

بررسی کانی‌شناسی، زمین شیمی و میانبارهای سیال در رخداد معدنی آلچه‌قشلاق، ورزقان، استان آذربایجان شرقی

حسین ناصری^{۱*}، علی اصغر کلاگری^۱، سید غفور علوی^۱، سید مهران حیدری^۲

۱- گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین شناسی و معدنی کشور، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱/۱۶، نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۲/۱۰)

چکیده: رخداد معدنی آلچه‌قشلاق، در شمال ورزقان واقع بوده و بخشی از کمربند فلزایی ارسباران است. سنگ‌های میزبان کانه‌زایی شامل داسیت، ریولیت، ریوداسیت و آندزیت ائوسن هستند که با توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق قطع شده‌اند. این سامانه با انواع دگرسانی گرمابی (سیلیسی، آرژیلی و پروپیلیتی) فعالیت خود را با ایجاد برش‌های گرمابی آغاز کرده و با نفوذ سیال‌های سیلیسی - سولفیدی و باریتی تداوم یافته است. از ویژگی‌های اصلی کانه‌زایی، وجود کانه‌زایی (درون‌زاد و برون‌زاد) در راستای پهنه‌های شکستگی و برشی، به صورت جان‌شینی، افشان و رگه - رگچه‌ای است. کانی‌های پیریت، اسفالریت، گالن، آرسنوپیریت، کالکوپیریت و تتراهدريت همراه با پاتله کوارتز در مرحله درون‌زاد و کانی‌های ثانویه شامل کالکوسیت، مالاکیت، آزوریت، گوتیت و هماتیت در مرحله برون‌زاد تشکیل شده‌اند. بررسی‌های زمین‌شیمی بر رگه‌های سیلیسی نشانگر حضور طلا و فلزهای پایه (سرب، روی و مس) با بیشترین همبستگی بین طلا با نقره و آرسنیک است. نتایج بررسی میانبارهای سیال در بلورهای کوارتز، باریت و اسفالریت در مرحله دوم کانی‌زایی نشان دهنده دماهای همگن‌شدگی بین ۱۴۰ تا ۳۹۴ درجه‌سانتی‌گراد و شوری از ۵ تا ۲۰/۹ درصد وزنی معادل نمک طعام است. همچنین حضور همزمان میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع و تک‌فازی گازی و بافت‌های برشی گرمابی به فرآیند جوشش و افت فشار همراه با نهشت کانی‌های سولفیدی اشاره دارند. بر این اساس سامانه‌های دگرسانی و رخداد معدنی آلچه‌قشلاق بیشترین شباهت را با ذخایر فراگرمایی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: کانه‌زایی؛ فراگرمایی؛ میانبارهای سیال؛ آلچه قشلاق؛ ورزقا.

مقدمه

حفر ۱۴ گمانه پی جویی تفصیلی فعالیت پی‌جویی ادامه داشته و در حال حاضر در مرحله پی‌جویی تکمیلی است. این کانسار از نظر پهنه‌های ساختاری - رسوبی در پهنه البرز - آذربایجان (شکل ۱ الف)، و از دیدگاه فلزایی، در پهنه کانه‌زایی ارسباران [۲، ۱] (شکل ۱ الف) قرار دارد. این پهنه از بارزترین مناطق دارای ذخایر فلزی در ارتباط با توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق به سن الیگومیوسن (پورفیری، اسکارن و فراگرمایی) چون کانسارهای پورفیری سونگون [۳-۶]، مسجدداغی [۷]،

کانه‌زایی طلا - فلزهای پایه آلچه‌قشلاق در استان آذربایجان - شرقی، ۱۷ کیلومتری شمال شهرستان ورزقان بین طول‌های $38^{\circ}38'11''$ و $46^{\circ}40'23''$ شرقی و عرض‌های $38^{\circ}37'32''$ شمالی قرار دارد. پتانسیل کانه‌زایی در این منطقه، نخستین بار توسط کارشناسان سازمان زمین‌شناسی و پی‌جویی معدنی شمال غرب کشور به روش پی‌جویی زمین - شیمی ناحیه‌ای و چکشی شناسایی شد و در سال گذشته با

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۴۱۲۵۷۳۴۲، پست الکترونیکی: Hossein.nasari@Tabrizu.ac.ir

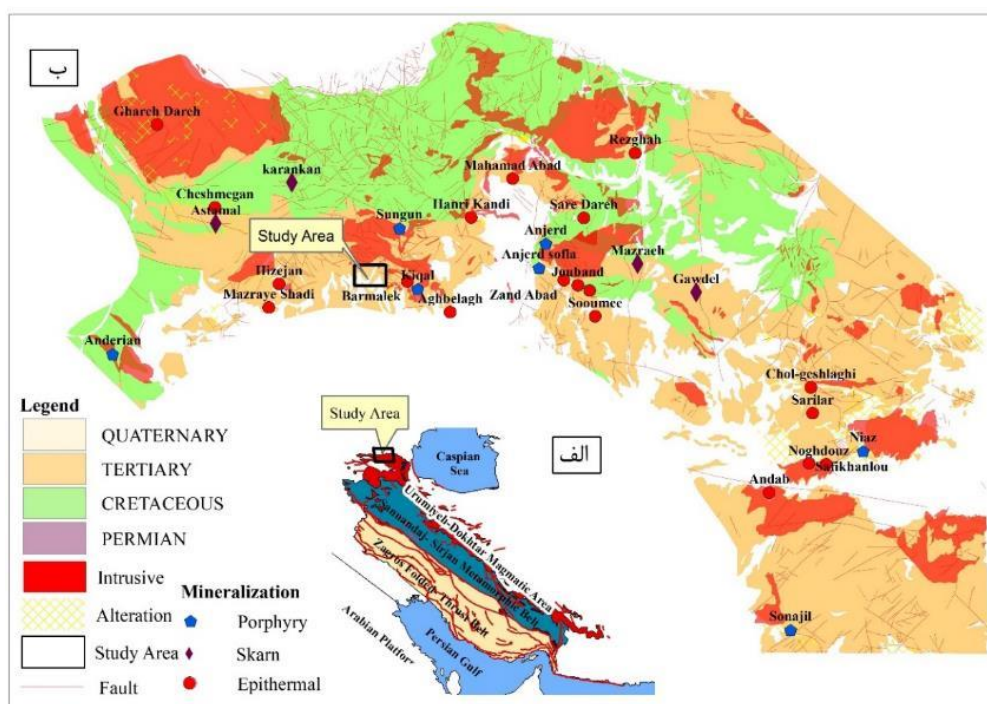


کاربردی بتواند الگوی اکتشافی مناسبی برای ذخایر دیگر در این پهنه و سایر پهنه‌های کشور فراهم نماید.

زمین‌شناسی عمومی

چنان که بیان شد، منطقه آلچه‌قشلاق بخشی از کمربند فلزایی ارسباران (شکل ۱ ب) بوده که با درازای حدود ۴۶۶ کیلومتر و پهنای حدود ۶ تا ۸۶ کیلومتر دربرگیرنده نهشته‌های آتشفشانی- رسوبی کرتاسه و سنوزوئیک و همچنین، توده‌های نفوذی سنوزوئیک است (شکل ۱ الف). حضور رخنمون‌های نادری از سازندهای پرکامبرین و پالئوزوئیک شبیه ایران مرکزی، شاهدی بر تاریخچه یکسان این مناطق، آذربایجان و ایران مرکزی، در دوره‌های یاد شده است [۳۳]. نهشته‌های فیلیش‌گونه کرتاسه، کربنات‌های سکوی قاره‌ای همراه با سنگ های بیشتر آتشفشانی سنوزوئیک، نهشته‌های قدیمی‌تر را در این کمربند (ارسباران) می‌پوشاند. توده‌های نفوذی الیگومیوسن [۳۴-۳۶] در این کمربند عامل اصلی، ایجاد پهنه- های دگرسانی گسترده و کانی‌زایی‌های گرمایی متعدد توسط پژوهشگران مختلف در نظر گرفته شده‌اند [۳۶-۳۸]. به بیان بهتر، حجم بالای فوران‌های آتشفشانی و نفوذ توده‌های نیمه- عمیق با ترکیب متنوع، امکان ایجاد انواع ذخایر گرمایی را در این کمربند فراهم کرده است (شکل ۱) [۳۹].

سوناجیل [۸، ۹]، هفت چشمه [۱۰]، صاحب‌دیوان [۱۱]، کیقال [۱۲، ۱۳]، دره علی‌جواد [۱۴]، ذخایر اسکارنی مس سونگون [۱، ۱۵]، مس اسکارنی مزرعه [۱۶]، معدن انجرد [۱۷، ۱۸]، گودال [۱۹] و ذخایر طلای فراگرمایی چون شرف آباد- هیزه‌جان [۲۰، ۲۱]، زگلیک- ساریلار [۲۲، ۲۳]، انیق- قره‌چیلر [۲۴]، اندریان و آسترقان [۲۵-۲۸]، مزرعه شادی [۲۹]، نبی‌جان [۳۰] و صفی‌خانلو- نقدوز [۳۱] است. در واقع، این کمربند ماگمایی معرف بخشی از دگرگونی‌ها و تشکیل نفوتیتیس (کوهزاد زاگرس) بوده که از نظر موقعیت زمین‌پویایی، منطبق بر کرانه فعال قاره‌ای است [۳۲]. بر این اساس، حضور کانی‌زایی‌های مس، مولیبدن و فلزهای قیمتی چون طلا در این پهنه بر اهمیت پژوهش پیرامون شرایط فیزیکوشیمیایی و چگونگی تشکیل سامانه‌های کانه‌دار آن می‌افزاید. افزون بر این، تاکنون بررسی دقیق و جامعی از نظر کانه‌زایی بر رگه‌های کانه- دار منطقه آلچه‌قشلاق انجام نشده است. از این رو در این پژوهش، بر پایه بررسی‌های زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی، ساختار و محیط تشکیل، روابط کانی‌شناسی، زمین‌شیمی، دگرسانی و میانبارهای سیال (با استفاده از کانی کوارتز و باریت همزاد با کانی‌سازی سولفیدی و کانی اسفالریت) درک مناسبی از نوع و روند کانه‌زایی و ویژگی‌های فیزیکو- شیمیایی سیال‌های کانه‌دار به دست آمده است. امید است این پژوهش از نظر



شکل ۱ الف) موقعیت رخداد معدنی آلچه‌قشلاق بر پهنه‌های ساختاری ایران [۳۳]. ب) موقعیت پهنه فلزایی ارسباران (بر گرفته از مرجع [۳۹]).

روش بررسی

این پژوهش در دو بخش شامل بازدیدهای صحرایی و آزمایشگاهی با نمونه‌برداری از واحدهای سنگی، پهنه‌های دگرسان و پهنه‌های سیلیسی و باریتی کانه‌دار به تعداد ۷۰ نمونه سطحی انجام شده است. در این بین، ۲۵ نمونه مناسب برای تهیه مقاطع نازک و ۱۰ نمونه برای تهیه مقطع صیقلی انتخاب شدند. این مقاطع با میکروسکوپ نوری عبوری-بازتابی در دانشگاه تبریز بررسی شدند. همچنین تعداد ۲۲ نمونه برای تعیین مقادیر عناصر فرعی به روش طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES) و طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) در آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی و پی‌جویی معدنی تجزیه گردیدند (جدول ۱). افزون بر این، به منظور بررسی سنگ‌نگاری و ریزدماسنجی از کانی‌کوارتز، اسفالریت و باریت همزاد با رگه-رگچه‌های کوارتزی-سولفیدی-اکسیدی، ۱۵ نمونه دوبر صیقل تهیه و پارامترهای دمایی آنها اندازه‌گیری شد. این بررسی‌های میانبارهای سیال با دستگاه گرمایش و سرمایش لینکام مدل THMCG 600 در دانشگاه تربیت مدرس با توانایی اندازه-گیری گستره دمایی ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد انجام

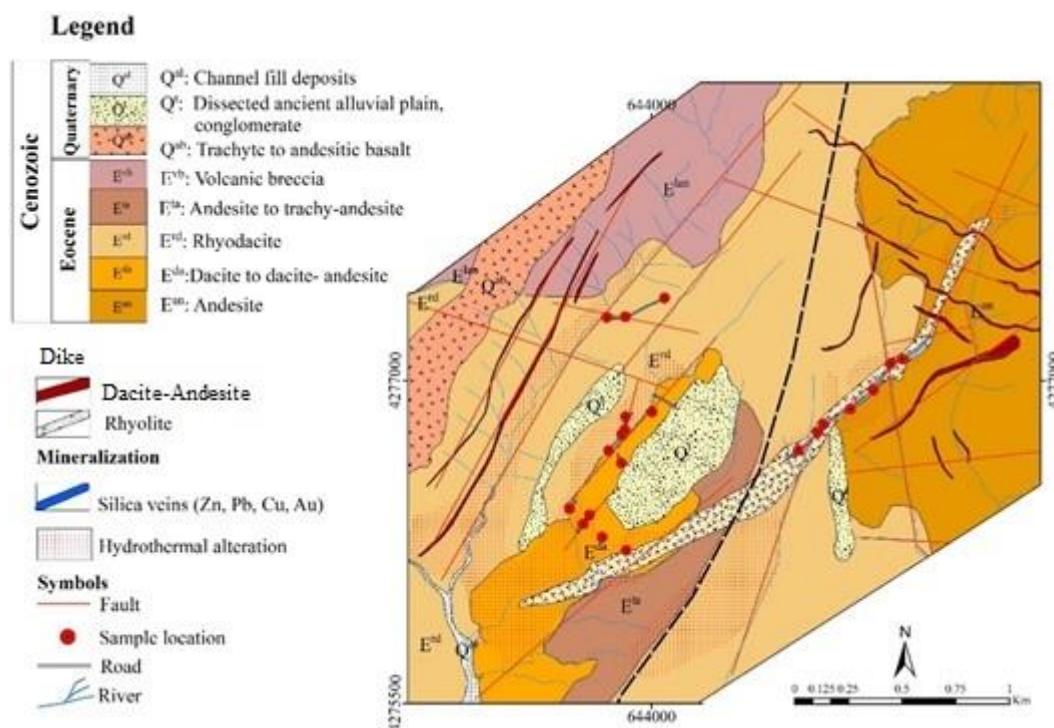
شد. گفتنی است که بهنجارسازی دستگاه با $C_4H_3CH_3$ در دمای ۹۵- درجه سانتی‌گراد و KNO_3 در دمای ۳۳۵ درجه سانتی‌گراد صورت گرفت. در این پژوهش نشانه‌های اختصاری کانی‌ها برگرفته از ویتنی و اوانز [۴۰] هستند.

