

اثرات دگرگونی و دگرشکلی بر کانسار سولفید توده‌ای غنی از طلا باریکا، خاور سردشت، شمال باختر پهنه دگرگونه سنندج - سیرجان

حسینعلی تاج‌الدین^۱، ابراهیم راستاد^۲، عبدالمجید یعقوب‌پور^۳ و محمد محجل^۲

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۳ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۸/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۴/۲۱

چکیده

کانسار سولفید توده‌ای غنی از طلا (و نقره) باریکا، در ۱۸ کیلومتری خاور شهرستان سردشت، در شمال باختر پهنه دگرگونی سنندج - سیرجان قرار دارد. واحدهای سنگی رخنمون یافته در محدوده باریکا، مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی زیردریایی دگرگون‌شده کرتاسه، شامل متاندزیت، متاتوفیت، فیلیت و اسلیت است. کانسار باریکا به صورت یک کانسار سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد، تشکیل و سپس در اثر فرایندهای کوهزادی زاگرس، دچار دگرگونی و دگرشکلی شده است. فرایندهای دگرگونی و دگرشکلی عمل کرده بر روی کانسار باریکا، ساخت، بافت و کانی‌شناسی کانسنگ چینه‌سان اولیه را تغییر داده و ساخت‌ها، بافت‌ها و شکل‌های جدیدی از کانه‌زایی ایجاد کرده است. در مرحله گرمایی همزمان با فعالیت آتشفشانی، طلا به صورت غیر قابل رؤیت درون پیریت‌های فرامبوییدال نهشت یافته است. عملکرد دگرگونی پیش‌رونده بر بخش چینه‌سان کانسار، سبب تبلور پیریت‌های فرامبوییدال، ایجاد پیریت‌های درشت بلور و تشکیل الکتروم در مرز دانه‌های پیریت تبلور دوباره یافته شده است. عملکرد پهنه برشی باریکا، دگرشکلی شدید کانسار و تحرک دوباره طلا و عناصری از کانسنگ اولیه و نهشت دوباره آنها در فضاهای ایجادشده در اثر دگرشکلی را سبب شده است، که نتیجه آن، تشکیل الکتروم‌های درشت‌دانه قابل مشاهده با چشم (تا ۳ میلی‌متر) و کانه‌های سولفوسالتی در ریزشکستگی‌ها و فضاهای باز موجود در کانسنگ چینه‌سان، است. بدیهی است عملکرد دگرگونی و دگرشکلی بر روی کانسنگ چینه‌سان اولیه، افزایش اندازه الکتروم و افزایش بازیافت طلا است.

کلیدواژه‌ها: کانسار سولفید توده‌ای غنی از طلا، دگرگونی، دگرشکلی، باریکا، سنندج - سیرجان.

*نویسنده مسئول: ابراهیم راستاد

E-mail: rastad@modares.ac.ir

۱- مقدمه

کانسارهای سولفید توده‌ای غنی از طلا (Au-VMS)، نوعی از کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد هستند که در آنها مقدار طلا (بر حسب گرم در تن) بیشتر از مجموع مقدار عناصر همراه مس، سرب و روی (بر حسب درصد) است. از این رو در این دسته از کانسارها، طلا به عنوان فلز اصلی است (Poulsen et al., 2000 & Dube et al., 2007). عملکرد فرایندهای دگرگونی و دگرشکلی بر روی کانسارهای سولفید توده‌ای و تأثیر آنها بر تحرک دوباره کانه‌ها و عناصر کانه‌ساز، در تعداد زیادی از مقالات مورد بحث قرار گرفته است (برای مثال Vokes, 1969 & 2000; McClay, 1983; Vivallo & Rickard, 1990; Gu & McClay, 1992; Cook et al., 1993; Larocque et al., 1993; Tiwary et al., 1998; Khin Zaw et al., 1997 & 1999; Wagner et al., 2005 & Gu et al., 2007). دگرگونی یک فرایند مهم برای تحرک‌پذیری و توزیع دوباره عناصر فرعی و جزئی موجود در کانسنگ سولفید توده‌ای است (Marshall & Gilligan, 1987, 1993; Marshall et al., 2000); (Wagner et al., 2005 & Gu et al., 2007). در بسیاری از کانسارهای مهم سولفید توده‌ای غنی از طلا دنیا، که در سنگ میزبان آتشفشانی تشکیل شده‌اند، دگرگونی به آزادسازی طلا و نقره از پیکره‌های توده‌ای و نهشت دوباره آنها درون ساختارهای تیپ رگه و پهنه‌های شکستگی انجامیده است (Huston et al., 1992; Larocque et al., 1993 & 1995; Marignac et al., 2003). در مقایسه با کانسنگ‌های توده‌ای اولیه، که در آن طلا و نقره به صورت غیرقابل مشاهده در زیر میکروسکوپ وجود دارند، معمولاً فلزات گرانبهای موجود در رگه‌هایی که از نهشت عناصر متحرک‌شونده در اثر دگرگونی تشکیل شده‌اند، به صورت فازهای کانی جدا از هم (برای نمونه الکتروم، سولفوسالت‌های Ag،

تلوریدها و سلنیدهای Au-Ag) حضور یافته‌اند. (Huston & Large, 1989; Hannington & Scott, 1989; Huston et al., 1992; Höller & Gandhi, 1995; Cook, 1996; Cook et al., 1998). تغییرات کانی‌شناسی و شیمیایی حاصل از دگرگونی بر روی پیکره‌های سولفید توده‌ای، به طور قابل توجهی پتانسیل اقتصادی کانسارهای سولفید توده‌ای غنی از طلا را افزایش خواهد داد. کانسار باریکا، که نخستین و تنها کانسار سولفید توده‌ای غنی از طلا (و نقره) گزارش شده در ایران است (یارمحمدی، ۱۳۸۵)، در ۱۸ کیلومتری خاور شهرستان سردشت در شمال باختر پهنه دگرگونی سنندج - سیرجان قرار دارد (شکل ۱). یارمحمدی (۱۳۸۵) و یارمحمدی و همکاران (۱۳۸۴ و ۱۳۸۷)، کانسار باریکا را با ذخایر غنی از طلا Au-Zn-Pb-Ag معرفی شده توسط Large et al. (1989) و Huston (2000) و چند ذخیره نوع کروکو با سن میوسن در حوضه Hokuroko ژاپن قابل مقایسه دانسته‌اند. این کانسار، به صورت یک کانسار سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد، تشکیل و سپس در اثر فرایندهای کوهزادی، دچار دگرگونی و دگرشکلی شده است. در این پژوهش، بر اساس شواهد ساختی و سنگ‌نگاری کانه‌ها، مراحل تشکیل و تکوین کانه‌های موجود در بخش کانسنگ چینه‌سان کانسار، از زمان تشکیل کانسنگ بر روی کف دریا تا پایان مرحله دگرشکلی اصلی کانسار، مطالعه شده است. از سوی دیگر در این مقاله تأثیر دگرگونی و دگرشکلی بر رفتار کانه‌های اولیه موجود در کانسنگ چینه‌سان، به ویژه تأثیر آن بر تحرک دوباره و به دنبال آن تمرکز دوباره اجزای تشکیل‌دهنده کانسنگ در ساختارهای ثانویه حاصل از دگرگونی و دگرشکلی بررسی شده است.

