

## تعیین شرایط فیزیکوشیمیایی و عوامل کنترل کننده کانه‌زایی با استفاده از کانه‌نگاری، روابط پاراژنزی و میان‌بارهای سیال در کانسار استینیت - طلا شورچاه، جنوب شرق زاهدان

راحله مرادی\*، محمد بومری، ساسان باقری، اعظم زاهدی

بخش زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

(دریافت مقاله: ۹۲/۷/۳، نسخه نهایی: ۹۲/۱۰/۲۸)

**چکیده:** کانسار آنتیموان شورچاه، در منطقه‌ی فلش شرق ایران واقع شده است. در این منطقه کانه‌زایی آنتیموان در رگه‌های سیلیسی، تشکیل شده است. گرانیتهای به شدت سیلیسی و برشی شده و سنگ‌های دگرگون درجه‌ی پایین غنی از کانی‌های فیلسیلیکاتی، میزبان این رگه‌ها هستند. استینیت کانه اصلی آنتیموان در رگه‌هاست و در ارتباط با پیریت، آرسنوپیریت و طلاست. سنارمونیت و سروانتیت از اکسیدهای آنتیموان موجود در کانسار شورچاه هستند. سنگ‌های میزبان به طور بالقوه قادر به ایجاد کردن اسیدی شدگی لازم برای ته‌نشینی استینیت-طلا بوده‌اند. بر اساس روابط پاراژنزی و داده‌های ترمودینامیکی، استینیت فاز پایدار آنتیموان در کانسار مورد بررسی است که نهشت آن با کاهش دما و کاهیدگی کنترل می‌شود، به جز در شرایط قلیایی که اسیدی شدن عامل اصلی کانه‌زایی است. استینیت و طلا در کانسار شورچاه می‌توانند در غلظت‌های قابل ملاحظه‌ای به صورت همبافت‌های بی-سولفیدی حمل شده و با کاهش pH نهشته شده باشند. دمای همگن‌شدگی و شوری میان‌بارهای سیال در کوارتزهای همراه با رگه‌های معدنی به ترتیب از ۱۴۶/۵ تا ۳۲۷/۹ درجه‌ی سانتیگراد و ۰/۲۱ تا ۵/۷۱ درصد وزنی نمک طعام تغییر می‌کند که بیانگر وجود یک شاره‌ی جوی بوده و کانه‌زایی نوع وراگما تا مزوترمال را به اثبات می‌رساند.

**واژه‌های کلیدی:** استینیت-طلا؛ شرایط فیزیکوشیمیایی؛ میان‌بارهای سیال؛ کانه‌زایی؛ شورچاه؛ زاهدان.

### مقدمه

کانسارهای اسکارن و وراگمای آنتیموان همراه با سرب، روی، تنگستن و قلع در سنگ‌های رسوبی غنی از کلسیم در کنار گرانیتهای برخوردار و یا در کمان‌های ماگمایی تشکیل شده‌اند [۴،۳]. کانسارهای آنتیموانی که در زون‌های برشی دیده می‌شوند، از نوع مزوترمال هستند و به دو دسته تک‌فلزی و چند فلزی تقسیم شده‌اند. این نوع کانسارها در زون‌های برشی با دگرگونی ضعیف که دارای مقداری طلا هستند و با فاصله از موتور گرمایی تشکیل شده‌اند، دیده می‌شوند [۵]. کانسار شورچاه علیرغم اینکه علاوه بر استینیت دارای کانه‌های

منابع مهم آنتیموان جهان از ذخایر رگه‌ای استینیت بوده که بیشتر در دماهای پایین تشکیل شده‌اند. استینیت رایج‌ترین کانه‌ی آنتیموان‌دار است که در سنگ‌های دگرگون درجه‌ی پایین و در بیشتر مناطق با گرمایی‌های وابسته به ماگماهای گرانیتهای در زون‌های برشی تشکیل می‌شود [۱]. رگه‌های سیلیسی آنتیموان-طلا در آلاسکا، استرالیا، بولیوی، کانادا، اروپا، نیوزیلند و چین نیز با سنگ‌های رسوبی دگرگون شده همراهند [۲]. در صربستان، بولیوی و جنوب شرق آسیا

کانه‌دار انجام گرفت و نمونه‌های مناسبی برای بررسی‌های ریز دماسنجی انتخاب و به شرکت آذین زمین پویا ارسال شدند. آزمایش‌های گرمایش و سرمایش با استفاده از گرم کننده و سرد کننده لینکام مدل TMS 94 انجام گرفت. دقت کار دستگاه در هنگام گرمایش و سرمایش  $\pm 0.1$  درجه‌ی سانتیگراد و گستره‌ی دمای این دستگاه بین  $196-^{\circ}\text{C}$  تا  $600+^{\circ}\text{C}$  درجه‌ی سانتیگراد بوده است. برای محاسبات آماری و بررسی چگونگی آنتیموان و طلا در داده‌های سطحی و عمقی بخش‌های شورچاه و توزگی، از داده‌های ژئوشیمیایی موجود نظیر تجزیه‌های ICP انجام شده در این منطقه و نیز تجزیه‌های XRD موجود به منظور تعیین اکسیدهای آنتیموان استفاده شدند. در پایان با استفاده از مجموعه کانه‌های آنتیموان‌دار و به کارگیری روابط  $\text{pH}-f\text{O}_2$  در سیستم Fe-Sb-S-O به تفسیر گستره‌ی پایداری مجموعه‌ی کانه‌ها پرداخته شد که برای رسیدن به این هدف ثابت‌های تعادل با برنامه کامپیوتری SUPCRT92 به دست آمد [۹] و فاز نمودار مربوط به شرایط فیزیکیوشیمیایی ترسیم شد.

#### بحث و بررسی

##### زمین‌شناسی کانسار شورچاه

کانسار شورچاه در استان سیستان و بلوچستان و  $60$  کیلومتری جنوب شرقی زاهدان در طول جغرافیایی  $60^{\circ}54'52''$  شرقی و عرض جغرافیایی  $29^{\circ}10'33''$  شمالی قرار گرفته است. این کانسار در زون فلیش شرق ایران و در حاشیه‌ی باتولیت زاهدان واقع شده است [۱۰]. قدیمی‌ترین سنگ‌های موجود در این کانسار شیست‌ها و فیلیت‌های کرتاسه تا ائوسن هستند. سنگ‌های نفوذی منطقه شامل: گرانیت، گنیس و گرانودیوریت به سن‌های ائوسن تا الیگوسن، به شکل‌های باتولیت، استوک و نیز دایک‌های گرانیتی، گرانودیوریتی و آپلیتی به سن میوسن هستند. در مرحله‌ی آخر نیز رگه‌های کوارتزی و استینیتی در منطقه شکل گرفته‌اند (شکل ۱ و ۲).

از نظر ساختاری احتمالاً منطقه‌ی مورد بررسی در یک زون برشی واقع است و آثار و شواهد عملکرد گسل‌ها به فراوانی و در مقیاس‌های مختلف مشاهده می‌شوند. در منطقه‌ی شورچاه همخوانی خوبی بین کانه‌زایی، گستره‌ی دگرسان شده و بیشترین فراوانی گسل‌ها مشاهده می‌شود به طوری که،

دیگری نیز هست، ولی احتمالاً مشابه نوع اول است زیرا کانه‌های دیگر موجود در این کانسار بسیار اندک بوده و ارزش اقتصادی ندارند. از مهمترین بررسی‌هایی که روی کانسار شورچاه انجام شده است می‌توان به گزارش نهایی پی‌جویی کانه‌زایی آنتیموان در منطقه شورچاه توسط شرکت معدنی زرکن مینرالز [۶]، پروژه پی‌جویی آنتیموان در منطقه شورچاه و توزگی توسط ایتوک ایران [۷] و نیز چگونگی سبک و خاستگاه کانی‌زایی آنتیموان و طلا در شورچاه، جنوب‌شرق زاهدان توسط مرادی اشاره کرد [۸].

توصیف‌های بسیاری درباره‌ی ذخایر آنتیموان‌دار شده است، در حالی که، بررسی‌های نسبتاً اندکی درباره گستره‌ی شرایط فیزیکیوشیمیایی این نوع کانه‌زایی انجام شده است. استینیت کانه‌ی غالب آنتیموان در بیشتر ذخایر آنتیموان‌دار از جمله کانسار شورچاه است، ولی علت آن به خوبی تعیین نشده است. از سؤالات دیگری که در مورد این کانه‌زایی مطرح است این است که به چه علتی ذخایر استینیت در دمای پایین تشکیل می‌شوند و به چه دلیل معمولاً دارای طلا هستند.