زمین‌شناسی منطقه

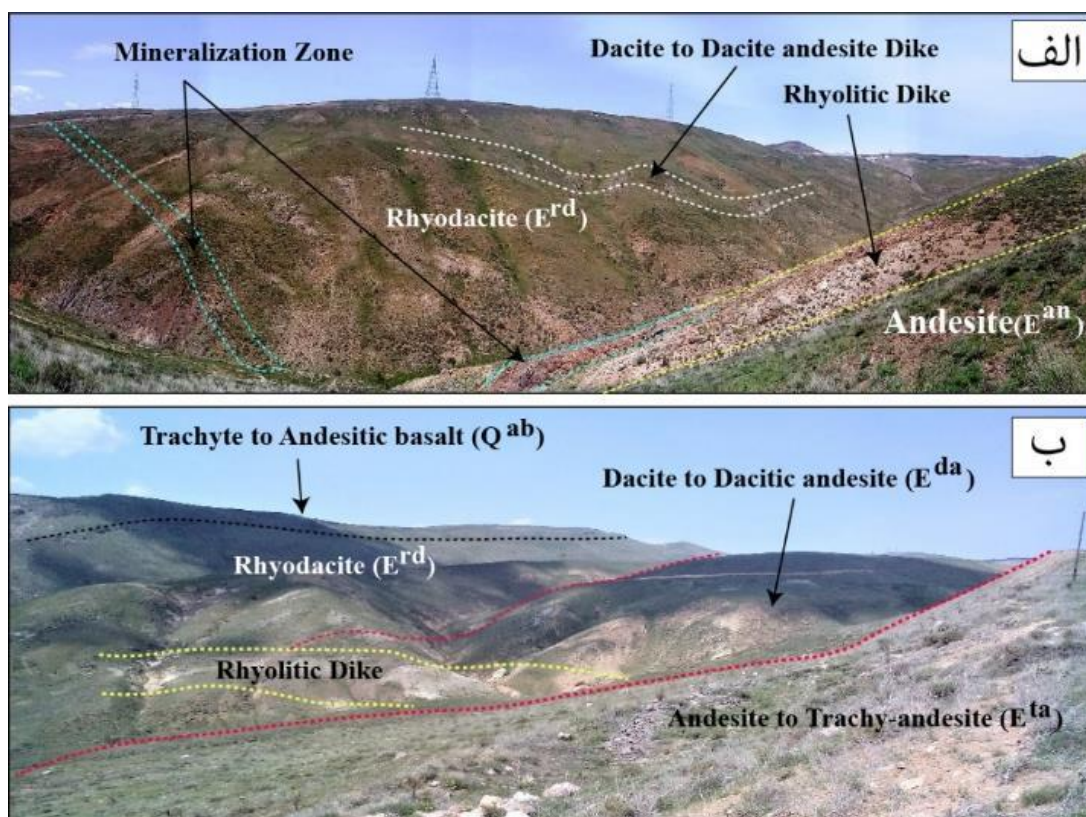
سنگ‌شناسی واحدهای رخنمون‌یافته در این منطقه بر اساس نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۵۰۰۰ اغلب شامل توالی سنگ‌های آتشفشانی حدواسط تا اسیدی به سن ائوسن پسین است که با دایک‌های آندزیتی-داسیتی قطع شده‌اند (شکل ۲). در واقع گسترده‌ترین واحد سنگی رخنمون‌یافته در این منطقه ترکیبی از آندزیت تا ریوداسیت و ریولیت دارند. قدیمی‌ترین واحد رخنمون یافته در این منطقه ترکیبی آندزیتی E^{an} دارد که با دایک‌های به سن الیگوسن قطع شده است. (شکل‌های ۲ و ۳ الف). بیشترین رخنمون این واحد در غرب منطقه است و در بخش‌هایی میزبان کانی‌زایی نیز هستند. در مرکز منطقه مورد بررسی، واحد داسیت تا داسیت-آندزیت E^{da} قرار داشته که گسترش کمتری نسبت به سایر واحدهای سنگی دارد. این واحد در معرض دایک ریولیتی قرار گرفته و با بافت برشی و کانی‌زایی همراه است (شکل ۳ ب).

جدول ۱ داده‌های بدست آمده از نمونه‌های برداشت شده از رگه‌های سیلیسی کانی‌دار در منطقه آلچه‌قشلاق (طلا بر حسب ppm) و سایر عناصر بر حسب ppm).

شماره نمونه	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Mo	Ba
Al.05	۲۲۵۰	۲۳٫۵	۱۳۴	>۱۰۰۰۰	۶۹۴٫۹	۵۸۳٫۳	۶۱۳۳
Al.07	۴۰۰	۹٫۴	۲۰۵۷	۱۰۰۰۰	>۱۰۰۰۰	۱۲۹٫۴	۵۵۳۴
Al.09	۲۳۲	۱٫۷	۴۵۸٫۸	۴۴۷۲٫۵	>۱۰۰۰۰	۱۲٫۲	۱۷۱۰
Al.13	۸۱۰	۱۴٫۲	۷۴٫۱	۲۶۱۷٫۴	۲۰۲۹٫۶	۱۰۲٫۸	۴۳۹۷
Al.20	۹۴۰	۲۲٫۹	۵۶٫۱	>۱۰۰۰۰	۵۲۷٫۷	۴۳۱٫۸	۶۱۶۸
Al.37	۱۹٫۸	۰٫۵	۸۷٫۵	۶۸٫۴	۱۲۷٫۶	۲۸٫۵	۳۷۱۴
Al.11	۲۲۶	۷٫۲۷	>۱۰۰۰۰	>۱۰۰۰۰	>۱۰۰۰۰	۸۰	۲۷۳۲
Al.18	۶۹٫۸	<۰٫۵	۲۶۳٫۷	۱۲۶٫۵	۱۲۳۱٫۱	۲۹٫۷	۷۵۵۷
Al.21	۲۲۱۰	۴٫۵	۱۱۰٫۵	۸۰٫۶	۶۵٫۲	۴۴٫۶	۲۶۷
Al.23	۲۱۰۰	۱٫۶	۲۷٫۴	۱۶۰۳٫۵	۷۴٫۸	۱۳٫۳	۲۳۸۱
Al.24	۲۵	۱٫۱	۴۵٫۹	۱۱۶٫۴	۱۹۱٫۲	۵۳٫۴	۳۵۷۸
Al.26	۲۵۱	۱٫۳	۳۷۶٫۹	۱۲۹۳٫۸	۲۹۸٫۷	۴۱	۳۹۷۸
Al.27	۳۸٫۶	<۰٫۵	۸۹۳٫۴	۱۴۹٫۴	۵۶۶٫۱	۸٫۱	۱۵۷۳
Al.28	۴۳۰	۱٫۹	۲۷۶	۳۳۸٫۱	۶۴۴٫۱	۸۹٫۷	۵۸۰۸
Al.29	۵۶٫۹	۱٫۳	۱۲۱۸	۴۰۶٫۱	۲۵۸	۶۸٫۶	۵۶۸۴
Al.38	۱۶۰	۱۳٫۳	>۱۰۰۰۰	>۱۰۰۰۰	۲۸۲۹	۱۶٫۸	۳۹۳۶
Al.40	۴۹۰	۳٫۷	۳۰۲	۳۰۷۱٫۹	۲۶۳	۱۲٫۲	۱۲۲۴
Al.42	۱۶۷	۴٫۸	۵۷٫۷	۱۷۴۰٫۸	۴۱۳٫۹	۱۲۹٫۸	>۱۰۰۰۰
Al.43	۴۵۰	۱	۱۷٫۸	۸۴۶۶٫۶	۱۱۲۲٫۶	۴	۳۰۷
Al.44	۱۹٫۵	۳٫۳۶	۱۶۴٫۶	>۱۰۰۰۰	۳۳۸٫۸	۷٫۲	۲۳۰
Al.45	۲۳٫۷	۱٫۶	۶۹۱۳٫۵	۳۲۳٫۴	>۱۰۰۰۰	۱۲۱٫۴	۱۹۳۲
Al.03	۲۸	<۰٫۵	۶۳٫۷	۱۶۸	۳۹۵٫۳	۶	۴۶۱۶



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۵۰۰۰ رخداد معدنی آلچه‌قشلاق نشان‌دهنده موقعیت رگه‌ها و نمونه‌های برداشت‌شده



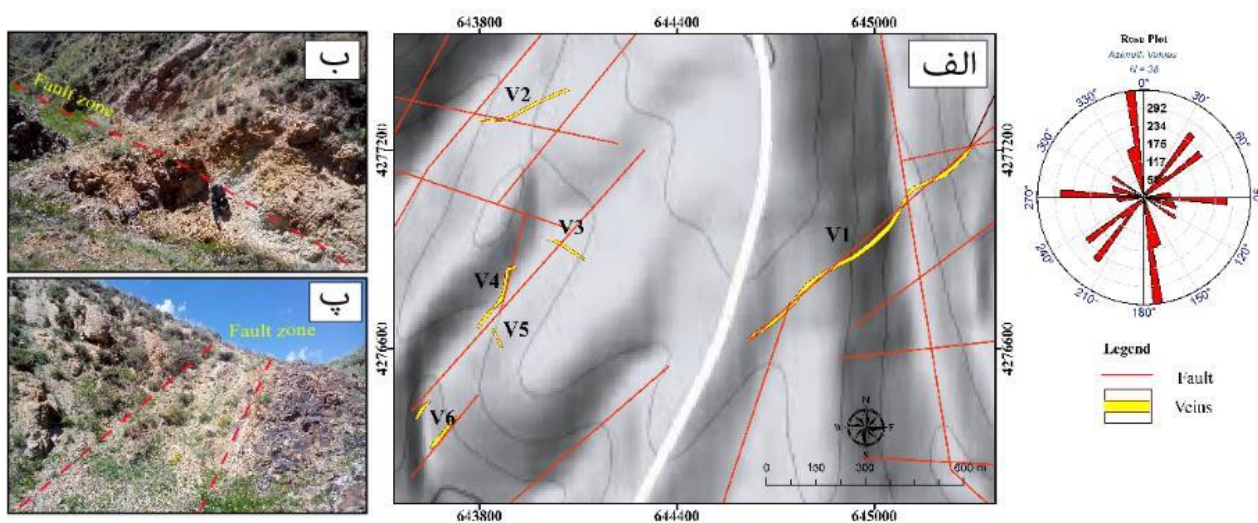
شکل ۳ نمائی از رخنمون سنگ‌های تشکیل‌دهنده منطقه آلچه‌قشلاق: الف) واحد آندزیتی و ریوداسیتی همراه با دایک‌های ریولیتی و داسیت-آندزیتی و پهنه کانی‌زایی (دید به سمت شرق)، ب) واحدهای داسیت تا داسیت‌آندزیتی، ریوداسیتی، آندزیت تا تراکی‌آندزیتی و تراکیت-تراکی بازالت همراه با دایک ریولیتی (دید به سمت شرق).

– جنوب غرب و با شیبی به سمت شمال غرب با ضخامت حدود ۵ متر و طولی حدود ۲ کیلومتر در مرکز منطقه قرار دارد (شکل ۳ ب).

سنگ‌نگاری

پیمایش‌های انجام شده و برداشت خطواره‌ها و گسل‌ها در این منطقه باعث شناسایی دو روند کلی در آن شده است (شکل ۴ الف). گسل‌های با روند شمال غرب- جنوب شرق در راستای گسل‌های اصلی و ناحیه‌ای هستند و در این منطقه نیز از روندهای اصلی اثر گذار محسوب می‌گردند. رگه‌های سیلیسی کانه‌دار و دایک‌های با روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق نیز در منطقه حضور دارند که دارای روندی هم‌راستا با این گسل‌ها هستند. این گسل‌ها دارای شیبی قائم هستند و جهت شیب در آنها، در صورت وجود به سمت جنوب غرب مایل است. گسل‌های با روند شمال‌شرق- جنوب غرب از گسل‌های فرعی در مقیاس کوچک بوده و بیشتر عمود بر روند اصلی خطواره‌ها و شکستگی‌های منطقه هستند (شکل ۴ ب). کانی‌زایی در این منطقه هم روند با این گسل‌ها بوده و بیشتر به شکل رگه‌های سیلیسی - باریتی و پهنه‌های برشی است. گسترش پهنه‌های دگرسانی پیرامون این گسل‌ها بیشتر است (شکل‌های ۴ ب و پ). شیب غالب این گسل‌ها و شکستگی‌ها از ۷۵ تا ۹۰ درجه در تغییر بوده و راستای شیب آنها نیز شمال غرب است.

