

کانی‌شناسی و تغییرات شیمیایی سولفوسالت‌های کانسار سرب و روی فراگرمایی آی قلعه‌سی (جنوب‌شرق تکاب، شمال‌غرب ایران)

رامین محمدی نیائی^{۱*}، نیما نظافتی^۱، منصور قربانی^۲، جمال شیخ‌ذکریایی^۱، فرخناز دلیران^۳

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه علوم تحقیقات تهران

۲- دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران

۳- انجمن علوم زمین کاربردی، بنیاد فناوری دانشگاه کارلسروهه آلمان

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۳/۲۲، سخن‌نهایی: ۱۴۰۰/۷/۱۴)

چکیده: کانسار فراگرمایی سرب و روی (نقره) آی قلعه‌سی در شمال‌غرب ایران و جنوب‌شرق تکاب واقع است. جایگاه ساختاری آن در برخوردگاه کمریند آتشفشنای ارومیه- دختر با پهنه سندج- سیرجان است. براساس بررسی‌های میکروسکوپی و تجزیه به روش ریزپردازش الکترونی، ترکیب این سولفوسالت‌ها از سری تنانتیت- تتراهدریت است. این کانی‌ها بیشتر در کانی‌های میزبان جایگزین شده‌اند و نتایج ریزپردازش الکترونی نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی آنها وابسته به ترکیب کانی‌شناسی کانه‌های سولفیدی میزبان است. با نفوذ گنبدهای داسیتی نزدیک کانسار، سیال‌های گرمابی با گریزندگی بالای گوگرد و آرسنیک و بهطور فرعی آنتیموان تشکیل می‌شوند. فعالیت دوباره گسل‌ها سبب برشی شدن کانه‌های سولفیدی اولیه شده و زمینه را برای نفوذ سیال‌های گرمابی فراهم می‌کند. نفوذ و چرش این سیال‌ها در بخش‌های برشی شده کانسار به‌دلیل گریزندگی بالای گوگرد و آرسنیک، شرایط ترمودینامیکی جدیدی را برای سامانه موجب شده که خود سبب ناپایداری کانی‌های سولفیدی می‌شود. در وضعیت جدید، خرددهای برشی کانه‌های اسفالریت، کالکوپیریت و پیریت با این سیال‌ها واکنش کرده و کانه‌های سولفوسالت سری تنانتیت- تتراهدریت را بوجود می‌آورند.

واژه‌های کلیدی: آی قلعه‌سی؛ فعالیت دوباره گسل‌ها؛ ریزپردازش الکترونی؛ گریزندگی گوگرد و آرسنیک؛ سولفوسالت سری تنانتیت- تتراهدریت.

محیط‌های درون‌زاد گرمابی [۷,۲] و برون‌زاد [۹,۸] کنترل می‌کنند.

هدف اصلی این پژوهش تعیین ترکیب کانی‌شناسی کانه‌های سولفوسالتی کانسار آی قلعه‌سی و بررسی عوامل موثر بر تغییرات شیمیایی آنها در بخش‌های مختلف کانسنگ بوده است. سرانجام براساس بازدیدهای میدانی، بررسی‌های میکروسکوپی و یافته‌های ریزپردازش الکترونی، یک مدل احتمالی برای چگونگی تشکیل کانه‌های سولفوسالت سری تنانتیت- تتراهدریت پیشنهاد شده است.

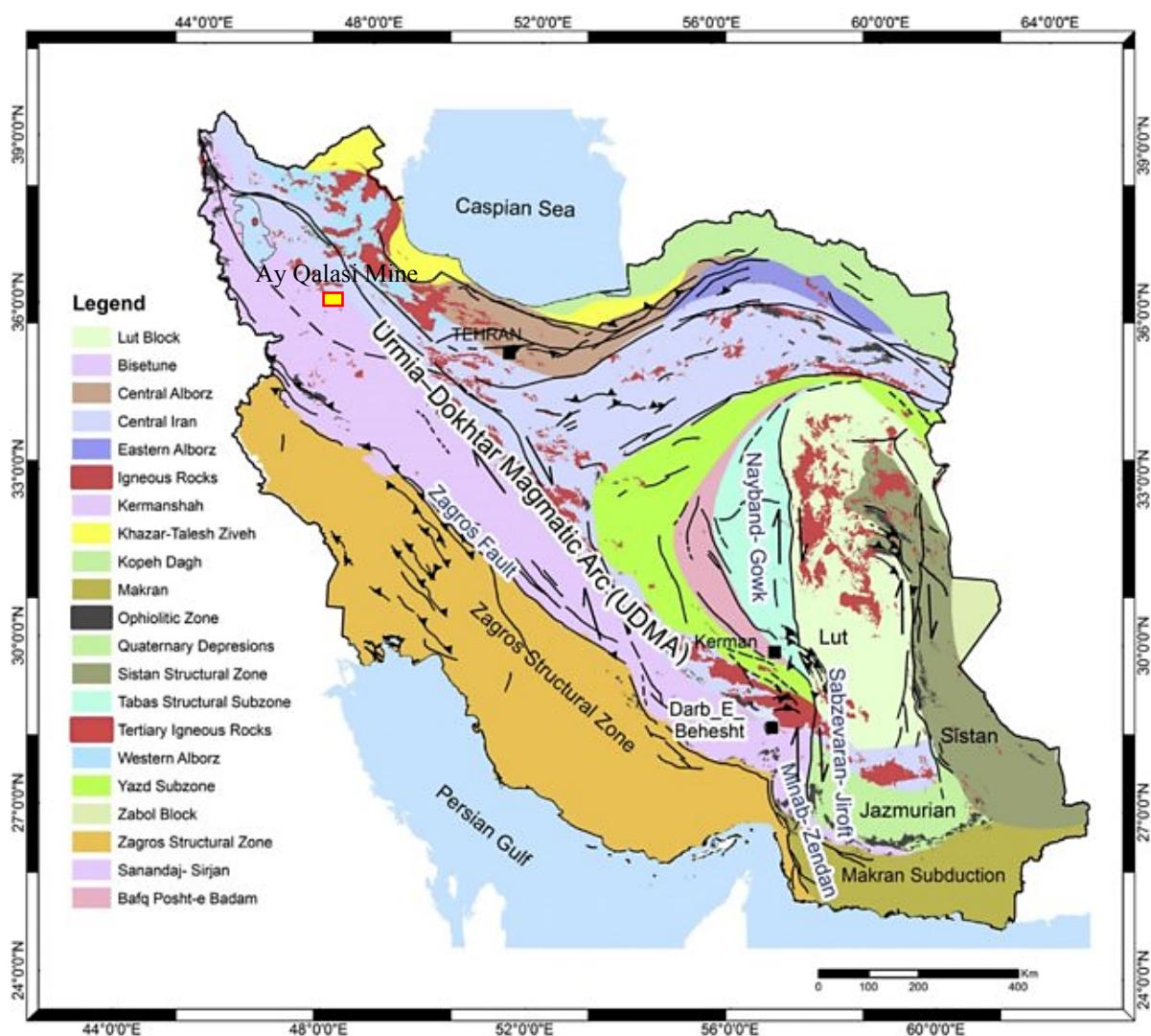
کانسار فراگرمایی سولفیدشدگی متوسط آی قلعه‌سی [۱۰-۱۲]

مقدمه

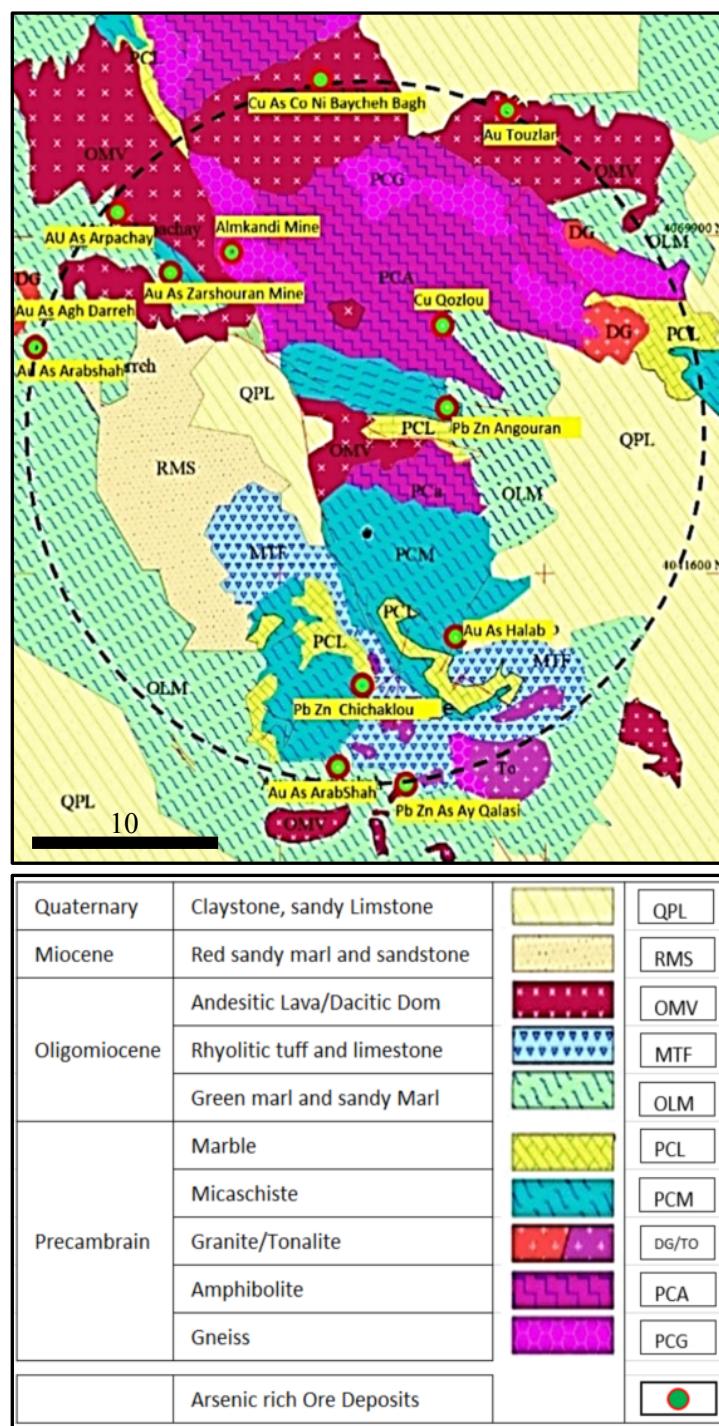
بررسی کانه‌های سولفوسالت، بهویژه سری تنانتیت- تتراهدریت از جنبه‌های مختلفی ارزشمند است، زیرا بخش مهمی از عناصر پایه چون سرب، روی و جیوه و عناصر تلویریم و بیسموت در این کانه‌ها یافت شده [۴-۱] و بخشی از نقره و طلا در این کانه‌ها تمرکز می‌یابد [۶-۴]. در برخی کانسارات چون کانسار بلیکو-سلى نرزو، تنها ۴۰٪ نقره کانسنگ در گالن قرار دارد و بقیه آن در کانه‌های سولفوسالتی متتمرکز است [۷]. از فواید بررسی آنها در ک فرآیندها و عواملی است که کانه‌زایی و تحرک دوباره عناصر را در محیط‌های دگرگونی، آتشفشنایی و

طلای زرشوران [۱۷، ۱۶]، طلا- آرسنیک- آنتیموان آق دره [۱۸]، روی- سرب انگوران [۲۱-۱۹]؛ آرسنیک- نیکل- کبالت- بیسموت- عناصر پایه با یچه باغ [۲۲]، روی- سرب حلب [۲۳]؛ سرب- روی علم کنندی [۲۴] طلای حلب [۲۵]، سرب- روی- مس قوزلو [۲۶]، طلا- آرسنیک عربشاه [۲۸، ۲۷]، سرب- روی- طلای آرپاچای [۲۹]؛ طلای توزلاز [۳۰]؛ مس- طلای آق اتاق [۳۱]؛ سرب- روی \pm طلای چیچکلو [۳۲] و سرب و روی آی قلعه‌سی [۱۲-۱۰] است. گفتنی است که این کانسارها در گستره دایره‌ای شکل به شعاع ۳۰ کیلومتر و با مساحتی حدود ۲۸۰۰ کیلومتر مربع پراکنده هستند. مهم‌ترین ویژگی مشترک این کانسارها وجود کانه‌های آرسنیک‌دار و یا کانه‌های سولفوسالات آرسنیک‌دار در بیشتر آنهاست [۲۹-۱۶] (شکل ۲).