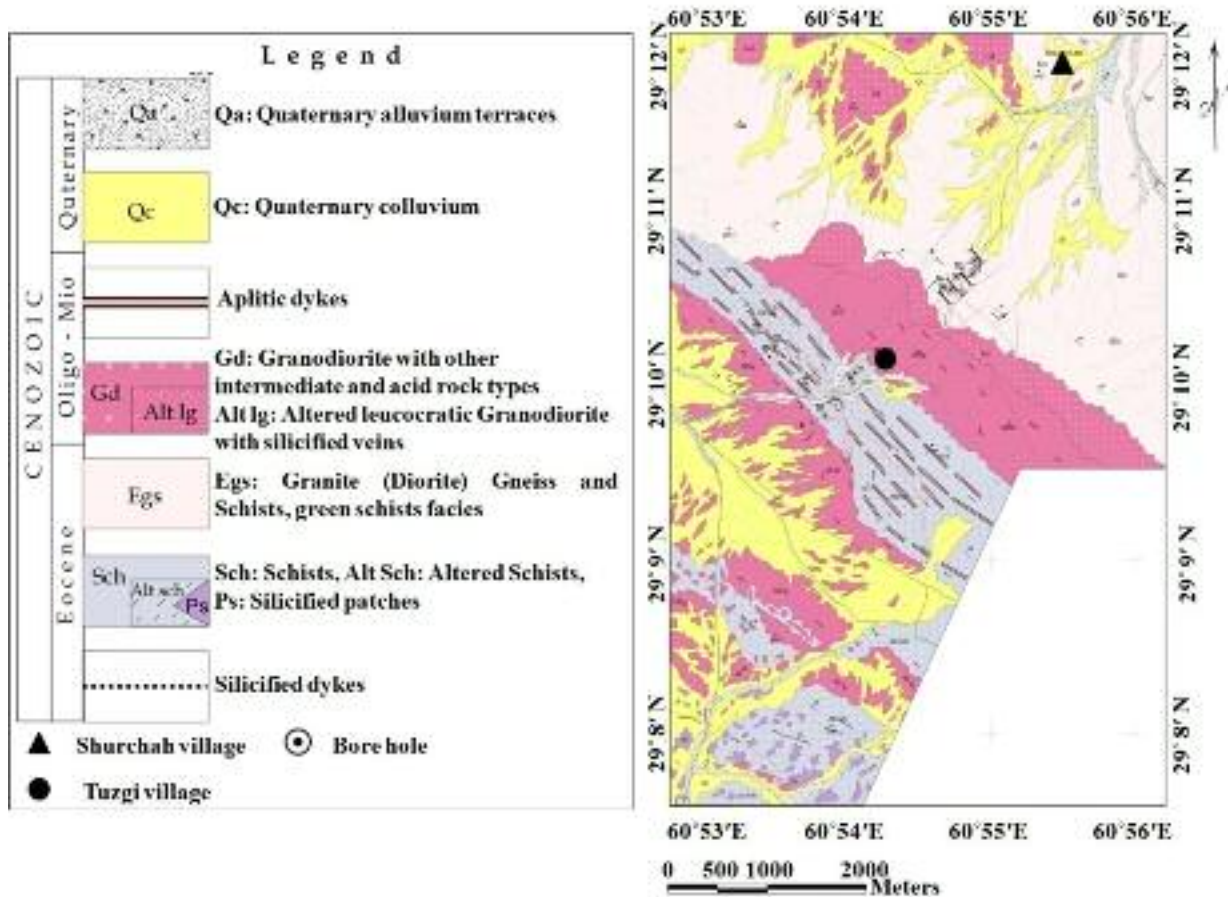
در این پژوهش سعی شده است که علاوه بر بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌شناسی کانسار شورچاه، میان‌بارهای سیال نیز به منظور بررسی شوری، دمای همگن شدن و تعیین نوع شاره‌ی کانه‌زا، مورد بررسی قرار گیرند و از آنجا که بررسی گستره‌ی شرایط فیزیکیوشیمیایی کانه‌زایی استینیت-طلا در منطقه‌ی شورچاه انجام نشده است، بهتر است با استفاده از بررسی‌های کانه‌نگاری مجموعه‌ی کانه‌های آنتیموان‌دار و به کارگیری روابط  $\text{pH}-f\text{O}_2$  در سیستم Fe-Sb-S-O، به بررسی شرایط فیزیکیوشیمیایی و عوامل کنترل کننده‌ی کانه‌زایی در کانسار استینیت-طلا شورچاه پرداخته شود.

#### روش بررسی

ابتدا نقشه‌های زمین‌شناسی  $1:20000$ ،  $1:5000$  و  $1:1000$  کانسار شورچاه بررسی شدند و طی بررسی‌های صحرایی ویژگی‌های رگه‌های معدنی و ارتباط آن‌ها با سنگ‌های میزبان و ساختارهای منطقه مورد بررسی قرار گرفتند. از کلیه واحدهای دارای ماده معدنی نمونه‌برداری شد و تعدادی مقاطع نازک، صیقلی و دوبرصیقلی تهیه و مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی‌های سنگ‌نگاری میان‌بارهای سیال نیز روی کوارتزهای

کرده است. کانسار شورچاه دارای دو بخش کانه‌زایی به نام‌های بخش شورچاه در شمال و بخش توزگی در جنوب کانسار نامبرده است که هر کدام دارای ویژگی‌های زمین‌شناسی خاص خود است و به صورت جداگانه بررسی می‌شوند.

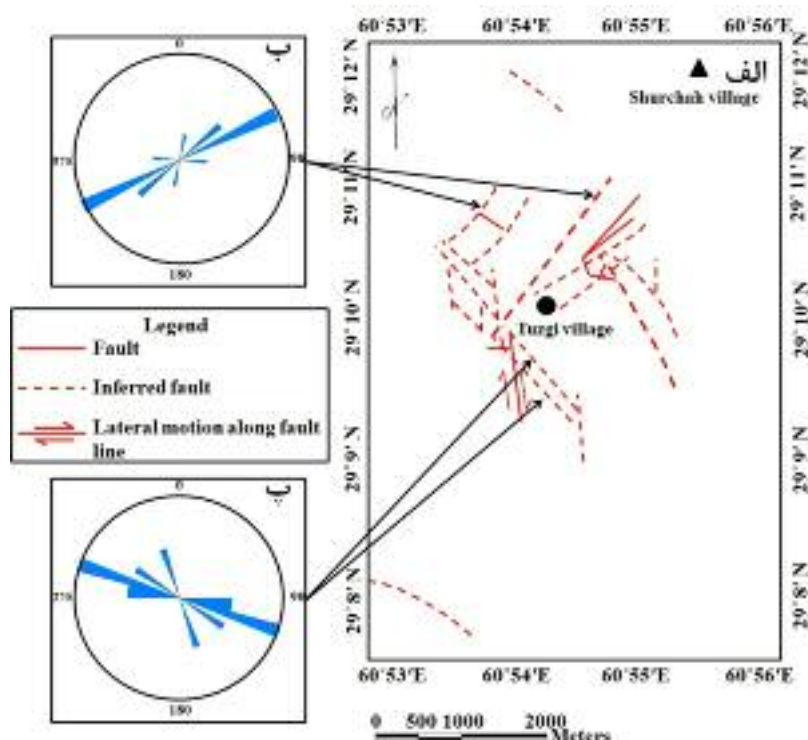
بیشترین گسترش زون‌های دگرسان در بخش میانی گستره با بیشترین فعالیت گسلش است (شکل ۳- الف). وجود سطوح گسلی چین خورده در منطقه نشان می‌دهد که حداقل در برخی از آن‌ها گسلش قبل از چین خوردگی‌های مهم عمل



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی کانسار شورچاه (اصلاح شده از نقشه ۱/۲۰۰۰۰ شرکت زرکن مینرالز) [۶].



شکل ۲ الف: نمایی از دایک‌های آپلیتی و گرانودیوریتی در میان شیست‌های کانسار شورچاه، ب: نمایی از نوارهای گرانودیوریتی نفوذ کرده در میان شیست‌های بخش شورچاه.



شکل ۳ الف: نقشه‌ی گسل‌های اصلی کانسار شورچاه، ب: نمودار رز ترسیم شده برای راستای گسل‌های بخش شورچاه، پ: نمودار رز ترسیم شده برای راستای گسل‌های بخش توزگی.

جابه‌جائی‌هایی تا حدود ۲ متر نشان می‌دهند (شکل ۴ ب)، خردشدگی اطراف گسل‌ها و کانه‌زایی استیبنیت در راستای آن‌ها، هوازدگی و دگرسانی‌های جهت‌دار و جابه‌جائی، اشاره کرد. فعالیت‌های زمین‌ساختی در بخش توزگی نیز سبب به وجود آمدن گسل‌هایی شده‌اند که بیشتر دارای راستای شمال غربی- جنوب شرقی هستند (شکل ۳ پ). عملکرد این گسل‌ها بیشتر در شیست‌ها بوده و از نوع نرمال و نیز واروند (شکل ۴ پ).