۲- زمین‌شناسی کانسار باریکا

کانسار باریکا در شمال باختر پهنه سنندج- سیرجان و در زیرپهنه حاشیه‌ای آن

الکتروم‌ها بیشتر در همراهی با کانی‌های سولفوسالتی غنی از Ag-As-Sb و کمتر در مرز و حاشیه پیریت مشاهده شده‌اند. داده‌های الکترون میکروپروب نشان می‌دهد که تمامی کانی‌های سولفوسالتی که در شکستگی‌های شکنا تمرکز یافته‌اند، مقادیر بالایی از Ag, As, Sb دارند، به گونه‌ای که Ag تا ۶۹/۲۷ درصد در استیفانیت، Pb تا ۶۶/۸۴ درصد در ژئوکروویت غنی از As و جیوه تا ۸/۹۴ درصد در تنانتیت تمرکز یافته است.

۴- زایش (ژن) کانسار باریکا

مطالعات انجام‌شده بر روی کانسار باریکا (تاج‌الدین، ۱۳۸۸)، نشان می‌دهد که این کانسار، شکل ناقص و تکامل نیافته‌ای از یک کانسار نوع کروکو است (Ohmoto, 1996) که تنها کانسنگ سیاه در آن تشکیل شده و بدون بخش‌های کانسنگی زرد و پیریتی است (تاج‌الدین و همکاران، ۱۳۸۸). این کانسار پس از تشکیل، دچار درجه پایین دگرگونی (شیست‌سبز پایینی) و درجه بالای دگرشکلی شده است. بر اساس مطالعات میان‌بارهای سیال (تاج‌الدین و همکاران، ۱۳۸۸)، کانسنگ‌های بخش‌های سیلیسی پهنه استرینگر و توده‌ای- نواری بخش چینه‌سان کانسار باریکا، محصول نهشت یک مرحله از سیال‌های کم‌دما (حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) و با شوری کم (میانگین ۴/۵ درصد وزنی NaCl)، هستند که به صورت رخساره ریزدانه کانسنگ سیاه (رخساره ۱) نهشته شده‌اند. به علت درجه حرارت کم سیال کانه‌ساز باریکا، فرایند پهنه پالایش که مستلزم افزایش حرارت سیال، از دمای حدود ۲۰۰ درجه به بالاتر از ۲۸۰ درجه است تا گذر کانسنگ سیاه به کانسنگ زرد و در پی آن کانسنگ پیریتی را امکان‌پذیر سازد، رخ نداده است. از این رو در کانسار باریکا، به علت نبود زون پالایش، امکان تشکیل کانسنگ‌های زون‌بندی شده، همانند آنچه که در کانسارهای تکامل یافته کروکو مشاهده می‌شود، وجود نداشته است. فرایندهای دگرگونی و دگرشکلی اثر گذاشته بر کانه‌زایی آتشفشان‌زاد، به ایجاد ساخت‌ها، بافت‌ها و شکل‌های جدیدی از کانه‌های طلا در کانسنگ انجامیده است.

۵- بافت و مراحل کانه‌زایی در کانسنگ چینه‌سان باریکا

کانسار سولفید توده‌ای باریکا، مشابه بیشتر کانسارهای سولفید توده‌ای قدیمی جهان، پس از تشکیل، دچار دگرگونی و دگرشکلی شده است. از این رو در کانسنگ چینه‌سان کانسار باریکا، تنوعی از بافت‌ها قابل مشاهده است که هر یک از این بافت‌ها، مرحله‌ای از تکامل و تکوین کانسار را در خود به ثبت رسانده‌اند. این بافت‌ها عبارتند از بافت‌های همزمان با نهشت کانسنگ چینه‌سان، بافت‌های تشکیل شده در ارتباط با دگرگونی ناحیه‌ای اثر گذاشته بر کانسار، بافت‌های دگرشکلی حاصل از عملکرد پهنه برشی باریکا، بافت‌های حاصل از هوازدگی و / یا غنی‌شدگی برون‌زاد (سوپرژن) کانه‌های سولفیدی. از آنجا که طلا و دیگر کانه‌زایی‌های فلزی در هم راهی با سه مرحله اول است، در زیر، سه مرحله تشکیل کانسنگ (همزمان با نهشت کانسنگ، دگرگونی و دگرشکل) و بافت‌های مرتبط با آنها مورد بحث قرار می‌گیرند.

۵-۱. مرحله همزمان با نهشت کانسنگ

بافت‌های همزمان با نهشت، در اثر فعالیت گرمایی زیر دریایی و نهشت کانسنگ اولیه بر کف دریا حاصل شده است. کانسار باریکا از نهشت یک سیال گرمایی کم‌دما (۱۵۰ تا ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد) با شوری پایین (۱ تا ۹/۶ درصد وزنی نمک طعام) که با آب سرد دریا آمیخته شده، تشکیل شده است (تاج‌الدین و همکاران، ۱۳۸۸). کانی‌سازی همزمان با فعالیت‌های آتشفشانی در بخش چینه‌سان کانسار باریکا، با ایجاد ساخت و بافت‌های رسوبی مانند نواری (شکل ۵-الف)، توده‌ای، نیمه توده‌ای، دانه‌پراکنده و فرامبیدال (شکل ۵-ب)، همراه بوده که ویژگی نهشت کانسنگ سیاه (رخساره ریزدانه) است. با وجود عملکرد دگرگونی و دگرشکلی بر روی کانسار باریکا، بقایایی از ساخت و بافت‌های اولیه همزمان با نهشت، مانند توده‌ای- نیمه‌توده‌ای، دانه‌پراکنده و فرامبیدال، که ویژگی نهشت کانسنگ

(Mohajjel et al., 2003) قرار دارد. واحدهای سنگی رخنمون یافته در محدوده باریکا، مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشان- رسوبی زیردریایی دگرگون شده با سن کرتاسه هستند که از متاولکانیک‌های با ترکیب آندزیت- تراکی آندزیت، متاتوفیت، فیلیت و اسلیت تشکیل شده‌اند.

کانسار باریکا از دو بخش چینه‌سان و زون استرینگر که درون واحد متاولکانیک آندزیتی قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است (شکل ۲). بخش چینه‌سان کانسار، از نظر همزمانی تشکیل با سنگ‌های آتشفشانی میزبان نهشته شده در یک محیط زیردریایی، ژئومتری عدسی شکل کانسنگ‌های سولفیدی و باریتی، حضور ساخت و بافت‌های توده‌ای، نیمه توده‌ای و نواری کانسنگ‌های سولفیدی و باریتی، پارائز کانیایی (پیریت، اسفالریت، گالن، استیب‌نیت و همراهی با سولفوسالت‌ها) و عنصری (Zn-Pb-Cu-Au-Ag) شاخص کانسنگ‌های سیاه کروکو، ویژگی‌های حرارتی و شوری سیال‌های کانه‌ساز (دمای همگون‌شدگی حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و شوری میانگین ۴/۵ درصد وزنی NaCl)، ویژگی‌های بخش کانسنگ سیاه از کانسارهای نوع کروکو را نشان می‌دهد (تاج‌الدین و همکاران، ۱۳۸۸) و شامل کانسنگ‌های سولفید و باریت توده‌ای- نواری همراه با بخش‌های فرعی از نواری سیلیسی است که در مجموع، در طول حدود ۱۵۰ و ستبرای ۱ تا ۲۰ متر رخنمون دارند (شکل ۳). در شکل ۴، نمایی از بخش‌های مختلف کانسنگ‌های سولفیدی، باریتی و سیلیسی در بخش چینه‌سان کانسار باریکا نشان داده شده است. در بخش‌های مختلف این بخش از کانسار، عیار متوسط طلا و نقره به ترتیب ۴/۳ و ۲۶۰ گرم بر تن اندازه‌گیری شده است. کانه‌های تشکیل‌دهنده در بخش‌های مختلف کانسنگ چینه‌سان تنوع زیادی دارند و شامل پیریت، اسفالریت، گالن و مجموعه متنوعی از سولفوسالت‌ها و الکتروم هستند.