در ۳۴ کیلومتری جنوب‌شرقی شهرستان تکاب و در مختصات جغرافیایی $40^{\circ} 20'$ E $36^{\circ} 36'$ N عرض شمالی و $22^{\circ} 47'$ E طول شرقی واقع است. کانسار آی قلعه‌سی دارای حدود ۱۰۰۰۰۰ تن ذخیره احتمالی ماده معدنی با عیار متوسط ۳٪ سرب و ۴٪ روی، ۰٪ مس، ۵۰٪ بی‌بی‌ام نقره و ۱٪ بی‌بی‌ام طلا است [۱۲]. این کانسار در ایالت فلززایی تکاب و در زیرپهنه تکاب- تخت‌سلیمان- انگوران واقع است. از دیدگاه ساختاری این زیرپهنه بخشی از پهنه ساختاری سندج- سیرجان محسوب می‌شود [۱۳] (شکل ۱) که در برخوردگاه با کمان آتش‌شانی ارومیه دختر قرار دارد [۱۵، ۱۴]. زیرپهنه تکاب- تخت‌سلیمان- انگوران از دیدگاه فلززایی از مناطق مهم ایران بوده و میزبان کانسارهای مهمی همچون



شکل ۱ جایگاه ساختاری کانسار آی قلعه‌سی (مستطیل زرد) در نقشه زمین‌شناسی پهنه‌های زمین‌ساختی ایران برگرفته از مرجع [۱۳] با تغییرات.



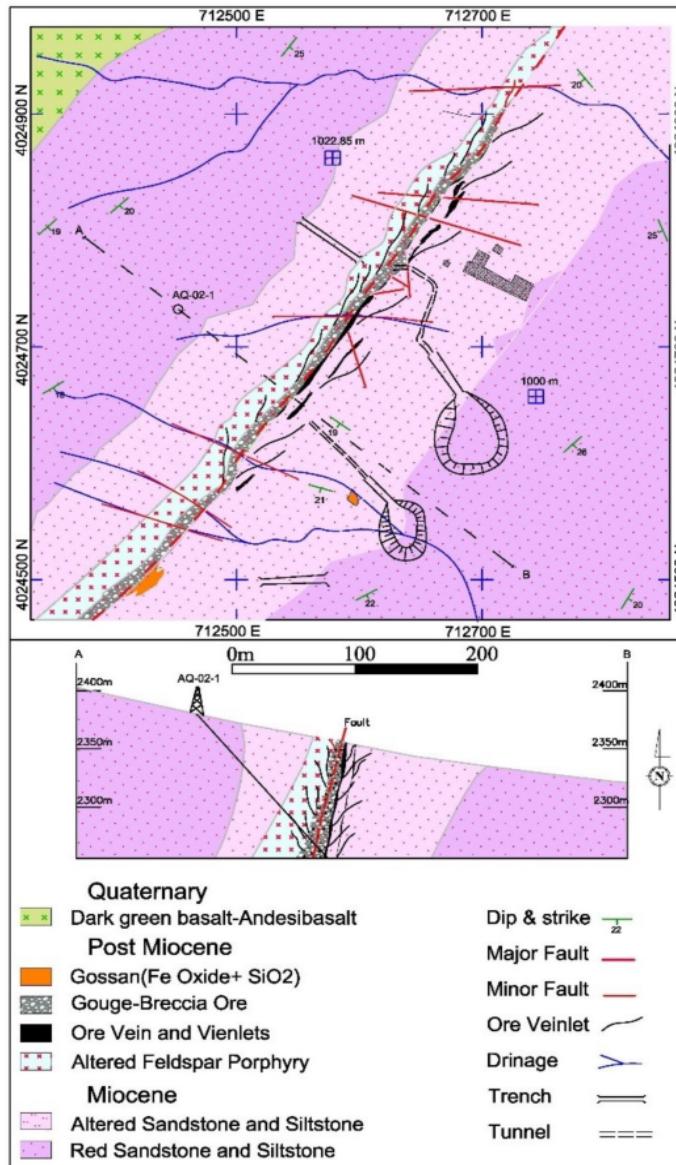
شکل ۲ نقشه پراکندگی کانسارهای فلزی در ایالت فلزیابی تکاب که در آنها، کانی‌های آرسنیکدار دیده می‌شوند، برگرفته از مرجع [۱۵] با تغییرات.

سطحی کانسار تهیه و سپس مطالعات کانی‌شناسی و کانه‌نگاری بر آنها انجام شد. در بررسی‌های میکروسکوپی، افزون بر کانی‌شناسی و نیز کانه‌نگاری کانه‌ها، بافت‌ها، روابط بافتی، جایگاه مکانی، محل پیدایش و همیافتدی آنها نیز مورد توجه ویژه قرار گرفت. بر پایه این بررسی‌ها، تعداد ۲۸ نقطه از مقاطع

روش بررسی
برای انجام این پژوهش افزون بر بازدیدهای صحرابی کانسار آی قلعه‌سی و تهیه نقشه زمین شناسی (شکل ۳)، مغزه‌های حفاری اکتشافی نیز بررسی شده و تعداد ۳۰ مقطع صیقلی و ۲۴ مقطع نازک-صیقلی از مغزه‌های حفاری و نمونه‌های

آلمان ارسال شدند. پردازش با شدت جریان ۲۰ میلی‌آمپر و ولتاژ ۱۵ کیلو ولت انجام گردید. براساس بافت‌ها، با توجه به درصد عناصر فرمول تجربی کانه‌ها محاسبه شد (جدول ۱).

نازک- صیقلی و صیقلی برای تجزیه با ریزکاوالکترونی (EPMA) مدل LEO 1530VZ به منظور شناسایی ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی کانه‌های سولفیدی و بهویژه سولفوسالتسی، انتخاب و به بنیاد فناوری دانشگاه کارلسروهه



شکل ۳ نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰ کانسار آی قلعه‌سی و گسلهای آن.

جدول ۱ کانی‌شناسی دگرسانی‌های کانسار آی قلعه‌سی.

دگرسانی کوارتز سریسیت پیریت	دگرسانی آرژیلیتی شدن	دگرسانی سوبیرزن
کوارتز	ایلیت	گوئتیت
پیریت	آلبیت	جاروسیت
سریسیت	مونتموریلوبیت	مونتموریلوبونیت
ایلیت	کلیسیت	ژیپس
	کائولینیت	پرتلندریت

هیدروکسیدهای آهن، کربناتهای سرب، روی، مس و کانی‌های رسی متنوعی شده است.

کانه‌زایی

بررسی‌های کانه‌نگاری نشان می‌دهد که کانسنگ آی قلعه‌سی از کانه‌های پیریت، اسفالریت‌های کالکوپیریت‌دار با بافت ناامیختگی، گالن، کالکوپیریت به مقدار ناجیز و سولفوسالتهای سری تنانتیت-تراهدریت تشکیل شده است (شکل ۴) که در این سری نیز تنانتیت فراوانی بیشتری دارد. مهم‌ترین بافت‌ها ریزبرشی، انتشاری، رگچه‌ای و جانشینی هستند، که در بیشتر مقاطع دیده می‌شوند. بارزترین ساخت‌ها عبارتند از برشی، شکافه پرکن، شانه‌ای و رگه‌ای. در بخش‌های برون‌زاد کانسار، کانه‌های کالکوپیریت، سروزیت، اسیتیزونیت و انواع مختلف کانی‌های اکسید-هیدروکسید آهن‌دار دیده می‌شوند. مهم‌ترین کانی‌های باطله موجود در رگه‌ها و برش‌های کانسار آی قلعه-سی کوارتز، سریسیت، کانی‌های رسی به‌ویژه ایلیت، کائولینیت، مونتموریونیت و مقادیر کمی آلونیت و جاروویت هستند (جدول ۲).

پنج مرحله کانه‌زایی در کانسار آی قلعه‌سی مشخص شده است [۱۰، ۱۲]. مرحله نخست کانه‌زایی با گسترش پهنه‌های دگرسانی فیلی (کوارتز-پیریت-سریسیت \pm ایلیت) و با حضور پیریت به صورت دانه‌پراکنده در ماسه‌سنگ‌های میزان و فلدسپات پورفیری مشخص می‌شود (شکل ۵). مرحله دوم کانه‌زایی شامل نهشت کانه‌های اسفالریت، کالکوپیریت، گالن، پیریت و کوارتز است. کانه‌های پیریت، گالن، اسفالریت و کالکوپیریت به صورت سیمان، قطعه‌های برشی ماسه‌سنگی و فلدسپات پورفیری را در بر گرفته‌اند. پهناهی رگه‌های کانه‌دار این مرحله از ۰/۵ تا ۲ متر متغیر است. با در نظر گرفتن ضخامت بخش‌های برشی شده کانه‌دار ضخامت به ۵ متر نیز می‌رسد. مرحله سوم کانه‌زایی با تشکیل کانه‌های سولفوسالتهای از نقره تنانتیت-تراهدریت مشخص می‌شود که به صورت رگچه‌ای لبه‌ای دیده می‌گردد و در بسیاری از نقاط کانسنگ به صورت سیمان، خرده‌های برشی کانه‌های سولفیدی را در بر گرفته‌اند (شکل ۴). مرحله چهارم کانه‌زایی با تشکیل کوارتز و پیریت به صورت رگچه‌ای (با اندازه ۵ تا ۲۰ سانتی‌متر) و سیمان برش‌ها مشخص می‌گردد. مرحله پنجم کانه‌زایی با حضور کوارتز پرکنده فضای خالی و رگچه‌ای به اندازه ۱ تا ۱۰ سانتی‌متر مشخص می‌شود. کوارتزهای این مرحله درشت‌بلور و خودشکل هستند و در شکاف‌ها بافت شانه‌ای دارند.