بخش شورچاه دارای گسل‌های کوچک و بزرگی است که عموماً روند شمال شرقی- جنوب غربی دارند (شکل ۳ ب) و بیشتر آنها وارون و پرشیب‌اند (شکل ۴ الف) ولی گسل‌های نرمال نیز وجود دارند. در اثر فعالیت‌های زمین‌ساختی، درز و شکاف‌های زیادی در سنگ‌ها به وجود آمدند که سبب تسهیل عبور شاره‌های کانه‌زا و نیز موجب دگرسانی سنگ‌ها شده است. سنگ‌های زون شورچاه در طول گسل‌ها تغییر کرده‌اند. از جمله این تغییرات می‌توان به برش‌های گسلی کرناتی- سیلیسی که دارای اکسیدهای آهن فراوان است، آینه‌های گسلی که گاهی

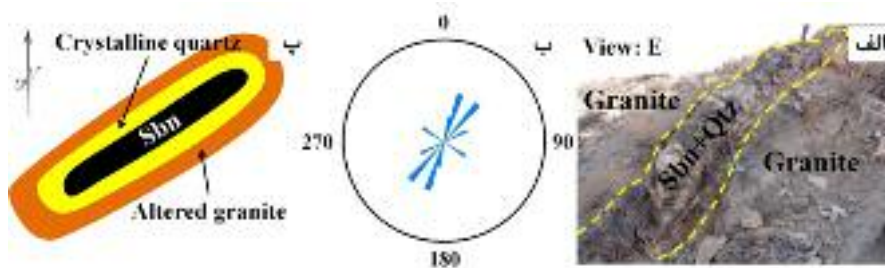


شکل ۴ الف: نمایی از گسل وارون در گرانیت‌های بخش شورچاه، ب: نمایی از آینه گسل در بخش شورچاه، پ: نمایی از رواندگی در بخش توزگی.

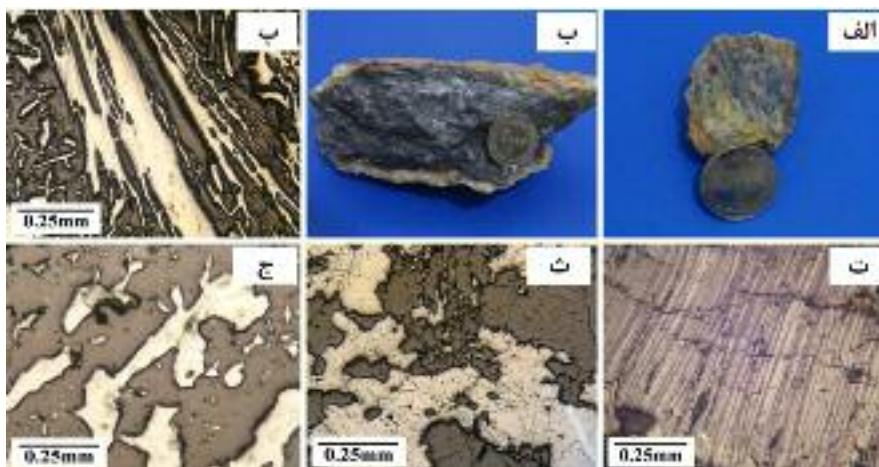
**کانه‌زایی و کانه‌نگاری در بخش شورچاه**

طول گستره‌ی کانه‌زایی در بخش شورچاه حدود ۷۰۰ متر است. رگه‌های کانه‌زایی در بخش شمالی و درون گرانیت‌ها واقع شده‌اند (شکل ۵- الف) و بیشتر آنها راستای شمال شرقی- جنوب غربی دارند (شکل ۵- ب). ترکیب رگه‌ها بیشتر از استیبنیت و کوارتز است. استیبنیت با کوارتزهای بلورین در بر گرفته شده و درون گرانیت‌های دگرسان شده، قرار گرفته‌اند (شکل ۵- پ). طول رگه‌های استیبنیت- کوارتز تا چندین متر و ضخامت آنها حداکثر به ۵۰ سانتیمتر می‌رسد. علاوه بر استیبنیت، مقدار کمی پیریت و کانه‌زایی ثانویه به صورت ترکیبات آهن‌دار لیمونیت و گوتیت مشاهده می‌شوند. علاوه بر استیبنیت کانه‌زایی طلا نیز دیده می‌شود، ولی در مشاهدات صحرایی قابل مشاهده نیست. استیبنیت اصلی‌ترین کانه در بخش شورچاه است که به رنگ خاکستری فولادی بوده، دارای جلای فلزی است، و به صورت بلورهای تیغه‌ای و نوک تیز که کج یا منحنی شده‌اند و نیز به شکل توده‌ای دیده می‌شود

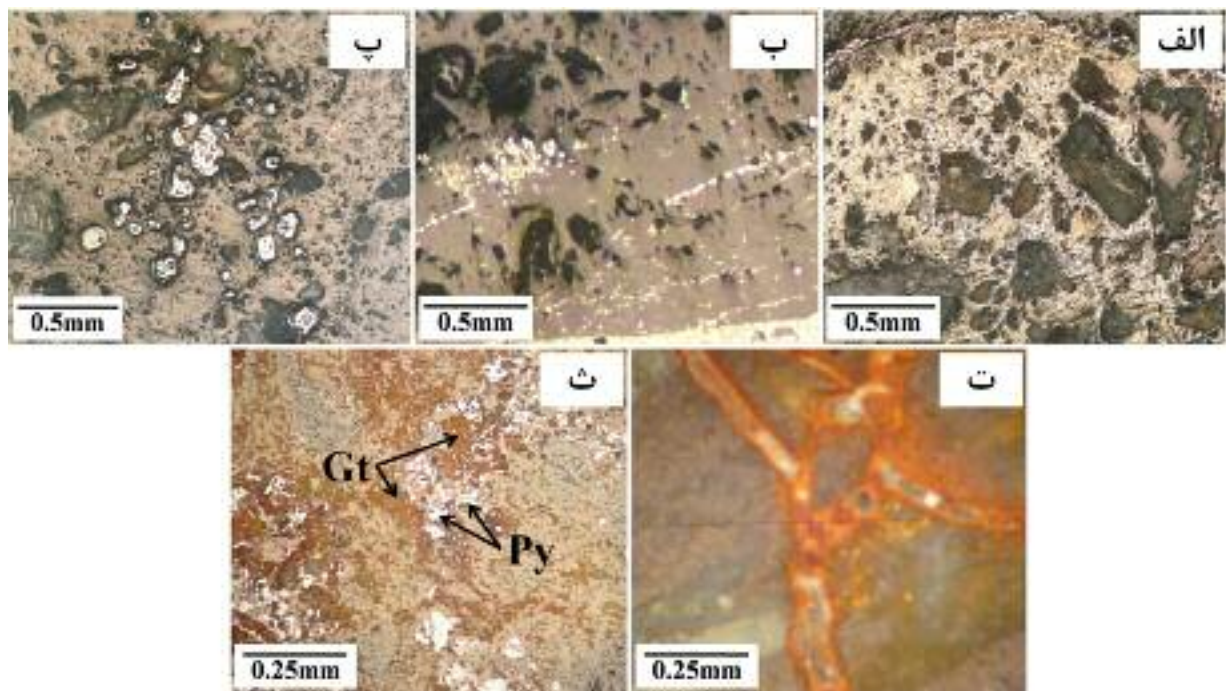
(شکل ۶- الف و ب). استیبنیت در مقاطع میکروسکوپی در اندازه‌های مختلف، به صورت کشیده و سوزنی و نیز بی‌شکل و توده‌ای نیز دیده می‌شود (شکل ۶- پ و ت). وجود ماکل پلی- سنتتیک از دیگر خصوصیات قابل ذکر است و بافت مشاهده شده نیز بیشتر به صورت پرکننده‌ی فضاهای خالی بوده ولی بافت پراکنده نیز وجود دارد (شکل ۶- ث و ج). مقدار پیریت در مقیاس مشاهدات صحرایی، در مقایسه با استیبنیت کم است. پیریت‌ها به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار بوده و دارای بافت‌های برشی، جانشینی، رگچه‌ای و پراکنده‌اند (شکل ۷- الف، ب و پ). هیدروکسیدهای آهن نظیر گوتیت، از کانه‌های ثانویه- ای هستند که به صورت رگچه‌ای داخل درز و شکاف‌ها را پر کرده‌اند (شکل ۷- ت) و یا از تجزیه‌ی کانه‌های سولفیدی، مانند پیریت به وجود آمده‌اند که تشکیل اشکال دروغین داده‌اند (شکل ۷- ث). کوارتز بخش اصلی رگه‌های استیبنیت را در بخش شورچاه تشکیل می‌دهد و مهمترین باطله است.



