



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

راحله مرادی<sup>\*</sup> ، محمد بومردی، ساسان باقری، اعظم زاهدی

بخش زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

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

چکیده: کانسار آنتیموان شورچاه، در منطقه‌ی فلیش شرق ایران واقع شده است. در این منطقه کانه‌زایی آنتیموان در رگه‌های سیلیسی، تشکیل شده است. گرانیتوئیدهای به شدت سیلیسی و برشی شده و سنگ‌های دگرگون درجه‌ی پایین غنی از کانه‌های فیلوسیلیکاتی، میزبان این رگه‌ها هستند. استیبنیت کانه اصلی آنتیموان در رگه‌هاست و در ارتباط با پیریت، آرسنوبیریت و طلاست. سنارمونتیت و سروانتیت از اکسیدهای آنتیموان موجود در کانسار شورچاه هستند. سنگ‌های میزبان به طور بالقوه قادر به ایجاد کردن اسیدی شدگی لازم برای تهنشینی استیبنیت- طلا بوده‌اند. بر اساس روابط پاراژنزی و داده‌های ترمودینامیکی، استیبنیت 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. استیبنیت و طلا در کانسار شورچاه می‌توانند در غلظت‌های قابل ملاحظه‌ای به صورت همبافته‌های بی- سولفیدی حمل شده و با کاهش pH نهشت شده باشند. دمای همگن شدگی 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 و راگرما تا مزوترمال را به اثبات می‌رساند.

واژه‌های کلیدی: استیبنیت- طلا، شرایط فیزیکوشیمیایی، میان‌بارهای سیال، کانه‌زایی، شورچاه، زاهدان.

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

مقدمه  
منابع مهم آنتیموان جهان از ذخایر رگه‌ای استیبنیت بوده که بیشتر در دماهای پایین تشکیل شده‌اند. استیبنیت رایج‌ترین کانه‌ی آنتیموان دار است که در سنگ‌های دگرگون درجه‌ی پایین و در بیشتر مناطق با گرمابی‌های وابسته به ماجمایی گرانیتی 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

\* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۵۱۴۰۰۲۷۶، پست الکترونیکی: rmoradi@pgs.usb.ac.ir

کانه‌دار انجام گرفت و نمونه‌های مناسبی برای بررسی‌های ریز دماسنگی انتخاب و به شرکت آذین زمین پویا ارسال شدند. آزمایش‌های گرمایش و سرمایش با استفاده از گرم کننده و سرد کننده لینکام مدل 94 TMS انجام گرفت. دقت کار دستگاه در هنگام گرمایش و سرمایش  $\pm 0.1$  درجه‌ی سانتیگراد و گستره‌ی دمای این دستگاه بین  $-196$  تا  $+600$  درجه‌ی سانتیگراد بوده است. برای محاسبات آماری و بررسی چگونگی آنتیموان و طلا در داده‌های سطحی و عمقی بخش‌های سورچاه 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 آنتیموان دار و به کارگیری روابط pH- $fO_2$  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 فیزیکوشیمیایی ترسیم شد.

### بحث و بررسی

#### زمین‌شناسی کانسار سورچاه

کانسار سورچاه در استان سیستان و بلوچستان و ۶۰ کیلومتری جنوب شرقی زاهدان در طول جغرافیایی  $54^{\circ}52'$  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 شیسته‌ها 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 استیبنیتی در منطقه شکل گرفته‌اند (شکل ۱ و ۲).

از نظر ساختاری احتمالاً منطقه مورد بررسی در یک زون برشی واقع است و آثار و شواهد عملکرد گسل‌ها به فراوانی و در مقیاس‌های مختلف مشاهده می‌شوند. در منطقه‌ی سورچاه 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 سورچاه انجام شده است می‌توان به گزارش نهایی پی‌جوبی کانه‌زایی آنتیموان در منطقه سورچاه توسط شرکتمعدنی زرکن مینرالز [۶]، پروژه‌ی پی‌جوبی آنتیموان در منطقه سورچاه و توزگی توسط ایتوک ایران [۷] و نیز چگونگی سیک و خاستگاه کانه‌زایی آنتیموان و طلا در سورچاه، جنوب‌شرق زاهدان توسط مرادی اشاره کرد [۸].

توصیف‌های بسیاری درباره‌ی ذخایر آنتیموان دار شده است، در حالی که، بررسی‌های نسبتاً اندکی درباره گستره‌ی شرایط فیزیکوشیمیایی این نوع کانه‌زایی انجام شده است. استیبنیت کانه‌ی غالب آنتیموان در بیشتر ذخایر آنتیموان دار از جمله کانسار سورچاه 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 استیبنیت در دمای پایین تشکیل می‌شوند و به چه دلیل معمولاً دارای طلا هستند.