بحث و بررسی زمین‌شناسی کانسار

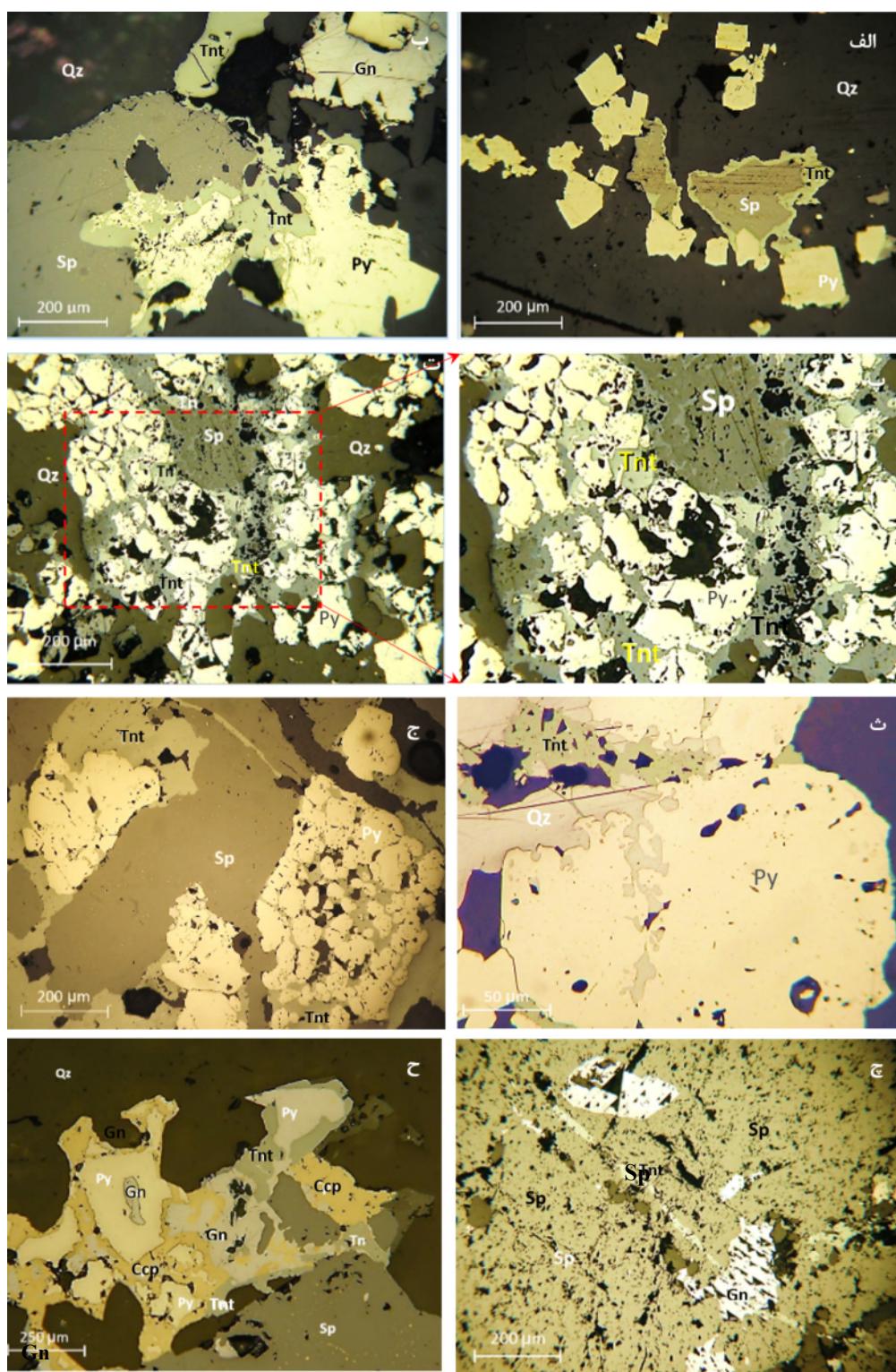
رخداد کانه‌زایی سرب و روی آی قلعه‌سی در بخش‌های جنوبی ورقه ۱:۲۵۰۰۰ تکاب [۱۵] و شمال شرق ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ تکاب [۱۴، ۳۳] رخمنون دارد (شکل ۱). براساس بررسی‌های صحرایی، پی‌سنگ این منطقه بیشتر شامل واحدهای دگرگونی پوشیده شده با سنگ‌های رسوبی است. مجموعه‌های دگرگونی شیستی، گیسی و مرمرهای آهکی در دره‌های عمیق و بخش‌های شمال شرقی و شمال غربی کانسار رخمنون دارند. واحدهای سنگی رخمنون یافته در گستره کانسار شامل واحدهای ماسه‌سنگی و لای‌سنگی قرمز رنگ می‌شوند. گنبدهای داسیتی و دایک فلدسپات پورفیری به سن پس از الیگومن با روند شمال غربی-در واحد ماسه‌سنگی و لای‌سنگی می‌شوند (شکل ۳). ترکیب تقریبی این دایک از تراکی آندزیت تا داسیت متغیر است.

این کانسار به صورت رگه‌ای و عدسی‌مانند، در فضای برشی گسله‌ای با گرای ۰۰۳۵ و شبیب ۷۵ درجه به سمت شمال غرب در مرز گسله ماسه‌سنگ‌های دگرسان شده می‌شوند و دایک فلدسپات پورفیری نهشته شده است. این دایک خود در یک گسل به نسبت بزرگ و عمیق در ماسه‌سنگ‌ها نفوذ کرده است. طول رگه حدود ۳۳۰ متر و پهنه‌ای آن ۰/۵ تا ۲ متر است. با در نظر گرفتن بخش‌های برشی شده، ضخامت رگه گاه به ۴ تا ۵ متر نیز می‌رسد.

سن دقیق کانه‌زایی تعیین نشده است، ولی از آنجا که رگه‌های ماده معدنی واحدهای سنگی می‌شوند را قطع کرده اند، می‌توان سن جوانی را برای آنها در نظر گرفت که کم و بیش با سن کانه‌زایی کانسارهای آقدره، زرشوران، عربشاه، حلب، توپلار، آقاتاق، علم‌کنندی، بایچه‌باغ، چیچکلو و انگوران با سن غالب می‌شوند میانی تا پسین [۱۶، ۱۸، ۲۰، ۳۵] نیز همخوانی دارد. گفتنی است که با وجود سن جوان کانه‌زایی، مجموعه‌های دگرگونی میزان چون معادن زرشوران و انگوران براساس نقشه‌های زمین‌شناسی ۱۲۵۰،۰۰۰ تکاب و ۱۰۰،۰۰۰ تکاب و تخت‌سلیمان اغلب قدیمی‌تر از کامبرین هستند [۳۳، ۱۵].

دگرسانی

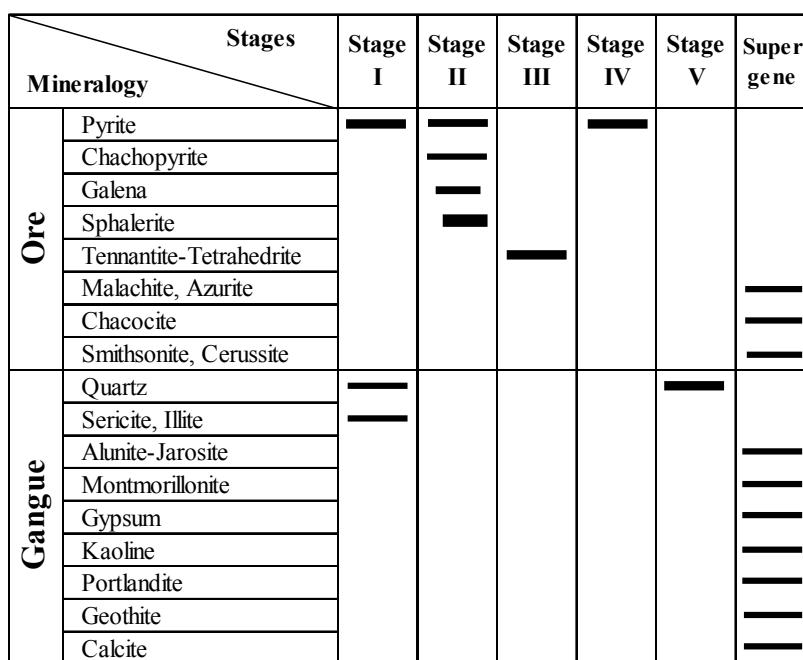
براساس نتایج پراش پرتوی ایکس (جدول ۱) و بررسی‌های میکروسکوپی مهم‌ترین دگرسانی‌های موجود در این کانسار عبارتند از کوارتز-سریسیت-پیریت (QSP)، سیلیسی شدن و دگرسانی‌های برون‌زاد که منجر به تشکیل اکسید-



شکل ۴ بافت‌های شاخص در مقاطع میکروسکوپی کانسنگ: الف- بافت جانشینی تنانتیت که به صورت حاشیه‌ای در لبه‌های اسفالریت جایگزین شده است، ب- بافت جانشینی تنانتیت در لبه‌های بلور برشی شده پیریت و لبه‌های اسفالریت، پ، ت- کانه تنانتیت (سبزرنگ) به صورت سیمان، اسفالریت و پیریت را دربرگرفته است، ث- پیریت‌های نیمه‌شکل دار با سطوح هضم شده و خلیج‌های خودگی در سیمان سیلیسی، (حضور تنانتیت در بخش‌های برشی کانسنگ قابل توجه است)، ج- از بین رفتن زوایای بلورهای پیریت برشی و گردش‌گی کلست‌ها در اثر جانشینی و هضم توسط محلول‌های سازنده تنانتیت، چ- بافت رگچه‌ای تنانتیت که بلورهای اسفالریت و گالن با رگچه تنانتیت قطع شده‌اند و ح- جانشینی هم‌زمان پیریت و کالکوپیریت با تنانتیت و جانشینی پیریت با کالکوپیریت.

جدول ۲ فرمول تجربی کانه‌های سولفوسالتی که با ریزپردازشگر الکترونی تجزیه شده‌اند.