**شکل ۵** الف: نمایی از رگه‌ی استیبنیت-کوارتز در میان گرانیت‌های بخش شورچاه، ب: نمودار رز ترسیم شده در راستای رگه‌های استیبنیت بخش شورچاه، پ: تصویری نموداری از رگه‌ی استیبنیت- کوارتز در بخش شورچاه. Sbn: استیبنیت، Qtz: کوارتز.



**شکل ۶** تصاویر نمونه‌های دستی و مقاطع میکروسکوپی کانه‌های بخش شورچاه، الف: استیبنیت‌های سوزنی، ب: استیبنیت‌های توده‌ای، پ: استیبنیت کشیده و سوزنی (PPL)، ت: استیبنیت توده‌ای با ماکل پلی‌سنتتیک (XPL)، ث: بافت پرکننده‌ی فضای خالی (PPL)، ج: بافت پراکنده در استیبنیت (PPL).



شکل ۷ تصاویر میکروسکوپی الف: پیریت جانشین (PPL)، ب: پیریت‌های رگچه‌ای (PPL)، پ: پیریت‌های پراکنده (PPL)، ت: گوتیت‌های رگچه‌ای که داخل درز و شکاف‌ها را پر کرده‌اند (XPL)، ث: گوتیت‌های حاصل از تجزیه‌ی سولفیدها و تشکیل اشکال دروغین (XPL).

#### کانه‌زایی و کاننگاری در بخش توزگی

به نظر می‌رسد کانه‌زایی در این بخش کمتر از بخش شورچاه است، ابعاد رگه‌های استیبنیت کمتر بوده و از یکدیگر فاصله‌ی بیشتری دارند. رگه‌های استیبنیت دارای ضخامت متفاوتی هستند و در شیست‌ها (شکل ۸- الف) و در مسیر گسل‌ها وجود دارند. این رگه‌ها در جهات مختلفی قرار دارند ولی دارای روند غالب شمال‌غربی- جنوب‌شرقی هستند (شکل ۸- ب) که در مقیاس محلی، راستای واحد نفوذی با واحدهای رسوبی گستره نیز به همین صورت است.

رگه‌ها بیشتر از استیبنیت و کوارتز تشکیل شده‌اند، استیبنیت با کوارتزهای بلورین در بر گرفته شده و درون شیست‌های دگرسان شده قرار گرفته‌اند (شکل ۸- پ). ضخامت رگه‌ها تا ۳۵ سانتیمتر و طول آن‌ها نیز به چندین متر می‌رسد. کانهای اصلی در این بخش نیز استیبنیت بوده که با آرسنوپیریت و کانهای ثانویه به صورت ترکیبات آهن‌دار از جمله: لیمونیت و گوتیت همراه است. نکته قابل توجه در این بخش، وجود مقادیر زیاد هیدروکسیدهای آهن آن است که بیانگر آن است که در این بخش مقدار سولفیدها بالا بوده و در شرایط سطحی به هیدروکسیدهای آهن تجزیه شده‌اند.

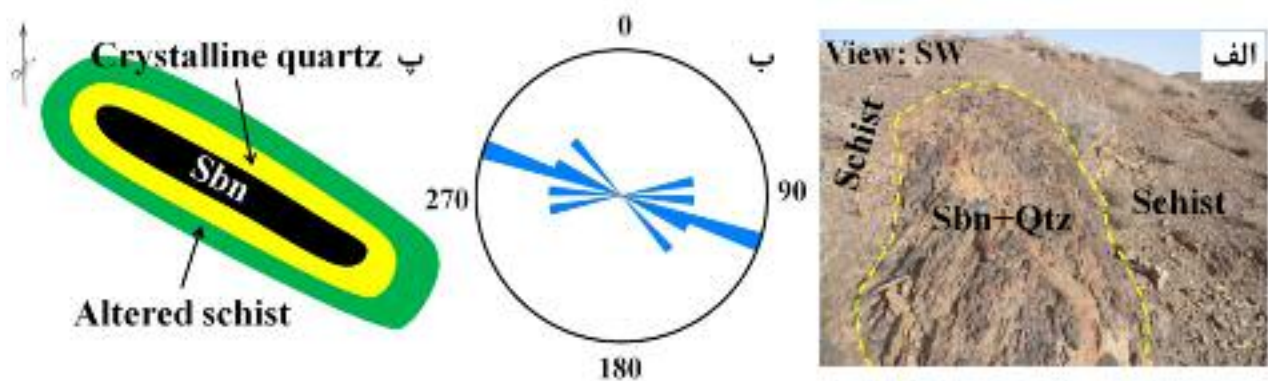
استیبنیت در اندازه‌های متفاوت، به صورت نیمه شکل‌دار تا بی- شکل و نیز اسکلتی دیده می‌شود (شکل ۹- الف) و دارای ماکل- های پلی‌سنتتیک و سرنیزه‌ای هستند (شکل ۹- ب). بافت غالب به صورت پرکننده‌ی فضاهای خالی است ولی بافت‌های توده‌ای و پراکنده نیز دیده می‌شوند (شکل ۹- پ، ت). عامل جهت- یافتگی در استیبنیت ممکن است نیروهای زمین ساختی منطقه باشد. آرسنوپیریت از دیگر کانهای موجود در بخش توزگی است و به رنگ کرمی متمایل به سفید، شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار، در اندازه ریز و به صورت رگچه‌ای و پراکنده است (شکل ۹- ث). کانی کوارتز بخش اصلی رگه‌های استیبنیت را در بخش توزگی تشکیل می‌دهد و از مهمترین باطله‌ها است. هیدروکسیدهای آهن مانند بخش شورچاه، به احتمال زیاد از تجزیه‌ی سولفیدها تحت تأثیر هوازدگی در محیط سطحی تشکیل شده‌اند.

#### دنباله‌ی پاراژنزی کانها و کانی‌ها

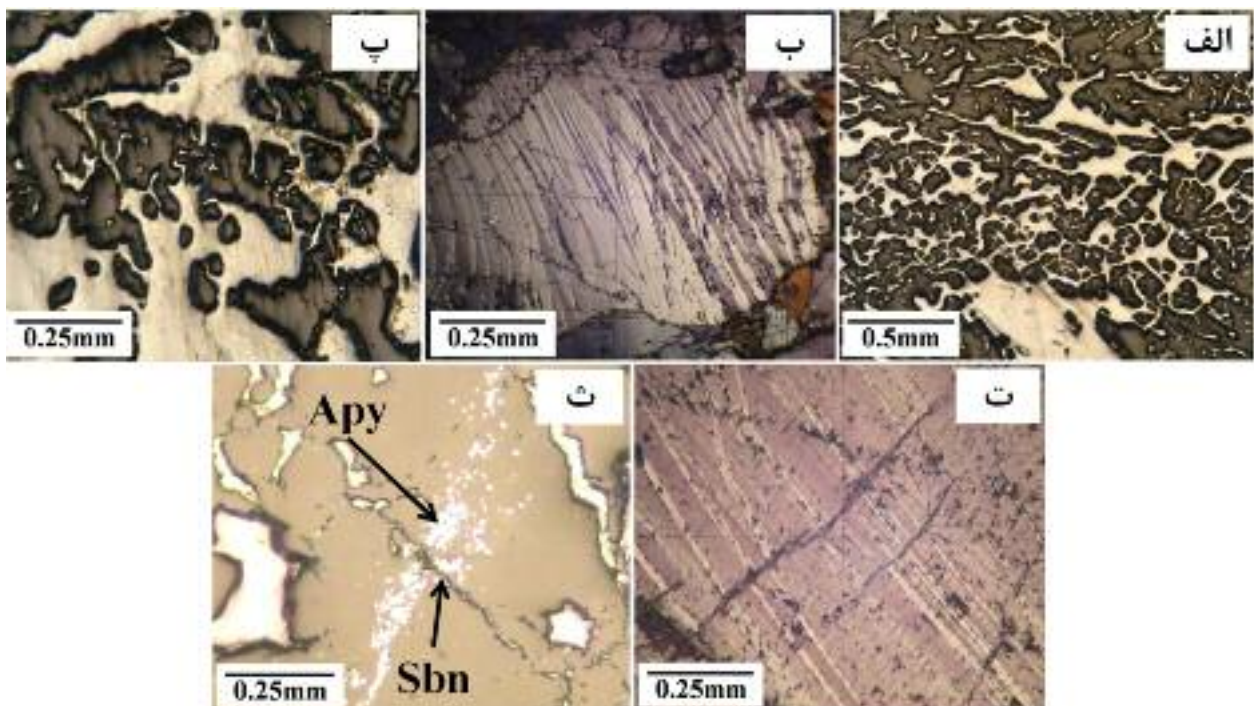
بر اساس بررسی‌های صحرایی، بررسی نمونه‌های دستی، بررسی‌های میکروسکوپی و روابط بافتی موجود بین کانها و کانی‌های موجود در کانسار شورچاه می‌توان توالی احتمالی پاراژنز آن‌ها را طی مراحل مختلفی از یکدیگر تفکیک کرد. در

ب). از کانه‌های برون‌زاد در این منطقه می‌توان به سنارمونیت ( $Sb_2O_3$ )، سروانتیت ( $Sb_2O_4$ )، هیدروکسیدهای آهن حاصل از تجزیه‌ی سولفیدها و نیز کلسیت‌های رگچه‌ای اشاره کرد. کوارتز نیز که باطله‌ی اصلی در کانسار شورچاه است، در تمام مراحل حضور دارد (جدول ۱).