واحد ریوداسیت E^{rd} گسترده‌ترین واحدهای تشکیل‌دهنده منطقه مورد بررسی بوده که از جنوب تا شمال آن قابل مشاهده است. این واحد در بخش‌های میزبان رگه‌های کانی‌زایی به شدت دچار دگرسانی شده و در بخشی نیز بافت اولیه خود را از دست داده است. واحد برش آتشفشانی E^{vb} بیشتر در بخش شمال غرب منطقه گسترش دارد (شکل ۲). قطعه‌های برشی موجود در این واحد بیشتر دارای ترکیب ریولیت تا داسیت و آندزیت در اندازه‌های میلی‌متری تا ۱۰ سانتی‌متر هستند که در خمیره‌ای از مواد آتشفشانی اسیدی قرار دارند. واحد آندزیت- تراکی آندزیت E^{at} : دگرسان به رنگ خاکستری از مرکز منطقه به سمت جنوب غرب و در راستای جاده دسترسی معدن سونگون است (شکل ۲). واحد تراکی- آندزیت‌بازالتی Q^{ab} بیشتر در غرب و شمال غرب منطقه مورد بررسی واقع است (شکل ۲). روند عمومی این واحد شمال شرق- جنوب غرب است و به صورت دگرشیب بر واحدهای قدیمی‌تر قرار دارد (شکل ۳ ب). دایک‌های داسیتی تا داسیت آندزیتی به‌طور گسترده در منطقه مورد بررسی حضور دارند و بیشترین رخمون آنها نیز در غرب و شمال غرب و در واحد آندزیتی E^{an} است (شکل ۲). روند عمومی آنها در بخش غربی منطقه، شمال غرب- جنوب شرق و در شرق منطقه نیز تا حدی شمال شرق- جنوب غرب است (شکل ۳ الف). دایک ریولیتی به رنگ سفید با روند شمال شرق



شکل ۴ نقشه و تصاویر صحرایی گسل‌های منطقه آلچاق‌شلاق. الف) نقشه گسل‌های برداشت شده همراه با روند رگه‌های سیلیسی و نمودار گل- سرخی آن، ب و پ) هم‌راستایی گسل‌های منطقه با شکستگی‌های اصلی منطقه و گسترش پهنه‌های دگرسانی پیرامون آنها.

دگرسانی‌های گرمابی

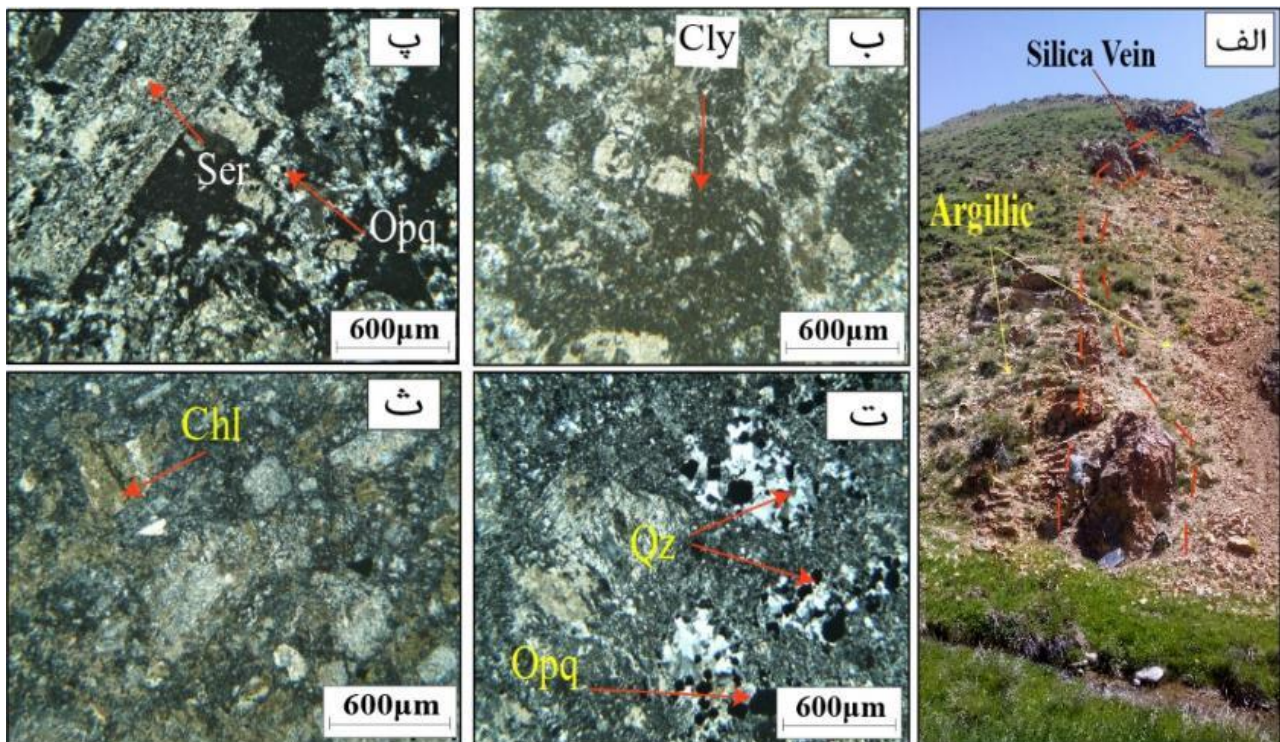
عمده واحدهای زمین‌شناسی در منطقه آلچه‌قشلاق به شدت در معرض فرایندهای گرمابی قرار داشته و دچار دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیکی متوسط و پروپیلیتی شده‌اند. این دگرسانی‌ها هم به صورت گسترده پیرامون رگه‌های سیلیسی (شکل‌های ۵ الف و ب) و هم به صورت مجزا تظاهر یافته‌اند. در این بین، پهنه‌های آرژیلی و پروپیلیتی گسترش بیشتری دارند و بیشترین رخنمون دگرسانی سیلیسی به پیرامون رگه‌های سیلیسی محدود می‌شوند (شکل ۵ ب).

دگرسانی آرژیلیکی بیشترین گسترش را در بین دگرسانی‌ها دارد و اغلب بر واحدهای داسیتی، ریوداسیتی و دایک‌های ریولیتی را اثر داشته است. این دگرسانی در واحد آندزیتی نیز محدود به پیرامون رگه‌های سیلیسی است و سرانجام با دگرسانی پروپیلیتی پایان می‌یابد (شکل‌های ۵ الف و ب). این دگرسانی دربردارنده کانی‌های رسی، کوارتز و پیریت است که در این بین، رسی شدن فلدسپارها جنبه عمومی دارد و برای

همه نمونه‌های بررسی شده دیده می‌شود (شکل‌های ۵ پ و ت). کانی پیریت (حدود ۵ درصد سنگ) نیز به صورت تمام بلورین و درشت در متن سنگ در این نوع دگرسانی دیده می‌شود که بیشتر در حال تبدیل به کانی‌های اکسیدی چون همتایت و لیمونیت است.

دگرسانی سیلیسی به دو شکل در این منطقه دیده می‌شود. نوع اول بیشتر در ارتباط با پهنه‌های ساختاری است و در راستای گسل‌ها به صورت متراکم و رگه‌ای دیده می‌شود. نوع دوم در ارتباط با پهنه‌های برشی گرمابی بوده و همه فضای بین قطعه‌های را پر کرده است (شکل ۵ چ).

دگرسانی پروپیلیتی با حضور کانی‌های کلریت، اپیدوت و کلسیت در واحدهای آندزیتی تا تراکی‌آندزیتی، با فاصله از رگه‌های سیلیسی گسترش دارد. این کانی‌ها جانشین کانی‌های فرومنیزین چون پیروکسن، هورنبلند و بیوتیت شده‌اند، به‌طوری که در بسیاری از مقاطع بررسی شده آثاری از کانی اولیه باقی نمانده است (شکل ۵ ح).



شکل ۵ تصاویر صحرایی و میکروسکوپی (در نور قطبیده متقاطع، XPL) از پهنه‌های دگرسانی منطقه آلچه‌قشلاق: الف) رگه کانه‌دار سیلیسی با هاله‌های دگرسانی‌های آرژیلی پیرامون آن، ب) کانی‌های رسی در پهنه دگرسانی آرژیلی، پ) سریسیتی شدن کانی پلاژیوکلاز همراه با کانی‌های کدر در دگرسانی آرژیلی، ت) کانی کوارتز با بافت پرکننده فضاهای خالی در دگرسانی سیلیسی، ث) کلریتی شدن هورنبلند در پهنه دگرسانی پروپیلیتی. (Qz: کوارتز، Ser: سریسیت، Cly: کانی‌های رسی، Chl: کلریت و Opq: کانی کدر).

کانی‌سازی

پهنه کانه‌دار در کانسار آلچه‌قشلاق با سرشت قطع کننده (روزادی) در قالب ۶ رگه سیلیسی دربردارنده طلا و فلزهای پایه شکل گرفته است (شکل ۶ الف). رخنمون‌های اصلی کانی-زایی در این گستره دارای دو روند عمومی شمال شرق- جنوب غرب و شمال غرب- جنوب شرق هستند که ۴ رگه که از رگه-های اصلی محسوب می‌گردند (V1، V2، V4 و V6) روند NE-SW دارند (شکل ۴ الف) و با طولی حدود ۱۰۰۰ متر و ۵ تا ۷ متر پهنای شیبی حدود ۷۵ تا ۸۰ درجه به سمت شمال غرب، در شرق منطقه واقع هستند (شکل‌های ۵ الف و ۶ الف). دو رگه دیگر که طول و ضخامت کمتری دارند (V3 و V5) از روند NW-SE پیروی می‌کنند (شکل ۴ الف). رگه‌های سیلیسی به دلیل مقاومت بالا در مقابل فرسایش نسبت به سنگ میزبان خود به صورت برجسته با افزایش حدود ۱ متر در سطح زمین دیده می‌شوند (شکل ۶ الف). سیمای بافتی این کانی‌زایی در رگه‌های سیلیسی شامل رگه-رگچه‌ای (شکل‌های ۶ ب)، برشی (شکل ۶ پ و ت)، تیغه‌ای (شکل ۶ ث)، توده‌ای و نواری است. کانی‌زایی درون‌زاد غالب در رگه‌های سیلیسی شامل اسفالریت، گالن، کالکوپیریت و پیریت و گاهی آرسنوپیریت و سولفوسالت‌هایی چون تتراهدریت است و به کانی‌های کولیت، کالکوسیت، مالاکیت، آزوریت و اکسیدها و

هیدرواکسیدهای آهن نیز می‌توان به عنوان مجموعه کانیایی برونزاد اشاره کرد.

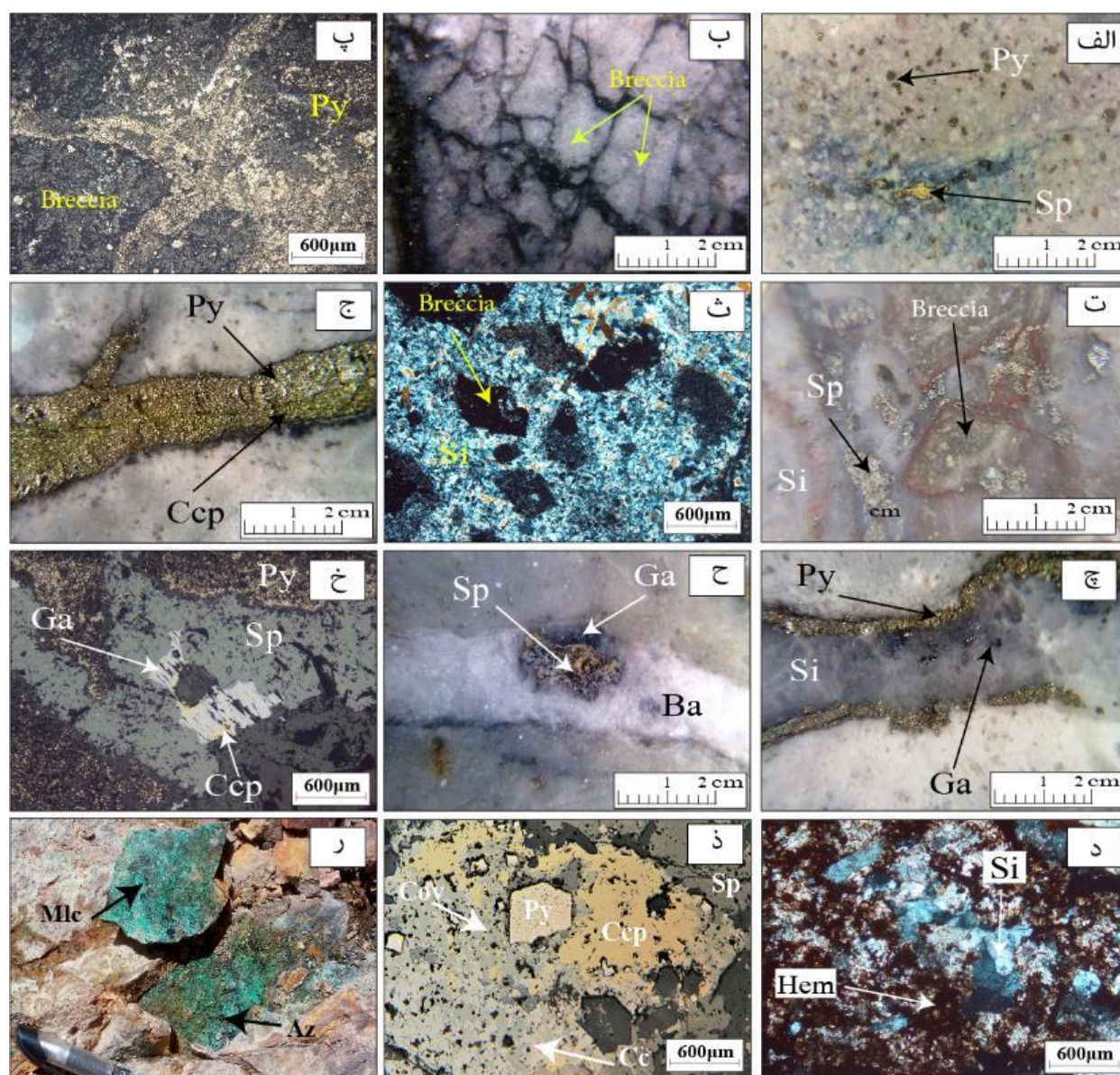
بافت و ساخت ماده معدنی

بافت پراکنده: گسترش این بافت بیشتر در سنگ میزبان کانی-زایی رخ داده است (شکل ۷ الف). واحد داسیت و ریوداسیتی به دلیل اثر سیال‌های کانی‌ساز بیشتر دچار دگرسانی شده‌اند و میزبان پیریت پراکنده در متن خود هستند. این فرایند مقدمه-ای بر کانی‌سازی اصلی در مراحل بعد است.