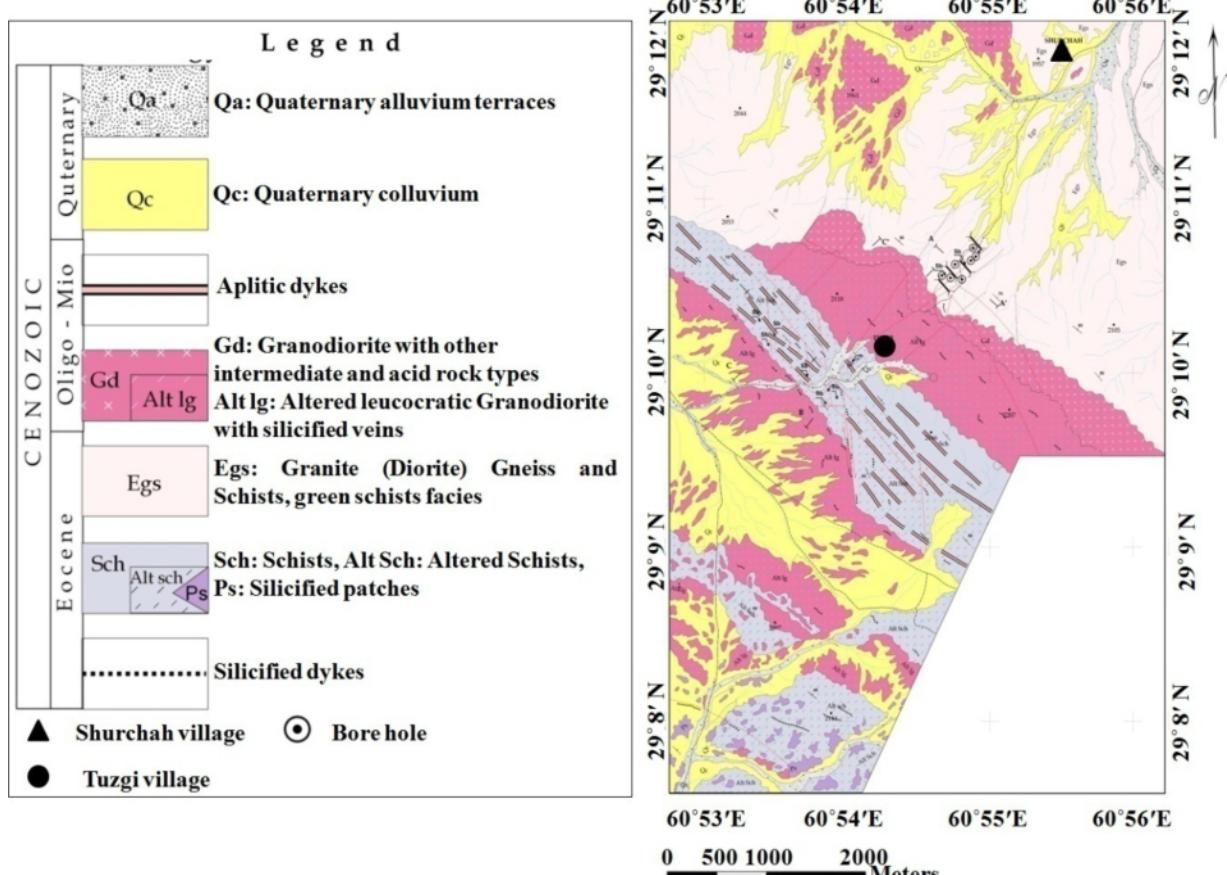
در این پژوهش سعی شده است که علاوه بر بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌شناسی کانسار سورچاه، میان‌بارهای سیال نیز به منظور بررسی شوری، دمای همگن شدن و تعیین نوع شاره‌ی کانه‌زا، مورد بررسی قرار گیرند و از آنجا که بررسی گستره‌ی شرایط فیزیکوشیمیایی کانه‌زایی استیبنیت- طلا در منطقه‌ی سورچاه انجام نشده است، بهتر است با استفاده از بررسی‌های کانه‌نگاری مجموعه‌ی کانه‌های آنتیموان دار و به کارگیری روابط pH- $fO_2$  در سیستم Fe-Sb-S-O، به بررسی شرایط فیزیکوشیمیایی و عوامل کنترل کننده‌ی کانه‌زایی در کانسار استیبنیت- طلا سورچاه پرداخته شود.

### روش بررسی

ابتدا نقشه‌های زمین‌شناسی  $1,20000$ ،  $1,50000$  و  $1,10000$  کانسار سورچاه 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 دوبلصیقلی 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.

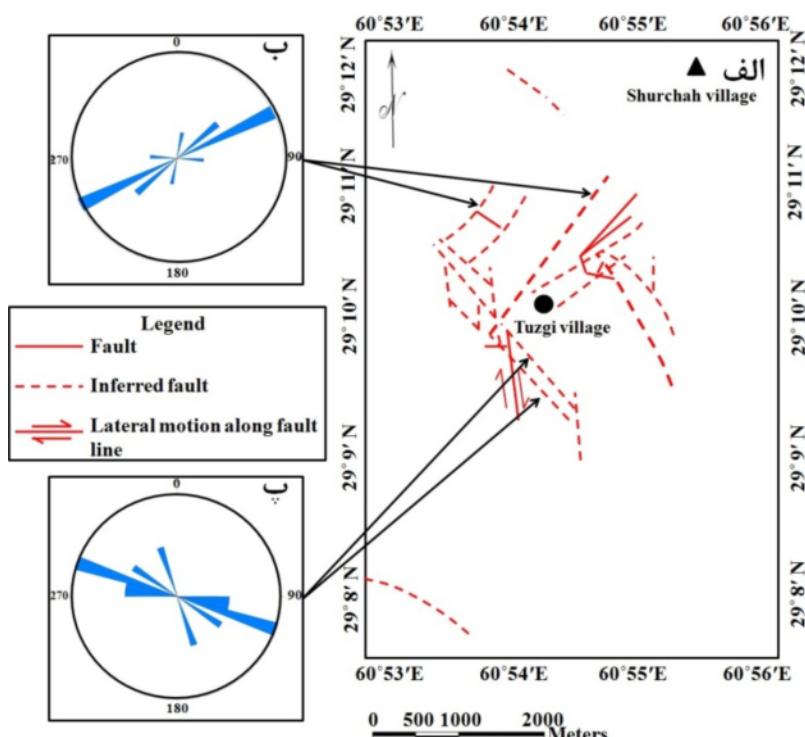
بیشترین گسترش زون‌های دگرسان در بخش میانی گستره با بیشترین فعالیت گسلش است (شکل ۳-الف). وجود سطوح گسلی چین خوردده در منطقه نشان می‌دهد که حداقل در برخی از آن‌ها گسلش قبل از چین خوردگی‌های مهم عمل