مرحله اول پیریت‌های خودشکل و درشت تشکیل شده‌اند. در مرحله دوم استینیت‌های دارای بافت پرکننده‌ی فضای خالی ظاهر شده‌اند و به دلیل اینکه آرسنوپیریت‌ها را قطع می‌کنند، از آن‌ها جوانترند (شکل ۹-ث) و نیز پیریت‌های بی‌شکل، پراکنده و کوچک نسل دوم نیز پدیدار شده‌اند. در مرحله‌ی سوم پیریت‌های رگچه‌ای نسل سوم تشکیل شده‌اند (شکل ۷-).



شکل ۸ الف: نمایی از رگه استینیت در میان شیست‌های بخش توزگی، ب: رز دیاگرام ترسیم شده در راستای رگه‌های استینیت بخش توزگی، پ: تصویری نموداری از رگه استینیت-کوارتز در بخش توزگی. Sbn: استینیت، Qtz: کوارتز.



شکل ۹ مقاطع میکروسکوپی الف: استینیت‌های اسکلتی (PPL)، ب: ماکل پلی‌سنتیک در استینیت‌ها (XPL)، پ: بافت پرکننده‌ی فضای خالی استینیت‌ها (PPL)، ت: استینیت‌های توده‌ای (XPL)، ث: رگه‌ای از آرسنوپیریت که با رگه‌ای از استینیت قطع شده است (PPL). Apy: آرسنوپیریت، Sbn: استینیت.

جدول ۱ توالی پاراژنزی کانسار شورچاه.

Minerals & Ores		Hypogene		Supergene
Pyrite	Type I	████████	-----	
	Type II		-----████████	
	Type III			-----████████
Chalcopyrite		████████-----		
Arsenopyrite			████████-----	
Stibnite			-----████████████████████	
Senarmontite				████████-----
Cervantite				████████-----
Quartz	Type I	████████-----		
	Type II		████████████████████-----	
Calcite				████████-----
Fe- Hydroxides				████████-----

### سنگ‌نگاری و ریز دماسنجی میان‌بارهای سیال

بررسی‌های ریز دماسنجی روی میان‌بارهای سیال اولیه دو فاز کوارتزهای در ارتباط با کانه‌زایی صورت گرفته است. میان‌بارهای سیال اولیه به صورت مجزا و درشت، در زمینه کوارتز پراکنده بوده و اندازه‌ی آن‌ها در حدود ۲۰ تا ۴۰ میکرون است ولی انواع ۱۰ میکرونی نیز وجود دارند (شکل ۱۰-الف). تعداد میان‌بارهای سیال ثانویه زیاد بوده و به صورت ریز، بی-شکل و دو فاز دیده می‌شوند و به شکل خطی در راستای شکستگی‌ها ردیف شده‌اند (شکل ۱۰-ب). بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری، میان‌بارهای سیال نمونه‌های مورد بررسی را می‌توان در چهار گروه قرار داد شامل: (۱) میان‌بارهای سیال دو فاز غنی از مایع، (۲) میان‌بارهای سیال سه فاز دارای گاز-مایع آب-مایع کربن دی‌اکسید، (۳) میان‌بارهای سیال تک فاز غنی از مایع و (۴) میان‌بارهای سیال تک فاز غنی از گاز. بیشتر میان‌بارهای سیال در نمونه‌های مورد بررسی از گروه

۱ و ۲ هستند. میان‌بارهای سیال گروه ۱ غنی از مایع هستند و در مقاطع مورد بررسی حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد مایع دارند، حباب گاز در آن‌ها کوچک بوده، فاز جامد ندارند و بیشتر بی-شکل‌اند که دلیل آن نامنظم بودن فضاهای باقیمانده بین سطوح بلوری هنگام رشد بلورهاست. شکل‌های بلوری منفی نیز وجود دارند که شکل منفی آن‌ها به صورت فضای خالی هم‌شکل با شکل اصلی بلور، در درون آن است، و دارای درجه-پرشدهگی بالا و شوری پایین هستند که نشانگر تشکیل آن‌ها در دماهای پایین است. این گروه از میان‌بارهای سیال دو فاز در کانسار شورچاه به فراوانی دیده می‌شوند.

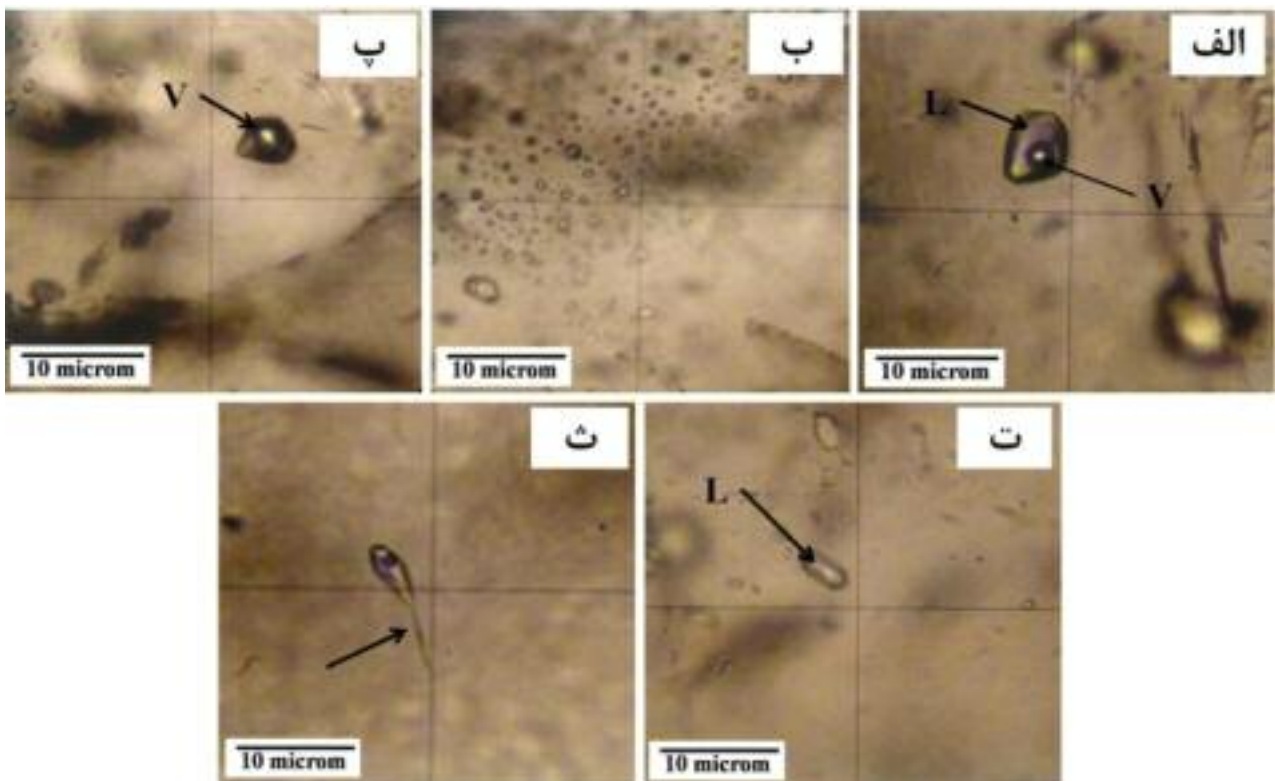
در گروه ۲ علاوه بر فاز گاز و فاز مایع آب، فاز مایع کربن دی‌اکسید نیز وجود دارد. میان‌بارهای سیال گروه ۳ و ۴ بر خلاف دو گروه دیگر کوچک است و فراوانی کمی دارند و به این دلیل از آن‌ها در بررسی‌های ریز دماسنجی استفاده نشده است



