیقات و کاربرد مواد معدنی ایران در سال‌های اخیر (۱۳۸۵)، اقدام به حفاری مغزه‌گیری تعداد ۱۰ گمانه با

\*نویسنده مسئول، تلفن نمایش: ۰۲۱ (۸۸۳۰ ۹۲۹۳)، پست الکترونیکی: fazel\_tale@yahoo.com



شکل ۱ (الف) موقعیت منطقه‌ی معدنی شوراب در نقشه‌ی ساختاری ایران [۳] و راههای دسترسی به منطقه و (ب) نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده منطقه [۲].

شاره‌ی کانه‌ساز است که بر مبنای شواهد کانی‌شناسی، بافت، شاره‌های درگیر و ایزوتونی اکسیژن انجام گرفته است.

#### روش بررسی

به منظور بررسی چگونگی کانی‌سازی در منطقه، پس از بررسیهای دفتری و کارهای انجام‌گرفته قبلی [۴-۷]، این نهشته در مقیاس ۱:۵۰۰۰ به گستردگی حدود ۱/۵ کیلومتر

بخش دوم رگه‌ی معدنی نیز در ۲۰۰ متری شمال بخش نخست قرار دارد که کانی‌سازی به طول ۱۰۰ متر و عرض ۲۰ متر با روند شمال غربی-جنوب‌شرقی بوده و درون داسیت‌های خرد شده و به شدت دگرسان ترشییری تشکیل شده است (شکل ۱). میزان کانسار نهشته با احتساب طول، میانگین پهنا و عمق رگه‌ها حدود ۱۵ هزار تن برآورد زده می‌شود [۲]. هدف این پژوهش، بررسی چگونگی تشکیل، شرایط‌دمایی و ویژگی‌های فیزیکو‌شیمیایی

منطقه‌ی سوراب، در کنترل شکستگی‌ها و گسل‌های منطقه است که در کل به دو صورت شامل (۱) گسل‌های شمال‌غربی-جنوب‌شرقی و (۲) گسل‌های شمال‌شرقی-جنوب‌غربی و شرقی-غربی در منطقه دیده می‌شوند.

### بحث و بررسی پراکندگی دگرسانی‌ها

به طور کلی چهار نوع دگرسانی شامل پروپیلیتیک، سریسیتیک، آرژیلیک و سیلیسیک در منطقه تشخیص داده شدند که از نظم خاصی برخوردار نبوده و دگرسانی‌های سیلیسیک و سریسیتیک در پیرامون رگه‌های کانه‌دار از اهمیت بالایی برخوردارند. مهم‌ترین کانی‌های پروپیلیتیک دگرسان در منطقه، آبیت و اپیدوتاند که در آندزیت‌ها و تراکیت‌های منطقه قابل مشاهده‌اند. دگرسانی آرژیلیک با افزایش کائولینیت به جای پلازیوکلاز و مونتموریونیت به جای آمفیبول و پلازیوکلاز به‌ویژه در آندزیت‌های منطقه شناخته می‌شود که در بررسی‌های XRD قابل شناسایی‌اند. سیلیسی شدن به‌ویژه در اطراف رگه و رگچه‌های کوارتز-استیبنیت و بندرت سنگ‌های داسیت و ریوداسیت میزان کانی‌سازی تشکیل شده است. همچنین سریسیتی شدن در منطقه از چشم‌گیر پدیده‌ی دگرسانی است که در نتیجه افزایش یون  $K^+$  در اثر کلریتی شدن بیوتیت‌ها به وجود آمده و غالباً باعث ایجاد هاله‌ی دگرسانی در پیرامون فنوكریست‌های پلازیوکلاز شده است (شکل ۱).

### کانی‌شناسی رگه‌ها و توالی پاراژنزی

کانی‌سازی در منطقه در راستای گسلی به طول حدود ۱۰۰ متر با روند تقریبی شرقی-غربی با شیب ۴۰ تا ۷۰ درجه به‌سمت جنوب تشکیل شده است که با چند گسل عرضی تقریباً شمالی-جنوبی قطع شده است. در تمامی رگه‌های مورد بررسی کوارتز و کلسیت به عنوان فراوان‌ترین کانی باطله و پس از آن به ترتیب گالن، اسفالریت، استیبنیت و کالکوپیریت به عنوان مهم‌ترین کانی‌های سولفیدی (بین ۲۰ تا ۳۰ درصد رگه) فراوان‌ترین کانی‌های تشکیل دهنده‌ی رگه‌ها هستند. استیبنیت بیشتر به صورت آزاد به همراه دیگر کانی‌های سولفیدی آنتیموان دار از جمله کالکواستیبنیت و سولفosalت‌های چار و جهی و بورونیت مشاهده می‌شود که به صورت بافت شکاف‌پرکن و در موارد نادری به صورت پراکنده و ادخال در کانه گالن دیده می‌شود که وجود ماکل "crumpled" از ویژگی‌های شاخص آن است (شکل ۲الف). در تجزیه‌های EPMA صورت گرفته بر روی کالکواستیبنیت‌ها، وجود عناصر نقره (۰.۴۵۱٪)، روی (۰.۵۳۵٪)، آرسنیک (۰.۲۳۷٪) و طلا (۰.۲ppb) در