زون استرینگر، از رگه و رگچه‌های سیلیسی سولفیددار با ساخت استوک‌ورک تشکیل شده است. عیار متوسط طلا و نقره در رگه‌های سیلیسی این بخش از کانسار به ترتیب ۰/۷ و ۳۲ گرم بر تن اندازه‌گیری شده است. کانی‌شناسی رگه و رگچه‌های سیلیسی زون استرینگر ساده و شامل پیریت، اسفالریت، گالن، تتراندريت و مقادیر کمی کالکوپیریت است. کانسار باریکا و سنگ میزبان آن، پس از تشکیل دچار دگرگونی (در حد رخساره شیست‌سبز) شده و به دنبال آن تحت تأثیر عملکرد پهنه برشی باریکا، به شدت دگرشکل شده است. دگرسانی اصلی سنگ میزبان، سریسیتی، کوارتز- سریسیتی، سیلیسی، سولفیدی و کلریتی است. ژئومتری، شدت و روند پهنه برشی باریکا، توسط ژئومتری، شدت و روند پهنه دگرشکلی کانسار کنترل می‌شود، به گونه‌ای که گستره عملکرد پهنه برشی، به طور کامل با گستره کانسار باریکا و پهنه دگرسانی میزبان آن منطبق است.

۳- کانی‌شناسی و شیمی کانه‌ها

به منظور شناخت کانی‌شناسی و شیمی کانسنگ‌های طلا دار با عیار بالاتر از ۱ گرم در تن، ۷۰ نقطه از ۶ نمونه برداشت شده از بخش‌های مختلف کانسنگ چینه‌سان، انتخاب و در مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران، توسط دستگاه الکترون میکروپروب مدل EPMA Cameca SX-100 مطالعه شده است.

مجموعه مطالعات سنگ‌نگاری و داده‌های الکترون میکروپروب نشان می‌دهد که کانه‌های تشکیل‌دهنده در بخش کانسنگ چینه‌سان باریکا تنوع زیادی دارند و شامل پیریت، اسفالریت، گالن، استیب‌نیت، الکتروم و انواعی از کانه‌های سولفوسالت شامل تتراندريت- تنانتیت، استیفانیت، پیرارژیریت، ترچمنیت، اسمایتیت، میارژیریت، آندوریت، ژئوکروویت، سلیگمانیت، گوتاردیت و یک کانی ناشناخته با فرمول $(Ag_2Pb_3As_4Sb_4S_{17})$ هستند. ترکیب متوسط کانی‌های سولفوسالتی موجود در کانسنگ چینه‌سان در جدول ۱ آمده است.

نتایج مطالعات الکترون میکروپروب نشان می‌دهد که طلا به صورت الکتروم با یک فایننس ۸۷۵-۷۸۰ در بخش‌های مختلف کانسنگ چینه‌سان حضور دارد.

پیریت، بیشتر توسط کانی‌های با خاصیت پلاستیکی بیشتر، مانند باریت و اسفالریت، تراندریت و الکتروم پر می‌شوند. این ارتباط نشان می‌دهد که رفتار پیریت شکننا بوده است، در حالی که فازهای سولفیدی در برگیرنده نرم‌تر، به وسیله سازو کارهای جریان پلاستیکی، شکستگی‌های باز ایجاد شده در مرحله دگرشکلی را پر کرده‌اند (Marshall & Gilligan, 1987, 1993; Bailie & Reid, 2005).

کانه‌های با دگرشکلی پلاستیکی شامل اسفالریت، تراندریت - تنانیت، گالن و استیب‌نیت هستند که ساخت و بافت‌های دگرشکلی شکل‌پذیر را نشان می‌دهند. بافت‌های سایه فشاری متشکل از اسفالریت، تراندریت - تنانیت و گالن به خوبی در اطراف کانی‌های سخت‌تر پیریت دانه‌پراکنده در کانسنگ دیده می‌شود (شکل‌های ۸-الف و ب). در اثر دگرشکلی، برخی از کانه‌های سولفیدی، در راستای برگ‌وارگی طول‌شدگی یافته و یا بویینه شده‌اند (شکل‌های ۸-ج و د). دانه‌های الکتروم بیشتر در موقعیت همبری و یا درون کانه‌های اسفالریت و تراندریت - تنانیت مشاهده می‌شوند (شکل ۸-د). الکتروم درون گالن نیز به ندرت مشاهده شده است. اندازه الکتروم از ۱ تا ۲۴۰ میکرومتر متغیر است، اما بیشتر دانه‌ها در اندازه‌های میان ۳۰ و ۱۵۰ اندازه‌گیری شده‌اند.

در کانسار باریکا، بخشی از کانه‌زایی، به صورت شبکه‌ای از رگچه‌های غنی از سولفوسالت در سبتهای ۱۰ میکرومتر تا ۵ میلی‌متر در بخش‌های به شدت خردشده از کانسنگ چینه‌سان رخ داده است. به نظر می‌رسد که پراکنندگی شکستگی‌ها در بخش‌های مختلف کانسنگ چینه‌سان، توسط ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها کنترل می‌شود، از این رو بیشتر رگچه‌ها، در نوارهای سیلیسی، که شکنندگی بالاتری دارند، گسترش یافته‌اند. بر پایه کانی‌شناسی کانسنگ و شیمی کانها، بیشتر کانی‌های سولفوسالتی تمرکز یافته در شکستگی‌ها، ثانویه و به دلیل داشتن ترکیب پیچیده غنی از عناصر به شدت تحرک‌پذیر (جدول ۱) با مجموعه کانی‌شناسی اولیه متفاوت هستند. طلا، به صورت الکتروم و بیشتر در نزدیک همبری‌ها و یا درون کانی‌های سولفوسالتی غنی از Ag مشاهده شده است (شکل‌های ۹-الف، ب، ج). تنها کانها سولفیدی، که سولفوسالت‌های موجود در شکستگی‌ها را همراهی می‌کند، مقادیر خیلی کم پیریت به صورت دانه‌های شکل‌دار در اندازه‌های ۲۰ تا ۱۰۰ میکرون است (شکل ۹-د). اندازه دانه‌های الکتروم از ۵۰ میکرومتر تا ۳ میلی‌متر متفاوت است (شکل ۱۰). هیچ ارتباط و همبستگی مستقیمی میان اندازه و ترکیب کانی‌های الکتروم وجود ندارد، ولی الکتروم‌های بزرگ‌تر تمایل دارند تا در فضاهای بزرگ‌تر جای بگیرند و بیشتر در همراهی با سولفوسالت‌های غنی از Ag-Pb-As-Sb مشاهده می‌شوند. رخداد الکتروم و سولفوسالت‌ها در طول شکستگی‌ها، تحرک دوباره عناصر Ag-Au-As-Sb-Pb-Hg از پیکره معدنی اصلی و تمرکز دوباره این عناصر در فضاهای تشکیل شده در هنگام دگرشکلی را نشان می‌دهد. مراحل مختلف تکامل کانی‌شناسی و بافتی کانها در کانسنگ چینه‌سان باریکا، در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