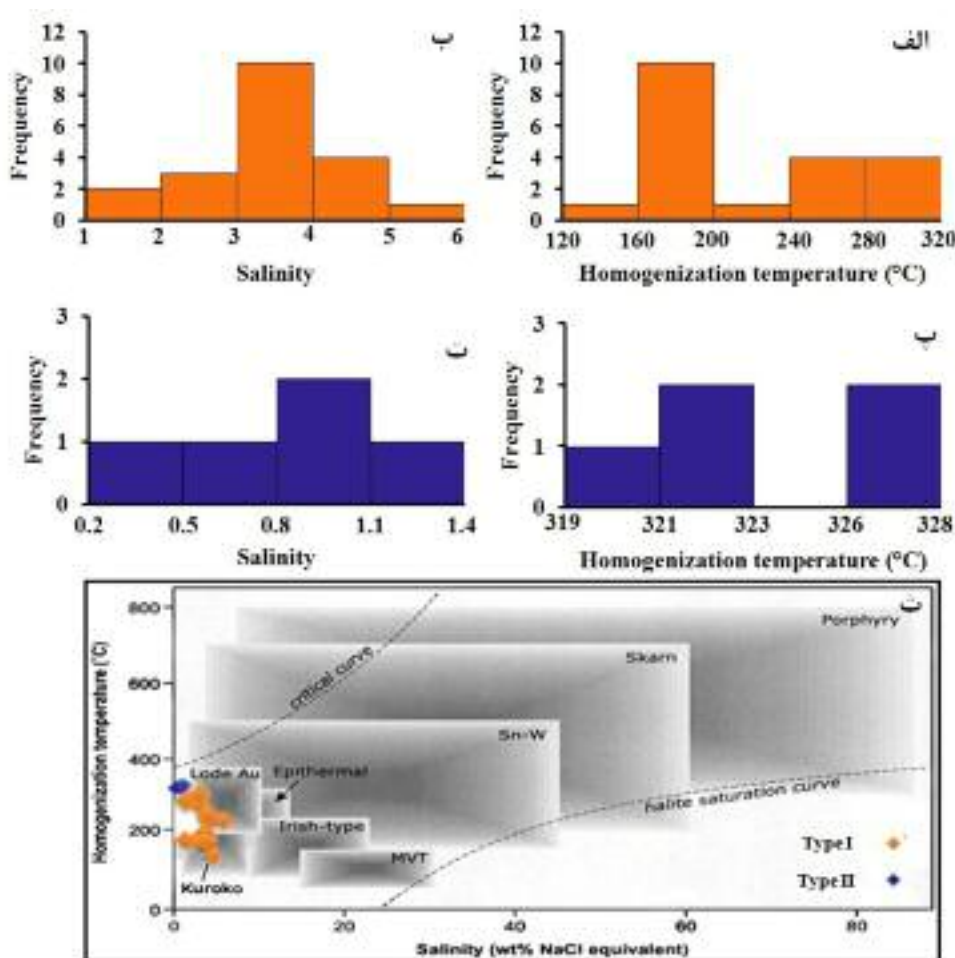
اینکه شوری آن‌ها بین ۰/۲۱ تا ۱/۲۲ درصد وزنی معادل نمک طعام است (شکل ۱۱- پ و ت). با توجه به نمودارهای توزیع فراوانی، دمای همگن‌شدگی اغلب میان‌بارهای سیال بین ۲۰۰-۱۶۰ درجه سانتیگراد است که معادل با شوری بین ۴-۳ درصد وزنی نمک طعام بوده و فاز اصلی کانه‌زایی نیز در همین دما در کانسار شورچاه رخ داده است. با توجه به دمای همگن‌شدگی و شوری میان‌بارهای سیال اندازه‌گیری شده و با استفاده از نمودار رده‌بندی انواع کانسارها از ویلکینسون [۱۱]، کانسار شورچاه از نوع وراگرمایی تا مزوترمال است (شکل ۱۱- ت). کانسارهای وراگرمایی نزدیک سطح زمین و در دمای کمتر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد تشکیل می‌شوند ولی در بعضی موارد دمای بیشتر از این نیز گزارش شده است. علاوه بر این، کانسارهای وراگرمایی شوری پایینی دارند [۱۲]. شاره‌های کانه‌زا اغلب ترکیبی از آب-های ماگمایی، فسیل و جوی هستند [۱۳]، اما خاستگاه اصلی شاره‌ها در کانسارهای وراگرمایی، شاره‌های جوی هستند [۱۴].

(شکل ۱۰- پ و ت). از جمله پدیده‌هایی که در تعدادی از میان‌بارهای سیال مشاهده می‌شوند، پدیده‌ی باریک‌شدگی است که این میان‌بارهای سیال نیز در بررسی‌های ریز دماسنجی به کار گرفته نشده‌اند (شکل ۱۰- ت).

میان‌بارهای سیال گروه ۱ دارای حداقل دمای همگن‌شدگی ۱۴۶/۵ و حداکثر ۳۱۲/۵ درجه‌ی سانتیگراد بوده، دامنه تغییرات دمای ذوب آخرین قطعه یخ (Tmi) ۰/۷- تا ۳/۵- درجه‌ی سانتیگراد است و نشان می‌دهد که در انجماد این میان‌بارهای سیال با توجه به مثبت نبودن دمای ذوب نهایی هیچ نوع کلاتریتی تشکیل نشده است. شوری این میان‌بارهای سیال بین ۱/۲۲ تا ۵/۷۱ درصد وزنی معادل نمک طعام تغییر می‌کند (شکل ۱۱- الف و ب). در میان‌بارهای سیال گروه ۲ حداقل دمای همگن‌شدگی ۳۱۹/۴ و حداکثر آن ۳۲۷/۹ درجه-ی سانتیگراد بوده و دامنه‌ی تغییرات دمای ذوب آخرین قطعه یخ (Tmi) ۹/۴ تا ۹/۹ است. این دما می‌تواند حاکی از حضور CO<sub>2</sub> مایع به صورت فاز کلاتریت در این گروه باشد. ضمن



شکل ۱۰ تصاویر میکروسکوپی از میان‌بارهای سیال در کوارتزهای رگه‌ای کانسار شورچاه، الف: میان‌بار سیال اولیه بی‌شکل، ب: میان‌بارهای سیال ثانویه، پ: میان‌بار سیال تک‌فازی غنی از گاز، ت: میان‌بار سیال تک‌فازی غنی از مایع، ث: پدیده‌ی باریک‌شدگی در میان‌بارهای سیال.



شکل ۱۱ نمودارهای فراوانی الف: دمای همگن شدن میان بارهای سیال گروه ۱، ب: شوری میان بارهای سیال گروه ۱، پ: دمای همگن شدن میان بارهای سیال گروه ۲، ت: شوری میان بارهای سیال گروه ۲، ث: موقعیت میان بارهای سیال گروه ۱ و ۲ در کوارتزهای رگه‌ای کانسار شورچاه بر اساس نمودار ویلکینسون [۱۰].

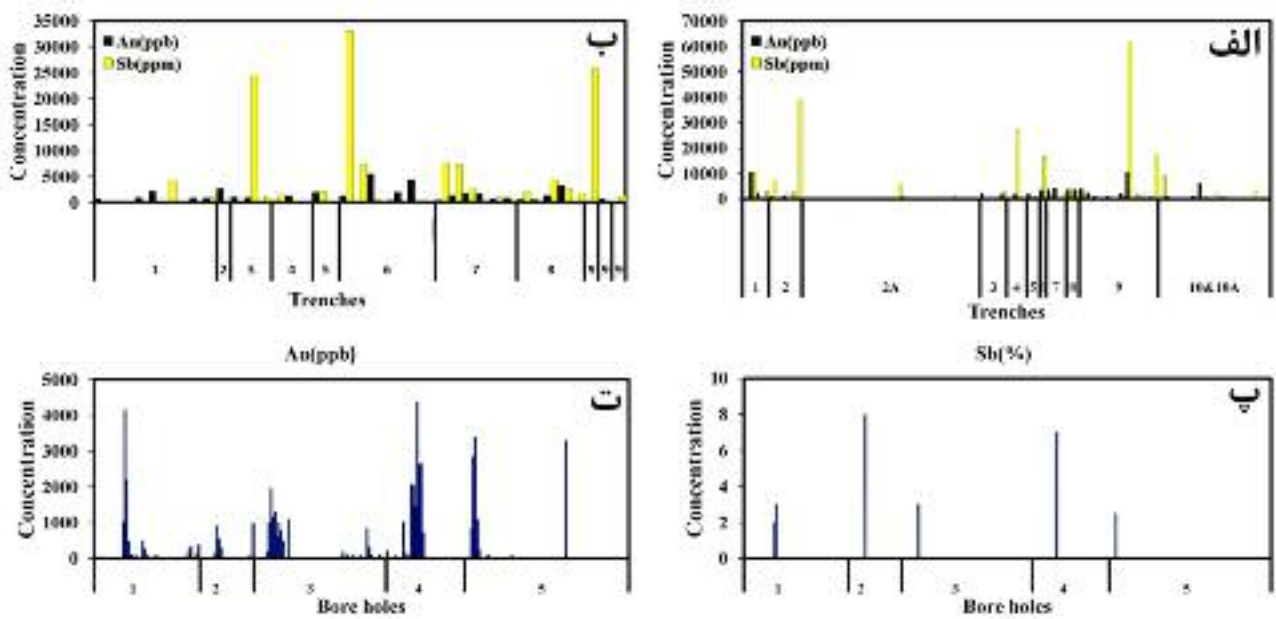
توزگی حاکی از این است که بیشترین غلظت آنتیموان و طلا به ترانشه شماره ۶ با  $32936 \text{ ppm}$  آنتیموان و  $55246 \text{ ppb}$  طلا وابسته است. داده‌های عمقی بخش شورچاه نیز نشان می‌دهند که بیشترین غلظت آنتیموان در گمانه‌ی شماره ۲ با  $8\%$  آنتیموان و بیشترین غلظت طلا در گمانه‌ی شماره ۴ با  $4 \text{ ppb}$  طلا است.