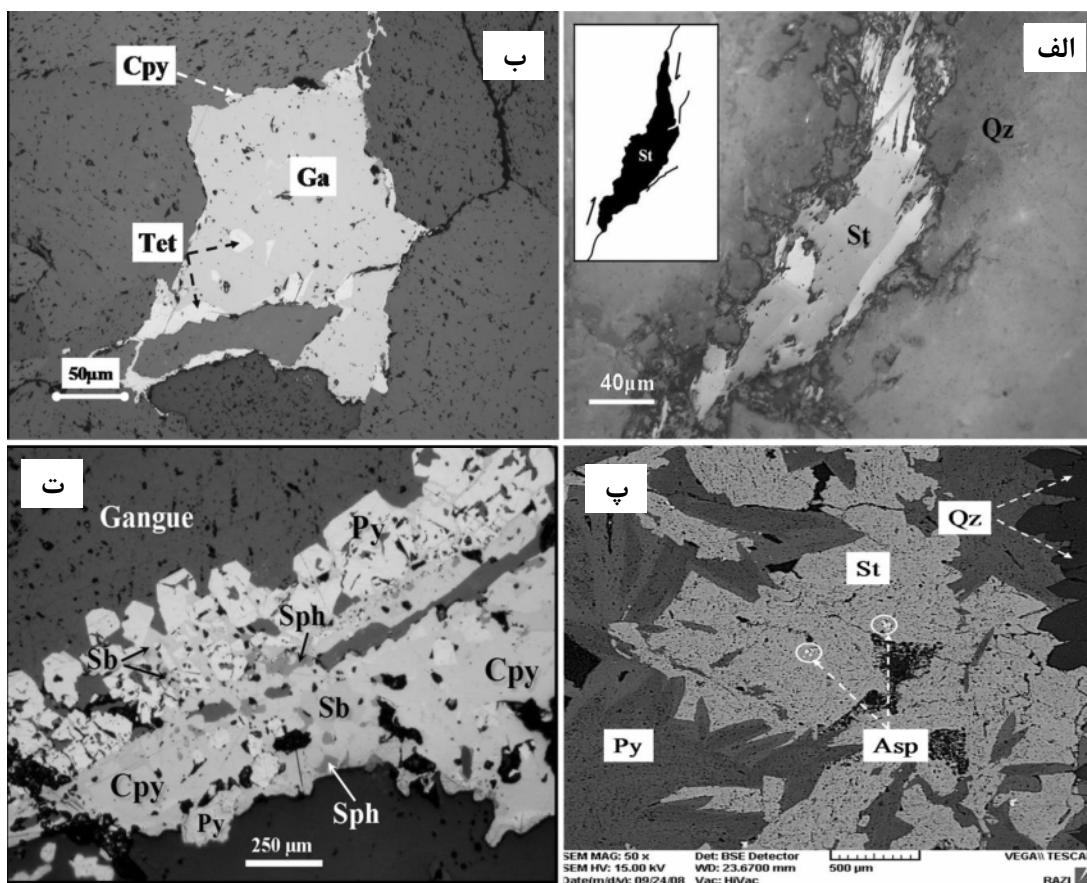
مربع مورد بررسی قرار گرفت که طی آن حدود ۶۰ مقطع نازک، صیقلی و نازک-صیقلی برای بررسی‌های میکروسکوپی، SEM و EPMA از رخنمون‌های سطحی و مغزه‌های حفاری تهیه شدند. تجزیه به روش SEM با استفاده از طیف EDS و ولتاژ ۱۵ کیلوولت در مرکز متالورژی رازی ایران و تجزیه نقطه‌ای به روش EPMA با دستگاه مدل CAMECA SX100 با ولتاژ ۲۰ کیلوولت و جریان ۲۰ نانومپر در دانشگاه آکیتای ژاپن انجام گرفت. بررسی‌های شاره‌های درگیر نیز روی ۸ نمونه مقطع دوبر صیقل از رگه کوارتزی همراه با کانه‌سازی و اسفالریت در Linkam DSC تربیت معلم تهران با استفاده از دستگاه THM600 و بررسی‌های ایزوتوپی اکسیژن بر روی ۷ نمونه کانی کوارتز از بخش‌های مختلف رگه در دانشگاه آکیتای ژاپن انجام شد.

### زمین‌شناسی منطقه‌ی معدنی

بر اساس بررسی‌های که تاکنون در منطقه سوراب انجام گرفت [۵،۴۰]، می‌توان گفت که به طور کلی دو واحد سنگ‌شناسی، شامل سنگ‌های رسوی مزوژوئیک و سنگ‌های آذرین آتشفسانی و شبه آتشفسانی آهکی-قلیایی به سن ترشیری در منطقه دیده می‌شوند. قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه شامل تناوبی از شیل، سیلتستون و ماسه‌سنگ‌های کرمزنگ ژوراسیک سازند شمشک بوده که بخش اصلی معدن بر روی این واحد سنگ‌چینه‌ای قرار گرفته است (شکل ۱). روی این سازند، نهشته‌های آهکی بادامو با مرز مشخصی قرار دارد که بیشتر در شمال و شمال‌شرق معدن به چشم می‌خورد. پس از آن سازند بغمشاه با ترکیب شیل‌های مارنی تا ماسه‌ای ریز دانه در برخی مناطق بر روی آهک بادامو قرار گرفته است که در بخش‌های بالاتر خود به ماسه‌سنگ‌های آهکی تبدیل می‌شود. پس از رسوب‌گذاری سازنده‌ای یاد شده، طی سنوزوئیک حرکت‌های کوهزایی وابسته به فاز پیرنه به همراه فعلیت‌های ماقمایی گسترده ائوسن-الیگوسن در منطقه موجب شکل‌گیری حجم زیادی از سنگ‌های آتشفسانی و شبه آتشفسانی شده است [۶] که بر اساس شواهد صحرایی و بررسی‌های پیشین طی دو مرحله شامل آتشفسان قدیمی (ترشیری) با تشکیل ریولیت، داسیت و ایگنمبریت با ماهیت پرآلومین (سری آهکی-قلیایی و آتشفسان) و ولکانیسم جوان (نئوژن-کواترنر) از نوع بازالتی و آندزیتی با ماهیت قلیایی در منطقه بوده است. به عقیده‌ی [۸] پیدایش کانسارهای سرب، روی، مس، طلا و قلع ناحیه‌ی لوت را می‌توان به آتشفسان جوان منطقه نسبت داد. کانی‌سازی در