۶- نتیجه‌گیری

بخش چینه‌سان کانسار سولفید توده‌ای باریکا، در طی فعالیت گرمایی آتشفشان‌زاد در محیط زیردریایی نهشت یافته‌اند. طلا احتمالاً به صورت میانبارهای غیر قابل مشاهده در پیریت و الکتروم در باریت حضور یافته است. بافت‌های کانسنگی همزمان با نهشت اولیه، در طی دگرگونی و دگرشکلی مؤثر بر کانسار، به مقدار زیادی از بین رفته‌اند. در عوض، عملکرد دگرگونی و دگرشکلی، به تشکیل و پیدایش ساخت‌ها، بافت‌ها و کانه‌های نوظهور در کانسار انجامیده است. کانه‌های تشکیل شده در مراحل دگرگونی و دگرشکلی، بیشتر در اثر تحرک دوباره مکانیکی و شیمیایی کانسنگ‌های اولیه (همزمان با نهشت) به وجود آمده‌اند. بافت‌های حاصل از تحرک دوباره مکانیکی کانها، بسته به ویژگی‌های مکانیکی کانها، به صورت دگرشکلی شکل‌پذیر (برای نمونه تبلور دوباره، سایه فشار، بودیناز، طول‌شدگی و چین‌خوردگی) و شکننا (کاتاکلاستیک) تظاهر یافته‌اند. دگرگونی ناحیه‌ای

سیاه (رخساره ریزدانه) است، در بخش چینه‌سان کانسار باریکا دیده می‌شود (شکل ۵). کانی‌شناسی در کانسنگ‌های کمتر دگرشکل شده شامل پیریت، اسفالریت، گالن، تراندریت - تنانیت و مقادیر فرعی استیب‌نیت است. بر پایه O'Leary & Sack (1987) و Wagner et al. (2005)، پاراژنز جفت کانی اسفالریت - تراندریت، دمای تشکیل حدود ۲۰۰ درجه را برای کانسنگ چینه‌سان باریکا پیشنهاد می‌کند، که با داده‌های دمایی میانبارهای سیال اندازه‌گیری شده برای کانسار (۱۵۰ تا ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد) منطبق است. در مقاطع صیقلی مطالعه‌شده، در همراهی با بافت‌های اولیه وابسته به کانسنگ‌های سولفید توده‌ای، کانها طلا و یا الکتروم مشاهده نشده ولی در کانسنگ‌های باریتی، الکتروم در اندازه‌های کوچک‌تر از ۱۴۰ میکرون مشاهده شده است. بر پایه Huston et al. (1992)، در این مرحله از کانی‌سازی، طلا به صورت الکتروم درون باریت و/یا به صورت طلای غیر قابل مشاهده (در اندازه‌های کوچک‌تر از ۱ میکرون) درون پیریت و در همراهی نزدیک با سولفوسالت‌های As, Pb و Sb و دیگر کانی‌های سولفیدی و نقره در کانی‌های سولفوسالت تمرکز یافته است.

۵-۲. مرحله دگرگونی (ناحیه‌ای)

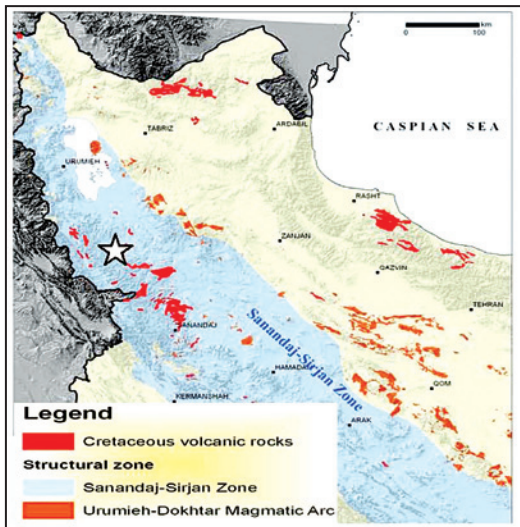
کانسار باریکا پس از تشکیل، دچار دگرگونی در حد شیت‌سبز پایینی شده است. رخداد این پدیده با جهت‌یافتگی ضعیف پورفیروبل‌ها، گسترش برگ‌وارگی (D1) و تشکیل کانی‌های ثانوی سربست و کلریت همراه است. دگرگونی تأثیر قابل توجهی در تبلور دوباره کانه‌های سولفیدی و تمرکز طلا به صورت الکتروم دارد. عملکرد دگرگونی بر کانسنگ سولفیدی باریکا، به تبلور پیریت‌های فراموبیدال، ایجاد پیریت‌های درشت بلور با بافت الحاق سه‌گانه و تشکیل الکتروم در مرز دانه‌های پیریت تبلور یافته انجامیده است (شکل ۶). طلا، به صورت الکتروم، بیشتر در اندازه‌های ۱۰ تا ۱۵۰ میکرون در حواشی پیریت تبلور دوباره یافته، تشکیل شده است. رشد و تشکیل الکتروم در حواشی و مرز بلورهای پیریت، بر پایه مدل ارائه شده توسط Cox et al. (1987) و Huston (2000) قابل توضیح است. بر پایه این مدل در محیط‌های درجه پایین - متوسط دگرگونی، طلا در اثر فرایند انتقال انحلالی (Solution Transfer) از سمت پیریت‌های طلا‌دار به حواشی کانه‌های پیریت تبلور دوباره یافته، حرکت می‌کند و به صورت الکتروم‌های قابل مشاهده با میکروسکوپ در حواشی کانها تمرکز می‌یابد.

۵-۳. مرحله دگرشکلی

در مرحله‌ای از فرایند دگرگونی پیش‌رونده، تنش اعمال‌شده بر کانسار باریکا و سنگ‌های دگرسان‌شده میزبان آن، به تشکیل پهنه برشی باریکا همراه با ساختارهای دگرشکلی شکل‌پذیر و شکننا (D2)، در کانسار و سنگ‌های میزبان آن انجامیده است. روند برگ‌وارگی‌های حاصل از دگرشکلی (D2) با روند برگ‌وارگی دگرگونی (D1) و طبقه‌بندی سنگ‌ها (S0) هم‌راستا است.