نام کانی	فرمول تجربی کانیها	کد نمونه
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.2}Zn_{1.8}As_4S_{13}$	AQ-P207-F0
تنانتیت-تراهدریت روی دار	$Cu_{10}Zn_{1.6}As2.5S_{13}$	K2-10a
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.4}Zn_{1.6}As3.5S_{13}$	K2-11b
تنانتیت-تراهدریت روی دار	$Cu_{10.2}Zn_{1.8}As_4Sb_{1.3}S_{13}$	K2-10d
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.4}Zn_{1.6}As_4S_{13}$	K2-11b
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.1}Zn_{1.9}As_4S_{13}$	AQ-P01-F06-SS
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.2}Zn_{1.8}As_4S_{13}$	AQ-P01-SS
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.2}Zn_{1.8}As_4S_{13}$	AQ-P01-F09-SS
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.1}Zn_{1.7}Fe_{0.2}As_4S_{13}$	AQ-P01-F07-SS
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.2}Zn_{1.8}As_4S_{13}$	AQ-P01-F09-SSb
تنانتیت روی دار	$Cu_{10}Zn_{1.2}Fe_{0.8}As_4S_{13}$	AQ-P04-F01-SS2
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.4}ZnFe_{0.6}As_4S_{13}$	AQ-P04-F01-SS1
تنانتیت روی دار	$Cu_{10}Zn_{1.2}Fe_{0.8}As_4S_{13}$	AQ-P04-F05
تنانتیت روی دار	$Cu_{10}Zn_{1.8}Fe_{0.2}As_4S_{13}$	AQ-P07-F0
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.1}Zn_{1.8}Fe_{0.2}As_4S_{13}$	AQ-P07-F04-SS-1
تنانتیت روی دار	$Cu_{10}Zn_{1.9}Fe_{0.1}As_4S_{13}$	AQ-P07-F04-SS-2
تنانتیت روی دار	$Cu_{9.7}Zn_{1.4}FeAs_4S_{13}$	AQ-P09-F05-SS-1
تنانتیت-تراهدریت روی دار	$Cu_{9.7}Zn_{1.5}Fe_{0.8}Sb_{3.7}As_{0.3}S_{13}$	AQ-P09-F05-Sb-SS2
تنانتیت روی دار	$Cu_{10.1}As_{3.35}Zn_{1.5}Fe_{0.4}S_{13}$	AQ-P09-F06-SS
(Sb+As)<(Te)	$Cu_{11.7}Fe_{0.3}Te_{1.8}Sb_{1.1}As_{0.6}S_{13}$	AQ-P09-F08
تنانتیت روی دار	$CuZn_{1.8}Fe_{0.2}As_4S_{13}$	AQ-P07-F03-SS
تنانتیت روی دار	$Cu_{10}Zn_{1.1}Ag_{0.1}Asb_4S_{13}$	AQ-P07-F01-PbSS
تراهدریت-تنانتیت روی دار	$Cu_{10.2}Zn_{1.8}Sb_{2.3}As_{1.7}S_{13}$	AQ-P12-F01
تراهدریت-تنانتیت روی دار غنی از نقره	$Cu_{10}Zn_{1.7}Ag_{0.3}Sb_{3.4}As_{0.6}S_{13}$	K2-10e
تراهدریت روی دار غنی از نقره	$Cu_{10}Zn_{11}Ag_{0.1}Sb_4S_{13}$	AQ-P07-F01-PbSSb



شکل ۵ توالی همیافتدی کانه‌زایی در کانسار آی قلعه‌سی [۱۲].

بافت رگچه‌ای: تنانیتی به ندرت به صورت رگچه‌ای و میانبار در اسفالریت و گالن دیده می‌شود (شکل ۵ج).

بافت نگاشتاری: در بزرگنمایی‌های بسیار بالا و یا در بررسی با میکروسکوپ الکترونی، بافت نگاشتاری یا میرمکیتی مانند بین بلورهای تنانیتی و گالن دیده می‌شود بطوریکه بلورهای بسیار کوچک گالن در اندازه‌های ۱۰-۰۱ میکرون، به صورت قطرک‌ها یا شکل‌های کرم‌مانند در تنانیتی قرار دارند (شکل ۶). این نوع بافت و بافت‌های جانشینی اغلب از انواع بافت‌های واکنشی محسوب می‌شوند [۳۶، ۳۷].

همیافتی و محل پیدایش کانه‌های سری تنانیتی-تراهدریت نکاتی در مورد محل پیدایش کانه‌های تنانیتی-تراهدریت قابل توجه هستند که در ارائه مدل احتمالی تشکیل آنها اهمیت دارند و در ادامه بیان می‌شوند.

الف- این کانه‌ها به صورت حاشیه‌ای در لبه‌های کانه اسفالریت (شکل‌های ۴الف، ب) دیده می‌شوند.

ب- این کانه‌ها به صورت سیمان، خردۀای برشی کانه‌ها به‌ویژه بلورهای پیریت خرد شده را در بر می‌گیرند. به دلیل استحکام بلورهای پیریت، این کانه بیشترین مقدار برشی شدن را در تنش‌های زمین‌ساختی از خود نشان می‌دهد (شکل‌های ۴پ، ت). کانه تنانیتی نیز در بخش‌های برشی و یا خرد شده کانسنگ بیشترین فراوانی را دارد (شکل‌های ۴الف-ج و ۷الف). کانه تنانیتی در کانسنگ توده‌ای و بخش‌هایی با بلورهای اسفالریت و گالن سالم‌تر و با خردش‌گی کمتر یا دیده نمی‌شود و یا فراوانی بسیار کمی دارد (شکل ۷ب). در این بخش‌ها نیز تنانیتی در صورت وجود بیشتر در همبrijی دو یا سه کانی اسفالریت، پیریت و گالن و در محل فشردگی آنها به هم دیده می‌شود (شکل‌های ۴ب-ح و ۷الف و ۸الف).

پ- کانه تنانیتی بیشترین در بخش‌های دربردارنده پیریت و کالکوپیریت جایگزین شده و اغلب جانشین کالکوپیریت و سپس پیریت گردیده است (شکل‌های ۴پ، ت، ج و ح). قابل توجه است که بلورهای پیریت خودشکل و خرد نشده آن جانشینی تنانیتی ندارند.

ت- در صورت جانشینی کامل تنانیتی به جای پیریت، یک یا چند رگچه تنانیتی به درون کانه‌های کناری وارد شده‌اند (شکل ۸الف).

ث- بلورهای اسفالریت بیشتر دارای بافت ناامیختگی (کالکوپیریت در اسفالریت؛ تصویر ۸ب) هستند، اما در مناطقی

گسل خودگی‌های پس از کانه‌زایی سبب برشی شدن رگه اصلی و آمیختگی آن با سنگ‌های کمر پایین و کمر بالای رگه و تشکیل گوج‌های رسی فراوان شده که نتیجه آن افزایش ضخامت پهنه کانه‌دار و کاهش عیار آن بوده است، به طوری که ضخامت ماده معدنی در مناطق برشی به بیش از ۵ متر نیز می‌رسد. این فرآیندها همچنین سبب گسترش فرآیندهای بروز زاد در این کانسار و تشکیل کانه‌های اسمیت‌زونیت، سروزیت، مالاکیت، آزوریت، کالکوپیریت، گوتئیت و انواع مختلف کانه‌های رسی شده است.

کانی‌شناسی سولفوسالت‌های کانسار آی قلعه‌سی مهم‌ترین کانه سولفوسالتی کانسنگ آی قلعه‌سی تنانیتی بوده و مقدار ناچیزی تراهدریت نیز تشکیل شده است. تفکیک این دو کانه در زیر میکروسکوپ دشوار است. در بررسی‌های پیشین [۱۱]، تراهدریت تنها سولفوسالت موجود معرفی شده بود، اما ریزپردازش الکترونی نشان داد که این سری بیشتر دارای ترکیب تنانیتی و به ندرت تراهدریتی هستند [۱۰، ۱۲]. تنانیتی با رنگ سبز کمرنگ مایل به زرد کم رنگ (شکل ۴) و تراهدریت با رنگ سبز بسیار کم رنگ دیده می‌شوند در بیشتر مقاطع بررسی شده، تنانیتی دارای فراوانی حدود ۴ تا ۵٪ بوده و اندازه آن از ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر متغیر است. این در حالی است که فراوانی تراهدریت کمتر از ۰.۵٪ است.

از آنجا که در این پژوهش، همیافتی کانه‌ها، محل پیدایش سری تنانیتی-تراهدریت و بافت‌های موجود در آنها برای مدل‌سازی خاستگاهی و تهنشست این سری اهمیت داشته است، در ادامه بافت‌های این کانه‌ها و چگونگی همیافتی آنها با کانه‌های دیگر توضیح داده می‌شود.

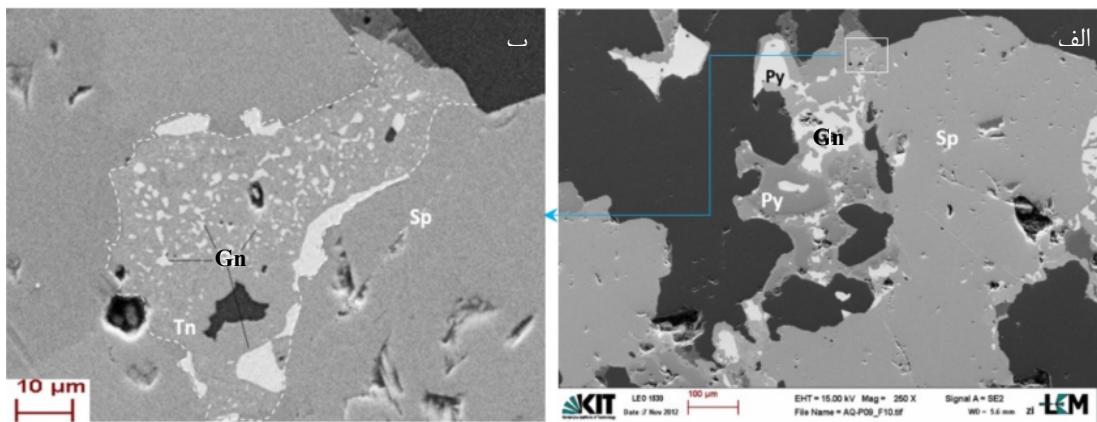
بافت‌های کانه‌های سری تنانیتی-تراهدریت

بافت جانشینی: تنانیتی اغلب دارای بافت جانشینی بوده و در لبه کانه‌های اسفالریت، پیریت، کالکوپیریت گالن جانشین شده است (شکل‌های ۴الف-د). سطوح هضم و گرد شده، شکل‌های خلیجی و باقی‌مانده کانیایی از مهم‌ترین بافت‌های شاخص جانشینی تنانیتی دیده شده هستند (شکل‌های ۴ث و ج).

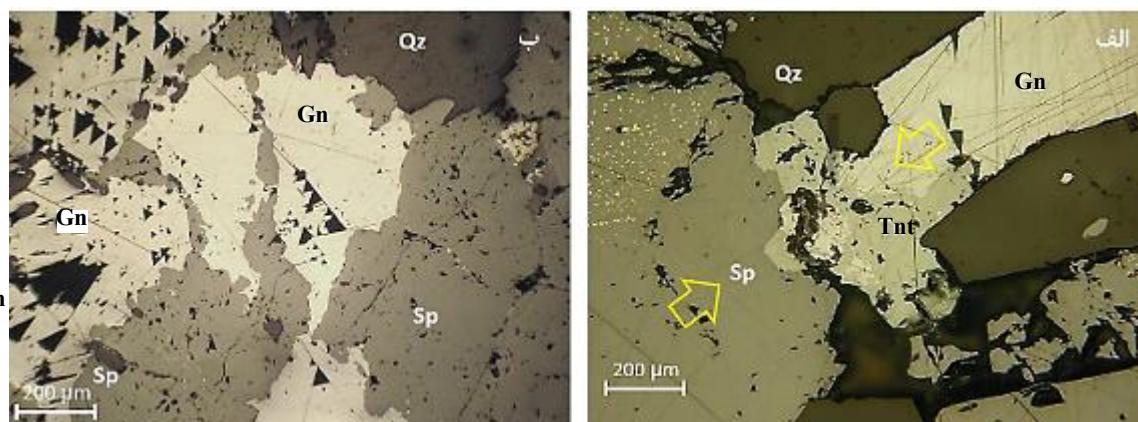
بافت سیمانی: در بسیاری از مقاطع بررسی شده، تنانیتی به صورت سیمان، خردۀای برشی پیریتی را در برگرفته است (شکل‌های ۴پ و ت)، قابل توجه است که بلورهای تنانیتی شکستگی و خردش‌گی ندارند که این می‌تواند بیانگر تشکیل ثانویه آنها باشد.