همراه با پیریت‌های خودشکل و سوزنی نسل دوم (با مقدار بالای آرسنیک) به صورت ذرات ریز دانه ( $10\text{--}20$  میکرون) به وسیله SEM شناسایی شدند که ترکیب آن‌ها از حاشیه به مرکز ثابت بوده و به صورت ادخال در استیبنیت مشاهده شدند (شکل ۲پ). بر اساس بررسی‌های انجام شده، کانی‌سازی در رگه‌ها به طور کلی طی دو مرحله، شامل مرحله‌ی اول (کانی‌سازی فلزات پایه،  $\text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu}$ ) و مرحله‌ی دوم (کانی‌سازی استیبنیت، کالکواستیبنیت، بورونیت، تتراهریت-تنانتیت و آرسنوبیریت) است که مرحله‌ی پس از کانی‌سازی نیز با حضور کلسیت‌های ثانویه، ملاکیت، اکسیدهای آهن و منگنز به صورت پراکنده در سنگ میزان دیده می‌شود (شکل‌های ۲ت و ۳).

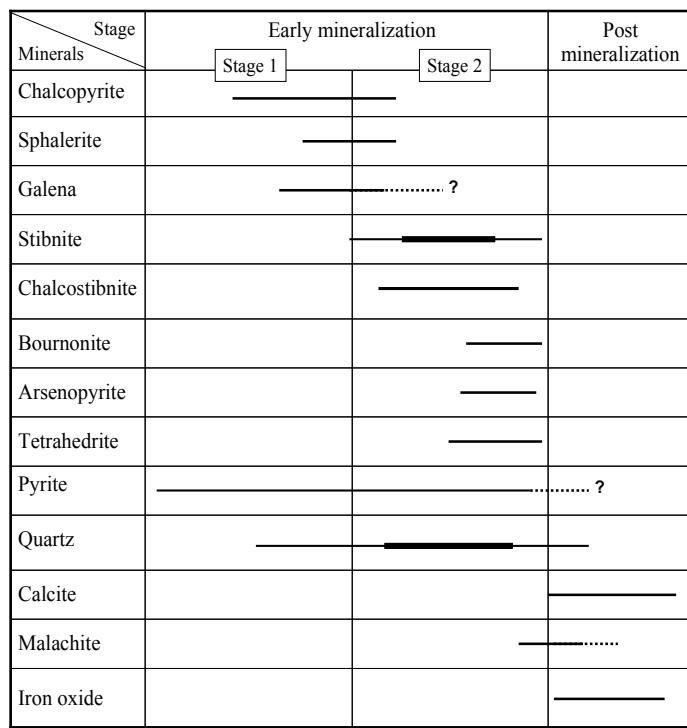
ساختمان آن تشخیص داده شده است که از ویژگی‌های خاص کالکواستیبنیت در منطقه‌ی شوراب است (جدول ۱) [۵]. مجموعه تتراهریت-تنانتیت غالباً به صورت ادخال‌های بسیار ریز به صورت پراکنده در کانه‌ی گالن دیده می‌شود که در ترکیب خود دارای  $10.31\%$  آهن،  $3.65\%$  روی،  $0.93\%$  تا  $1.83\%$  آرسنیک و  $2.32\%$  تا  $4.15\%$  نقره است (جدول ۱ و شکل ۲ب). اسفالریت بیشتر به صورت ذرات پراکنده به همراه کالکوبیریت، گالن، استیبنیت و پیریت‌های فرومبوئیدال نسل اول مشاهده می‌شود و ترکیب آن (با استفاده از EPMA) غالباً به سمت ورتیت ( $\text{Wurtzite} = \text{ZnS}$ ) گرایش دارد. به نظر می‌رسد تشکیل اسفالریت در منطقه در دمای پایین صورت گرفته که وجود مقدار پایین Fe در ترکیب شیمیایی آن تأییدی بر این ادعاست [۹]. آرسنوبیریت‌ها



شکل ۲ (الف) تصویر میکروسکوپی از کانی‌سازی استیبنیت (St) با بافت شکافه‌پرکن در کانی میزان کوارتز (Qz)، (ب) کانه‌زایی گالن (Ga) حاوی ادخال‌های تتراهریت (Tet) و ذرات کالکوبیریت (Cpy) در حاشیه، (پ) تصویر BSE از رگه کانه‌دار حاوی استیبنیت (St) و ذرات آرسنوبیریت (Asp) در مرکز، کوارتز (Qz) و پیریت‌های نسل دوم (Py) با مقدار بالای آرسنیک در حاشیه‌ی رگه و (ت) تصویر میکروسکوپی از بافت نواری "crustified" با حضور پیریت‌های خودشکل نسل اول (Py) در اطراف و کانه‌های کالکوبیریت (Cpy) و اسفالریت (Sph) در مرکز که رگه و رگچه‌های استیبنیت (Sb) در مرحله‌ی دوم کانی‌سازی کانه‌های مرحله‌ی قبل را به صورت بافت پرکننده‌ی فضای خالی قطع کرده‌اند.