ژئومتری، شدت و روند پهنه برشی توسط ژئومتری، شدت و روند پهنه دگرسانی باریکا کنترل می‌شود، به گونه‌ای که گستره کارکرد پهنه برشی، به طور کامل بر گستره کانسار باریکا و پهنه دگرسانی میزبان آن منطبق است و بیشترین شدت دگرشکلی با کانسار باریکا (بخش چینه‌سان) مطابقت دارد. بر پایه Galley et al. (2007)، کانسارهای VMS به دلیل ماهیت شکل‌پذیر پیکره‌های سولفید توده‌ای، به راحتی با واتنش (Strain) ایجادشده در طی دگرشکلی ناحیه‌ای سازگار می‌شوند و بنابراین می‌توانند درجات بالاتری از تبلور مجدد و تحرک دوباره نسبت به چینه‌های آتشفشانی و رسوبی دربرگیرنده را نشان دهند. بافت‌های دگرشکلی، حاصل از عملکرد برش (Shearing)، که بر روی کانسار باریکا پوشش یافته (Overprinted) و بافت‌های اولیه و بافت‌های حاصل از دگرگونی را تحت تأثیر قرار داده است، به دو دسته کاتاکلاستیک و پلاستیک قابل تقسیم هستند:

بافت کاتاکلاستیک در پورفیروبل‌هاست‌های پیریت (شکل‌های ۷-الف و ب) و به ندرت در اسفالریت دیده شده است. شکستگی‌های موجود درون کانی‌های

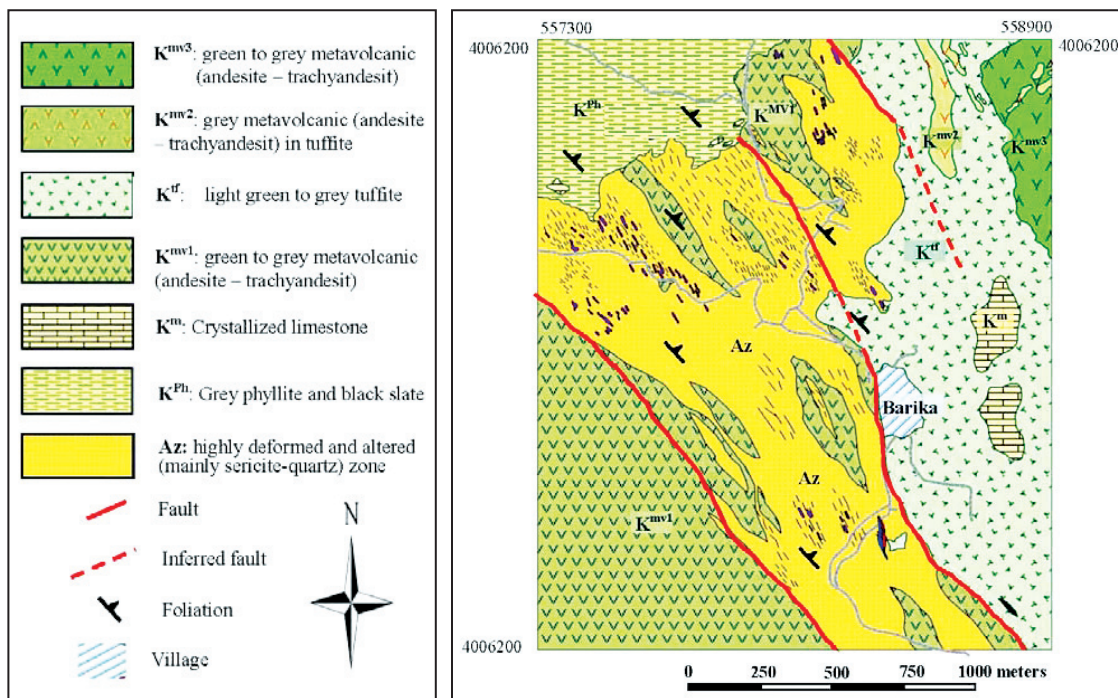


شکل ۱- موقعیت کانسار باریکا (علامت ☆) در همراهی با سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه، در شمال باختر پهنه دگرگونی سنندج - سیرجان.

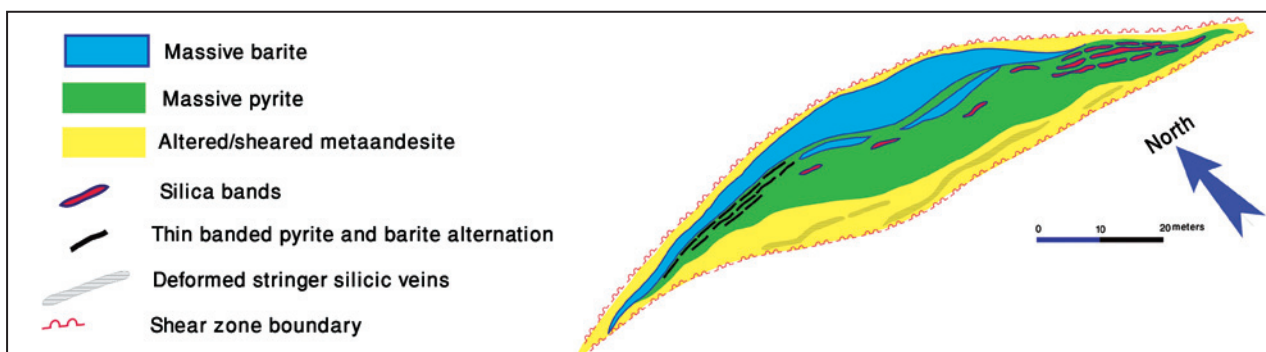
باعث مهاجرت طلا به شکستگی‌ها و مرزهای دانه‌ها و در پی آن تشکیل الکتروم میکروسکوپی شده است. دگرشکلی حاصل از عملکرد پهنه برشی باریکا، عناصر از پیش موجود Au, Ag, Pb, Sb, As و Hg را متحرک ساخته و دوباره آنها را به صورت انواعی از کانی‌های سولفوسالتی با ترکیب پیچیده و غنی از عناصر تحرک پذیر و الکتروم، در ساختارهای شکل پذیر- شکننا که در سراسر کانسنگ چینه‌سان برش یافته (sheared) ایجاد شده‌اند، تمرکز داده است. الکتروم‌ها، که در شکستگی‌ها جای گرفته‌اند، در اندازه‌های میکروسکوپی تا قابل مشاهده با چشم دیده می‌شوند. از نظر اقتصادی دگرگونی و دگرشکلی اعمال شده بر کانسنگ چینه‌سان باریکا، در آزادسازی دانه‌های طلای بسیار ریز غیر قابل مشاهده با میکروسکوپ (refractory) از سولفیدها و تمرکز و درشت شدن آنها در شکل قابل استحصال (الکتروم) نقش کلیدی و اساسی داشته و در پایان موجب افزایش بازیافت طلا از کانسنگ شده است.

سپاسگزاری

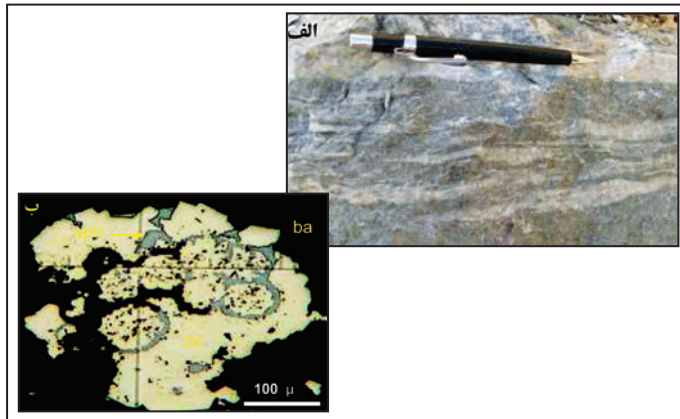
این پژوهش با همکاری‌های همه‌جانبه سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به انجام رسیده است؛ از این رو از ریاست محترم سازمان، جناب آقای مهندس کره‌ای و معاونان محترم اکتشافات معدنی، جناب آقایان مهندس عابدیان و مهندس برنا، کمال تشکر و سپاسگزاری را داریم.