بر اساس نمودارهای ترسیم شده در شکل ۱۳، توزیع فراوانی آنتیموان حالت بهنجار دارد، چولگی آن مثبت بوده، در داده‌های سطحی در حدود  $4950$  و در داده‌های عمقی در حدود  $6152$  است. توزیع فراوانی طلا نیز حالت بهنجار دارد، دارای چولگی مثبت بوده، در داده‌های سطحی در حدود  $2989$  و در داده‌های عمقی در حدود  $1932$  است.

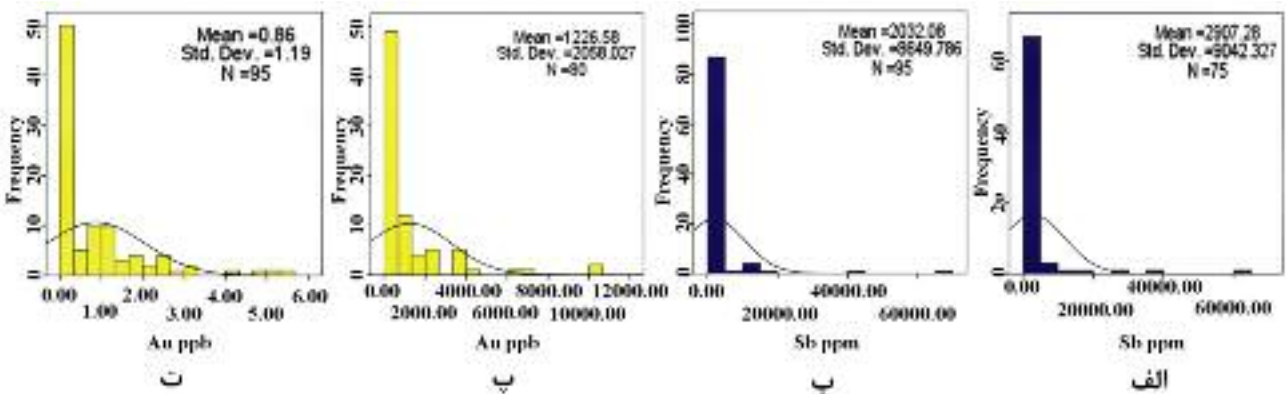
#### تحلیل آماری آنتیموان و طلا در داده‌های سطحی و عمقی

شرکت معدنی زرکن مینرالز ۱۱ ترانشه و ۶ حلقه چاه اکتشافی در بخش شورچاه و ۳۰ ترانشه در بخش توزگی حفر کرده است [۶]. از سوی دیگر، ایتوک ایران نیز در حدود ۱۷ ترانشه به طول  $57/2$  متر و ۲۲ گمانه به طول  $1886$  متر در کانسار شورچاه حفر کرده است [۷]. عمیق ترین گمانه  $202$  متر و کم عمق ترین آن‌ها  $45/5$  متر بوده است. در این قسمت با استفاده از داده‌های موجود اقدام به انجام بررسی‌های آماری کرده‌ایم.

بر اساس محاسبات آماری انجام شده و نمودارهای ترسیم شده در شکل ۱۲، بیشترین غلظت آنتیموان و طلا در داده‌های سطحی بخش شورچاه به ترانشه شماره ۹ با  $61332/4 \text{ ppm}$  آنتیموان و  $10562 \text{ ppb}$  طلا است. داده‌های سطحی بخش



شکل ۱۲ الف: نمودار مقدار آنتیموان و طلا در ترانشه‌های بخش شورچاه، ب: نمودار مقدار آنتیموان و طلا در ترانشه‌های بخش توزگی، پ: نمودار مقدار آنتیموان در چاه‌های حفاری شده بخش شورچاه، ت: نمودار مقدار طلا در چاه‌های حفاری شده در بخش شورچاه.



شکل ۱۳ نمودارهای توزیع فراوانی الف: آنتیموان در ترانشه‌های کانسار شورچاه، ب: آنتیموان در چاه‌های حفاری شده بخش شورچاه، پ: طلا در ترانشه‌های کانسار شورچاه، ت: طلا در چاه‌های حفاری شده بخش شورچاه.

### تعیین شرایط فیزیکوشیمیایی، عوامل کنترل کننده‌ی پایداری کانه‌های آنتیموان و ته نشست استینیت

روابط پایداری میان کانه‌های مختلف در سیستم Fe-Sb-S-O در کانسار شورچاه، به صورت تابعی از  $fO_2$  و pH، در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد و  $a_s = 0.1$  بنا شده است. پارامترهای مهمی که برای کنترل حلالیت کانه‌های آنتیموان در نظر گرفته می‌شوند شامل: فعالیت گونه‌های فلزی آبگون،  $T$ ،  $fO_2$ ،  $a_s$  و pH هستند. به طور کلی دما باید به پایین‌تر از ۲۵۰ درجه برسد تا شارژ از استینیت اشباع شود، و بیشتر ذخایر آنتیموان نیز در دمای بین ۱۵۰ و ۳۰۰ درجه‌ی سانتیگراد تشکیل می‌-

شوند [۱۵]. استینیت در دماهای نسبتاً پایین شکل می‌گیرد. بنابراین، می‌توان گفت که کاهش دما عامل اصلی کنترل کننده کانه‌زایی استینیت است. حلالیت استینیت در شارژهای گرمایی در pH زیر خنثی بسیار پایین است. بنابراین، استینیت کانه پایدار آنتیموان در  $fO_2$  متوسط و مقادیر pH زیر ۸ است. میزان حلالیت استینیت در pH بالاتر افزایش می‌یابد. بنابراین، کاهش pH نیز می‌تواند عامل مهمی در ته‌نشینی استینیت در گستره‌ی  $H_2S$  باشد [۱۵]. از طرف دیگر، به طور معمول استینیت همراه با پیریت بوده و در گستره‌ی پیریت قرار می‌گیرد (شکل ۱۴). تشکیل اکسیدهای آنتیموان از جمله

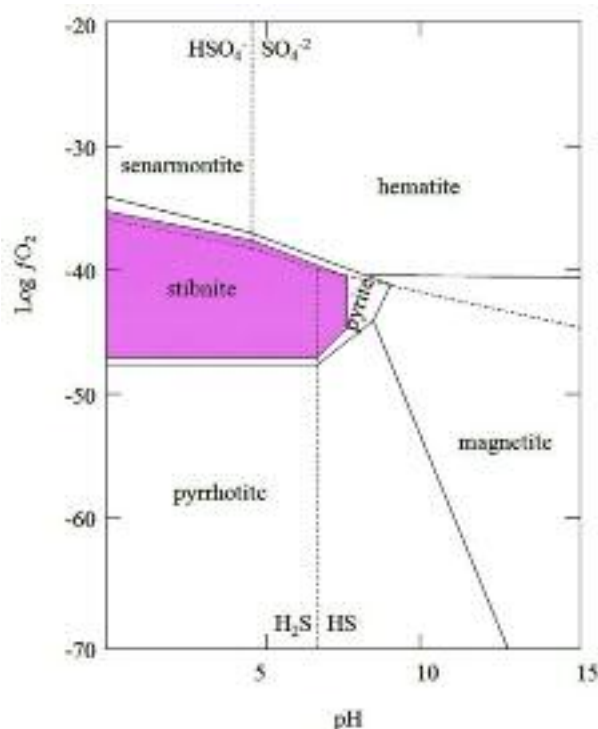
نهشت استینیت- طلا در کانسار شورچاه نقش مؤثری داشته باشد. نکته‌ی قابل توجه این است که کانه‌زایی طلا در دماهای بالاتر از استینیت رخ می‌دهد بنابراین می‌توان گفت که حلالیت طلا نسبت به استینیت وابستگی بیشتری به دما دارد. از آن جا که بر خلاف طلا، کاهش دما عامل مهمی در نهشت استینیت است، تنها راهی که سبب نهشته شدن هر دو فلز در طی سرد شدن می‌شود، بافر شدن شاره با یک مجموعه کانه سولفیدی و بنابراین، کاهش پیش رونده  $a_s$  است [۱۵].