جدول ۱ درصد داده‌های تجزیه‌ی دستگاهی EPMA کانی‌های مختلف، شامل ۱) آرسنوبیریت، ۲) تتراهردیریت، ۳) پیریت، ۴) گالن، ۵) اسفالریت، ۶) کالکوستینیت، ۷) کالکوبیریت، ۸) استینبینیت و ۹) بورونیت (n: تعداد نقاط آنالیز و n.d: مقادیر ثبت نشده)

Mineral element	۱ (n=۳)	۲ (n=۳)	۳ (n=۴)	۴ (n=۵)	۵ (n=۴)	۶ (n=۳)	۷ (n=۷)	۸ (n=۵)	۹ (n=۲)
Cu	۰,۰۶	۳۸,۹۰	۰,۵۸	n.d	۱,۳۵	۳۴,۴۹	۳۴,۵۵	۰,۰۱	۱۲,۳۳
Fe	۳۳,۴۱	۱۰,۱۷	۴۵,۵۴	۰,۰۱	۱,۶۱	۳,۴۹	۲۹,۶۲	n.d	۵,۵۰
Mn	n.d	۰,۰۳	n.d						
As	۴۴,۰۳	۱,۵۶	۰,۰۲	n.d	۰,۲۶	۲,۳۷	۰,۰۲	n.d	۰,۷۴
Ag	n.d	۴,۱۵	n.d	n.d	n.d	۴,۵۱	۰,۲۱	۰,۱۲	n.d
Sb	۰,۰۱	۶,۶۵	n.d	۰,۱۲	۰,۰۲	۱۶,۹۴	n.d	۷۰,۴۰	۱۴,۸۷
Zn	n.d	۵,۶۰	۰,۰۴	۰,۰۲	۵۹,۹۵	۵,۳۵	۰,۰۲	n.d	n.d
Pb	۰,۱۳	۰,۰۴	n.d	۸۵,۴۵	۱,۴۲	۰,۱۰	۰,۲۲	n.d	۳۵,۳۸
Hg	n.d	۰,۲۴	۰,۱۸	n.d	n.d	۰,۱۱	۰,۰۶	۰,۱۳	n.d
Cd	n.d	n.d	۰,۰۲	۰,۰۶	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۴
Bi	۰,۰۳	۰,۲۹	۰,۵۶	n.d	۰,۱۳	n.d	۰,۱۱	۰,۰۹	n.d
Au	n.d	n.d	۰,۰۵	n.d	n.d	۰,۰۲	n.d	n.d	۰,۰۱
Te	n.d	n.d	n.d	۰,۹۵	n.d	n.d	۰,۰۳	n.d	n.d
S	۲۱,۶۵	۳۱,۶۵	۵۳,۱۵	۱۳,۵۵	۳۴,۳۶	۲۵,۸۸	۳۵,۱۶	۲۸,۸۳	۲۷,۹۳
Total	۱۰۰,۳۲	۹۹,۲۸	۱۰۰,۰۴	۱۰۰,۱۹	۹۹,۱۳	۱۰۰,۳۳	۱۰۰,۰۳	۹۹,۶۱	۹۹,۷۷



شکل ۳ توالی پاراژنزی کانسار چند فلزی شوراب.

هستند که یکی بین ۳ تا ۷ درصد و دیگری بین ۱۰ تا ۱۵ درصد نمک طعام است (شکل ۴). بیشترین فراوانی دمای نقطه‌ی اوتکتیک نیز در داده‌های حاصل از شاره‌های درگیر اولیه [۱۹] بین ۲۴۵°C تا ۲۶۰°C به دست آمد که بنابر [۱۴] معادل ترکیب شاره‌ی H<sub>2</sub>O-NaCl است (جدول ۲).

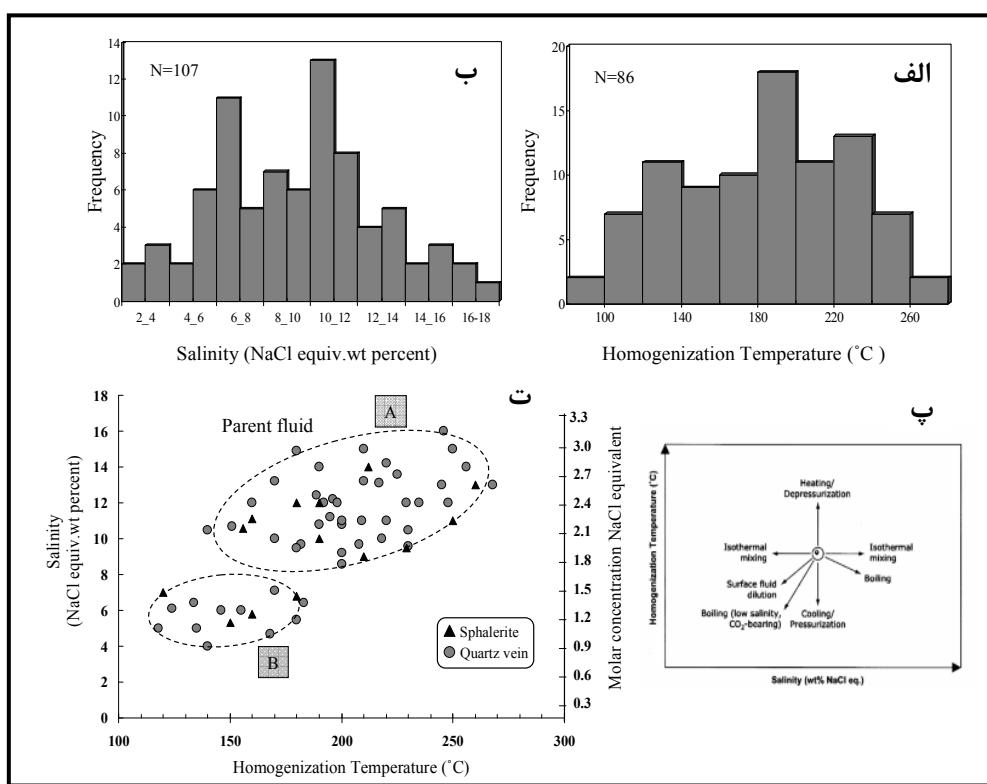
**ژئوشیمی ایزوتوبی اکسیژن**  
بررسی‌های ایزوتوبی کانسار شوراب روی رگه‌های کوارتز-استینیت با استفاده از روش [۱۵] آماده‌سازی شد و طی آن تعداد ۷ نمونه کوارتز از بخش‌های مختلف رگه برداشت شدند (شکل ۱) و در دانشگاه آکیتای ژاپن با دقت  $\pm 0.1\%$  مورد بررسی قرار گرفتند که مقادیر ایزوتوبی اکسیژن به شرح جدول (۳) به دست آمد. با توجه به بررسی‌های میکرودماسنجی انجام شده، میانگین دمای تشکیل کانسار  $200^{\circ}\text{C}$  محاسبه شد که با توجه به این دما و داده‌های به دست آمده از  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Quartz}}$  بنابر رابطه [۱۵] فاکتور جدایش ( $\alpha$ ) از رابطه ۱ به دست آمد.