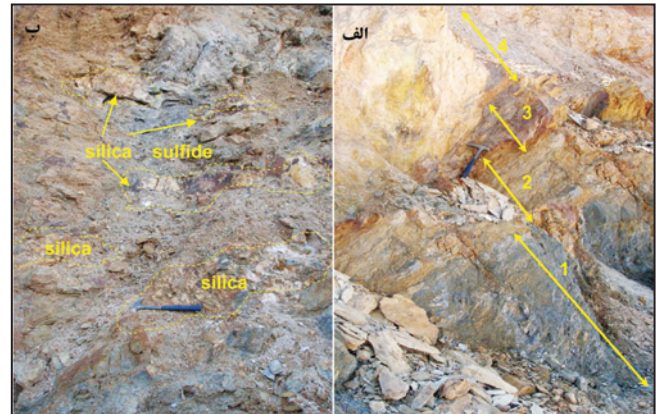
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی کانسار سولفید توده‌ای باریکا.



شکل ۳- زمین‌شناسی بخش‌های مختلف کانسار سولفید توده‌ای باریکا در بخش چینه‌سان

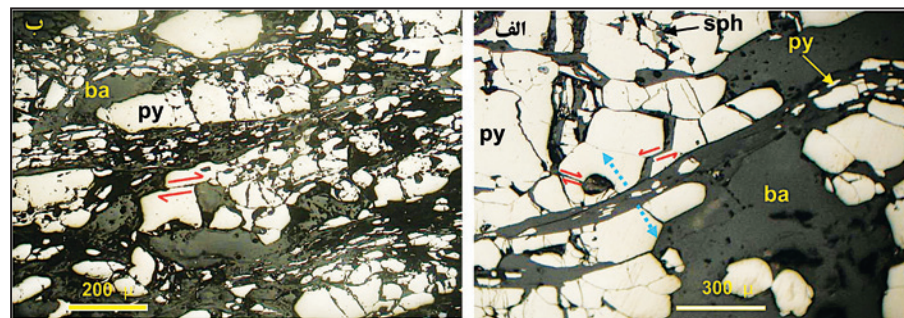
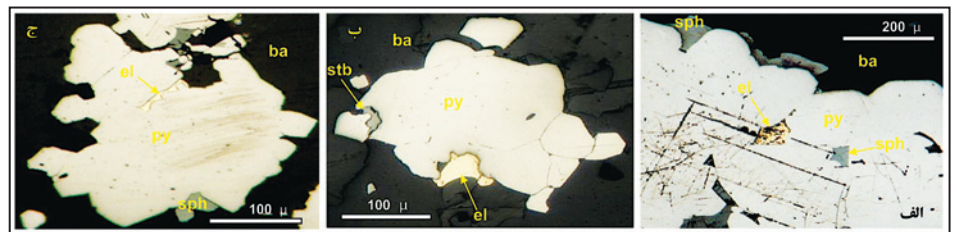


شکل ۵- ساخت و بافت‌های همزمان با نهشت کانسنگ در بخش چینه‌سان کانسار باریکا: الف) ساخت نواری حاصل از تناوب باریت و سولفید، ب) بافت فرامیویدال پیریت (پارمحمدی، ۱۳۸۵)، که آثار تبلور دوباره در حاشیه بلورها به خوبی دیده می‌شود. Py: پیریت و sph: اسفالریت



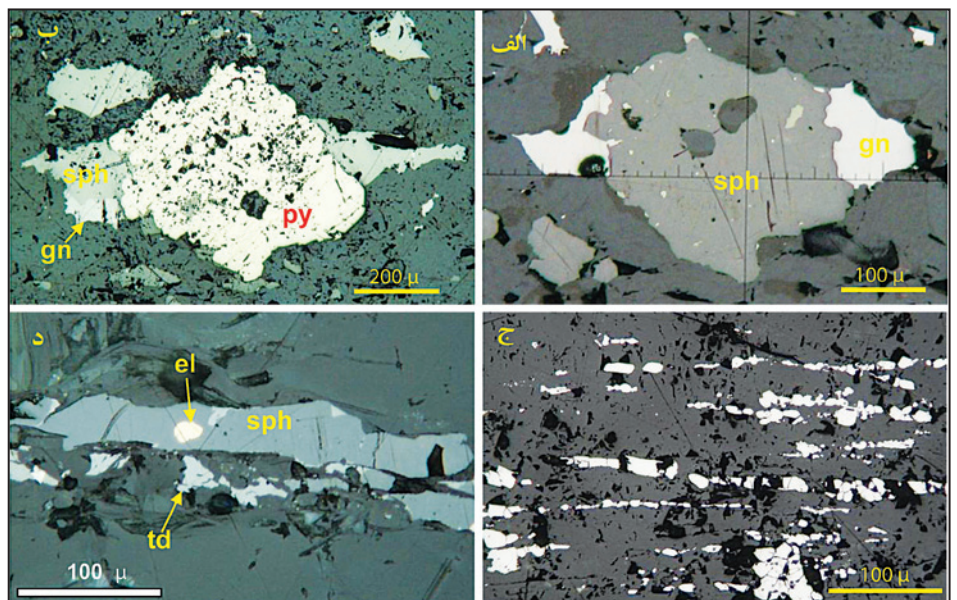
شکل ۴- الف) نمایی از بخش‌های مختلف کانسار سولفید توده‌ای باریکا در بخش چینه‌سان: ۱) سولفید توده‌ای، ۲) تناوب باریت و سولفید، ۳) لایه باریتی و ۴) متاآندزیت دگرسان‌شده (کمر بالا). ب) نمایی نزدیک از نوارهای سیلیسی در همراهی با کانسنگ سولفیدی

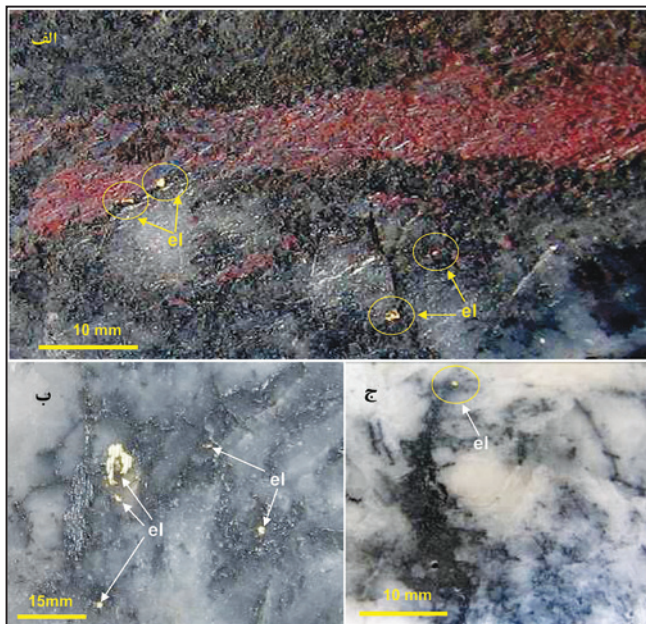
شکل ۶- نمونه‌هایی از بافت‌های تبلور دوباره یافته پیریت‌های فرامیویدال در اثر دگرگونی. در این شکل‌ها، الکتروم در مرز و حاشیه پیریت‌های تبلور یافته تشکیل شده است. el: الکتروم، py: پیریت و stb: استیب‌نیت