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



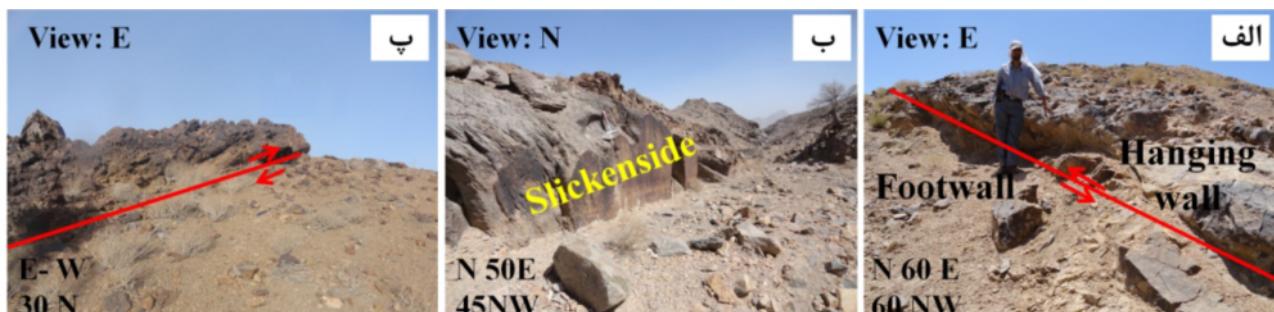
شکل ۲ الف: نمایی از دایک‌های آپلیتی و گرانودیوریتی در میان شیست‌های کانسار شورچاه، ب: نمایی از نوارهای گرانودیوریتی نفوذ کرده در میان شیست‌های بخش شورچاه.



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.

جابه‌جایی‌هایی تا حدود ۲ متر نشان می‌دهند (شکل ۴ ب)، خردشیدگی اطراف گسل‌ها و کانه‌زایی استیبنینیت در راستای آن‌ها، هوازدگی و دگرسانی‌های جهت‌دار و جابه‌جایی، 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 شیسته‌ها بوده و از نوع نرمال و نیز وارونند (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 کربناتی-سیلیسی که دارای اکسیدهای آهن فراوان است، آینه‌های گسلی که گاهی

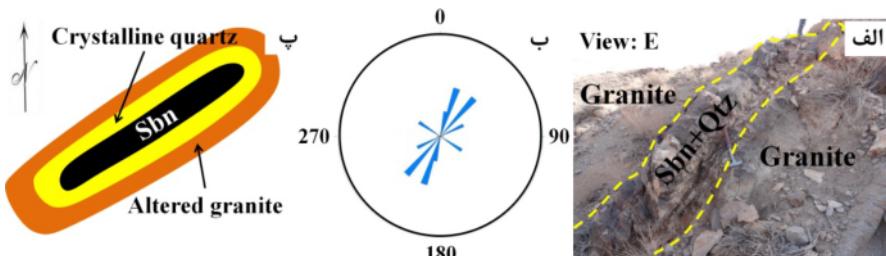


شکل ۴ الف: نمایی از گسل وارون در گرانیت‌های بخش شورچاه، ب: نمایی از آینه گسل در بخش شورچاه، پ: نمایی از روراندگی در بخش توزگی.

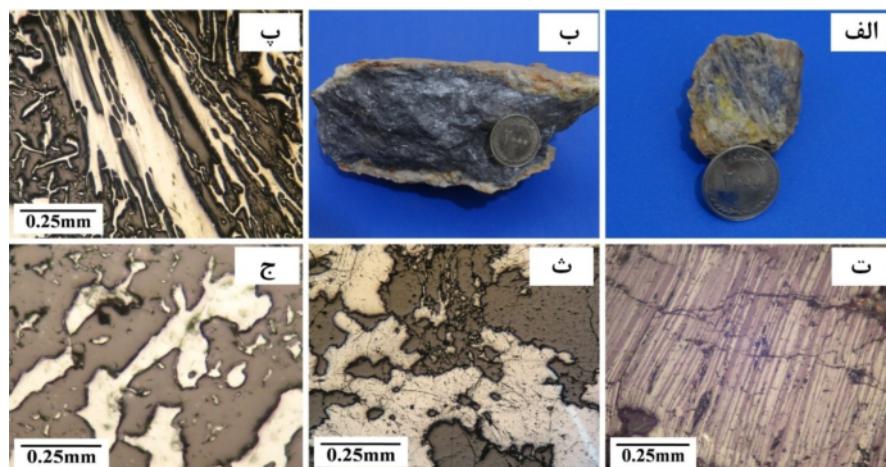
(شکل ۶- الف و ب). استیبنیت در مقاطع میکروسکوپی در اندازه‌های مختلف، به صورت کشیده و سوزنی و نیز بی‌شکل و توده‌ای نیز دیده می‌شود (شکل ۶- پ و ت). وجود ماکل پلی-سننتیک از دیگر خصوصیات قابل ذکر است و بافت مشاهده شده نیز بیشتر به صورت پرکننده فضاهای خالی بوده ولی بافت پراکنده نیز وجود دارد (شکل ۶- ث و ج). 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 ثانویه‌ای 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.