### پتروگرافی شاره‌های درگیر

از بررسی‌های پتروگرافی شاره‌های درگیر اولیه (P) به شکل‌های استوانه‌ای، دوکی‌شکل، بیضوی و بی‌شکل با اندازه‌ی متوسط ۱۰ تا ۲۰ میکرون که بر اساس تقسیم‌بندی‌های [۱۱، ۱۰] انجام شد معلوم شد که آن شاره‌ها از نوع مایع+بخار (L + V)، بخار+مایع (V + L) و فاز مایع (L) هستند و تقریباً هیچ‌گونه فاز جامد و گاز مستقلی مشاهده نشد. فعالیت‌های زمین ساختی پس از تشکیل شاره‌های درگیر اولیه، موجب تشکیل حجم زیادی از شاره‌های ثانویه (S) و ثانویه‌کاذب (PS) با ابعاد زیر ۵ میکرون شده است.

### میکرودماسنجی

بر اساس بررسی‌های میکرودماسنجی انجام شده، دامنه‌ی تغییرات دمای همگن‌شدن شاره‌ها ( $\text{Th}_{\text{total}}$ ) بین  $114^{\circ}\text{C}$  تا  $275^{\circ}\text{C}$  بوده و دمای ذوب آخرین قطعه یخ ثبت شده ( $\text{Tm}_{\text{ice}}$ ) از  $-12^{\circ}\text{C}$  تا  $-2^{\circ}\text{C}$  به دست آمد که بر این اساس، شوری محاسبه شده با رابطه [۱۳] بین  $42^{\circ}\text{C}$  تا  $177^{\circ}\text{C}$  درصد معادل نمک طعام به دست آمد. داده‌های به دست آمده، حاکی از وجود حداقل دو دسته شوری در شاره‌ها



شکل ۴ بررسی‌های میکرودماسنجی شاره‌های درگیر کانسار چند فلزی شوراب شامل (الف) نمودار ستونی دمای همگن‌شدن شاره‌ها با میانگین دمای  $200^{\circ}\text{C}$ ، (ب) نمودار ستونی شوری شاره‌های درگیر دارای دو گستره یکی بین ۳ تا ۷ درصد و دیگری بین ۱۰ تا ۱۵ درصد معادل نمک طعام، (پ) و (ت) نمودار شوری-دمای همگن‌شدن شاره، که نشان‌دهنده‌ی وجود دو نوع شاره (A, B) با شوری و دمای متفاوت است که احتمالاً بنابر نمودار تعیین روند فیزیکوشیمیایی شاره توسط [۱۲]، دستخوش فرآیند رقیق‌شدن و اختلاط شده‌اند.

جدول ۲ داده‌های میکرودماسنجری شاره‌های درگیر بررسی شده (n: تعداد نمونه‌ها،  $Tm_{ice}$ : دمای ذوب نهایی یخ،  $Th_{total}$ : دمای همگن شدن شاره، L: فاز مایع و V: فاز بخار)