رفته و یا به طور چشمگیری حجم آنها کاهش یافته است (شکل‌های ۷ الف و ۸).

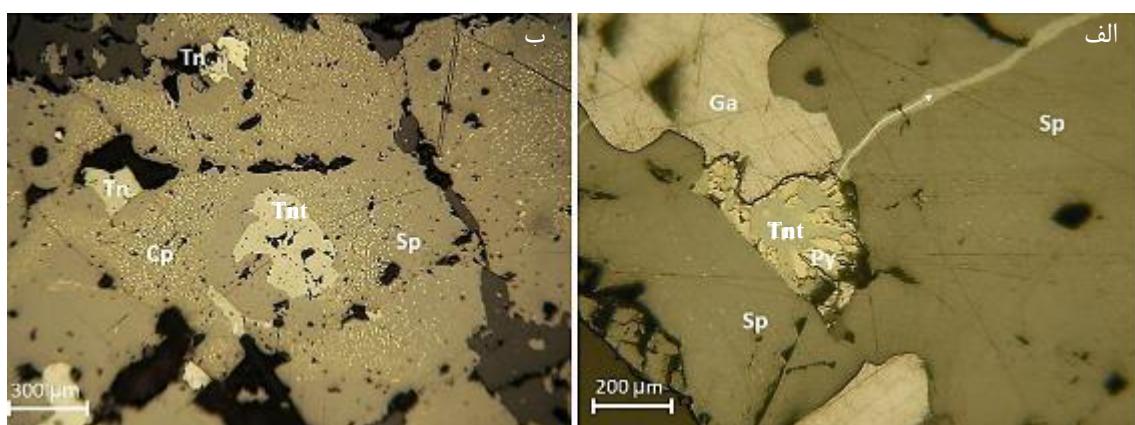
که تنانیت به صورت میانبار در اسفالریت دیده می‌شود، بافت ناامیختگی بلورهای اسفالریت پیرامون میانبار تنانیت از بین



شکل ۶ بافت نگاشتاری گالن- Tannerit در تصویر بازتابی میکروسکپ الکترونی که قطرک‌ها و شکل‌های کرمی‌مانند گالن (سفید) با تنانیت دربرگرفته شده‌اند (این تصویر در شکل ۴-ح آورده شده است). Ccp: کالکوپیریت، py: پیریت، Gn: گالن، Tnt: تنانیت و Qz: کوارتز.



شکل ۷ الف- تشکیل تنانیت در محل همبrij و فشردگی دو کانی گالن و اسفالریت. (به کاهش یا ناپدیدشدن قطرک‌های کالکوپیریت در اسفالریت توجه شود)؛ ب- تشکیل نشدنکانه تنانیت در اسفالریت و گالن‌های سالم و برشی نشده کانسنگ توده‌ای. (تصاویر در نور قطبیده مقاطع، xpl، تهیه شده‌اند).



شکل ۸ الف- تشکیل تنانیت در محل پیریت‌های برشی و خردشده در مرز اسفالریت و گالن. به مهاجرت محلول سازنده تنانیت از محل واکنش و تشکیل رگچه‌های تنانیت در اسفالریت توجه شود. ب- میانبار تنانیت در اسفالریت. به از بین رفتن بافت ناامیختگی یا کاهش شدید قطرک‌های کالکوپیریت پیرامون بلورهای تنانیت توجه شود.

حالت، تنانیتیت- تتراهدریت‌های روی‌دار نامیده می‌شوند و فرمول تقریبی سری آنها $(\text{Cu}, \text{Ag}, \text{Fe}, \text{Zn})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ است. درصد کاتیون‌های $(\text{Cu}, \text{Ag}, \text{Fe}, \text{Zn})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$ در کانسارهای مختلف متفاوت بوده و گاه ۲ تا ۳ کاتیون ممکن است وجود نداشته باشد، ولی مس اغلب وجود دارد [۳۹].

پ-ترکیب شیمیایی سولفوسالت‌های بررسی شده در بخش‌های مختلف کائسنگ متفاوت بوده و مقدار فلزات پایه آنها یعنی مس، روی، آهن و نقره وابسته به ترکیب شیمیایی کانی‌های کنار آنهاست و بسته به اینکه چه کانه‌ای با محلول‌های گرمابی گوگرد-آرسنیکدار هضم (جایگزین) شده باشد، ترکیب آنها تغییر می‌کند. برای مثال کانه‌های سولفوسالتی کنار گالن نقره بسیاری دارند و انواع سولفوسالت‌های جانشین اسفالریت، غنی از روی (تنانیت‌های روی‌دار) و انواع کانه‌های سولفوسالتی که جایگزین کالکوپیریت غنی از مس شده‌اند و نیز انواع تشکیل‌دهنده سیمان پیریت برشی و جانشین پیریت، دارای مقادیر آهن بیشتری هستند (جدول ۴).

ترکیب شیمیایی سولفوسالت‌ها بر پایه نتایج ریزپردازش الکترونی براساس نتایج تجزیه نمونه‌های برگزیده با دستگاه ریزپردازشگر الکترونی، فرمول تجربی کانه‌ها تعیین و چکیده آن در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج پردازش برخی از آنها در جدول‌های ۲ تا ۵ آورده شده است، بررسی شیمی این کانه‌ها نتایجی را در پی داشته است که در ادامه بیان می‌شود.

الف- سولفوسالت‌های موجود بیشتر از سری تنانیت- تتراهدریت هستند. ترکیب بخش عمده آنها به قطب غنی از آرسنیک نزدیک و تنانیتی بوده و نسبت As به Sb در نمونه‌ها بطور متوسط ۱۷ به ۱ است (جدول‌های ۲ و ۳). بهندرت ترکیب‌های حداواسط و تتراهدریتی و غنی از آنتیموان نیز دیده می‌شود. در یک نمونه نیز مقداری Te وجود دارد که در ساختار کانی گلدیلیدیت وارد شده است [۱۱].

ب- سری تنانیت-تتراهدریت شناسائی شده دارای مقادیر قابل توجه روی از ۰.۴٪ تا ۰.۸٪ است (جدول‌های ۲ تا ۵). نتایج نشان می‌دهند که کانی‌های سری تنانیت- تتراهدریت می‌توانند در ترکیب خود تا ۱۰٪ روی داشته باشند [۳۹، ۳۸] که در این

جدول ۳ نتایج تجزیه به روش ریزپردازش تنانیت غنی از روی و مس

Element	Weight %	Error	Atomic %	Error
S	۲۹.۹۲	±۰.۱۷	۴۶.۳۷	±۰.۲۷
Cu	۴۴.۴۹	±۰.۸۱	۱۷.۳۵	±۰.۶۴
Zn	۸.۱۱	±۰.۷۹	۶.۲۳	±۰.۶۱
As	۱۷.۴۸	±۰.۲۱	۱۱.۷۲	±۰.۱۴
	۱۰۰	-	۱۰۰	-

جدول ۴ نتایج تجزیه تتراهدریت غنی از روی و مس.

Element	Weight %	Error	Atomic %	Error
S	۲۴.۵۸	±۰.۱۵	۴۳.۸۱	±۰.۲۷
Mn	۰.۴۴	±۰.۱۱	۰.۴۶	±۰.۱۱
Fe	۲.۳۲	±۰.۱۳	۲.۳۸	±۰.۱۴
Cu	۳۸.۰۴	±۰.۷۷	۳۴.۲۲	±۰.۶۹
Zn	۶.۱۶	±۰.۷۴	۵.۳۸	±۰.۶۵
As	۱.۳۷	±۰.۰۷	۱.۰۴	±۰.۰۵
Sb	۲۷.۰۹	±۰.۲۱	۱۲.۷۲	±۰.۱
-	۱۰۰	-	۱۰۰	-

جدول ۵ نتایج تجزیه تراهدریت- تنانیت غنی از روی و مس.

Element	Weight %	Error	Atomic %	Error
S	۲۷.۴۴	±۰.۱۶	۴۶.۴۶	±۰.۲۷
Cu	۳۹.۴۸	±۰.۷۹	۳۳.۷۳	±۰.۶۷
Zn	۷.۲۴	±۰.۷۸	۶.۰۱	±۰.۶۵
As	۸.۱۸	±۰.۱۷	۵.۹۲	±۰.۱۲
Sb	۱۷.۶۶	±۰.۱۹	۷.۸۷	±۰.۱۰
-	۱۰۰	-	۱۰۰	-

با نفوذ و جایگزینی گنبدهای داسیتی و دایک‌های فلدسپات پورفیری در گستره کانسار، سیال‌های گرمابی غنی از گوگرد و آرسنیک و به مقدار کمتر آنتیموان شکل می‌گیرند. هم‌زمان فعالیت دوباره گسل‌های در برگیرنده کانسار سبب برشی شدن و خردشیدگی دوباره کانسنگ اولیه به ویژه کانه‌های سولفیدی اولیه آنها چون اسفالریت‌های کالکوپیریت‌دار، گالن و پیریت می‌شود که این فرآیند بینهای خود زمینه را برای نفوذ سیال‌های گرمابی فراهم می‌نماید. روشن است که خردشیدگی کانه‌ها طی فرآیند گسل‌ش سبب افزایش نسبت سطح به حجم کانه‌ها می‌شود و افزایش سرعت انجام واکنش‌های جانشینی را در پی خواهد دارد.

سیال‌های یاد شده با چرخش در بخش‌های برشی شده کانسار به دلیل گریزندگی بالای گوگرد و آرسنیک خود، شرایط ترمودینامیکی جدیدی را برای سامانه ایجاد کنند که سبب ناپایداری کانی‌های سولفیدی در بخش‌های خرد شده می‌گردد. در وضعیت جدید، کانی‌های برشی شده سولفیدی چون اسفالریت، کالکوپیریت و پیریت با سیال گرمابی غنی از گوگرد و آرسنیک وارد واکنش شده و کانی‌های سولفوسالت را به صرف روی اسفالریت، مسی کالکوپیریت، آهن پیریت و کالکوپیریت و نقره گالن و آرسنیک-آنتمیوان سیال گرمابی تشکیل می‌دهند. از دیدگاه ترمودینامیکی، کانه‌های سولفوسالتسی یعنی تناننتیت-تراهردیت پایدارترین شکل کانی‌ها در این شرایط هستند [۴۴] (شکل‌های ۸ و ۹).

در ادامه دلایل و شواهدی که این مدل بر پایه پیشنهاد شده است بیان می‌شود.