### کانه‌زایی و کانه‌نگاری در بخش شورچاه

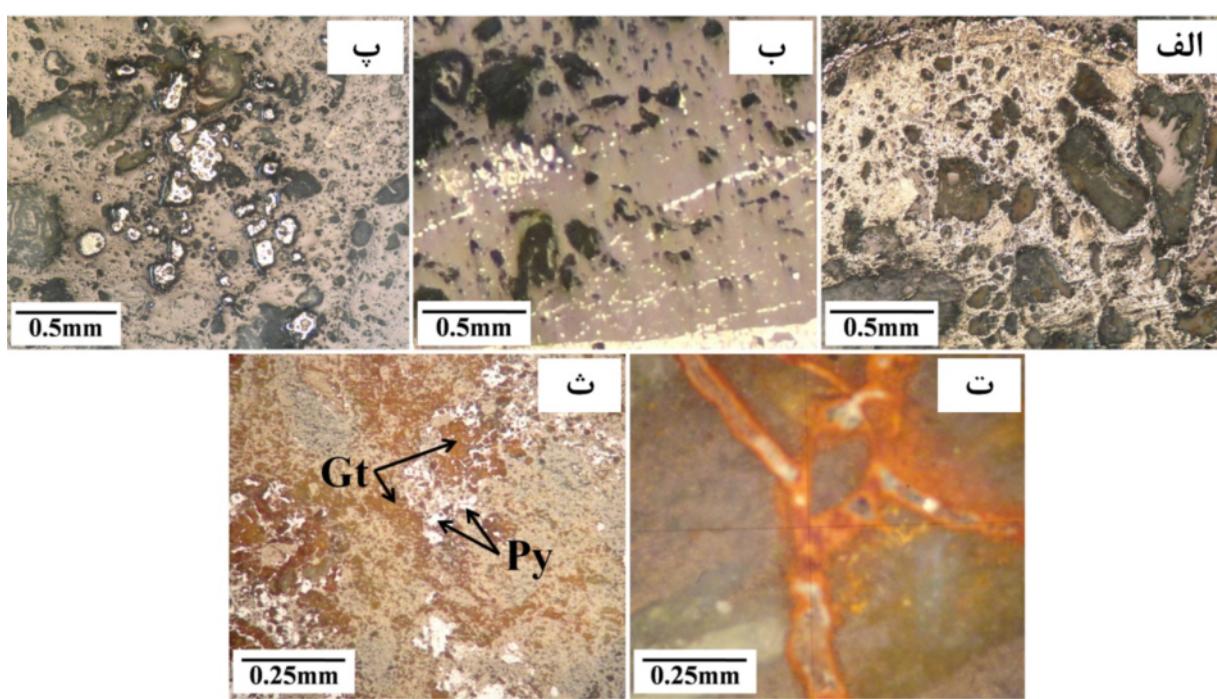
طول گستره‌ی کانه‌زایی در بخش شورچاه حدود ۷۰۰ متر است. رگه‌های کانه‌زایی در بخش شمالی و درون گرانیت‌ها واقع شده‌اند (شکل ۵- الف) و بیشتر آنها راستای شمال شرقی-جنوب غربی دارند (شکل ۵- ب). ترکیب رگه‌ها بیشتر از استیبنیت و کوارتز است. استیبنیت با کوارتزهای بلورین در بر گرفته شده و درون گرانیت‌های دگرسان شده، قرار گرفته‌اند (شکل ۵- پ). طول رگه‌های استیبنیت-کوارتز تا چندین متر و ضخامت آن‌ها حداقل 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 قبل 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 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 (XPL)، ث: استیبنیت توده‌ای با ماکل پلی‌سننتیک (PPL)، ج: بافت پرکننده فضای خالی (PPL)، د: استیبنیت کشیده و سوزنی (PPL).



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

استیبنیت در اندازه‌های متفاوت، به صورت نیمه شکل دار تا بی-شکل و نیز اسکلتی دیده می‌شود (شکل ۹-الف) و دارای ماکلهای پلی‌ستنتیک و سرنیزه‌ای هستند (شکل ۹-ب). بافت غالب به صورت پرکننده فضاهای خالی است ولی بافت‌های توده‌ای و پراکنده نیز دیده می‌شوند (شکل ۹-پ، ت). عامل جهت-یافته‌گی در استیبنیت ممکن است نیروهای زمین ساختی منطقه باشد. آرسنوبیریت از دیگر کانه‌هایی موجود در بخش توزگی است و به رنگ کرمی متمایل به سفید، شکل دار تا نیمه شکل دار، 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 شورچا، به احتمال زیاد از تجزیه سولفیدها تحت تأثیر هوازدگی در محیط سطحی تشکیل شده‌اند.

#### دنباله‌ی پاراژنزی کانه‌ها و کانی‌ها

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

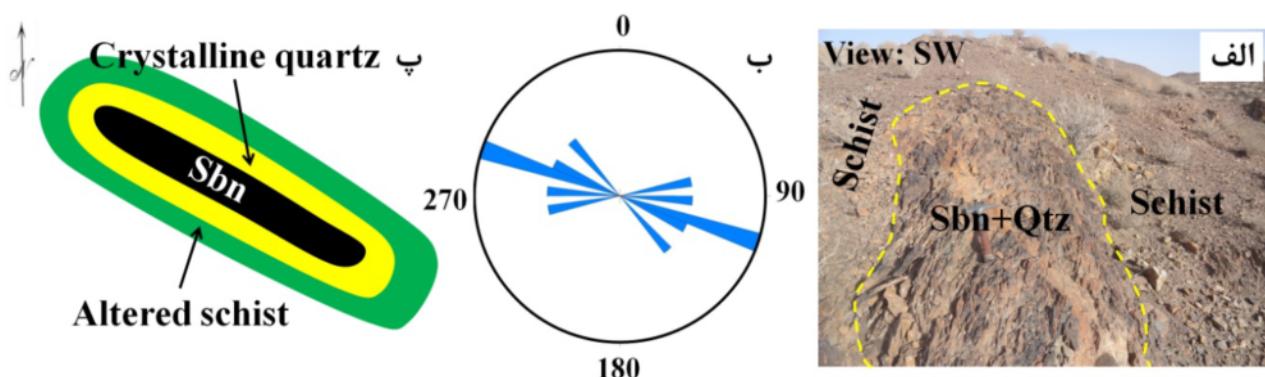
#### کانه‌زایی و کانه‌نگاری در بخش توزگی

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 شیسته‌ها (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.