بافت برشی: این بافت بیشترین گسترش را در این کانی‌زایی دارد و بر بیشتر واحدهای زمین‌شناسی درگیر کانی‌زایی اثر داشته است. سیمان این بافت شامل سیمان سولفیدی (شکل‌های ۷ ب و پ) و سیلیسی-سولفیدی (شکل‌های ۷ ت و ث) تشکیل می‌دهد. در برش سولفیدی فاصله قطعه‌ها نسبت به هم بسیار کم است و جابجایی مشخصی را نشان نمی‌دهند (شکل ۷ ب). در این نوع برش، بخش عمده سولفید تشکیل دهنده سیمان را پیریت تشکیل داده است (شکل ۷ پ). سیمان سیلیسی-سولفیدی بیشتر از کانی سیلیس تشکیل شده است (شکل ۷ ت) که کانی‌های فلزی به صورت شناور در آن پراکنده هستند. فاصله قطعه‌ها در این بافت زیاد است و گاهی گردشگری قطعه-ها نیز دیده می‌شود (شکل ۷ ث). این بخش از کانی‌زایی، مرحله اصلی کانی‌زایی در این سامانه است.



شکل ۶ تصاویر صحرایی و مزوسکوپی کانی‌زایی در منطقه آلچه‌قشلاق: الف) رگه سیلیسی کانه‌دار (دید به سمت شمال شرق)، ب) بافت رگچه‌ای و دندان سنگی. پ و ت) بافت برشی خرد شده و گرد شده در رگه‌های سیلیسی، ث) بافت تیغه‌ای در رگه‌های سیلیسی.



شکل ۷ تصاویر مزوسکپی و میکروسکپی (XPL) از بافت‌های کانی‌زایی در پهنه کانی‌زایی منطقه آلچقشلاق: الف) بافت دانه پراکنده کانی پیریت در سنگ میزبان کانی‌زایی، ب) بافت برشی با سیمان سولفیدی، پ) سیمان پیریت در برش سولفیدی، ت) بافت برشی با سیمان سیلیسی-سولفیدی، ث) بافت برشی با قطعه‌های گرد شده و سیمان دارای سیلیس، ج) بافت رگچه‌ای سولفیدی دربردارنده پیریت و کالکوپیریت، چ) بافت رگچه‌ای دارای سیلیس و سولفید، ح) بافت رگچه‌ای دارای باریت و سولفید، خ) بافت جانشینی در پهنه درونزاد که در آن اسفالریت به جای گالن و گالن نیز جایگزین کالکوپیریت شده است، د) جانشینی هماتیت به جای کانی‌های سولفیدی، ذ) جانشینی کالکوسیت و کولیت به جای کالکوپیریت و (ر) جانشینی مالاکیت و آزوریت به جای کالکوپیریت در پهنه برونزاد. Gth: گوتیت، Cc: کالکوسیت، Py: پیریت، Ccp: کالکوپیریت، Sp: اسفالریت، Ga: گالن، hem: هماتیت، Mlc: مالاکیت، Az: آزوریت و Cov: کولیت).

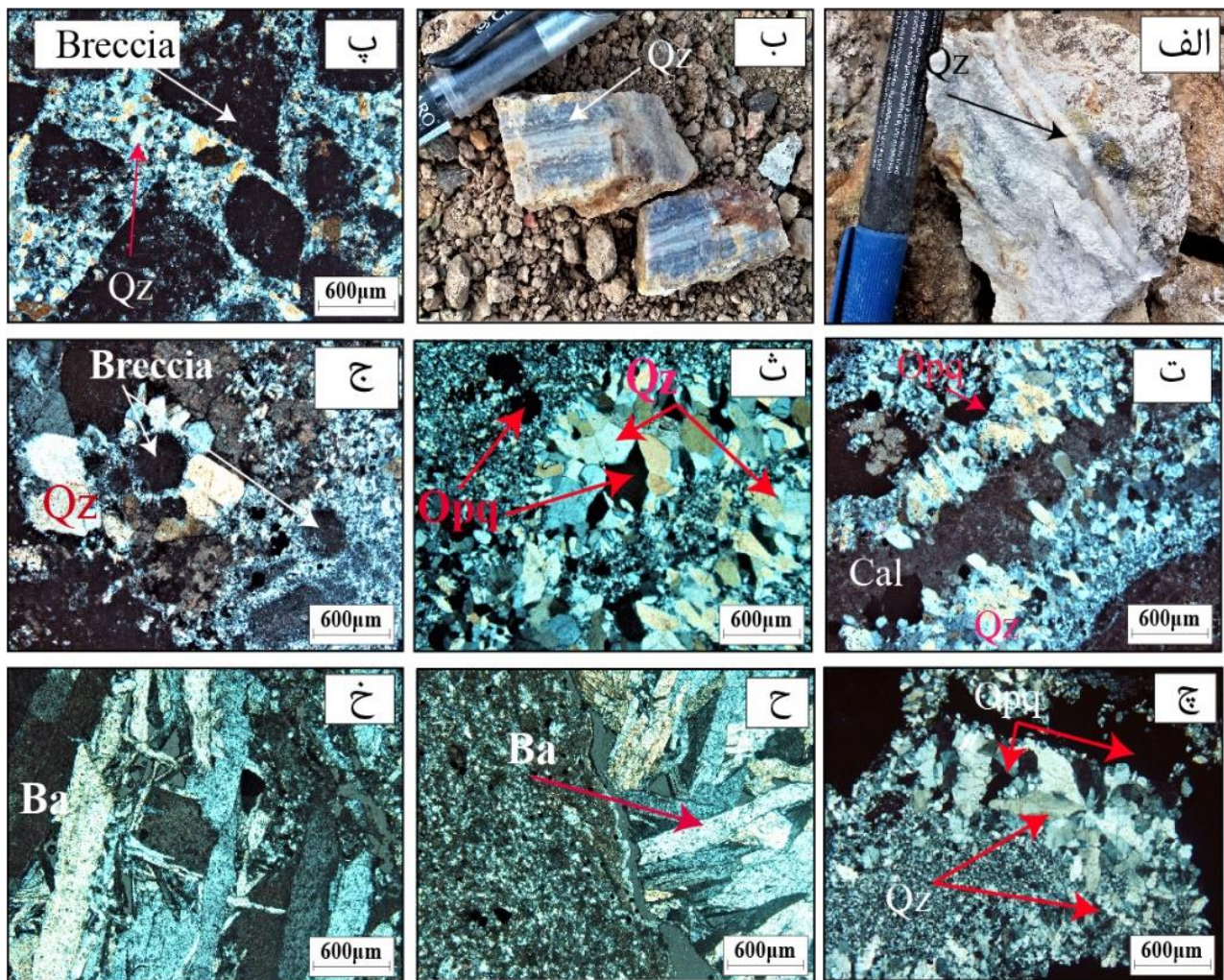
بافت جانشینی: این بافت هم در پهنه درونزاد و در کانی‌های سولفیدی و هم در پهنه برونزاد دیده می‌شود. کالکوپیریت با کانی‌های گالن و اسفالریت و کانی گالن نیز با اسفالریت جانشین شده است (شکل ۷ خ). در اثر فرایند برونزاد نیز، کانی‌های اکسیدی چون هماتیت (شکل ۷ د) جانشین پیریت

بافت رگچه‌ای: یکی دیگر از بافت‌های با اهمیت در این کانی‌زایی بافت رگچه‌ای است. اندازه این رگچه‌ها از چند میلی‌متر تا ۱ سانتی‌متر در تغییر است (شکل‌های ۷ ج، چ و ح). این رگچه‌ها هم به صورت کاملاً سولفیدی (شکل ۷ ج) هم همراه با سیلیس (شکل ۷ چ) و باریت (شکل ۷ ح) دیده می‌شوند.

فضاهای خالی (شکل ۸ ث)، کاکلی (شکل ۸ ج) شعاعی (شکل ۸ چ) است و در رگه‌ها و سیمان برشی دیده می‌شود. مانند کوارتز، باریت نیز از اندازه‌های ریز تا درشت در این کانی‌زایی حضور دارد. بافت غالب این کانی شامل بافت‌های تیغه‌ای (شکل ۸ ح)، برشی و پرکننده فضاهای خالی و پرماند است (شکل ۸ خ). بافت شعاعی این کانی نیز در سطوح و شکستگی‌های بخش‌های سیلیسی بسیار دیده می‌شود.

شده و کالکوسیت و کولیت (شکل ۷ ذ)، مالاکیت و آزوریت (شکل ۷ ر) نیز جانشین کالکوپیریت شده‌اند.

کوارتز به عنوان کانی باطله به صورت بلورهای ریز تا درشت (کوچکتر از ۲۰۰ میکرون تا ۱ سانتی‌متر) بی‌شکل تا شکل‌دار و یا به صورت توده‌ای در رگه‌ها و سیمان برش‌های گرمایی حضور دارد (شکل‌های ۸ الف و ب). بافت معمول این کانی شامل بافت‌های برشی (شکل ۸ پ)، شانه‌ای (شکل ۸ ت)، پرکننده