شواهد صحرایی

- فعالیت‌های آتشفسانی و پس از آتشفسان سبب تشکیل و تزریق محلول‌های غنی از آرسنیک در بخش‌های برشی شده کانسارهای قدیمی‌تر چون کانسارهای انگوران، آی قلعه‌سی و بایچه‌باغ و تشکیل کانسارهای آرسنیک-طلای یعنی زرشوران، آق دره، حلب و توزلار در گستره زمانی ۱۰ تا ۱۲ میلیون سال (حدود میوسن میانی تا پسین) شده است (شکل ۲) [۳۱-۱۶]. گفتنی است که آرسنیک‌زایی هنوز در منطقه ادامه دارد، بطوریکه در منطقه آی قلعه‌سی - عربشاه هنوز چشممه‌های گازدار غنی از آرسنیک دیده شده و به دلیل مقدار بالای آرسنیک اغلب سبب مرگ دامها می‌شود.

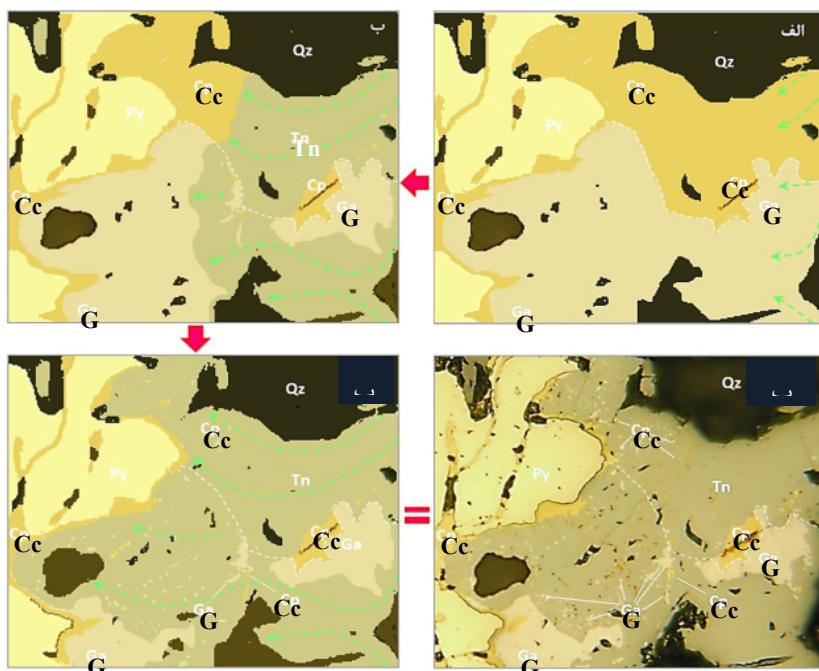
ت- میانبارهای کرمی‌شکل با بافت نگاشتاری یا شبهمیرمکیتی تناننتیت در واقع کانه گالن هستند. گالن تا حدود ۹۰٪ با تناننتیت جانشین شده است و میانبارهای یا قطرک‌ها، در واقع باقی‌ماندهای هضم و جانشینی گالن توسط تناننتیت هستند (شکل ۶) که در این حالت، مقدار نقره تناننتیت‌های این بخش‌ها نسبت به تناننتیت‌های جانشین پیریت و کالکوپیریت بیشتر است.

ث- بر پایه داده‌های ریزپردازش الکترونی، در یک نقطه کانه گلدفلدیت نیز شناسایی شد که در آن مقدار Te ۱۱٪۲۵ و Bi ۱۱٪۹۹ و Sb+As ۳٪۸ است.

ج- مقدار طلای این سولفوسالت‌ها بسیار ناچیز است. مقدار نقره تناننتیت بسیار کم است، ولی تتراهدریت‌های کنار گالن گاه تا ۵۵٪۰ پی‌پی‌ام نقره دارند (جدول ۶). در مجموع، سولفوسالت‌های آنتیموان‌دار (تتراهدریت) نسبت به انواع آرسنیک‌دار (تناننتیت) نقره بسیار بیشتری دارند.

مدل احتمالی تشکیل سری تناننتیت-تتراهدریت
مانند دیگر کانی‌ها، تشکیل سولفوسالت‌ها نیز به روش‌های مختلف امکان‌پذیر است. برخی از کانه‌های سولفوسالتسی به صورت اولیه و مستقیم از محلول‌های گرمابی ترسیب می‌شوند [۴۰]، بعضی به صورت مذاب‌های برآمده از فازهای بخار با دمای بالای نزدیک به دمای ماقماً دچار جدایش می‌شوند [۴۱، ۴۲]. گروهی دیگر از سولفوسالت‌ها بر اثر فرآیندهای ثانویه و در نتیجه باز تحرک عناصر در محیط‌های گرمابی شکل می‌گیرند [۷۶]، برای مثال در کانسارهای بلیکوسلی نروز، در اثر باز تحرک عناصر از سنگ معدن اصلی به سنگ دیواره، سولفوسالت‌های جدید شکل گرفته‌اند. بسیاری از پژوهشگران به خوبی به نقش بیسوموت در تمرکز طلا و جدایش آن از سیال‌های گرمابی اشاره نموده‌اند [۴۱-۴۳]. در این پژوهش، پیرامون مورد سوم تشکیل سولفوسالت‌ها بحث می‌شود.

بر پایه بازدیدهای صحرایی، بررسی‌های میکروسکوپی و ریزبافتی کانه‌ها، موقعیت مکانی آنها در کانه‌های دیگر و تجزیه‌های ریزپردازشی کانه‌ها، و بررسی پژوهش‌های انجام شده پیرامون کانسارهای دارای سولفوسالت، به‌ویژه کانه‌های سری تناننتیت-تتراهدریت روی دار یک مدل احتمالی برای تشکیل سولفوسالت‌های کانسار آی قلعه‌سی پیشنهاد شده است که در ادامه توضیح داده می‌شود.



شکل ۹ مراحل نفوذ محلول‌های غنی از آرسنیک و گوگرد و جاشینینی همزمان کالکوپیریت و گالن با تنانیت: الف- وضعیت اولیه کانه‌های گالن و کالکوپیریت پیش از نفوذ و چرخش سیال‌های آرسنیک‌دار و جایگزینی تنانیت. پیکان‌های سبز نفوذ محلول‌های غنی از آرسنیک و خط چین سفید مرز اولیه گالن و کالکوپیریت در تصویر بازسازی شده را نشان می‌دهند؛ ب- هضم و جایگزینی همزمان کانه‌های گالن و کالکوپیریت با محلول‌های غنی از آرسنیک و نهشت کانه تنانیت که جایگزین حدود ۵۰٪ کانه‌های گالن و کالکوپیریت شده است (تصویر بازسازی شده)؛ پ: هضم و جایگزینی همزمان کانه‌های گالن و کالکوپیریت با محلول‌های غنی از آرسنیک و نهشت کانه تنانیت که جایگزین حدود ۹۰٪ کانه‌های گالن و کالکوپیریت شده است (تصویر بازسازی شده)؛ ت- همان فرآیند تصویر پ در نمونه واقعی و نور قطبیده (به باقی‌مانده‌های گالن و کالکوپیریت در تنانیت توجه شود). میانبارهای گالن در زیر خط چین سفید، بیشتر گالن و میانبار بالای خط چین سفید، اغلب ترکیب کالکوپیریتی دارند.

جدول ۶ نتایج تجزیه تراهدریت غنی از روی و نقره

Element	Weight %	Error	Atomic %	Error
S	۲۸.۶۳	±۰.۱۷	۴۸.۷۳	±۰.۲۹
Cu	۴۲.۶۱	±۰.۸۶	۳۶.۶	±۰.۷۴
Zn	۴.۵۱	±۰.۸۱	۳.۷۶	±۰.۶۸
Ag	۰.۵۵	±۰.۱۲	۰.۲۸	±۰.۰۶
Sb	۲۳.۷۱	±۰.۴۹	۱۰.۶۳	±۰.۲۲
-	۱۰۰	-	۱۰۰	-

سولفوسالت در مقاطع میکروسکوپی نشان می‌دهد که تقریباً در همه مقاطع، کانی‌های سولفوسالتی در کنار کانی‌های سولفیدی اولیه وجود دارند و نمی‌توان آنها را به صورت مجزا و منفرد مشاهده کرد.

- کانه‌های سولفوسالت اغلب در بخش‌های برشی شده دیده می‌شوند و در بخش‌های خرد نشده کانسنگ بهویژه در بخش‌های بافت توده‌ای کانسنگ، بندرت می‌توان آنها را مشاهده نمود. در عوض، بیشترین تمرکز آنها در بخش‌های برشی شده است و اغلب به صورت سیمان قطعه‌های برشی شده سایر کانه‌های سولفیدی را در بر می‌گیرند.

- فعالیت دوباره گسل‌های پس از کانه‌زایی اصلی با راستای شمال‌شرق-جنوب‌غرب در کانسار آی قلعه‌سی (شکل ۳) از عوامل مهم و زمینه‌ساز نفوذ سیال‌های گرمابی بوده است. زیرا با ایجاد مناطق برشی شده، شرایط نفوذ سیال‌های گرمابی غنی از گوگرد، آرسنیک و آنتیموان را فراهم می‌آورد. فعالیت دوباره گسل‌های پس از کانه‌زایی اغلب زمینه را برای نفوذ سیال‌های گرمابی و یا جوی فراهم می‌کند که در هر حال، شرایط برای تشکیل کانی‌های جدید فراهم می‌شود [۴۲، ۴۱].

شواهد میکروسکوپی

- بررسی آماری محل پیدایش و موقعیت مکانی کانی‌های

تنانیتیت در لبه‌های اسفالریت می‌تواند از دیگر شواهد موجود باشند.

در این راستا، به نظر می‌رسد که آهن مورد نیاز برای تشکیل سولفوسالتس‌ها نیز به احتمال از پیریت و کالکوپیریت تامین شده باشد.

شواهد بررسی ریزپردازشی کانه‌های سولفوسالتس
چنان که در پیش‌تر اشاره شد، نتایج تجزیه‌ها به روش ریزپردازش الکترونی نشان می‌دهد که ترکیب سولفوسالتس‌ها در بخش‌های مختلف کانسنگ متفاوت است. چنین تغییراتی به احتمال بسیار ناشی از نوع و ترکیب شیمیایی کانی‌هایی است که با محلول‌های گرمابی گوگرد-آرسنیکدار وارد واکنش می‌شوند. با توجه به فرمول عمومی تنانیتیت سولفوسالتس‌ها (جدول ۵) نشان می‌دهد که سولفوسالتس‌ها در نتیجه واکنش کانی‌های سولفیدی برشی شده با محلول گرمابی غنی از آرسنیک و گوگرد تشکیل شده‌اند. وجود بافت‌های واکنشی در کانی‌های سولفوسالتس و سولفیدی نیز تا حدی این را تایید می‌کند.