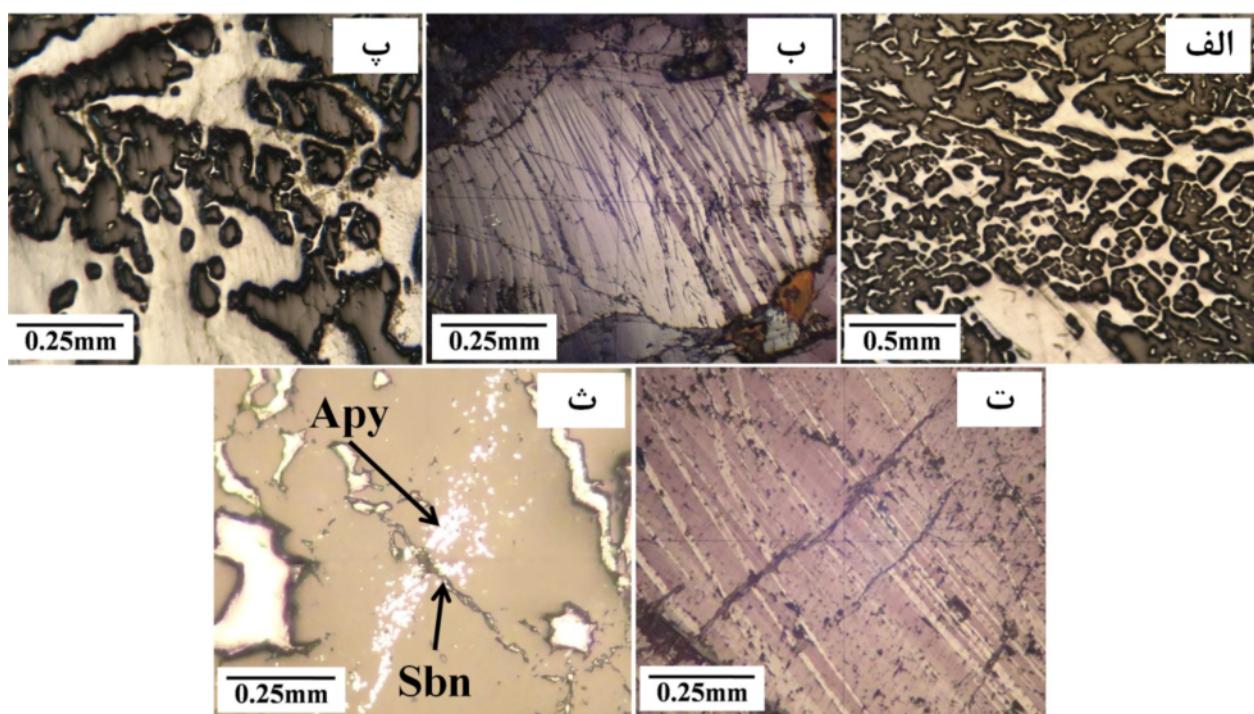
رگه‌ها بیشتر از استیبنیت و کوارتز تشکیل شده‌اند، استیبنیت با کوارتزهای بلورین در بر گرفته شده و درون شیسته‌های دگرسان شده قرار گرفته‌اند (شکل ۸-پ). ضخامت رگه‌ها تا ۳۵ سانتیمتر و طول آن‌ها نیز به چندین متر می‌رسد. کانه‌ی اصلی در این بخش نیز استیبنیت بوده که با آرسنوبیریت و کانه‌زایی ثانویه به صورت ترکیبات 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.

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

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



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



شکل ۹ مقاطع میکروسکوپی الف: استیبنیت‌های اسکلتی (PPL)، ب: ماکل پلی‌سنتتیک در استیبنیت‌ها (XPL)، پ: بافت پرکننده‌ی فضای خالی استیبنیت‌ها (PPL)، ت: استیبنیت‌های توده‌ای (XPL)، ث: رگه‌ای از آرسنوبیریت که با رگه‌ای از استیبنیت قطع شده است (PPL). Apy: آرسنوبیریت، Sbn: استیبنیت.

جدول ۱ توالی پاراژنی 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			

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- پرشدگی بالا و شوری پایین هستند که نشانگر تشکیل آنها در دمای‌های پایین است. این گروه از میانبارهای سیال دو فازی در کانسار شورچاه به فراوانی دیده می‌شوند.

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

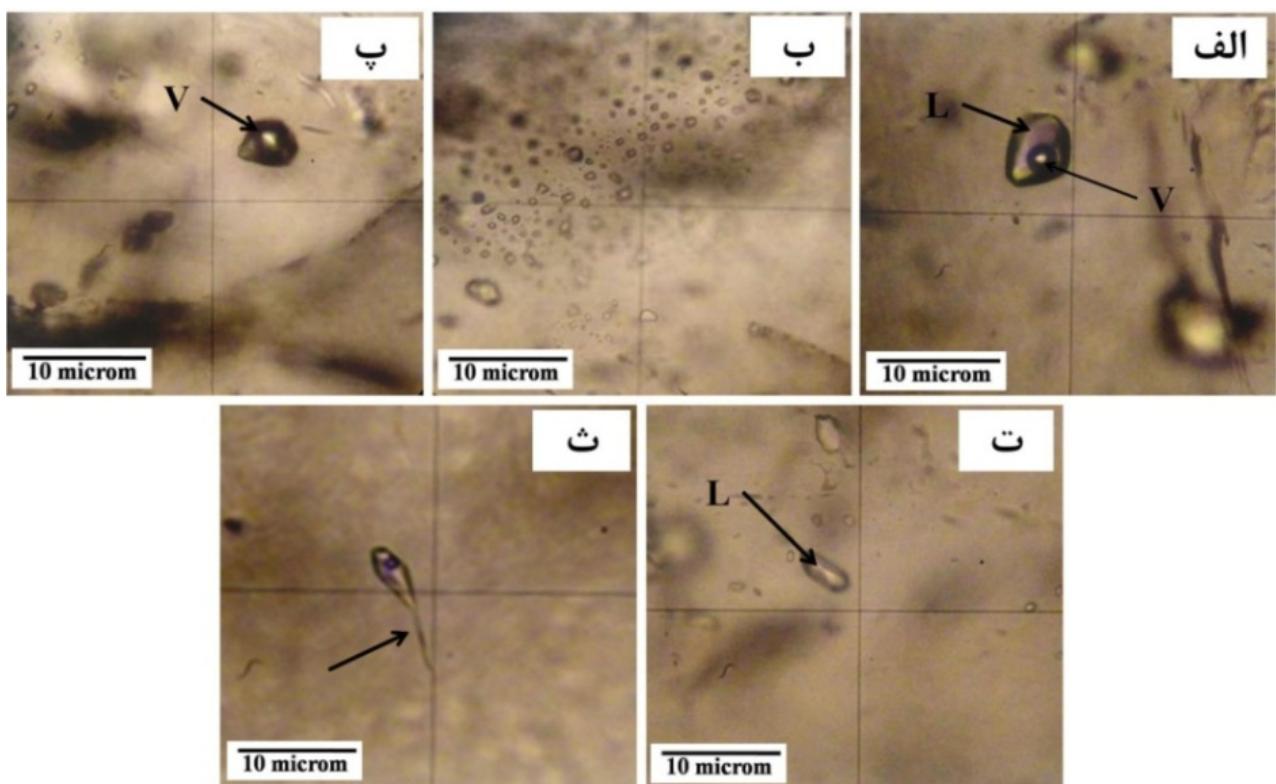
#### سنگنگاری و ریز دماسنجدی میانبارهای سیال