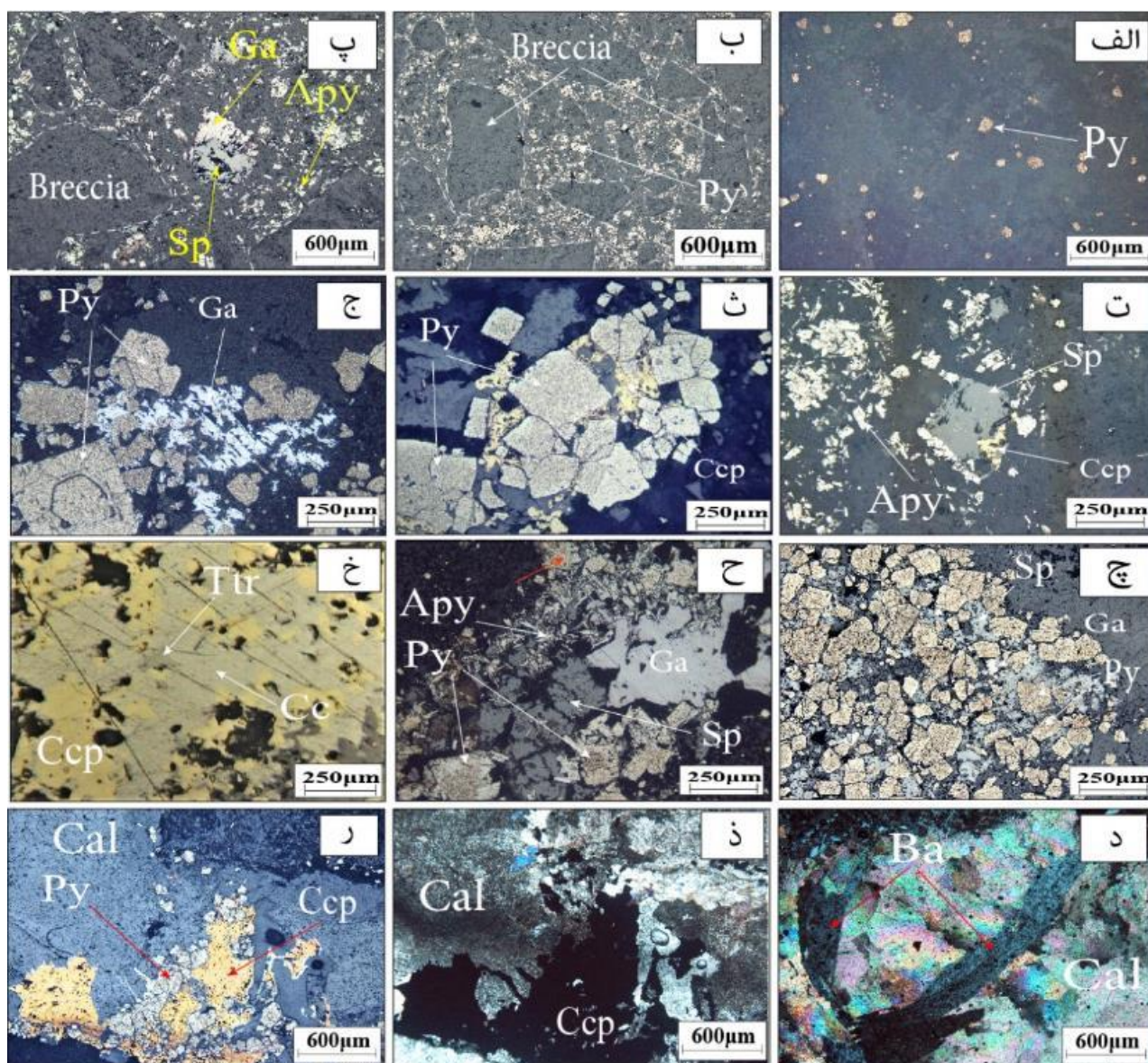


شکل ۸ تصاویر صحرایی، مزوسکپی و میکروسکپی (XPL) از ساخت و بافت باطله‌ها در پهنه کانی‌زایی منطقه آله‌قشلاق: الف) بافت دندان‌سگی (شانه‌ای) در باطله کوارتز، ب) بافت نواری و گل کلمی از باطله سیلیس، پ) کانی کوارتز با بافت پرکننده فضاهای خالی در برش‌های گرمایی، ت) بافت شانه‌ای کوارتز و پرشدگی آن با کلسیت، ث) کوارتز با بافت پرکننده فضاهای خالی و حفره‌ها همراه با کانی‌های سولفیدی، ج) بافت کاکلی کوارتز، چ) بافت شعاعی کوارتز در پهنه کانی‌زایی همراه با کانی‌های سولفیدی، ح) کانی باریت با بافت تیغه‌ای، خ) باریت با بافت تیغه‌ای و برشی. (Qz: کوارتز، Ba: باریت، Opq: کانی کدر)

کانی‌شناسی و توالی همبرزایی

کانی پیریت، فراوانترین کانی سولفیدی در این سامانه کانی‌زایی است. این کانی در چهار نوع در این کانی‌زایی حضور دارد. نوع اول از کانی پیریت به شکل دانه پراکنده، شکل‌دار تا نیمه‌شکل-دار (شکل ۹ الف) در اندازه‌های ۱۰ میکرون تا ۱ میلی‌متر در

سنگ میزبان و همراه با دگرسانی آرژیلی شکل گرفته است. گاهی قطع‌شدگی و جابجای پیریت با فازهای بعدی کانی‌زایی دیده می‌شود. این کانی به عنوان مرحله اول کانی‌زایی در این سامانه شناخته می‌شوند (شکل ۱۰).



شکل ۹ تصاویر میکروسکوپی (XPL) از کانی‌سازی در منطقه مورد بررسی: الف) کانی پیریت به صورت دانه پراکنده در مرحله اول کانی‌زایی، ب) کانی پیریت در برش سولفیدی مرحله دوم کانی‌زایی، پ) کانی‌های اسفالریت و گالن در برش‌های سولفیدی، ت) کانی‌های کالکوپیریت، اسفالریت و آرسنوپیریت در برش‌های با سیمان سولفیدی، ث، ج و چ) کانی پیریت همراه با کالکوپیریت، گالن و اسفالریت در برش سیلیسی-سولفیدی، ح) کانی‌های پیریت، اسفالریت، گالن و آرسنوپیریت در رگچه‌های سیلیسی، خ) کانی کالکوپیریت و رخداد کمیاب تتراهدریت همراه با کانی ثانویه کالکوسیت بر کانی کالکوپیریت، د) تشکیل کلسیت و باریت در مرحله سوم کانی‌زایی، ذ) کانی کلسیت همراه با کانی کالکوپیریت و ر) تصویر نور بازتابی قبل. Cc: کالکوسیت، Py: پیریت، Ccp: کالکوپیریت، Ga: گالن، Sp: اسفالریت، Ttr: تتراهدریت، Apy: آرسنیک، Cal: کلسیت و Ba: باریت.

کانی‌ها	کانی زایی هیپوژن			کانی زایی سوپرژن
	مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	
کانسنگ	پیریت			
	گالن			
	اسفالریت			
	کالکوپیریت			
	آرسنوپیریت			
	طلا			
	تتراهدریت			
	آزوریت			
	کالکوسیت			
	مالاکیت			
	هماتیت			
	گوتیت			
	لیمونیت			
کانی‌های باطله	کوارتز			
	کلسیت			
	باریت			
	دلومیت			
	کانی‌های رسی			
	سریسیت			
	کلریت			
	اپیدوت			
بقیه	برشی			
	پراکنده			
	رگه - رگچه			
	کوکاد			
	کلروفرم			
	پرشدگی حفرات			
	جانشینی			

شکل ۱۰ توالی همیافتی، فراوانی نسبی، ساخت و بافت مواد معدنی و باطله در کانسار آلچاقشلاق.

اندازه این کانی در این مرحله درشت‌تر از فازهای پیشین است در پایان نوع چهارم این کانی در رگچه‌های کانه‌دار (شکل ۹ ث) دیده می‌شود. کانی پیریت در این سامانه اولیه بوده و پیش از سایر کانی‌ها تشکیل شده به طوری که اغلب با آنها در بر گرفته شده است (شکل‌های ۹ ج و چ).

نخستین حضور کانی کالکوپیریت در این سامانه از برش-های سولفیدی است. مقدار و پراکندگی این کانی در این برش-ها بسیار کم بوده و بیشتر با سایر کانی‌ها جانشین شده و تنها آثاری از آن باقی مانده است. برخلاف برش‌های سولفیدی، کالکوپیریت در برش‌های سیلیسی بسیار حضور دارد و اندازه آن

مرحله دوم، اصلی‌ترین مرحله کانی‌زایی در این منطقه است و با برش‌های گرمابی همراه با سیمانی شامل سولفید و کوارتز-سولفید (پیریت، گالن، اسفالریت و کالکوپیریت) آغاز شده و با رگچه‌های کانه‌دار ادامه می‌یابد. این مرحله با برشی شدن گرمابی سنگ‌های میزبان آغاز می‌گردد (شکل ۹ پ) و شامل سیمان سیلیسی و سولفیدی است که گاهی فقط سولفید حضور دارد. نوع دوم کانی پیریت در سیمان بافت برشی سولفیدی (شکل ۹ پ) دیده می‌شود و نسبت به نوع قبل در اندازه‌های ریزتری حضور دارد. نوع سوم این کانی در برش‌های سیلیسی و همراه با سایر کانی‌ها حضور دارد (شکل ۹ ت).

بیشتری نسبت به مرحله پیش دارند و اندازه بلورهای کانی های سولفیدی نیز در آنها افزایش یافته و به حدود ۱ سانتی‌متر می‌رسد.

مرحله چهارم مرحله اکسایش کانی‌های درون‌زاد اولیه است. فرایند برونزایی باعث تشکیل برخی از کانی‌های ثانویه چون اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن (هماتیت و گوتیت) و ملاکیت، آزوریت، کالکوسیت ثانویه و کولیت شده است

زمین‌شیمی

در شکل ۱۱، پراکندگی رگه‌های سیلیسی و نمونه‌های برداشت شده از آن در منطقه آلچه قشلاق نشان داده شده است. با بررسی چگونگی پراکندگی، ارتباط و همبستگی عناصر مختلف در رگه‌های سیلیسی، کمترین عیار طلا ۲۵ ppb و بیشترین عیار آن نیز ۲۲۵۰ ppb (رگه V2) به دست آمده است، بر پایه شکل ۱۱ الف، رگه ۲ میزبان بیشترین عیار کانی‌زایی طلا در این مجموعه است و رگه‌های ۳ و ۴ نیز عیار به نسبت مناسبی از طلا را نشان می‌دهند. عیار روی از ۶۵ تا بیش از ۱ درصد در تغییر است و بجز رگه‌های ۲ و ۳، سایر رگه‌ها عیار بالایی از این عنصر دارند (شکل ۱۲ ب). مقدار عنصر سرب نیز از ۶۸ ppm تا بیش از ۱ درصد است و در رگه‌های شماره ۴ و ۶ بیشترین مقدار را دارد (شکل ۱۱ پ). عنصر مس عیار کمتری نسبت به عناصری چون سرب و روی دارد و کمترین مقدار آن ۵۶ ppm و بیشترین مقدار آن بیش از ۱ درصد است. رگه‌های ۱ و ۵ دارای بیشترین مقدار مس هستند (شکل ۱۱ ت).

برای بررسی ارتباط عناصر و همبستگی آنها از ضریب پیرسون (جدول ۲) استفاده گردید. بر این اساس، ضریب همبستگی عنصر طلا با عناصر آرسنیک (۰/۴۰۷) و نقره (۰/۴۱۹) ضعیف تا متوسط است که می‌تواند ناشی از حضور طلا در کانی‌های سولفوسالتی آرسنیک‌دار باشد. این در حالی است که همبستگی منفی طلا با مس (۰/۲۵-) و روی (۰/۲۴-) و همبستگی مثبت ضعیف آن با سرب (۰/۱۰-) نشان دهنده همزاد نبودن عنصر طلا با این عناصر و نبود آن در کانی‌هایی چون گالن، اسفالریت و کالکوپریت است. نقره با عناصر آرسنیک (۰/۵۹) و سرب (۰/۶۴) همبستگی مثبتی را نشان می‌دهد. مس با عناصر سرب (۰/۳۴) و روی (۰/۵۹) همبستگی مثبت دارد که بیانگر همزاد بودن این عناصر و همراهی کانی‌های تشکیل دهنده آنهاست. سرب افزون بر همبستگی با عناصر بیان شده، با عنصر روی (۰/۳) نیز همبستگی نسبی دارد.

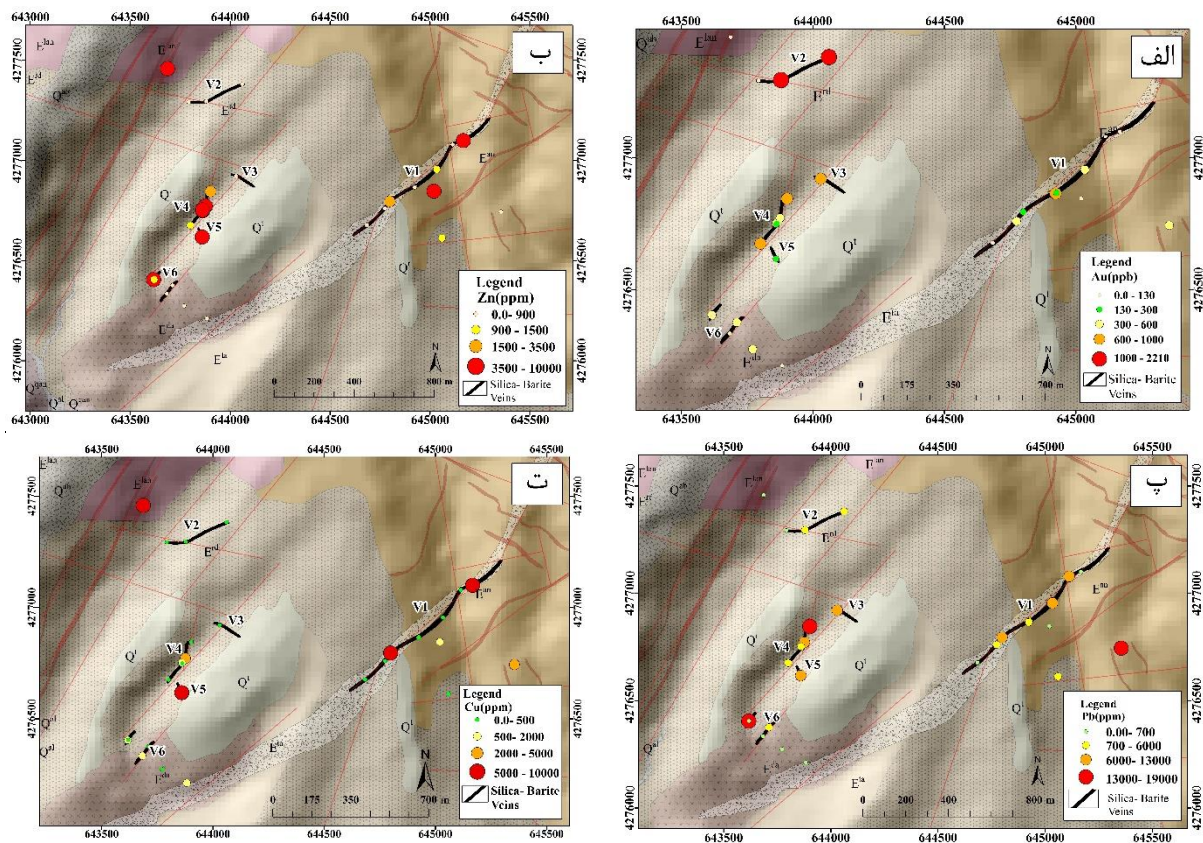
نیز درشت‌تر است. بافت غالب این کانی در این برش‌ها جانشینی است که با کانی‌های گالن و اسفالریت در بر گرفته می‌شود. نوع سوم این کانی، در رگچه‌های کانه‌دار حضور دارد. تنوع این رگچه‌ها در این مرحله زیاد است به طوری که گاهی به صورت مجزا و یا به صورت همراهی با سایر کانی‌ها دیده می‌شود.