Sample	Host mineral	Type	$Th_{total}$ (°C)	n	$Tm_{ice}$ (°C)	n	NaCl wt.% eq.
87-SH-1	Quartz	L+V	۱۲۳-۱۸۶	۵	-۷,۴ تا -۲,۷	۴	۱۱,۰ تا ۴,۳
	Quartz	L+V	۱۵۷-۱۹۳	۴	-۶,۴ تا -۲,۱	۳	۹,۷ تا ۳,۵
87-SH-2	Quartz	L	۱۷۶-۲۲۳	۳	-۸,۲ تا -۴,۵	۳	۱۲,۰ تا ۷,۱
	Quartz	L	۱۷۱-۲۳۴	۴	-----	--	-----
	Quartz	L+V	۲۱۹-۲۴۸	۶	-۹,۵ تا -۲,۳	۵	۱۳,۴ تا ۵,۲
87-SH-3	Quartz	L+V	۲۳۹-۲۵۰	۶	-۹,۳ تا -۵,۵	۵	۱۳,۲ تا ۸,۵
	Sphalerite	L+V	۱۷۵-۲۷۵	۷	-۶,۴ تا -۲,۳	۶	۹,۷ تا ۳,۸
	Sphalerite	L	۱۱۰-۱۸۲	۴	-----	--	-----
87-SH-4	Quartz	L+V	۲۲۲-۲۷۷	۶	-۱۲,۲ تا -۸,۳	۴	۱۶,۱ تا ۱۲,۰
	Quartz	L	۱۸۰-۲۵۷	۴	-----	--	-----
	Quartz	L+V	۱۵۶-۲۴۷	۸	-۹,۱ تا -۳,۶	۵	۱۳,۰ تا ۵,۸
87-SH-5	Sphalerite	L+V	۱۴۷-۱۹۵	۵	-۷,۳ تا -۲,۱	۵	۱۰,۸ تا ۳,۵
	Sphalerite	L+V	۱۲۶-۲۳۴	۴	-۹,۷ تا -۴,۳	۴	۱۳,۱ تا ۶,۸
	Sphalerite	L	۱۳۳-۲۵۰	۶	-----	--	-----
87-SH-6	Quartz	L+V	۱۹۶-۲۴۵	۶	-۱۳,۷ تا -۷,۶	۵	۱۷,۵ تا ۱۱,۲
	Quartz	L+V	۱۱۵-۲۱۱	۵	-۴,۸ تا -۲,۴	۵	۷,۴ تا ۴,۰
	Quartz	L+V	۱۷۹-۲۳۰	۴	-۱۳,۲ تا -۹,۷	۴	۱۷,۱ تا ۱۳,۷

جدول ۳ محاسبه‌ی داده‌های ایزوتوبی اکسیژن شاره‌ی (δ<sup>18</sup>O<sub>fluid</sub>) بر اساس داده‌های ایزوتوبی اکسیژن کوارتز (δ<sup>18</sup>O<sub>Quartz</sub>) و میانگین دمای همگن شدن شاره‌های درگیر.

Sample No.	$\delta^{18}\text{O}_{\text{quartz}}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$ (‰) (T=۲۰۰ °C)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$ (‰)
ST-QZ-۱۵	۱۳,۵	۲,۲	۴,۵
ST-QZ-۲۷	۱۴,۸	۴,۰	۳,۳
ST-QZ-۵۵	۱۴,۳	۴,۳	۴,۳
ST-QZ-۵۳	۱۴,۶	۴,۵	۲,۷
ST-QZ-۷۶	۱۲,۵	۲,۹	۲,۵
ST-QZ-۹۸	۱۲,۹	۳,۰	۲,۳
ST-QZ-۸۸	۱۳,۴	۳,۱	۳,۲

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = 1000 + \delta q / 1000 + \delta w \\ \delta q (\text{mean}) = 13.6 \text{ ‰} \end{array} \right\} \longrightarrow \delta w \approx 1 \quad (۲)$$

با توجه به این محاسبات، چنین به نظر می‌رسد که مقدار محاسبه‌شده از میانگین آب‌های جوی (کمتر از صفر پرمیل) بیشتر و از مقادیر آب‌های ماقمایی (بین ۵ تا ۱۰ %) کمتر است و تقریباً در میان این دو قرار می‌گیرد [۱۵]. بنابراین چنین به نظر می‌رسد که

$$T = 200 + 273 + 25 \longrightarrow T = 498 \text{ °C} \quad (۱)$$

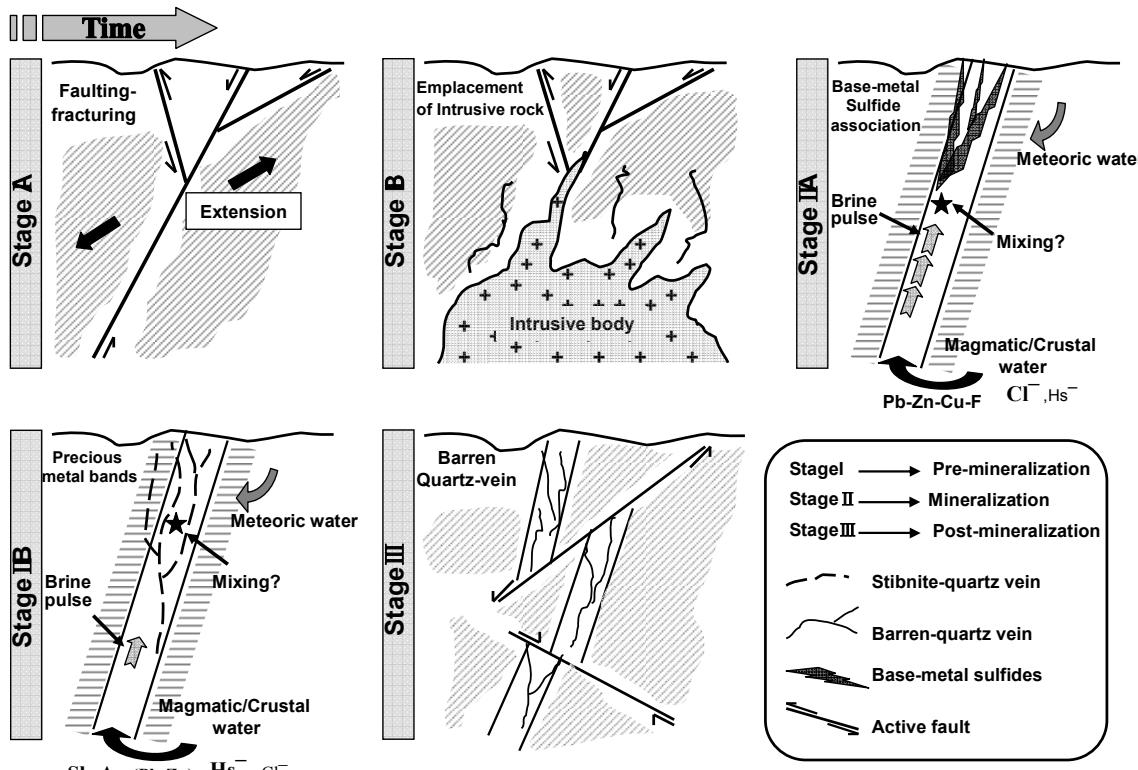
$$10^3 \ln \alpha = 3.38 (10^6 / T^2) - 3.40 \longrightarrow \alpha = 1.0102$$