بررسی‌های ریز دماسنجدی روی میانبارهای سیال اولیه دو فازی کوارتزهای در ارتباط با کانه‌زایی صورت گرفته است. میانبارهای سیال اولیه به صورت مجza و درشت، در زمینه‌ی 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 فازی دیده می‌شوند و به شکل خطی در راستای شکستگی‌ها ردیف شده‌اند (شکل ۱۰-ب). بر اساس بررسی‌های سنگنگاری، میانبارهای سیال نمونه‌های مورد بررسی را می- توان در چهار گروه قرار داد شامل: (۱) میانبارهای سیال دو فازی غنی از مایع، (۲) میانبارهای سیال سه فازی دارای گاز- مایع آب- مایع کربن دی اکسید، (۳) میانبارهای سیال تک فازی غنی از مایع و (۴) میانبارهای سیال تک فازی غنی از گاز. بیشتر میانبارهای سیال در نمونه‌های مورد بررسی از گروه

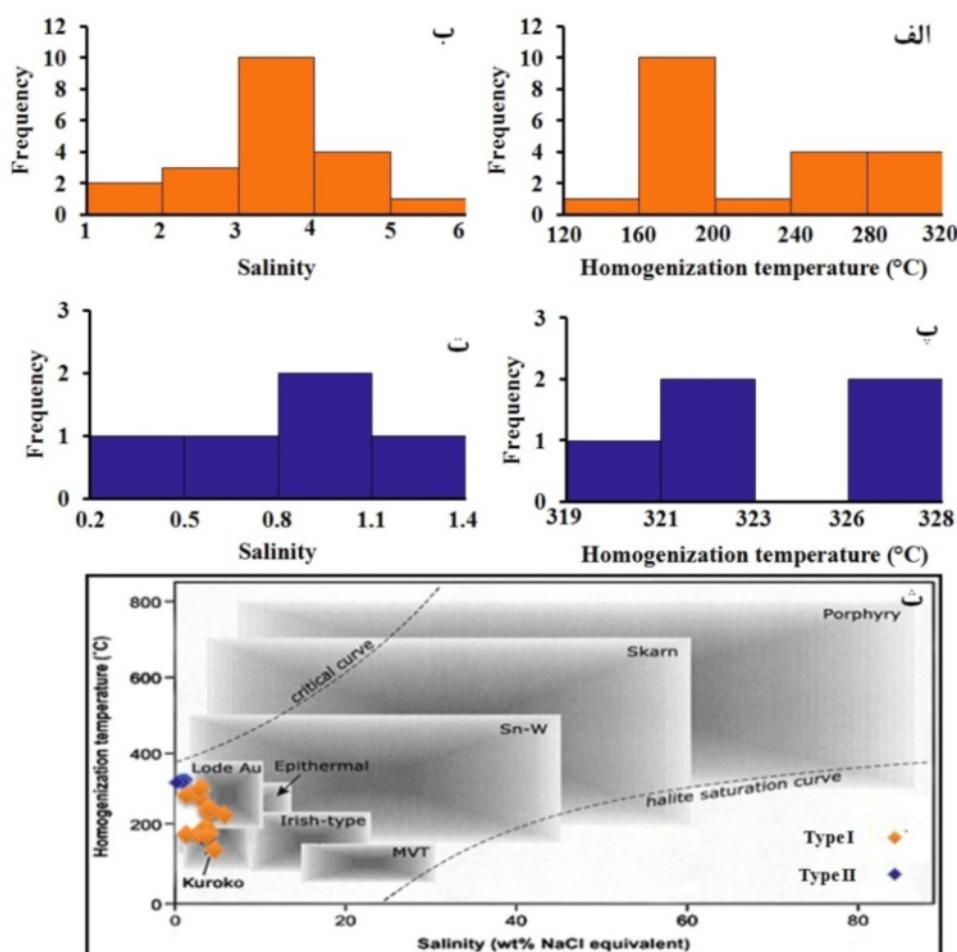
اینکه شوری آن‌ها بین ۰/۲۱ تا ۱/۲۲ درصد وزنی معادل نمک طعام است (شکل ۱۱-پ و ت). با توجه به نمودارهای توزیع فراوانی، دمای همگن‌شدگی اغلب میان‌بارهای سیال بین ۲۰۰-۳۴ درجه سانتیگراد است که معادل با شوری بین ۳-۶ درصد وزنی نمک طعام بوده و فاز اصلی کانه‌زایی نیز در همین دما در کانسار شورچاه رخ داده است. با 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 ورآگرمایی تا مژوترمال است (شکل ۱۱-ث). کانسارهای ورآگرمایی 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 ورآگرمایی شوری پایینی دارند [۱۲]. شاره‌های کانه‌زا اغلب ترکیبی از آب‌های ماقمایی، فسیل و جوی هستند [۱۳]، اما خاستگاه اصلی شاره‌ها در کانسارهای ورآگرمایی، 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-ث).