کانی گالن نیز مانند کالکوپریت در برش‌های سولفیدی مرحله دوم حضور دارد. مقدار این کانی نیز بسیار محدود است و مانند کانی‌های سیمان برشی اندازه بسیار کوچکی دارند. این در حالی است که نوع دوم این کانی که در برش‌های سیلیسی بسیار حضور دارد، درشت‌تر از انواع پیشین بوده و در بسیاری از مقاطع، با اسفالریت جانشین شده است. نوع سوم این کانی نیز در رگچه‌های کانه‌دار چه به صورت مجزا و چه به صورت همراهی با سایر کانی‌های سولفیدی دیده می‌شود.

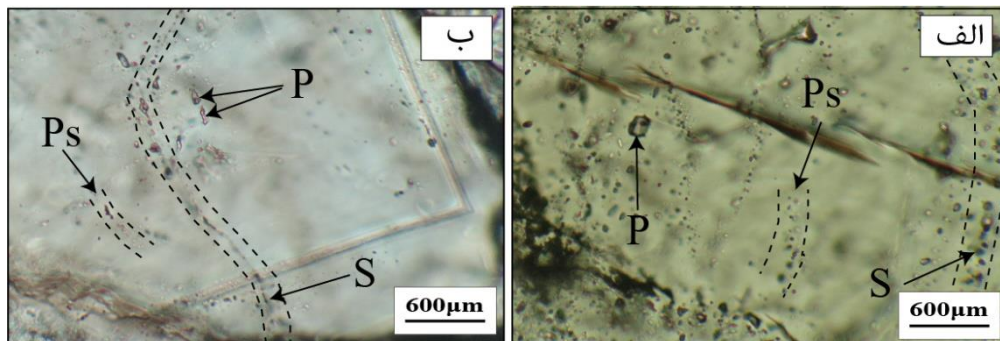
فراوان‌ترین کانی سولفیدی در این مرحله از کانی‌زایی، کانی اسفالریت است که در اندازه‌های مختلف چند میلی‌متر تا بیش از ۳ سانتی‌متر دیده می‌شود. به مانند کانی‌های پیشین، نخستین رخداد آن در برش‌های سولفیدی است که همراهی بالایی با گالن نشان می‌دهد. این در حالی است که نوع دوم آن در برش‌های سیلیسی است که فراوان‌ترین کانی در این برش‌ها محسوب می‌گردد. این کانی در این برش‌ها سایر کانی‌های سولفیدی را در بر گرفته و اغلب جانشین آنها شده است که می‌تواند نشان دهنده تأخیری بودن آن باشد. نوع سوم این کانی نیز در رگچه‌های کانه‌دار است. این رگچه‌ها چه به صورت مجزا و چه به صورت چند کانی همراه دیده می‌شوند که کانی اصلی این رگچه‌ها نیز اسفالریت است.

آرسنوپریت از کانی‌های به نسبت کمیاب در این مرحله از کانی‌زایی بوده و به شکل سوزنی و با اندازه‌ای حدود چند میکرون است (شکل ۷ خ). این کانی نیز به همراه سایر کانی‌ها هم در برش‌های سولفیدی و هم در رگچه‌های کانی‌دار دیده می‌شود. کانی تتراهدریت نیز نادر است و در نمونه‌های برآمده از مغزه‌های حفاری و درون کانی کالکوپریت وجود دارد (شکل ۷ د). با توجه به نتایج تجزیه (جدول ۱)، عیار کانی‌زایی طلا بالا بوده که نشانگر حضور طلا در این سامانه است. در بررسی های میکروسکوپی، کانی طلا دیده نشده است، اما ممکن است که فقط در ساختار کانی‌های دیگر جایگزین شده باشد.

مرحله سوم کانی‌زایی با حضور کانی‌های باریت و کلسیت و کمی کوارتز مشخص می‌شود. در این مرحله، رگچه‌های باریتی و کلسیتی (شکل‌های ۱۰ د، ذ) با کانی‌زایی کالکوپریت (شکل ۹ر)، اسفالریت و گالن شکل گرفته‌اند. این رگچه‌ها پهنای



شکل ۱۱ نقشه رگه‌های سیلیسی بر نقشه زمین‌شناسی و موقعیت نمونه‌های برداشت شده همراه با تغییرات عیار عناصر در پهنه کانی‌زایی آلچه-قشلاق: (الف) نقشه تغییرات عیار عنصر طلا، (ب) نقشه تغییرات عیار روی، (پ) نقشه تغییرات عیار سرب و (ت) نقشه تغییرات عیار برای عنصر مس.



شکل ۱۲ تصاویر میکروسکوپی میانبارهای سیال در نمونه‌های برداشت شده از کانی‌زایی منطقه آلچه-قشلاق: (الف و ب) میانبار سیال اولیه (P)، ثانویه (S) و ثانویه کاذب (PS) در کانی کوارتز.

جدول ۲ ضرایب همبستگی عناصر (محاسبه شده بر اساس جدول ۱ پیوست) برای نمونه‌های برداشت شده از رگه‌های سیلیسی در پهنه کانی‌زایی آلچه-قشلاق.

	Au	Ag	As	Cu	Pb	Zn	Ba
Au	۱,۰۰						
Ag	۰,۴۱۹	۱,۰۰					
As	۰,۴۰۷	۰,۵۹۰	۱,۰۰				
Cu	-۰,۲۵۵	۰,۱۲۶	۰,۰۹	۱,۰۰			
Pb	۰,۱۰۵	۰,۶۴۷	۰,۳۷۰	۰,۳۴۷	۱,۰۰		
Zn	-۰,۲۴۵	۰,۰۰۳	-۰,۰۲۰	۰,۵۹۳	۰,۳۰۵	۱,۰۰	
Ba	-۰,۰۱۱۳	۰,۳۳۶	۰,۱۸۴	-۰,۱۵۹	-۰,۰۵۴	-۰,۱۹۴	۱,۰۰

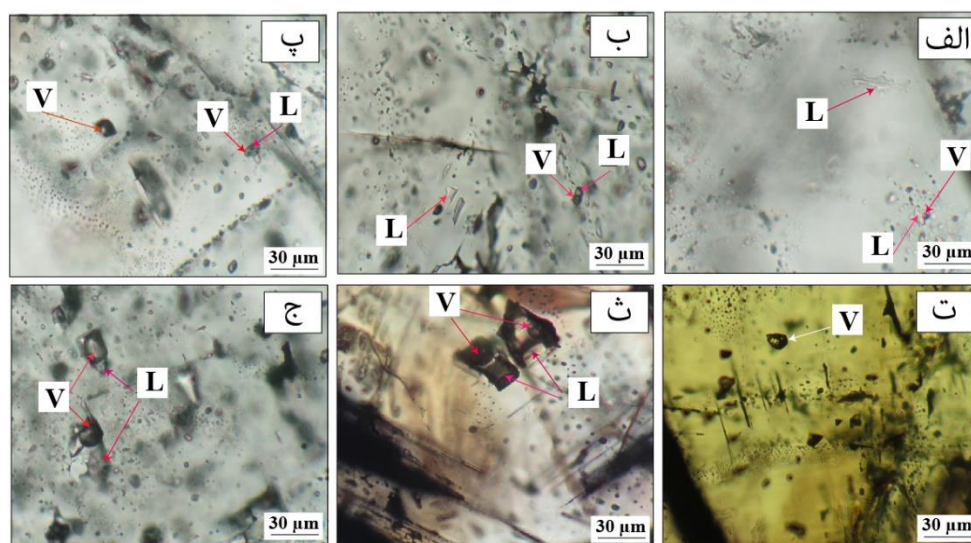
میانبارهای سیال

با توجه به مطالب بیان شده در مورد مراحل کانی‌زایی، کانی‌های با قابلیت حضور میانبارهای سیال از مراحل مختلف کانی‌زایی بررسی شدند. از این میان، کوارتز، اسفالریت و کانی باریت برای ریزدماسنجی انتخاب گردیدند.

هر سه گروه میانبارهای سیال (اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب؛ شکل ۱۲)، در رگه‌های منطقه آلچه‌قشلاق دیده می‌شوند [۴۱]. میانبارهای سیال اندازه‌ای از چند میکرون تا بیش از ۳۰ میکرون دارند، اما بیشتر آنها در کانی کوارتز دارای اندازه‌هایی حدود ۱۰ تا ۲۰ میکرون، در کانی اسفالریت حدود ۲ تا ۲۵ میکرون و در کانی باریت ۲ تا ۳۰ میکرون هستند. شکل‌های میانبارهای سیال در کوارتز به ترتیب فراوانی شامل نامنظم، بیضی، پهن، کشیده و کروی، در کانی اسفالریت اغلب به صورت تجمعی و با اشکال نامنظم، میله‌ای و منفی‌بلور و در کانی باریت با شکل‌های کروی، نامنظم و کشیده هستند. میانبارهای اولیه در این نمونه‌ها شامل میانبارهای نوع اول (تک فاز غنی از مایع (L، شکل‌های ۱۳ الف و ب)، نوع دوم تک

فازی غنی از بخار (V، شکل ۱۳ پ و ت)، نوع سوم دو فاز مایع-گاز (L-V، شکل ۱۳ ث) و نوع چهارم دو فاز گاز-مایع (V-L، شکل ۱۳ ج) هستند [۴۲، ۴۳]. میانبارهای تک فاز گازی (V) در کانی‌های کوارتز موجود در رگه‌های سیلیسی فراوانی بسیار کمی دارند و در نمونه‌های دیده شده دارای اندازه‌هایی در حدود ۱۰ میکرون و به صورت منفرد هستند. حضور میانبارهای سیال نوع اول (تک فاز غنی از مایع) و دوم (تک فاز غنی از بخار) همراه میانبارهای سیال نوع سوم (دو فاز غنی از مایع) و چهارم (دو فاز غنی از گاز) می‌تواند بیانگر فرآیند جوشش طی کانی‌زایی باشد [۴۴].

بر این اساس، تعداد ۱۹۶ میانبار سیال از مراحل مختلف کانی‌زایی در منطقه آلچه‌قشلاق ریزدماسنجی شدند (جدول ۳). همه نمونه‌های بررسی شده از نوع میانبارهای اولیه و از نظر مقدار فازی از نوع LV (دو فاز غنی از مایع) هستند. از میان ۱۳۴ میانبار از رگه‌های سیلیسی، ۱۲ عدد درون کانی اسفالریت و ۵۰ عدد درون کانی باریت هستند. نتایج آماری بدست آمده در جدول ۳ ارائه شده‌اند.



شکل ۱۳ تصاویر میکروسکوپی میانبارهای سیال در نمونه‌های برداشت شده از کانی‌زایی منطقه آلچه‌قشلاق: الف) تک‌فازی گازی همراه با دوفازی غنی از مایع در کانی باریت، ب) تک فاز گازی در اسفالریت، پ) تک فاز غنی از مایع همراه با دو فاز غنی از مایع در کانی کوارتز، ت) دو فازهای غنی از مایع و تک فاز غنی از مایع در کانی کوارتز، ث) دو فاز غنی از مایع در کانی کوارتز و ج) دو فاز غنی از بخار در کانی کوارتز.

جدول ۳ خلاصه نتایج ریزدماسنجی میانبارهای سیال اولیه نوع LV در مراحل مختلف کانی‌زایی در منطقه آلچه‌قشلاق.