شواهدی از کانسارهای سولفوسالتس‌دار

بررسی تعدادی از انواع کانسارهایی که سولفوسالتس‌های آنها در مراحل تاریخی و پایانی کانه‌زایی تشکیل شده‌اند، تا حدی می‌تواند مدل پیشنهادی برای تشکیل سولفوسالتس‌های کانسار آی-قلعه‌سی را تائید نماید. بررسی‌های بافتی این کانسارها نشان می‌دهد که در سولفوسالتس‌ها و کانی‌های سولفیدی بیشتر بافت‌های جانشینی، واکنشی، فروپاشی [۳۶، ۳۷]، خلیج خورده‌ی، رگچه‌ای، و میرمکیتی مانند یا نگاشtar گونه [۳۷]، باقی‌مانده کانی‌ای و سیمان برشی دیده می‌شود که تا حد بسیاری تشکیل آنها را به فرآیندهای زمین‌ساختی و واکنش‌های ثانویه مربوط می‌کند. این بافت‌ها در مقاطع بررسی شده کانسارهای آی-قلعه‌سی [۱۲، ۱۰]، زرشوران [۱۶، ۱۷]، منطقه معدنی بریکسلگ و شواز تریول شمالی اتریش [۳۶] و پی‌فاندر برگ [۳۷]، قلعه زری، منطقه بی‌جویی کوه دم اردستان [۴۴] و چاه زرد اردستان [۴۷، ۴۸] شوراب فردوس [۴۹] نیز شواهد خوبی از این فرآیند هستند. در کانسار قلعه‌زری در کانه گالن و سولفوسالتس‌های بیسموت یعنی آیکنیت، ماتیلدیت، ویتچنیت که در مراحل دوم تا پنجم کانه‌زایی تشکیل شده‌اند، بافت‌های مشابه بخوبی دیده می‌شوند [۲۳]. گفتنی است که در بیشتر این کانسارها، کانه‌های اسفالریت، گالن و کالکوپیریت به عنوان کانه اصلی و یا کانه فرعی یافت می‌گردد. که این ضرورت

- کانه‌های پیریت و اسفالریت متناسب با چسبندگی خود، در همبری هم دچار خردشدنگی، برشی شدن و درزه‌دار شدن شده‌اند (شکل‌های ۴، ب، پ، ت، ج و ح). بلورهای گالن به دلیل چسبندگی ویژه خود، دستخوش تغییر شکل و جهت یافته شده‌اند که در نمونه‌های دستی نیز به خوبی دیده می‌شود.

- در محل همبری سولفوسالتس‌ها با کانی‌های سولفیدی، اغلب بافت‌های فروپاشی، واکنشی و غیره دیده می‌شود (شکل ۴).

- بررسی‌های ریزبافتی و تجزیه‌های ریزپردازشی نشان می‌دهند که وجود کانه‌های پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن نیز در تشکیل سولفوسالتس‌های سری تنانیتیت- تتراهدریت و خردشدنگی آنها طی تنش‌های زمین‌ساختی بسیار مهم بوده (شکل‌های ۵، ۷، الف و ۹) بطوریکه وجود تنانیتیت ثانویه کاملاً وابسته به وجود کانه‌های مس‌دار بویژه کالکوپیریت است [۱۰، ۱۲]: بنظر می‌رسد که مس مورد نیاز برای تشکیل سولفوسالتس‌ها از کالکوپیریت تامین می‌شود و در صورت نبود آنها، واکنشی بین سیال‌های با گریزندگی بالای گوگرد و آرسنیک و کانی‌های سولفیدی انجام نشده و کانی‌های سولفوسالتسی تشکیل نمی‌شوند در این حالت، آرسنیک محلول گرمابی صرف تشکیل آرسنوفیریت و یا پیریت‌های آرسنیکدار می‌گردد [۴۵، ۴۶]. به بیان دیگر، پیش درآمد تشکیل کانه‌های سولفوسالتسی وجود کانه‌های سولفیدی و تزریق سیال گرمابی با گریزندگی بالای آرسنیک و گوگرد است. که سرانجام منجر به واکنش کانه‌ها با سیال‌های گرمابی و تشکیل سولفوسالتس‌ها می‌شود. وجود بافت‌های جانشینی تنانیتی در کالکوپیریت و از بین رفتن قطرک‌های کالکوپیریتی اسفالریت (بافت نآمیختگی) پیرامون بلورهای تنانیتی (شکل ۸) تا حدی می‌تواند دلیلی بر مصرف مس کالکوپیریت برای تشکیل تنانیتی باشد. البته در این بین نباید اثر تنش‌های زمین‌ساختی و یا فشار ناشی از تبلور تنانیتی را در از بین رفتن بافت نآمیختگی نادیده گرفت. وجود میانبارهای میکروسکوپی و ریزتر از جنس پیریت، کالکوپیریت و گالن در سولفوسالتس‌ها به احتمال بسیار گویای انجام واکنش بین کانه‌های سولفیدی خرد شده و سیال گرمابی غنی از گوگرد و آرسنیک است. به بیان دیگر، وجود میانبارهای کانی‌ای سولفیدی در سولفوسالتس‌های این کانسار که گاه بطور همزمان دو تا سه نوع کانه را در بر می‌گیرند (شکل‌های ۶ و ۹) می‌تواند نشانگر رخداد این نوع واکنش‌ها باشد؛ میانبارهای کانی‌ای، در واقع باقیمانده‌های کانی‌ای کانه‌های سولفیدی طی این نوع واکنش‌ها هستند. وجود بافت نگاشتاری تنانیتی- گالن، بافت‌های جانشینی در پیریت و کالکوپیریت، سیمان تنانیتی خرددهای برشی پیریت و کالکوپیریت و جانشینی

شیمیابی کانی‌های جایگزین شده در آنهاست. به بیان دیگر، ترکیب آنها تابع ترکیب کانه‌های سولفیدی جانشین شده است. به نظر می‌رسد که کانه‌های سولفوسالتی کانسار آی قلعه‌سی در فازهای تاخیری تشکیل شده‌اند و شکل‌گیری آنها در اثر جایگزینی گنبدهای داسیتی ایوب انصار و دایک‌های فلدسپات پورفیری در منطقه آی قلعه‌سی، گسلش و فعالیت دوباره گسل‌های در بردارنده کانسار، نفوذ و چرخش محلول گرمابی برآمده از گنبدهای داسیتی بوده که سبب تغییرات دمایی و نفوذ محلول‌های با گریزندگی بالای گوگرد، آرسنیک \pm آنتیموان شده است. محلول‌های شکل گرفته با نفوذ و چرخش در بخش‌های برشی شده کانسار سبب برهم زدن تعادل کانه‌های سولفیدی و سرانجام تشکیل کانه‌های سولفوسالت سری تنانتیت-تراهدریت به صرف فلزهای پایه کانه‌های سولفیدی می‌شود (شکل ۹).

قدرتانی

در خاتمه نویسندها بروخود لازم می‌دانند که از راهنمایی‌های ارزنده آقایان دکتر رشید نژاد و دکتر موسوی مطلق و نیز خانم دکتر یاسمی، مدیران و دست‌اندرکاران شرکت‌های توسعه معدن روی ایران، شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، شرکت پویا زرگان آق‌دره، آقای مهندس حیدری و آقای کریمی از شرکت زمین معدن حلب که اطلاعات ارزشمندی را در اختیار نگارندگان گذاشته‌اند، صمیمانه تشکر نمایند.

مراجع

- [1] George L. L., Cook N.J., Ciobanu C.L., "Minor and Trace Elements in Natural Tetrahedrite-Tennantite: Effects on Element Partitioning among Base Metal Sulphides", Journal of Minerals, 2017 . p. 25.
- [2] George, L.L.; Cook, N.J.; Ciobanu, C.L. , "Partitioning of trace elements in co-crystallized sphalerite-galena-chalcopyrite hydrothermal ores", Ore Geology Reviews, 2016. , p. 77
- [3] Karimpour, M. H., Large, R. R., Razmara1, M., Pattrick, R. A. D., "Bi-sulfosalt mineral series and their paragenetic associations in specularite-rich Cu-Ag-Au deposit, Qaleh-Zari mine, Iran", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy , vol. 13, no. 2, 2005.
- [4] Zhu Y.F., An F., Tan J., "Geochemistry of hydrothermal gold deposits: A review", Geoscience frontiers, Vol. 2, no.3, 2011, Pages 367-374.
- [5] Hackbarth C.J., Petersen U., "A fractional crystallization model for the deposition of argentian tetrahedrite", Economic Geology 79 (3), 1984, 448–460.

وجود کانه‌های سولفیدی پایه را برای تشکیل سولفوسالت‌ها تأثید می‌کند.

روشن است که سولفوسالت‌ها همواره از فرآیندهای ثانویه تشکیل نمی‌شوند، در بعضی از کانسارها چون کانسارهای مس منطقه شواز و بربکس لگ اتریش [۳۶]، سولفوسالت‌های نسل اول به صورت کاملاً اولیه و سولفوسالت‌های نسل دوم به صورت ثانویه تشکیل شده‌اند [۳۷]. وجود مزه‌های سه‌گانه تعادلی بین کانه‌های سولفوسالتی و سولفیدی نشانگر تشکیل اولیه آنها بوده که کانسارهای بلیک و سلی نروز [۷]، کالگورلی، مدلکریتینگ، کمل‌هسکوت و گریت بلدر استرالیا از جمله آنهاست [۱].

بررسی‌های پیشین نشان می‌دهد که واکنش‌های معکوس نیز امکان پذیر هستند، یعنی با تغییر شرایط ترمودینامیکی امکان ایجاد کانه‌های سولفیدی از کانه‌های سولفوسالت نیز وجود دارد. پژوهش‌های انجام شده پیرامون کانسارهای مختلف از جمله بلیک و سلی نروز [۳۶,۷] نشان می‌دهد که با نفوذ محلول‌های گرمابی و تغییر گریزندگی گوگرد و دما، کانه‌های سولفوسالت نسل اول یعنی تنانتیت، تراهدریت گوگرد، با هم واکنش داده و کانه‌های سولفوسالت نسل دوم چون انارژیت، کوبانیت و کانه‌های سولفیدی استیبنیت، اسفالریت، پیریت و سولفوسالت‌های سری تنانتیت-تراهدریت نسل دوم را به وجود آورده‌اند [۴۵,۳۷,۳۶].

شرایط ترمودینامیکی تشکیل سولفوسالت‌ها

تغییر دما و گریزندگی عناصر در محلول‌های گرمابی بهویژه گوگرد از عوامل اصلی ناپایداری کانه‌ها و بازتحرک عناصر آنها در کانسارها هستند [۴۵,۳۷,۳۶]. کاهش دما، آمیختگی سیال-های گرمابی و تغییر گریزندگی گوگرد [۴۵,۳۷,۳۶]، آرسنیک، آنتیموان و تلوریم [۵۰,۳۹] نیز از عوامل تنهشت سولفوسالت‌ها هستند. بنظر می‌رسد که گریزندگی بالای گوگرد و آرسنیک برای تنهشت تنانتیت، گریزندگی بالای گوگرد و تلوریم برای ایجاد گلدفلدیت همراه با تغییرات دمایی احتمال بسیار نقش مهمی در ناپایداری کانه‌های سولفیدی و بازتحرک عناصر آنها و تنهشت سولفوسالت‌های کانسار آی قلعه‌سی داشته‌اند.