میان‌بارهای سیال گروه ۱ دارای حداقل دمای همگن شدگی ۱۴۶/۵ و حداکثر ۳۱۲/۵ درجه‌ی سانتیگراد بوده، دامنه تغییرات دمای ذوب آخرین قطعه یخ ( $T_{mi}$ ) ۰/۷-۳/۵ درجه‌ی سانتیگراد است و نشان می‌دهد که در انجام‌داد این میان‌بارهای سیال با توجه به مشیت 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 درجه‌ی سانتیگراد بوده و دامنه تغییرات دمای ذوب آخرین قطعه یخ ( $T_{mi}$ ) ۹/۴ تا ۹/۹ است. این دما می‌تواند حاکی از حضور  $CO_2$  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 تک فازی غنی از گاز، ت: میان‌بار سیال تک فازی غنی از مایع، ث: پدیده‌ی باریک‌شدگی در میان‌بارهای سیال.

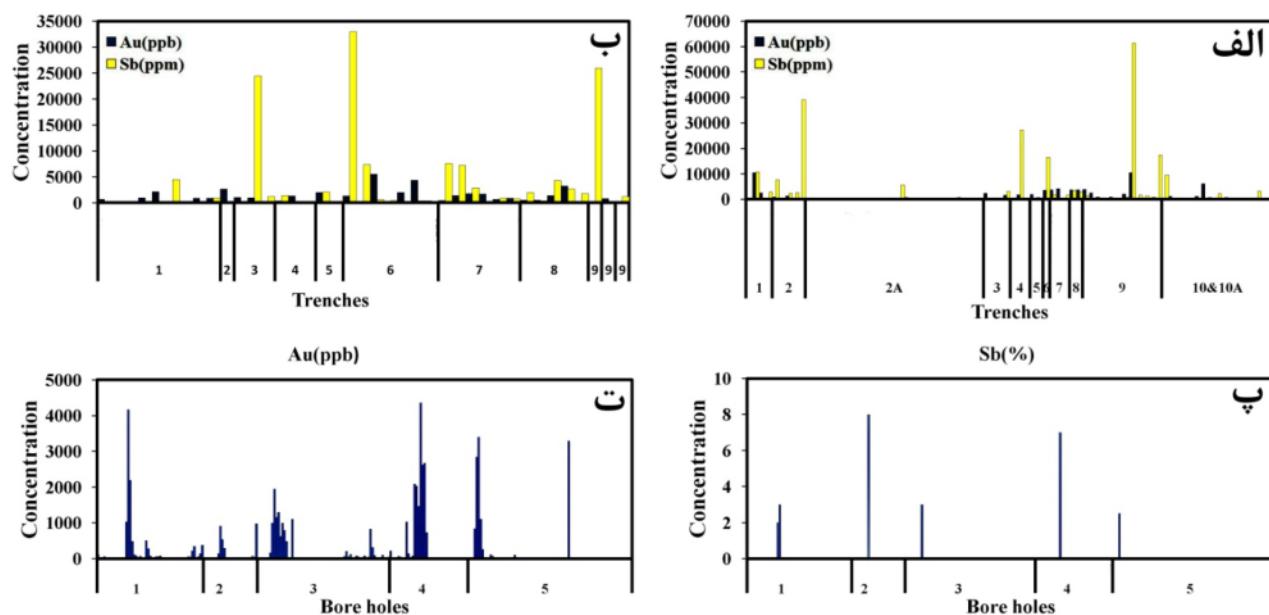


شکل ۱۱ نمودارهای فراوانی الف: دمای همگن شدن میان بارهای سیال گروه ۱، ب: شوری میان بارهای سیال گروه ۱، پ: دمای همگن شدن میان بارهای سیال گروه ۲، ت: شوری میان بارهای سیال گروه ۲، ث: موقعیت میان بارهای سیال گروه ۱ و ۲ در کوارتزهای رگه‌ای کانسار شورچاه بر اساس نمودار ویلکینسون [۱۰].

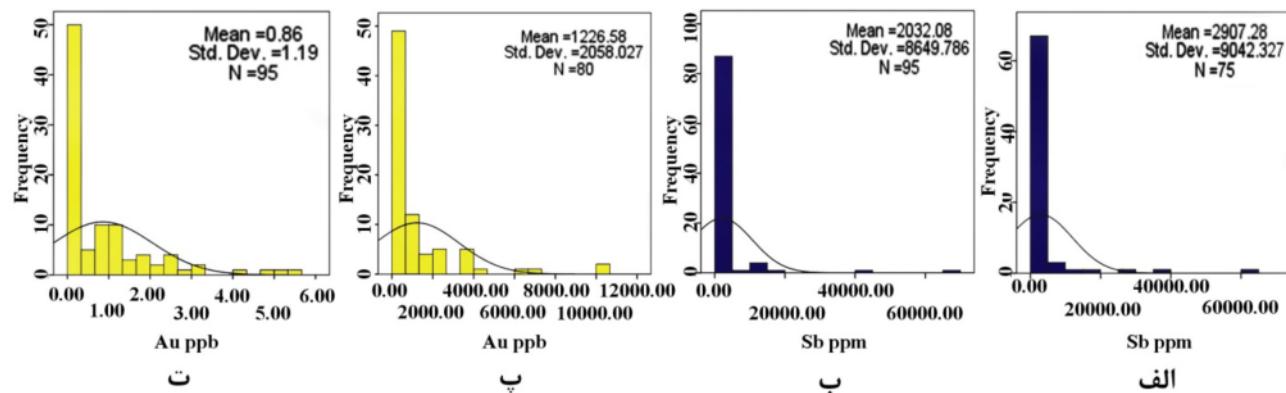
توزگی حاکی از این است که بیشترین غلظت آنتیموان و طلا به ترانشه شماره ۶ با  $32936 \text{ ppm}$  آنتیموان و  $55246 \text{ ppb}$  طلا وابسته است. داده‌های عمقی بخش شورچاه نیز نشان می‌دهند که بیشترین غلظت آنتیموان در گمانه‌ی شماره ۲ با  $8\%$  آنتیموان و بیشترین غلظت طلا در گمانه‌ی شماره ۴ با  $4360.6$  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  $572$  متر و  $22$  گمانه به طول  $1886$  متر در کانسار شورچاه حفر کرده است [۷]. عمیق‌ترین گمانه  $202$  متر و کم عمق‌ترین 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 ترانشهای بخش سورچاه، ب: نمودار مقدار آنتیموان و طلا در ترانشهای بخش توزگی، پ: نمودار مقدار آنتیموان در چاههای حفاری شده بخش سورچاه. ت: نمودار مقدار طلا در چاههای حفاری شده در بخش سورچاه.