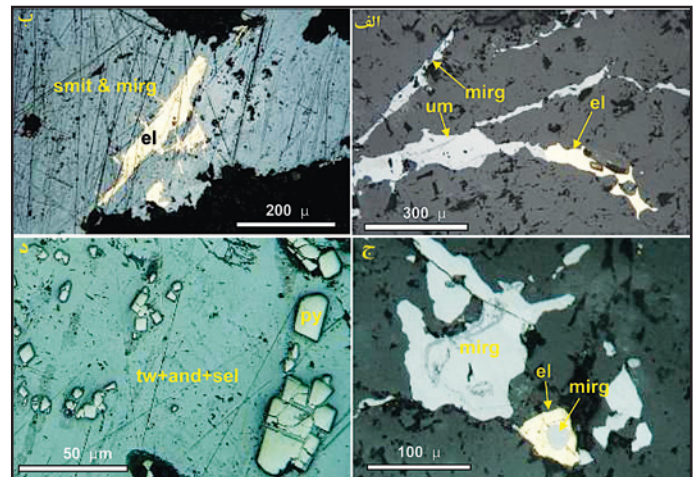
شکل ۷- بافت کاتاکلاستیک در پیریت: الف) در مرکز تصویر، پیریت‌ها بیشترین تنش را تحمل کرده و کاملاً خرد شده‌اند، ولی به سمت بالا و پایین تصویر، با دور شدن از کانون تنش، پیریت‌ها از محل الحاق سه‌گانه بلورها جابه‌جا شده‌اند. ب) پیریت‌های خرد شده در موازات برگ‌وارگی جهت یافتگی پیدا کرده‌اند.

شکل ۸- برخی از ساخت و بافت‌های حاصل از دگرشکلی شکل‌پذیر در بخش کانسنگ چینه‌سان باریکا. الف و ب) بافت سایه فشاری، ج) طولیل‌شدگی همراه با بودین‌شدگی در پیریت و د) طولیل‌شدگی در اسفالریت. py: پیریت، sph: اسفالریت، (شکل "الف" از پارمحمدی، ۱۳۸۵) gn: گالن، tet: تتراندزیت و el: الکتروم.





شکل ۱۰- فضاهای ایجادشده در اثر دگرشکلی شکنا که توسط کانه‌های سولفوسالتی (رنگ‌های سیاه و سرخ) و الکتروم‌های قابل مشاهده با چشم (el) پر شده است.



شکل ۹- سولفوسالت‌ها و الکتروم پرکننده در ریز شکستگی‌های قطع کننده نوارهای سیلیسی. الف) الکتروم در همراهی با کانی ناشناخته (um) با فرمول $Ag_2Pb_4As_4Sb_4S_{17}$ و میرارژیریت (mirg) در همراهی با اسمایتیت (smit) و میرارژیریت (mirg) به الکتروم به صورت ادخال در میرارژیریت (mirg) و د) بلورهای شکل دار پیریت در همراهی با توونیت (tw)، آندوریت (and) و سلیگمانیت (sel).

Main geological events		Synvolcanism		Metamorphism		Weathering
		stringer zone (stockwork)	stratiform ore (massive & banded ore)	prograde (D1)	shearing (D2)	
ore minerals	Pyrite	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████
	Sphalerite	██████████	██████████	██████████	██████████	
	Galena	██████████	██████████	██████████	██████████	
	Tetrahedrite-tenantite	██████████	██████████	██████████	██████████	
	Stibnite		██████████	██████████	██████████	
	Ag- As- Sb- Pb ± Hg- rich sulfosalt minerals				██████████	
	Gold (submicroscopic)		██████████			
	Electrom (microscopic to visible)			generation I ██████████	generation II ██████████	
chalcocite-covellite,malachite-azurite						██████████
main gangue minerals	Barite		██████████			
	Quartz	██████████	██████████			
style of deformation	Ductile			██████████	██████████	
	Brittle	██████████			██████████	
styles of mineralization	syndepositional		██████████			
	open space filling	██████████			██████████	
	replacement					██████████

شکل ۱۱- توالی کانی‌شناسی و بافتی کانه‌ها در کانسنگ چینه‌سان باریکا

جدول ۱- ترکیب شیمیایی کانی‌های سولفوسالتی موجود در بخش چینه‌سان کانسار باریکا بر اساس نتایج مطالعات الکترون میکروپروب

Total	S	Ag	Zn	Bi	Au	W	Te	Sn	Cd	Mo	Cu	Co	Fe	Pb	Hg	Sb	As	mineral
100.3	15.2	69.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	15.1	0.4	stephanite
99.6	17.1	63.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	13.2	5.2	pyrargyrite
99.7	42.4	23.9	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1	19.0	trechmannite
98.8	22.9	40.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.5	0.8	24.7	9.2	miargyrite
99.3	13.0	23.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	20.3	0.9	33.0	7.9	As-rich andorite
99.6	11.5	24.3	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	30.6	0.0	0.8	0.0	8.9	6.4	13.0	(Zn, Hg)-rich tennantite
99.4	17.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	66.8	0.0	9.8	4.7	As-rich geocronite
98.6	0.2	20.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	13.9	0.0	0.0	43.7	0.0	10.0	9.8	Sb-rich seligmanite
98.6	23.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	36.9	0.0	22.9	13.6	twinnite/ guettardite
98.6	41.7	24.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.6	19.2	smithite
100.3	23.2	8.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	34.8	0.1	20.2	12.7	unnamed mineral (Ag ₂ Pb ₄ As ₄ Sb ₄ S ₁₇)

کتابنگاری

- تاج‌الدین، ح.، راستاد، ا.، یعقوب‌پور، ع.، محجل، م.، عابدیان، ن.، برنا، ب.، دری، م.، روزبه، س. و یارمحمدی، ع.، ۱۳۸۸- مراحل تشکیل و تکوین کانسار سولفید توده‌ای غنی از طلای باریکا، بر اساس مطالعه ساخت، بافت و میکروترموتری سیالات درگیر، خاور سردشت، سنندج- سیرجان شمالی، بیست و هفتمین همایش علوم زمین و سیزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- یارمحمدی، ع.، ۱۳۸۵- کانی‌شناسی، ژئوشیمی، ساخت و بافت و ژئز کانه‌زایی طلا (نقره، فلزات پایه و باریت) در محدوده معدنی باریکا، شرق سردشت. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس.
- یارمحمدی، ع.، راستاد، ا.، محجل، م. و شمس، م. ج.، ۱۳۸۴- رخداد طلای باریکا: کانه‌زایی تیپ ماسیو سولفید ولکانوژنیک غنی از طلا در ایران، خلاصه مقالات بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- یارمحمدی، ع.، راستاد، ا.، محجل، م. و شمس، م. ج.، ۱۳۸۷- رخداد طلای باریکا: کانه‌زایی تیپ ماسیو سولفید ولکانوژنیک غنی از طلا در ایران. مجله علوم دانشگاه تهران. جلد ۳۴، شماره ۱، صفحات ۴۷ تا ۶۰.