با به دست آوردن فاکتور جدایش در دمای ۲۰۰ °C و محاسبه‌ی میانگین ایزوتوب اکسیژن ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{Quartz}}$ ، بنابر رابطه ۲ می‌توان مقدار ایزوتوب شاره‌ی کانه‌ساز یا  $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$  را به تقریب محاسبه کرد [۱۶].

کانه‌سازی در این سیستم‌ها، فرآیند جوشش، واکنش‌های شاره‌ی سولفیدی با سنگ میزبان و آمیزش شاره‌هاست. با توجه به اینکه طی آزمایش‌های میکرودماسنژی کانسار شوراب، تقریباً هیچ شاره‌ای به فاز بخار تبدیل نشد و نیز هیچ‌گونه شواهد صحراوی از قبیل بافت حفره‌ای، شانه‌ای و غیره در کوارترهای منطقه مشاهده نشد، می‌توان چنین استنباط کرد که پدیده‌ی جوشش در منطقه رخ نداده [۱۹] و احتمالاً مهمترین ساز و کار تشکیل همزمانی استیبنبت، کالکواستیبنیت، سولفوسالت‌ها و مجموعه‌ی گالن، اسفالریت و کالکوپیریت در منطقه، آمیزش شاره‌های آنتیموان دار با شوری و فلزی پایه با شوری و دمای بالا با شاره‌های آنتیموان دار با شوری و دمای پایین و در نتیجه رخداد فرآیند [سرداش] در فضای ناپیوسته‌ی سنگ‌های اطراف و مرز گسل‌ها و شکستگی‌ها است. با توجه به وجود مقادیر پایین مس و بالابودن نسبی مقادیر سرب، روی و نقره در رگه‌های موردن بررسی می‌توان گفت احتمالاً نسبت آب به سنگ یا W/R در زمان تشکیل ذخیره پایین و ترکیب ایزوتوپی شاره‌ی کانه‌ساز سبک بوده و به آب‌های جوی آمیخته با ماقما نزدیک بوده است (شکل ۵) [۲۰].

آمیزش آب‌های جوی و ماقمایی طی تشکیل کانسار شوراب صورت گرفت که این آمیختگی سبب غنی‌شدن شاره‌ی کانه‌ساز از مقادیر  $O^{18}$  شده است. با توجه به داده‌های جدول (۳) و به عقیده‌ی [۱۶، ۱۵] اختلاف ناشی از مقادیر ایزوتوپ اکسیژن شاره‌ی (۸ $\delta^{18}O_{\text{fluid}}$ ) و کوارتر (۸ $\delta^{18}O_{\text{Qz}}$ )، حاکی از نفوذ توده‌های کم عمق با ترکیب حدواسط تا فلزیک از جنس آندزیت تا داسیت-ریوداسیت و به دنبال آن تعادل شاره‌ی ماقمایی در منطقه بوده است.

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی شاره‌ی کانه‌ساز در بسیاری از ذخایر معدنی به خصوص ذخایر ورا گرمایی، پورفیری، ماسیوسولفید و ذخایر طلای نوع کوه‌زایی، فرایندهای فیزیکوشیمیایی مانند آمیزش، جدایش فازها، رقیق‌شدن در اثر آب‌های جوی، پدیده‌ی جوشش و [سرداش]، مهمترین سازوکارهایی هستند که در نهایت سبب تهنشینی و تمرکز اقتصادی ذخایر معدنی می‌شوند [۱۷]. بنابر بررسی‌های [۱۸] در شاره‌های وراگرمایی با ماهیت خنثی، آنتیموان به صورت  $H_2Sb_2S_4$  به همراه لیگاندهای بی‌سولفیدی در دمای کمتر از  $300^{\circ}\text{C}$  و شوری پایین (۲ تا ۱۰ درصد معادل نمک طعام)، انتقال می‌یابد مهمترین ساز و کار



شکل ۵ طرح واره‌ای از بازسازی چگونگی تشکیل و مراحل کانی‌سازی کانسار چند فلزی شوراب بر اساس شواهد ایزوتوپی، میکرودماسنژی شاره‌های درگیر و توالی پارازنزی کانی‌ها در منطقه، با استفاده از مدل ارائه شده توسط [۲۱].