نوع	تعداد میانبار	اندازه	T mi (first) (°C)	T mi (last) (°C)	TH (°C)	شوری (wt%NaCl eq)
کوارتز	۱۳۴	۳۰-۵	-۴۸٫۳ تا -۶۹	-۱۸٫۰۳ تا -۳	۱۵۰٫۷ تا ۳۹۸٫۴	۵٫۰۰ تا ۲۰٫۹۰
باریت	۵۰	۳۰-۵	-۵۲٫۱ تا -۶۸٫۵	-۱۶٫۳ تا -۳٫۷	۱۲۰٫۱ تا ۳۶۰	۶٫۰۰ تا ۱۹٫۷۰
اسفالریت	۱۲	۲۲-۹	-۵۲٫۱ تا -۵۶٫۴	-۴٫۳ تا -۱۵٫۸	۱۹۵ تا ۲۸۶٫۲	۶٫۹۰ تا ۱۹٫۳۰

بحث و بررسی

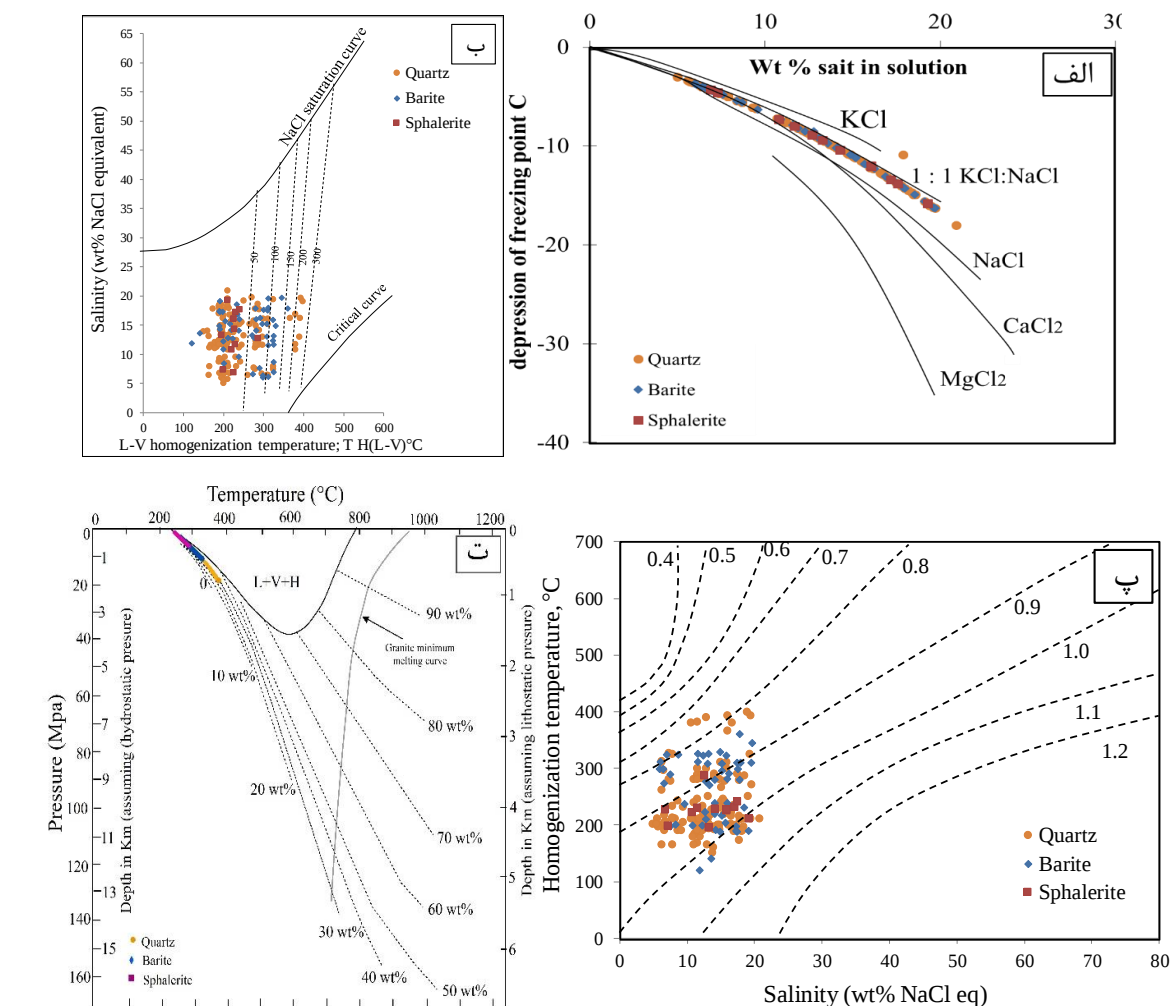
برآورد فشار، چگالی و عمق تشکیل میانبارهای سیال

پس از بررسی و تطبیق دمای همگدازی ثبت شده با یافته‌های ارائه شده توسط شفرد [۴۳]، یک سامانه فعال محلول گرمابی در منطقه آلچاقشلاق شناسایی گردید. برای تشخیص بهتر این امر، یافته‌های شوری نسبت به دماهای ذوب آخرین قطعه یخ رسم گردید (شکل ۱۴ الف). با توجه به این شکل، همه نمونه‌های بررسی شده در این سامانه بطور کلی از سامانه $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{KCl}$ پیروی می‌کنند. این نشان می‌دهد که این سامانه بیشترین فعالیت و اثر را طی مراحل کانه‌زایی در منطقه داشته است. از آنجا که دماهای نخستین ذوب فاز جامد در فرآیند سرمایش (نقطه همگدازی) حدود منفی ۵۰ درجه سانتیگراد هستند، با اطمینان می‌توان گفت که سیال‌های درگیر بررسی شده دارای مقداری نمک CaCl_2 نیز هستند. برای تعیین کمترین فشار بخار در زمان به دام افتادن میانبارهای سیال از نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی (شکل ۱۴ ب) استفاده گردید [۴۵]. بر اساس بررسی‌های صحرایی و مقاطع میکروسکوپی در منطقه، بافت برشی همراه با میانبارهای سیال دو فاز غنی از مایع و تک فاز گاز شکل گرفته است. از این رو، فرایند جوشش رخ داده است و می‌توان دمای همگن‌شدگی را معادل دمای به دام افتادن سیال در نظر گرفت [۴۱، ۴۶]. براساس شکل ۱۴ ب، فشارهای بدست آمده برای سیال در زمان به دام افتادن در کانی اسفالریت کمتر از ۵۰ bar، در کانی باریت در گستره‌ای بین کمتر از ۵۰ تا ۱۵۰ bar، در کانی کوارتز بین ۵۰ تا ۱۰۰ bar است که تعداد ۲ نمونه از ۱۲ نمونه بررسی شده فشار نزدیک به ۲۰۰ bar را نیز نشان می‌دهند. رگچه‌های سیلیسی در این بررسی‌ها نشانگر حضور سه سری میانبارهای سیالی با فشارهای مختلف هستند. سری اول دارای فشار کمتر از ۵۰ bar هستند که بخش بزرگی از سیال‌ها را شامل می‌گردد. سری دوم دارای فشارهای بین ۵۰ تا ۱۰۰ bar هستند که تعداد این میانبارها نسبت به سری اول کمتر است و سرانجام نوع سوم فشارهای حدود ۲۰۰ bar و تعداد کمتری نسبت به دو نوع دیگر دارند. برای تعیین چگالی سیال‌های کانه‌زا، از نمودار تغییرات شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی [۴۷] استفاده شد. بر این اساس، چگالی سیال‌های کانه‌زا برای میانبارهای موجود در بلورهای باریت در گستره ۰/۸ تا 1.1 g/cm^3 بدست آمده است. با توجه به شکل ۱۵ پ،

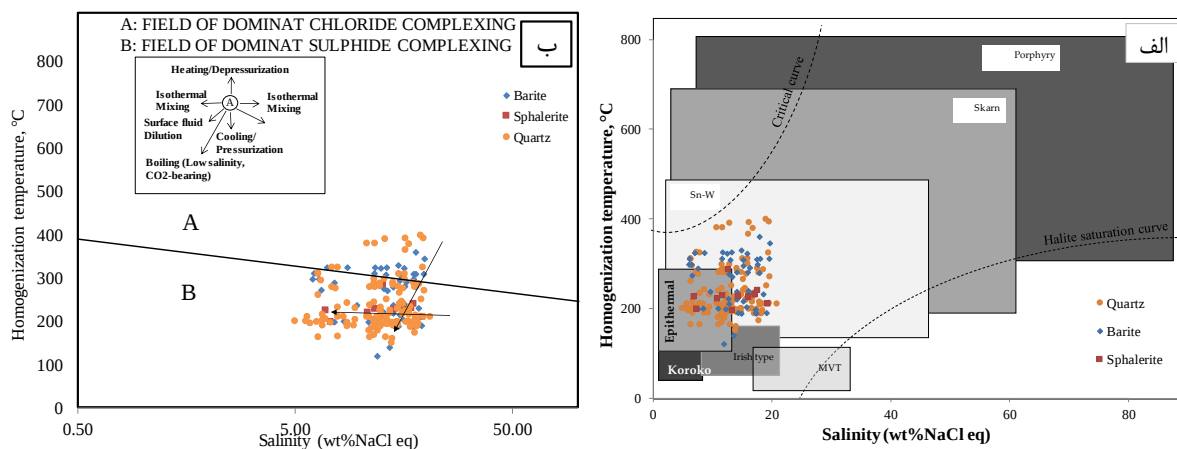
در این کانی دو انبوه از میانبارهای سیال دیده می‌شود که اولی با فشار کمتر از ۰/۸ تا 0.9 g/cm^3 و دومی با فشار حدود 1.0 g/cm^3 است. چگالی‌های بدست آمده برای سیال‌های درگیر در بلورهای اسفالریت گستره‌ای از ۰/۹ تا 1.0 g/cm^3 نشان می‌دهند. این تغییر می‌تواند به دلیل تفاوت در میزان شوری میانبارها در دماهای همگن‌شدگی نزدیک به هم رخ داده باشد. چگالی سیال‌های درگیر در بلورهای کوارتز نیز از ۰/۷ تا 1.0 g/cm^3 در تغییر است که این تغییرات نیز بیانگر حضور دو نسل میانبار سیال در بلورهای میزبان است. چگالی‌های نسل اول از ۰/۷ تا 0.8 g/cm^3 و نسل دوم از ۰/۹ تا 1.0 g/cm^3 در تغییر هستند (شکل ۱۴ پ). برای تعیین عمق احتمالی رخداد کانی‌زایی در منطقه آلچاقشلاق از نمودار همگن‌شدگی میانبارهای سیال نسبت به شوری استفاده شد [۴۸]. بر پایه نمودار عمق-دما فشار سیال-های درگیر در منطقه آلچاقشلاق (شکل ۱۴ ت)، رگه‌های کانه‌دار در عمق کمتر از ۱ کیلومتر و فشار کمتر از ۲۰ مگاپاسکال تشکیل شده اند.

خاستگاه و ویژگی‌های سیال‌های کانه‌دار

شواهد بافتی در مراحل مختلف کانه‌زایی چون برش‌های گرمابی و بررسی یافته‌های ریزدماسنجی در رخداد کانه‌زایی آلچاقشلاق گویای رخداد فرآیند جوشش طی تکامل این سامانه گرمابی است. همزیستی میانبارهای سیال دوفازی LV و VL و تک‌فاز گازی در بلور میزبان مهمترین شواهد رخداد جوشش در سامانه‌های گرمابی هستند [۴۹، ۵۰]. برای تعیین خاستگاه سیال‌های مولد کانسار آلچاقشلاق از نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی [۴۵] استفاده شد. براین اساس، کانسار آلچاقشلاق در رده کانسارهای فراگرمایی قرار می‌گیرد (شکل ۱۵ الف). در روند تکامل سیال‌های فراگرمایی، عواملی چون دما، فشار، pH و آب‌های جوی اثرگذار بوده و با توجه به شواهد صحرایی چون حضور بافت برشی در این منطقه، ممکن است جوشش و سردشدگی و همچنین آمیختگی هم‌دما با محلول‌های دیگر با شوری متفاوت رخ داده باشد (شکل ۱۵ الف). برای تعیین نوع لیگندهای موثر در حمل عناصر فلزی در محلول‌های کانه‌ساز در این کانسار، از نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی [۵۱] استفاده گردید. بر این اساس، هر دو لیگاند کمپلکس‌ساز بی‌سولفیدی و کلریدی در حمل فلزها در این سامانه نقش داشته‌اند (شکل ۱۵ ب).



شکل ۱۴ الف) نمودار شوری و نقطه ذوب پایانی یخ در سیال‌های دارای نمک‌های مختلف [۵۲]. ب) نمودار دومتغیره شوری نسبت به دمای همگنی برای تعیین فشار سیال در زمان به دام افتادن [۴۵]. پ) نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی برای تعیین چگای سیال‌های کانه‌زا [۴۷]. ت) نمودار دما-عمق-فشار میانبارهای سیال در سامانه NaCl-H₂O که بیانگر ارتباط فازها در فشارهای ایستایی و سنگ ایستایی است [۴۸].



شکل ۱۵ الف) جایابی یافته‌های میانبارهای سیال منطقه آلچاق‌شلاق بر نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی [۵۰]. برای تعیین نوع لیگندهای کمپلکس‌ساز در محلول‌های گرمایی. ب) نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی برای تعیین نوع کانسار در آلچاق‌شلاق [۴۵].

برداشت

کانی‌زایی گرمابی چندفلزی آلچقشلاق، در شمال غرب کشور و در کمربند فراگرمایی- پورفیری ارسباران رخ داده است. رگه‌های سیلیسی و باریتی در این کانسار به میزبانی سنگهای آتشفشانی (ریولیتی، ریبوداسیتی، داسیت آندزیتی) با ترکیب حدواسط تا اسیدی، سامانه‌ای رگه‌ای- برشی در ارتباط با ساختار (به‌عنوان عامل اصلی کنترل‌کننده کانه زایی) ایجاد نموده است. شواهدی چون بافت‌های برشی و پرکننده فضاهای خالی همراه با دگرسانی‌های سیلیسی، آرژلیک و پروپیلیتی نقش سیال‌های گرمابی را در این کانه زایی تقویت می‌نماید. حضور بافت برشی گرمابی از ویژگی‌های بارز این سامانه است که گسترش بیشتری دارد. کانی‌های سولفیدی چون اسفالریت، گالن، کالکوپریت، پیریت، آرسنوپریت و تتراهدریت به‌عنوان کانه‌های اصلی و کوارتز، باریت و کلسیت به‌عنوان کانی‌های باطله در این سامانه کانی‌زایی دیده می‌شوند. نتایج تجزیه نمونه‌های زمین‌شیمی نشان دهنده عیار بالای روی و سرب و همراهی آنها با سامانه رگه‌ای و همبستگی مثبت آنها با مس، نقره، آرسنیک و تا حدی طلا در پهنه‌های سیلیسی و باریتی است. برپایه بررسی‌های ریزدماسنجی میانبارهای سیال درون بلورهای کوارتز، باریت و اسفالریت دما ۱۴۰ تا ۳۹۴ درجه سانتی‌گراد و شوری ۵ تا ۲۰/۹ درصد وزنی معادل نمک طعام بدست آمده است. همچنین، حضور همزمان میانبارهای سیال دو فازی غنی از مایع و تک‌فازی گازی و بافت‌های برشی گرمابی به فرآیند جوشش و افت فشار همراه با نهشت کانی‌های سولفیدی اشاره دارند. در پایان، آمیزه‌ای از سیال‌های ماگمایی و جوی را می‌توان به‌عنوان خاستگاه سیال‌های موثر در کانه زایی در نظر گرفت. چنان که بیان شد، تعداد و گستره توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق چون پورفیری کیکال در شرق و سونگون در شمال این کانی‌زایی، می‌تواند نشانگر نقش و ارتباط مستقیم و یا غیرمستقیم (موتور گرمایی) این توده‌ها با کانه‌زایی در این سامانه گرمابی باشند.