#### برداشت

رگه‌های استینیت کانسار شورچاه در یک زون برشی شکل پذیر به شدت سیلیسی و برشی شده، در سنگ‌های گرانیتی و رسوبی دگرگون شده تشکیل شده‌اند و در کنترل ویژگی‌های ساختاری سنگ‌ها هستند. ارتباط شدید بین سنگ‌های گرانیتی و شیست‌ها می‌تواند بیانگر عملکرد ماگماتیسیم و دگرگونی با هم و به صورت همزمان در تحرک عناصر و کانه‌زایی باشد. شاره‌ی کانه‌زا دارای شوری پایین، بین ۰/۲۱ تا ۵/۷۱ درصد وزنی نمک طعام و دمای همگن‌شدگی بین ۱۴۶/۵ تا ۳۲۷/۹

سنارمونیت در کانسار شورچاه، به شرایط اکسایشی و فعالیت‌های غیر معمول بالای آنتیموان در شاره‌ی کانه‌دار نیاز دارد. بنابراین، هنگامی که شاره‌های گرمایی اکسید کننده، کانه‌زایی آنتیموان پیشین را تحت تأثیر قرار می‌دهند، سنارمونیت تشکیل می‌شود [۱۶].

کانسار شورچاه علاوه بر استینیت دارای مقادیری طلا نیز هست. نهشت این دو فلز در مکان‌هایی است که قادر به فراهم کردن شرایط قلیایی لازم برای انتقال این فلزات‌اند و به وسیله سنگ‌هایی که بالقوه قادر به ایجاد اسیدی شدن مورد نیاز برای نهشت استینیت- طلا هستند، رخ می‌دهد [۱۵]. یک شاره نسبتاً قلیایی و اندکی کاهیده می‌تواند حاوی این دو عنصر باشد. نهشت طلا در پاسخ به اکسایش، کاهش، افزایش یا کاهش pH است در حالی که، هم نهشت استینیت و طلا می‌تواند تنها به صورت نتیجه‌ای از اسیدی شدن شاره رخ دهد [۱۵]. سنگ‌های میزبان در کانسار شورچاه، غنی از کانی‌های فیلسیلیکاته هستند. بنابراین، ظرفیت بافر کردن حجم زیادی شاره را به pH نسبتاً پایین دارند. اگر تأثیر دما در نظر گرفته نشود، نهشت کانه‌های سولفیدی مانند پیریت و آرسنوپیریت راه دیگر اسیدی شدن بوده که ممکن است در فراهم آوردن شرایط



شکل ۱۴ نمودار pH- logfO2 ترسیم شده در ۲۰۰ درجه‌ی سانتیگراد و  $\Sigma a_s = 0.1$  که نشان دهنده‌ی گستره‌ی پایداری استینیت در سیستم Fe-Sb-S-O در کانسار شورچاه است.

from northern Portugal", Ore Geology Reviews 34 (2008) 533-546.

[3] Dill H. G., Melcher F., Botz, R., "Meso- to epithermal W-bearing Sb vein-type deposits in calcareous rocks in western Thailand: with special reference to their metallogenetic position in SE Asia", Ore Geology Reviews 34 (2008) 242-262.

[4] Janković S., "The ore deposits of Serbia (Yugoslavia), Regional metallogenic settings, environments of deposition, and types (in Serbian)", Faculty of mining and geology, Belgrade (1990) 799 p.

[5] Neiva A. M. R., András P., Ramos J. M. F., "Antimony quartz and antimony- gold quartz veins from northern Portugal", Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement 70 (2006) A442-A442.

[۶] شرکت معدنی زرکن مینرالز، "گزارش نهایی اکتشاف کانی‌سازی آنتیموان در گستره شور چاه"، (۱۳۸۳).

[۷] ایتوک ایران، "گزارش اکتشاف آنتیموان در منطقه شورچاه و توزگی"، وزارت صنایع و معادن، سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران، شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، (۱۳۸۶).

[۸] مرادی ر.، "سیک و منشاء کانی‌زایی آنتیموان و طلا در شورچاه، جنوب‌شرق زاهدان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، (۱۳۹۱)، ۱۵۹ صفحه.

[9] Johnson J. W., Oelkers E. H., Helgeson H. C., "SUPCRT92: A software package for calculating the standard molal thermodynamic properties of minerals, gases, aqueous species and reactions from 1 to 5000 bars and 0°C to 1000°C", Computers and Geosciences 17 (1991) 899-974.

[۱۰] آقانباتی ع.، "زمین‌شناسی ایران"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۸۳)، ۶۰۶ صفحه.

[11] Wilkinson J. J., "Fluid inclusion in hydrothermal ore deposits", Lithos 55 (2001) 229-272.

[12] Hedenquist J.W., "Mineralization associated with volcanic-related hydrothermal system in the Circum-Pacific Basin", In: Horn, M.K., Editor, 4<sup>th</sup> Circum-Pacific Energy and Mineral Resources Conference, Singapore, 1986, Transactions:

بوده است. فراوانی کوارتزها و رگه‌های سیلیسی در این منطقه بیانگر عملکرد بالای شاره‌های گرمابی است که سنگ‌های منطقه و به ویژه سنگ‌های همراه با کانه‌زایی را سیلیسی کرده‌اند. در این کانسار شواهدی از فعالیت‌های آتشفشانی مشاهده نشد. بنابراین، شاره‌ی کانه‌زا ارتباطی با فعالیت‌های آتشفشانی ندارند ولی با توجه به وجود نفوذی‌های گرانیتی در این کانسار، ارتباط نزدیک آن‌ها با رگه‌های کانه‌زایی شده و وجود شواهدی از کانه‌زایی در آن‌ها، شاره‌ی کانه‌زا و کانه‌زایی، در ارتباط با این نفوذی‌های گرانیتی بوده که هم به عنوان منبع گرمایی و هم منبع عناصر عمل کرده‌اند. استینیت کانه غالب آنتیموان در کانسار شورچاه بوده، در گستره‌ی وسیعی از شرایط T-pH- $fO_2$  موجود در طبیعت پایدار است، گرادیان‌های شدیدی از حلالیت با دما،  $fO_2$  و pH را به نمایش می‌گذارد و این می‌تواند از دلایل بیشتر بودن ذخایر استینیت نسبت به ذخایر دیگر آنتیموان‌دار باشد. نهشت استینیت اساساً با کاهش دما و کاهش کاهیدگی کنترل می‌شود به جز در شرایط قلیایی که اسیدی شدگی عامل اصلی کانه‌زایی است. حلالیت استینیت در دماهای بالاتر از ۳۵۰ درجه‌ی سانتیگراد شدید است و این می‌تواند دلیلی برای تشکیل این نوع ذخایر در دماهای پایین‌تر و به طور معمول زیر ۲۵۰ درجه‌ی سانتیگراد باشد. کانسار شورچاه علاوه بر استینیت دارای مقادیری طلاست به این مفهوم که شرایط مناسبی برای انتقال و نهشت این دو فلز با یکدیگر وجود داشته است یعنی در pH بالا و اندکی کاهیده انتقال یافته‌اند و سپس اسیدی شدگی که ممکن است به وسیله‌ی سنگ‌های میزبان غنی از کانی‌های فیلوسیلیکاتی فراهم آمده باشد، حلالیت این دو فلز را کاهش داده است. هنگامی که a<sub>s</sub> با مجموعه کانی‌های سولفیدی بافر شده باشد، کاهش دما ممکن است نقش مهمی در تولید این فلزات ایفا کرده باشد.

#### مراجع

[1] Gumiel P., Arrubas A., "Antimony Deposits in the Iberian Peninsula", Economic Geology 52 (1987) 1453-1463.

[2] Neiva A. M. R., András P., Ramos J. M. F., "Antimony quartz and antimony-gold quartz veins

- [15] Williams-Jones A. E., Normand C., "Controls of mineral parageneses in the system Fe-Sb-S-O", *Economic Geology* 92 (1997) 308-324.
- [16] Normand C., Gauthier M., Jébrak M., "The Québec Antimony deposit: An example of gudmundite-native antimony mineralization in the ophiolitic mélange of the southeastern Québec Appalachians", *Economic Geology* 91 (1996) 149-163.
- American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma (1987) 513-524.
- [13] Roedder E., "Fluid Inclusions", *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy* 12 (1984) 2644p.
- [14] Rossetti P., Colombo F., "Adularia-sericite gold deposits of Marmato (Caldas, Colombia): Field and petrographic data" In: McCaffrey K. J. W., Lonergan L., Wilkinson J. J., (Eds), (1999) "Fractures, Fluid Flow and Mineralization", *Geological Society of London* 155 (1999).