- [۵] رحیمی ه.، "بررسی ژئوشیمیایی، دگرسانی و زمین‌شناسی اقتصادی کانسار آنتیموان شوراب (جنوب خراسان)"، دانشگاه تربیت معلم تهران (۱۳۸۳) ۲۵۰ ص.
- [۶] لطفی م.، "خلاصه‌ای بر مطالعه فاز متالوژنی پیرنده‌ای در رابطه با سنگ‌های ولکانیک، ساب و لکانیک بخش شمالی پهنه لوت مرکزی"، چهارمین گردهمایی علوم زمین (۱۳۶۷).
- [۷] پیجوبی طلا و آنتیموان در شوراب و حیدرآباد، وزارت صنایع و معادن، دانشگاه صنایع و معادن ایران، (۱۳۸۰) ۳۴۴ ص.
- [۸] آقاباتی ع.، "زمین‌شناسی ایران"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۸۳) ۵۸۶ ص.
- [۹] Ramdohr P., "The ore minerals and their intergrowths", Pergamon Press, (1980) 1205 p.
- [۱۰] Roedder E., "Fluid Inclusions", Reviews in Mineralogy 12. Mineralogical Society of America, (1984) 646 p.
- [۱۱] Shepherd T.J., Rankin A.H., Alderton D.H., "A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies", Blackie and Sons, (1985) 239 p.
- [۱۲] Wilkinson J.J., "Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits", Lithos 55 (2001) 229-272.
- [۱۳] Hall D.I., Bodnar R.J., "Freezing point depression of NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O", Economic Geology, 65 (1988) 123 p.
- [۱۴] Bodnar R.J., "Revised equation and table for determining the freezing point depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solutions". Geochimica et Cosmochimica Acta 57 (1995) 683-684.
- [۱۵] Clayton R.N., O'Neil J.R., Mayeda T.K., "Oxygen isotope studies of the geothermal system at Wairakei, New Zealand", Geochimica et Cosmochimica Acta 39 (1972) 1179-1186.
- [۱۶] Taylor H.P., "Oxygen and hydrogen isotope relationship in hydrothermal deposits", In: Barnes H.L. (ed), Geochemistry of hydrothermal ore deposits, 2<sup>nd</sup> ed., (1979) 236-277.
- [۱۷] Skinner B.J., "Hydrothermal mineral deposits, what we do and don't know", In: Barnes H.L. (ed), Geochemistry of hydrothermal ore deposits, 3<sup>rd</sup> ed., Wiley, New York, (1997) 1-29.

## برداشت

کانی‌سازی در کاسار چند فلزی شوراب بهطور کلی زیر کنترل دو سیستم گسلی بوده که کانه‌زایی رگه‌ای در این سیستم گسلش شکل گرفته است. آنتیموان بهدلیل تحرک بالای خود از سوی گرمابی‌های صعودکننده بهسته بالا از درون سنگ میزبان داسیتی و روپاداسیتی و نیز سنگ دیواره‌ی شیلی شسته شده و در اثر چرخه‌های گرمابی پس از ماقمایتیسم بهصورت متناوب وارد فضاهای ناپیوسته سنگ‌های پیرامون شده است که وجود بافت شکافه‌پرکن، رگه‌ای و نواری از شواهد بارز آن هستند. بر مبنای مشاهدات صحرایی و آزمایش‌های EPMA و SEM، کانی‌سازی در منطقه طی دو مرحله، شامل کانی‌سازی فلزات پایه گالن، اسفالریت، کالکوپیریت (مرحله اول) و کانی‌سازی استیبنیت، کالکواستیبنیت، بورونیت، تتراهدریت-تنانتیت و آرسنوبیریت (مرحله دوم) صورت گرفته است. همچنین با توجه به آزمایش‌های میکرودماسنجی که داده‌های ژئوشیمی ایزوتوپی نیز آن را تأیید می‌کند، بهنظر می‌رسد شاره‌ی کانه‌ساز در منطقه، شاره‌ای با خاستگاه ماقمایی بوده که در اثر فعالیت‌های آتش‌فشانی منطقه طی سنبوزئیک، دستخوش فرآیند همرفت شده و با شاره‌های جوی که با سنگ‌های رسوبی و آذرین منطقه در تبادل ایزوتوپی بوده، آمیخته و منجر به تشکیل دو سیستم کانی‌سازی در منطقه شده است.

## مراجع

- [۱] بورنول ل.، "بررسی ژئوشیمی کانسار آنتیموان شوراب" ، ۱۳۶۴) گزارش شماره ۱۱ سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۲۰، ص.
- [۲] طالع فاضل ا.، "بررسی ژئوشیمی، سیالات درگیر و ژنز کانسار پلی متال شوراب (جنوب فردوس)"، (۱۳۸۸) دانشگاه تربیت معلم تهران، ۱۸۰، ص.
- [۳] Alavi M., "Tectonic map of the Middle East", (1991) Geological Survey of Iran, scale 1:5,000,000.
- [۴] Lotfi M., "Geological and geochemical investigation on the volcanogenic Cu-Pb-Zn-Sb ore mineralization in the Shurab-Gale chah and northwest of Khur", Diss. Des. Doktor. Univ. Hamburg, (1982) 152 p.

- Ore Deposits*", John Wiley and Sons, 3<sup>rd</sup> ed, (1997) 950 p.
- [21] Camprubi A., Chomiak B.A., Canals A., Norman D.I., *Fluid sources for the La Guitarra epithermal deposit (Temascaltepec district, Mexico): Volatile and helium isotope analyses in fluid inclusions*", Chemical Geology 231 (2006) 252-284.
- [18] Williams-Jones A.E., Normand Ch., "Controls of mineral parageneses in the system Fe-Sb-S-O", Economic Geology 92 (1997) 305-324.
- [19] Hedenquist J.W., Arribas A.R., Gonzalez-Urien E., "Exploration for epithermal gold deposits", In: Hagemann, S.G., Brown, P.E., (ed). Economic Geology 13 (2000) 245-277.
- [20] Barnes H.L., "Geochemistry of Hydrothermal