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

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

تعیین شرایط فیزیکوشیمیابی، عوامل کنترل کننده پایداری کانه‌های آنتیموان و ته نشست استیبنیت

روابط پایداری میان کانه‌های مختلف در سیستم Fe-Sb-S-O در کانسار سورچاه، به صورت تابعی از  $pH$  و  $fO_2$  در دمای  $a_s = 0.01$  درجه سانتیگراد و  $a_s = 0.1$  بنا شده است. پارامترهای مهمی که برای کنترل حلالت کانه‌های آنتیموان در نظر گرفته می‌شوند شامل: فعالیت گونه‌های فلزی آبگون،  $T$ ,  $fO_2$  و  $pH$  هستند. به طور کلی دما باید به پایین‌تر از ۲۵۰ درجه بررسد تا شاره از استیبنیت اشباع شود، و بیشتر ذخایر آنتیموان نیز در دمای بین ۱۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتیگراد تشکیل می-

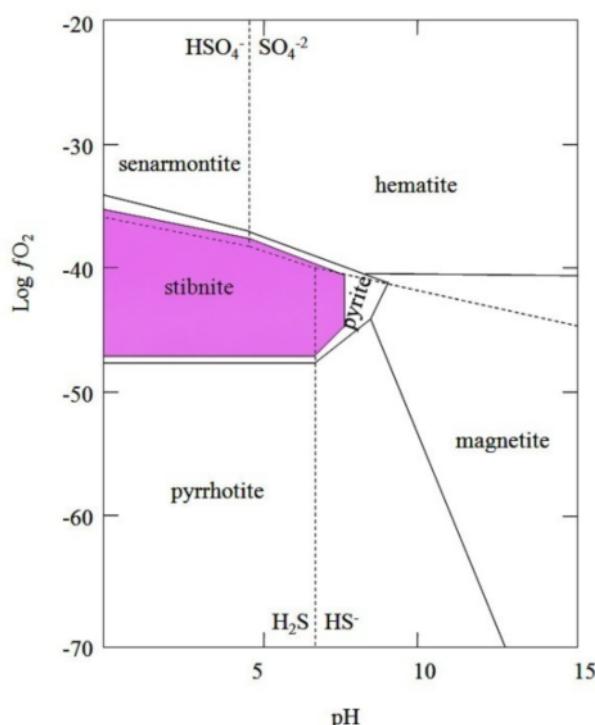
نهشت استیبنیت- طلا در کانسار شورچاه نقش مؤثری داشته باشد. نکته‌ی قابل توجه این است که کانه‌زایی طلا در دماهای بالاتر از استیبنیت رخ می‌دهد بنابراین می‌توان گفت که حلالیت طلا نسبت به استیبنیت واپستگی بیشتری به دما دارد. از آن جا که بر خلاف طلا، کاهش دما عامل مهمی در نهشت استیبنیت است، تنها راهی که سبب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

#### برداشت

رگه‌های استیبنیت 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 مagma‌تیسم 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 همگن‌شدن بین ۱۴۶/۵ تا ۳۲۷/۹

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

کانسار شورچاه علاوه بر استیبنیت 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 نیاز برای نهشت استیبنیت- 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 استیبنیت و طلا می-تواند تنها به صورت نتیجه‌های از اسیدی شدن شاره رخ دهد [۱۵]. سنگ‌های میزبان در کانسار شورچاه، غنی از کانی‌های فیلوسیلیکاته 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 آرسنوبیریت راه دیگر اسیدی شدن بوده که ممکن است در فراهم آوردن شرایط



شکل ۱۴ نمودار pH-log $f\text{O}_2$  ترسیم شده در ۲۰۰ درجه‌ی سانتیگراد و  $\Sigma_{\text{aS}} = ۰,۰۱$  که نشان دهنده گستره‌ی پایداری استیبنیت 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.
- [6] شرکت معدنی زرکن مینرالز، "گزارش نهایی اکتشاف کانی‌سازی آنتیموان در گستره سورچاه"، (۱۳۸۳).
- [7] ایتوک ایران، "گزارش اکتشاف آنتیموان در منطقه سورچاه و توزگی"، وزارت صنایع و معادن، سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران، شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، (۱۳۸۶).
- [8] مرادی ر، "سیک و منشاء کانی‌زایی آنتیموان و طلا در سورچاه، جنوب‌شرق راهدان"، 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.
- [10] 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 گرمایی است که سنگ‌های منطقه و به ویژه سنگ‌های همراه با کانه‌زایی را سیلیسی کرده‌اند. در این کانسار شواهدی از فعالیت‌های آتشفشنای مشاهده نشد. بنابراین، شاره‌ی کانه‌زا ارتباطی با فعالیت‌های آتشفشنای ندارند ولی با توجه به وجود نفوذی‌های گرانیتی در این کانسار، ارتباط نزدیک آن‌ها با رگه‌های کانه‌زایی شده 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. استیبنیت کانه غالب آنتیموان در T-pH- $fO_2$  موجود در طبیعت پایدار است، گرادیان‌های شدیدی از حلایت با دما،  $fO_2$  و pH را به نمایش می‌گذارد و این می‌تواند از دلایل بیشتر بودن ذخایر استیبنیت نسبت به ذخایر دیگر آنتیموان دار باشد. نهشت استیبنیت اساساً با کاهش دما و کاهیدگی کنترل می‌شود به جز در شرایط قلیایی که اسیدی شدگی عامل اصلی کانه‌زایی است. حلایت استیبنیت 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 سورچاه علاوه بر استیبنیت 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، حلایت این دو فلز را کاهش داده است. هنگامی که  $a_s$  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., "Antimene 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 gedmundite-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).