برداشت

سولفوسالت‌های کانسار آی قلعه‌سی بیشتر از سری تنانتیت-تراهدریت هستند. ترکیب اصلی آنها به قطب غنی از آرسنیک نزدیک‌تر است و بیشتر ترکیب تنانتیتی دارند. ترکیب شیمیابی این کانه در بخش‌های مختلف کانسنگ متفاوت بوده و مقدار فلزات پایه آنها یعنی مس، روی، آهن و نقره وابسته به ترکیب

- alteration and mineralization", Mineralium Deposita, vol. 43, , 2008 pp. 383-404.*
- [19] Marangi H., Azimzadeh M., Nabatian G., Kohestani H., "Application of mineralogy and trace/rare earth elements geochemistry to determine of strategic element-bearing phases in the Angouran Zn-Pb mine, SW Zanjan", Journal of Advanced Applied Geology, vol. 25, , 2018, pp. 95-113.
- [20] Gilg H.A., Boni M., Balassone G., Allen C.R., Banks D., Moore F., "Marble-hosted sulphid ores in the Angouran Zn-(Pb-Ag) deposit, NW Iran: interaction of sedimentary brines with a metamorphic core complex", Mineralium Deposita, vol. 41, 2006, pp. 1-16 .
- [21] Boni M., Gilg H.A., Balassone G., Schneider J., Allen C.R., Moore F. "Hypogene Zn carbonate ores in the Angouran deposit, NW Iran", Mineralium Deposita, vol. 42:, 2007, pp. 799-820.
- [22] Lotfi M., "Mineralization and formation of Baycheh Bagh Ni-Co-As-Base metals in northwest of Zanjan, Iran", Quarterly of Geosciences, vol. 53, 2004, pp. 40-55.
- [23] Karami F., Kohestani H., Mokhtari M.A.A., Azimzade A.M., "Geological and mineralization characteristics of Halab Zn-Pb (Ag) deposit, SW Zanjan", second international congress of geosciences Geological Survey of Iran , 2016.
- [24] Mohammadi Niae R., "Exploration report of Lead and Zinc of Alamkandi mine, Calcimin Company", 2006, p.150.
- [25] Nafisi R., Kouhestani H., Mokhtari M.A.A., Sadeghi M., "Geological and mineralogical characteristics of Halab Au mineralization, SW of Zanjan", in 35th national conference of earth science, 2017.
- [26] Taghilou R., Jahangiri A., Mohammadi Niae R., "Investigation of mineralogy, geochemistry and P and T conditions of amphibolite rocks of Qozlou region", in 11th conference of Iranian Geological Society, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhahd, 2007.
- [27] Najafzade M., Ebrahimi M., Mokhtari M.A.A., Kohestani H., "Mineral occurrence in Arabshah Carlin type mineralization of Au, As, Sb of the in the metallogenic zone of Takab-Anguaran-Takht-e-Soleyman, West Azarbaijan", Journal of Advanced Applied Geology, vol. 22, 2017, pp. 62-77.
- [28] Heydari M., Ghaderi M., Kohestani H., "Sediment-hosted epithermal gold mineralization of Arabeshah, SE Takab, NW Iran", Scientific Quaterly Journal, vol. 27, no. 105, 2016, pp. 265-282.
- [29] Talebi L., Mokhtari M.A.A., "The Arpachay mineralization occurrence, north of Takab: an epithermal base metal mineralization in the Takab-
- [6] Reich M., Kesler S.E., Utsunomiya S., "Solubility of gold in arsenian pyrite", Geochimica et Cosmochimica Acta , Volume 69, Issue 11, 69, 2005, p2781-2796.
- [7] Cook N.J., Spry P., Vokes F.M., "Mineralogy and textural relationships among sulphosalts and related minerals in the Bleikvassli Zn-Pb-(Cu) deposit, Nordland, Norway", Mineralium Deposita 34(1), 1998, p 35-56.
- [8] Bose, P., Sharma, A., "Role of iron in controlling speciation and mobilization of arsenic in subsurface environment", Water Research Volume 36, Issue 19, 2002, P 4916-4926.
- [9] Blanchard M., Alfredsson M., Brodholt J., Wright, K., Catlow, R.,R., A., "Arsenic incorporation into FeS₂ pyrite and its influence on dissolution: A DFT study", Geochimica et Cosmochimica Acta, Volume 71, Issue 3, 2007, pages 624-630.
- [10] Mohammadi Niae R., Daliran F., Nezafati N., Ghorbani M., Sheikh Zakariaei J., Kouhestani H., "The Ay Qalasi deposit: An Epithermal Pb-Zn (Ag) mineralization in the Urumieh-Dokhtar Volcanic Belt of northwestern Iran", Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen, vol. 19, Issue 3, 2015pp. 263-274.
- [11] Shirkhani M., "Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Lead-Zinc Deposit of Ayqalasi, Southeast of Takab", MS Thesis, Tarbiat Modares University, 2008, p. 143.
- [12] Mohammadi Niae R., "Genesis and economic Geology of Ay-Qalasi lead and zinc deposit with special emphasize on mineralization of precious metals", PHD Thesis , 2015, p234.
- [13] Sahandi R., "Structural geology map of Iran (1: 1000000 scale)", Geol. Surv. of Iran, 2013.
- [14] Ghorbani M., "Geology and Metallurgy of Takab Region", Journal of Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, 2001, p. 164-181.
- [15] Alavi M., Hajian J., Amidi M., Bolourchi H., "Geology of Takab-Saein-Qaleh, 1:250000", Report No. 50, Geological Survey of Iran., GSI, 1982.
- [16] Yousefi T, Abedini A, Aliyari F, Calagari A., "Mineralogy and fluid inclusion investigations in the Zarshuran gold deposit, north of Takab, NW", IranIranian Journal of Crystallography and Mineralogy, vol. 27, no. 3, 2019, pp. 537-550.
- [17] Karimi M., "The occurrence of Getchellite (AsSbS₃) at Zarshuran As-Au deposit", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, vol. 17, no. 2, 2009, p:231-238.
- [18] Daliran F., "The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agdarreh, Takab geothermal field, NW Iran, hydrothermal

- [40] M. Reed, "Sulfide Mineral Precipitation from Hydrothermal Fluids", *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol. 61, no. 1, 2006 pp. 609-631.
- [41] Mohammadi Niaezi R., "Faulting an active process in formation of sulfide-nonsulfide ores of Angouran deposit", 8th Iranian society of economic geology, Zanjan University , 2017, p.8.
- [42] Tooth, B., Ciobanu, C., L., Green, L., O'Neill, B., "Bi-melt formation and gold scavenging from hydrothermal fluids: An experimental study", *Geochimica et Cosmochimica Acta* , vol. 75, no. 19, 2011, pp. 5423-5443.
- [43] Henley, R., Mavrogenes, J., Tanner, D., "Sulfosalt melts and heavy metal ($As \square Sb \square Bi \square Sn \square Pb \square Tl$) fractionation during volcanic gas expansion: The El Indio (Chile) paleo-fumarole", *Geofluids*, vol. 12, 2012, p. 199-215.
- [44] Mehrabi B., Tale Fazel E., "Mineralogy and Cu-Au-Bi ore paragenesis of Kuh-e Dom prospecting area (northeastern Ardestan), Anarak metallogenic province", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* , vol. 24, no. 4, 2017, pp. 635-646.
- [45] Seal, R. R., Essene, E. J., Kelly W. C., "Tetrahedrite and tennantite; evaluation of thermodynamic data and phase equilibria", *The Canadian Mineralogist*, vol. 28, 1990, pp. 725-738.
- [46] Asadi H.H., Voncken J.H.L., Kanel R.A., Hale, M., "Petrography, mineralogy and geochemistry of the Zarshuran Carlin-like gold deposit, northwest Iran", *Mineralium Deposita* , vol. 35, 2000, pp. 656-671.
- [47] Kouhestani, H., Ghaderi, M., Large, R., R., Zaw, K., "Texture and chemistry of pyrite at ChahZard epithermal gold-silver deposit, Iran", *Ore Geology Reviews*, vol. 84, 2017, p. 80–101.
- [48] H. Kouhestani, "Geology, Alteration, Isotope Geochemistry and Origin of Chah Zard Ag-Au Deposit Southwest of Yazd", Ph.D. thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 2011, p. 285.
- [49] Mehrabi B., Tale Fazel E., "The role of magmatic and meteoric water mixing in mineralization of Shurab polymetal ore deposit South of Ferdows: isotope geochemistry and microthermometry evidences", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 19 (1), 2011, pp. 121-130.
- [50] Whitney D. L., Evans B. W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals"American Mineralogist" , 2010 Volume 95(1), pages 185–187.
- Angouran-Takht-e-Soleyman metallogenetic zone", Earth Sciences Journal, 2017, pp. 281-296.*
- [30] Heidari, S.M., Ghaderi, M., Kohestani, H., Hosseini, M., "Touzlar Epithermal Au-Ag (Cu) Deposit, Subvolcanic Intrusion-related of Intra-Arc Extensional Setting, Northwest Mahneshan, Iran", *Earth Sciences Quarterly* , vol. 94, 2015, pp. 329-348.
- [31] Rahmati N., Mokhtari M.A.A., "Ebrahimi M., Nabatian G., "Geology, mineralogy, structure and texture of Agh-Otagh base-precious metal mineralization, North Takab", journal of petrology, 2017, Pages 157 to 180.
- [32] R. Mohammadi Niaezi, "Final exploration report of Chichaklou Lead-Zinc deposit", Internal reports of Madan-Zamin company, 2004, pp.120.
- [33] Fonodi M., Hariri A., "Geological map of 1: 100,000 Takab", Geological Survey of Iran, 2011.
- [34] M. Ghorbani, *The Economic Geology of Iran: Mineral Deposits and Natural Resources*", 2013, pp.569.
- [35] Daliran, F., Pride, K., Walther, J., Berner, Z.A., Bakker, R.J., "The Angouran Zn (Pb) deposit, NW Iran: evidence for a two stage, hypogene zinc sulfide zinc carbonates mineralization", *Ore Geology Reviews* , vol. 53, pp. 373-402, 2013.
- [36] Krismer M., Vavtar F., Tropper P., Kaindl R., Satory B., "The chemical composition of tetrahedrite-tennantite ores from the prehistoric and historic Schwaz and Brixlegg mining areas (North Tyrol, Austria)", *European Journal of Mineralogy*, vol. 23, no. 6, pp. 925-936, 2011.
- [37] Krismer M., Vavtar F., Tropper P., Kaindl R., Satory B., "Mineralogy, mineral chemistry and petrology of the Ag-bearing Cu-Fe-Pb-Zn sulfide mineralizations of the Pfunderer Berg (South Tyrol, Italy)", *Austrian Journal of Earth Sciences*, vol. 104, no. 1, pp. 36-48, 2011.
- [38] Fadda S., Fiori M., Maria Grillo S., "Chemical variations in tetrahedrite - tennantite minerals from the Furtei epithermal Au deposit, Sardinia, Italy: Mineral zoning and ore fluids evolution", *Academi of Sciences Geochemistry, Mineralogy and Petrology*, vol. 43, no. Bulgarian Academi of Sciences Geochemistry, Mineralogy and Pe, 2005.
- [39] Moëlo Y., Makovicky E., Mozgová N., Jambor J., Cook N., Pring A., Paar W., Nickel Ernest H., Graeser S., Karup-Møller S., Balic-Žunic T., Mumme W., Vurro F., Topa D., "Sulfosalt systematics: a review", Report of the sulfosalt sub-committee of the IMA Commission on Ore Mineralogy, *European Journal of Mineralogy*, vol. 20(1), 2008, pp. 7-46.