قدردانی

این پژوهش بخشی از رساله دکتری نویسنده اول مقاله در دانشگاه تبریز است. از این رو، نگارندگان بر خود لازم می‌دانند که از حمایت‌های اساتید و مسئولان این دانشگاه، همچنین حمایت‌های مالی سازمان زمین‌شناسی و پی‌جویی معدنی شمال‌غرب، و در پایان از داوران محترم مجله قدردانی نمایند.

مراجع

- [1] Kowsari A., "Semi-detailed geochemical studies of Arpalin area (vol. 3)", Geological and Mineral Exploration Survey of Iran, Tehran (1994).
- [2] Ghorbani M., "Economic Geology of Mineral Deposits of Iran (vol. 1)", Arian Zamin publication, Tehran (2007).
- [3] Calagari A. A., "Geochemical, stable isotope, noble gas, and fluid inclusion studies of mineralization and alteration at Sungun porphyry copper deposit, East Azarbaijan, Iran", Implication for genesis. Unpublished PhD. Thesis. Manchester University, Manchester, (1997) p. 537.
- [4] Calagari A. A., "Geology and fracture-related hypogene hydrothermal alteration and mineralization of porphyry copper deposit at Sungun", Journal of Geological Society of India 64 (2004) 595-618
- [5] Ramezani Tayebe, Maanijou M., Taghavi A., Lentz., "Influence of Tectonic Factor on Porphyry Copper Deposits Localization and Distribution (Arasbaran District, NW Iran)", Synthesis of Alteration Patterns and Lineaments Using Digital Techniques. Geotectonics, (2022) 56. 10.1134/S0016852122030062.
- [6] Izadyar J., M.Sc. "Thesis Study on the Igneous Rocks in the Sungun's ore Area", Shahid Beheshti University, Faculty of Earth Science, Tehran (1992).
- [7] Ebrahimi S., Alirezaei S., Pan Y., Mohammadi B., "Mineralogy and ore fluid characteristics of the Masjed Daghi gold bearing veins system, NW Iran", Journal of Economic Geology 9(2) (2017) 561-586.
- [8] Hosseinzadeh M. R., Maghfouri S., Ghorbani M., Moayyed M., "Vein- Veinlets related with Mineralization and Fluid Inclusion Studies in the Sonajil Porphyry Cu- Mo Deposit, Arasbaran Magmatic Zone (in Persian)", Scientific Quarterly Journal of Geoscience 26(101) (2016) 219-231. <https://doi.org/10.22071/gsj.2016.41069>
- [9] MAANIJOU M., RAMEZANI T., Alipor S., "The main effective factors on the mineralization of Sonajil porphyry-epithermal copper-gold deposit, using remote sensing, mineralogical and geochemical studies", IRANIAN JOURNAL OF GEOLOGY, 12(48) (2019) 63-79. <https://sid.ir/paper/129274/en>
- [10] Hassanpour S., "Metallogeny and Mineralization of copper and gold in Arasbaran zone (Eastern Azerbaijan (in Persian))", Ph. D.

- [20] Nakhjavani B., Alavi S. G., "Type of mineralization, Geochemistry of Alteration and Relation of Gold and associated elements in the Hizeh-jan area (NW Iran) (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 26(3) (2018) 673-688.
- [21] Pournik P., "Economic geology and Au exploration at Sharafabad-Hizehjan area (northwest of Varzaghan) (in Persian)", Institute of Earth Science, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, (2002) 201 pp.
- [22] Miranvari A. S., Calagari A. A., Siahcheshm K., Sohrabi G., "Geochemical study of alteration zones around Au-bearing silicic veins at Zailic, East of Ahar, East- Azarbaijan Province", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 27 (2) (2019) 347-360.
- [23] Aghaei M., Rastad E., Shamanian G. H., Madanipour S., "Characteristics of the gold-bearing and barren quartz veins at the Zaylik-Sarilar epithermal deposit, Ahar-Arasbaran Zone, NW Iran: Evidence from mineralogy, alteration, texture and fluid inclusion", Ore Geology Reviews, Volume 154 (2023) 105341, ISSN 0169-1368, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105341>.
- [24] Asiay Soufiani F., Mokhtari M. A. A., Kouhestani H., Azimzadeh A. M., "Geology, geochemistry and fluid inclusion of Qarachilar Cu-Mo-Au quartz veins, northeast of Kharvana, East Azerbaijan", Journal of Economic Geology, 10(1) (2018) 139-171. <https://doi.org/10.22067/econg.v10i1.58161>.
- [25] Ferdosi R., Calagari A.A., Hosseinzadeh M. R., Siahcheshm K., "Investigation of petrography, mineralography, and mineralization of gold-bearing epithermal veins in Astaraghan area, Kharvana, East Azarbaijan (in Persian)", 32th national and 1th international Geosciences Congress. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (2014).
- [26] Ferdowsi R., Calagari A.A., Hosseinzadeh M. R., Siahcheshm K., "Petrography, geochemistry and mineral chemistry of Asteragan porphyritic stock, Kharvana, Eastern Azarbaijan (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 23(4) (2016) 759-774.
- [27] Jamali H., Mehrabi B., "Relationships between arc maturity and Cu-Mo-Au porphyry and related epithermal mineralization at the Cenozoic Arasbaran Magmatic Belt", Ore Geology thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (2010).
- [11] Khalilzadeh H., Alipour S., Abedini A., "Geochemistry, tectonic setting and magmatic origin of the mineralized stock in SahebDivan porphyry copper system", NW Iran. Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 27 (4) (2019) 781-794.
- [12] Simmonds V., Calagari A. A., Kyser K., "Fluid inclusion and stable isotope studies of the Kighal porphyry Cu-Mo prospect, East-Azarbaijan", NW Iran. Arabian Journal of Geosciences 8 (2015) 437- 453. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1130-z>
- [13] Ramazani T., Maanijou M., Asadi S., Lentz D., Pirouznia N., "Comparison of mineralization of the Sungun and Kighal porphyry copper deposits, NW Iran: With an emphasis on fluid inclusion studies", JOURNAL OF ECONOMIC GEOLOGY, 10(2) (2019) 403-424. <https://sid.ir/paper/180484/en>.
- [14] Hajalilou B., Aghazadeh M., "Geological, Alteration and Mineralization Characteristics of Ali Javad Porphyry Cu-Au Deposit, Arasbaran Zone, NW Iran", Open Journal of Geology, 6 (2016) 859-874. <http://dx.doi.org/10.4236/ojg.2016.68066>
- [15] Calagari A. A., Hosseinzadeh G., "The mineralogy of copper bearing skarn to the east of the Sungun-Chay river, East-Azarbaijan, Iran", Journal of Asian Earth Science 28 (2006) 423-438.
- [16] Mollai H., Sharma R., Pe-Piper G., "Copper mineralization around the Ahar Batholith, north of Ahar (NW Iran): Evidence for fluid evolution and the origin of the skarn ore deposit", Ore Geology Reviews 35 (2009) 401-414.
- [17] Hassanpour S., "The alteration, mineralogy and geochronology (SHRIMP U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) of copper bearing Anjerd skarn, north of the Shayvar Mountain, NW Iran", International Journal of Earth Sciences 102(3) (2013) 687- 699. <https://doi.org/10.1007/s00531-012-0819-7>
- [18] Hezarkhani A., "Anjerd skarn geochemistry and its association with economic copper mineralization, Azarbaijan-Iran", 15 (2004) 158-175.
- [19] Nakhjavani B., Calagari A. A., Alavi S. G., Siah Cheshm K., "Study of the intrusive body associated with Gowdal skarn (North of Ahar) and its comparison with other skarn granitoids", Iranian Journal of Petrology, 11(4) (2021) 111-134.

- University of Hamburg, Germany, (1993) 245p. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.11.008>.
- [38] Jamali H., Dilek Y., Daliran F., Yaghubpur A., Mehrabi B., "Metallogeny and tectonic evolution of the Cenozoic Ahar-Arasbaran volcanic belt, northern Iran", *International Geology Reviews* 52(4-6) (2009) 608-630. <https://doi.org/10.1080/00206810903416323>.
- [39] Jamali H., Mehrabi B., "Relationships between arc maturity and Cu-Mo-Au porphyry and related epithermal mineralization at the Cenozoic Arasbaran Magmatic Belt", *Ore Geology Reviews*, 65(2) (2015) 487-501. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.06.017>.
- [40] Whitney D. L., Evans B. W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", *American Mineralogist* 95 (2010) 185-187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>.
- [41] Roedder E., Bodnar R.J., "Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies", *Annual Reviews of Earth and Planetary Science* 8(1), (1980) 263-301. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.08.050180.001403>.
- [42] Roedder E., "Fluid inclusions. Reviews in Mineralogy 12", *Mineralogical Society of America*, (1984) p 644.
- [43] Shepherd T. J., Ranbin A. H., Alderton D. H. M., "A practical guide to fluid inclusion studies", Blackie, Glasgow (1985) p. 223.
- [44] Symons D., Symons T., Sangster D., "Paleomagnetism of the socieyu Cliffs dolostone and the age of the Nanisivk zinc deposits", *Baffin Island, Canada: Mineralum Deposita* 35 (2000) 672-682. <https://doi.org/10.1007/s001260050270>.
- [45] Wilkinson J. J., "Fluid inclusions in hydrothermal ore deposit", *Lithos* 55 (2001) 229-72. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5).
- [46] Ouyang H., Wu X., Mao J.W., Su H., Santosh M., Zhou Z., Li C., "The nature and timing of ore formation in the Budunhua copper deposit, southern Great Xing'an Range: Evidence from geology, fluid inclusions, and U-Pb and Re-Os geochronology", *Ore Geology Reviews* 63 (2014) 238-251. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.016>.
- [47] Ahmad S. N., Rose A. W., "Fluid inclusions in porphyry and skarn ores at Santa Rita, New Mexico", *Economic Geology* 75 (1980) 229-250. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.75.2.229>.
- Reviews, 65(2) (2015) 487-501. DOI: [10.1016/j.oregeorev.2014.06.017](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.06.017)
- [28] Jamali H., "Geology, geochemistry, mineralogy and genesis of Mivehrud Au-Cu mineralization, Eastern Azerbaijan Province (in Persian)", M.Sc. Thesis, Tarbiat Moallem University of Tehran, Tehran, Iran, (1999) 172 pp.
- [29] Radmard K., Zamanian H., hosainzadeh M., ahmadi khalaji A., "The study of mineralogy, geochemistry and fluid inclusions in quartz veins at the Mazreh Shadi gold deposit", *northeastern Tabriz. Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 25 (4) (2018) 823-844. <http://ijcm.ir/article-1-999-en.html>.
- [30] Baniadam F., "Geology and genesis of goldcopper mineralization in Nabijan area (in Persian)", M.Sc. Thesis, Institute of Geoscience, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (2003) 167 pp.
- [31] Ghadimzadeh H., "Economic geology and Au exploration at Safikhanlou-Noghdouz area (SE Ahar) (in Persian)", M.Sc. Thesis, Institute of Earth Science, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (2002) 232 pp.
- [32] Alavi M., "Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations", *Tectonophysics*, 229(2) (1994) 211-38. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2).
- [33] Aghanabati A., "Geology of Iran. Geological Survey of Iran Publication (in Persian)", Tehran (2006).
- [34] Babakhani A. R., Lesquer J. L., Rico R., "Geological Quadrangle map of Ahar, 1:250000", Geological Survey of Iran (1990).
- [35] Jahangiri A., "Post-collisional Miocene adakitic volcanism in NW Iran: geochemical and geodynamic implications", *Journal of Asian Earth Sciences* 30 (2007) 433-447. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.11.008>.
- [36] Castro A., Aghazadeh M., Badrzadeh Z., Chichorro M., "Late Eocene-Oligocene post-collisional monzonitic intrusions from the Alborz magmatic belt, NW Iran. an example of monzonite magma generation from a metasomatized mantle source", *Lithos*, 180-181 (2013) 109-127. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.08.003>.
- [37] Mehrpartou M., "Contributions to the geology, geochemistry, ore genesis and fluid inclusion investigations on Sungun Cu-Mo porphyry deposit, NW of Iran", PhD Dissertaton,

area", Guanajuato Mining District, México, Ore Geology Reviews 89 (2017) 143-170, ISSN 0169-1368,

<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.024>.

[50] Pirajno F., "*Hydrothermal processes and mineral system*", Springer Science, New York (2009) p 1273. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8613-7>.

[48] Fournier R. O., "*Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment*", Econ. Geol. 94 (1999) 1193–1212.

[49] Moncada D., Baker D., Bodnar RJ., "*Mineralogical, petrographic and fluid inclusion evidence for the link between boiling and epithermal Ag-Au mineralization in the La Luz*