References

- Bailie, R. H. & Reid, D. L., 2005- Ore textures and possible sulphide partial melting at Broken Hill, Aggeneys, South Africa I: petrography. *South African Journal of Geology* 108 (1), 51-70
- Cook, N. J., 1996- Mineralogy of the sulphide deposits at Sulitjelma, northern Norway. *Ore Geol. Rev.* 11:303-338.
- Cook, N. J., Halls, C. & Boyle, A. P., 1993- Deformation and metamorphism of massive sulphides at Sulitjelma, Norway. *Mineralogical Magazine* 57 (1): 67-81.
- Cook, N. J., Spry, P. G. & Vokes, F. M., 1998- Mineralogy and textural relationships among sulphosalts and related minerals in the Bleikvassli Zn-Pb-(Cu) deposit, Nordland, Norway. *Mineralium Deposita* 34:35-56.
- Cox, S. F., Etheridge, M. A. & Wall, V. J., 1987- The role of fluids in syntectonic mass transport, and the localization of metamorphic vein - type ore deposits: *Ore Geology Reviews*, v. 2, p. 133-171
- Dubé, B., Gosselin, P., Mercier-Langevin, P., Hannington, M. & Galley, A., 2007- Gold-rich volcanogenic massive sulphide deposits, in Goodfellow, W.D., ed., *Mineral deposits of Canada—A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication no. 5*, p. 75-94.
- Galley, A. G., Hannington, M. D. & Jonasson, I. R., 2007- Volcanogenic massive sulphide deposits, in Goodfellow, W.D., ed., *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5*, p. 141-161.
- Gu, L. X., McClay, K. R., 1992- Pyrite deformation in stratiform lead-zinc deposits of the Canadian Cordillera. *Mineralium Deposita* 27: 169-181.
- Gu, L. X., Zheng, Y., Tang, X. Q., Zaw, K., Della-Pasque, F., Wu, C. Z., Tian, Z., Lu, J. J., Ni, P., Li, H., Yang, F., Wang, X. J., 2007- Copper, gold and silver enrichment in ore mylonites within massive sulphide orebodies at Hongtoushan VHMS deposit, N.E. China. *Ore Geology Reviews* 30: 1-29.
- Hannington, M. D. & Scott, S. D., 1989- Sulfidation equilibria as guides to gold mineralization in volcanogenic massive sulfides: evidence from sulfide mineralogy and the composition of sphalerite. *Economic Geology* 84: 1978-1995.

- Höller, W. & Gandhi, S. M., 1995- Silver-bearing sulfosalts from the metamorphosed Rampura Agucha Zn-Pb-(Ag) deposit, Rajasthan, India. *Canadian Mineralogist* 33:1047-1057.
- Huston, D. L. & Large, R. R., 1989- A chemical model for the concentration of gold in volcanogenic massive sulfide deposits. *Ore Geology Reviews* 4: 171-200.
- Huston, D. L., 2000- Gold in volcanic-hosted massive sulfide deposits; distribution, genesis, and exploration, in Hagemann, S.G. ed., *Gold in 2000: Reviews in Economic Geology*, vol. 13, p. 401-426
- Huston, D., Bottrill, R. S., Creelman, R., Zaw, K., Ramsden, T., Rand, S., Gemmell, J. B., Bruce, L., Sie, S. H., & Large, R. R., 1992- Geologic and Geochemical Controls on the Mineralogy and Grain Size of Gold-Bearing Phases, Eastern Australian Volcanic Hosted Massive Sulfide Deposits. *Econ.Geol.*87:542-563
- Large, R. R., Huston, D. L., McGoldrick, P. J. & Ruxton, P. A., 1989- Gold distribution and genesis in Australian volcanogenic massive sulfide deposits and their significance for gold transport models. *Econ. Geol. Mon* (6). p.520-563
- Larocque, A. C., Hodgson, C. J. & Lafleur, P. J., 1993- Gold distribution in the Mobrún volcanic-associated massive sulfide deposit, Noranda, Quebec: a preliminary evaluation of the role of metamorphic remobilization. *Economic Geology* 88: 1443-1459.
- Larocque, A. C., Hodgson, C. J., Cabri, L. J. & Jackman, J. A., 1995- Onmicroprobe analyses of pyrite, chalcopyrite and pyrrhotite from the Mobrún VMS deposit in northwestern Quebec: evidence for metamorphic remobilization of gold. *Canadian Mineralogist* 33: 373-388.
- Marignac, C., Diagona, B., Cathelineau, M., Boiron, M. C., Banks, D., Fourcade, S. & Vallance, J., 2003-Remobilisation of base metals and gold by Variscan metamorphic fluids in the south Iberian pyrite belt: evidence from the Tharsis VMS deposit. *Chem. Geol.* 194: 143-165.
- Marshall, B. & Gilligan, L. B., 1987- An introduction to remobilization: information from ore body geometry and experimental considerations. *Ore Geology Reviews* 2 (1-3), 87-131.
- Marshall, B. & Gilligan, L. B., 1993- Remobilization, syntectonic processes and massive sulfide deposits. *Ore Geology Reviews* 8 (1-2), 39-64.
- Marshall, B., Vokes, F. M. & Larocque, A. C. L., 2000- Regional metamorphic remobilisation: upgrading and formation of ore deposits. In: Spry, P.G., Marshall, B., Vokes, F.M. (Eds.), *Metamorphosed and Metamorphogenic Ore Deposits*, *Reviews in Economic Geology* 11: 19- 38.
- McClay, K. R., 1983- Deformation of stratiform lead-zinc deposits. In: Sangster, D.F. (Ed.), *Sediment-Hosted stratiform Lead-Zinc Deposits*, *Short Course Handbook*, Mineral Association of Canada 8: 283- 309.
- 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
- O'Leary, M. J. & Sack, R. O., 1987- Fe-Zn exchange reaction between tetrahedrite and sphalerite in natural environments. *Contrib. Mineral Petrol.* 96:415-425.
- Ohmoto, H., 1996- Formation of volcanogenic massive sulfide deposits: the Kuroko perspective. *Ore geology reviews*, 10 :135-177
- Poulsen, K. H., Robert, F. & Dubé, B., 2000- Geological Classification of Canadian Gold Deposits: Geological Survey of Canada Bulletin 540, 106p.
- Tiwary, A., Deb, M. & Cook, N. J., 1998- Use of pyrite microfabric as a key to tectono-thermal evolution of massive sulphide deposits - an example from Deri, southern Rajasthan, India. *Mineralogical Magazine* 62: 197- 212.
- Vivallo, W. & Rickard, D., 1990- Genesis of an Early Proterozoic zinc deposit in high-grade metamorphic terrane, Saxberget, Central Sweden. *Economic Geology* 85: 714- 736.
- Vokes, F. M., 1969- A review of metamorphism of sulphide deposits. *Earth-Science Reviews* 5 (2): 99-143.
- Vokes, F. M., 2000- Ores and metamorphism: introduction and historical perspectives. *Reviews in Economic Geology* 11: 1-18
- Wagner, T., Jonsson, E. & Boyce, A. J., 2005- Metamorphic ore remobilization in the Hallefors district, Bergslagen, Sweden: constraints from mineralogical and small-scale sulphur isotope studies. *Mineralium Deposita* 40: 100-114.
- Zaw, K., Huston, D. L. & Large, R. R., 1999- A chemical model for remobilisation of ore constituents during Devonian replacement process within Cambrian VHMS Rosebery deposit, western Tasmania. *Economic Geology* 94: 529- 546.
- Zaw, K., Large, R. R. & Huston, D. L., 1997- Petrological and geochemical significance of a Devonian replacement zone in the Cambrian Rosebery massive sulphide deposit, western Tasmania. *Canadian Mineralogist* 35: 1325- 1349.