

مطالعه زمین شناسی، کانی شناسی و ژئوشیمی کانسار آهن رباعی، جنوب دامغان

فرج‌اله فردوست^۱، اکبر عبدالهی حیدر باغی^۲ و سولماز بلوچی^۳

^۱دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۳دانشجوی دکترا، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۳

چکیده

کانسار آهن رباعی در ۹۶ کیلومتری جنوب دامغان واقع شده است. سنگ‌های میزبان، سنگ‌های آهنی کرتاسه پسن (بخش I) و سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی انوسن از جمله توف‌های ماسه‌ای (بخش II) هستند. دگرسانی‌ها شامل کلریتی، اپیدوتی، آرژیلیتی، سیلیسی، کربناتی و هماتیته شدن است. کانی‌های تشکیل دهنده به سه دسته فلزی آهن دار (مگنتیت، هماتیت، پیریت، پروتیت، گوتیت و لیمونیت)، فلزی مس دار (کالکوپیریت، کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت و آزوریت) و باطله (کلسیت، دولومیت، کوارتز، گارنت، اپیدوت و کلریت) تقسیم می‌شوند. ساخت و بافت ماده معدنی به صورت توده‌ای، رگه-رگچه‌ای، شکافه پرکن، دانه پراکنده و جانشینی است. در بخش I میزان عیار فلزات آهن کل حدود ۶۰ درصد، مس ۰/۷ درصد و طلا ۲/۷ گرم در تن و در بخش II آهن کل بین ۸۲/۹۱-۵/۸۸ درصد (عیار میانگین ۳۱/۲ درصد)، مس بین ۲۰۷۶۱-۲۷۵ گرم در تن و طلا ۰/۸۹ گرم در تن متغیر است. مطالعات میانبارهای سیال بر روی کانی کوارتز مربوط به بخش II کانسار انجام شد که فراوانی دمای همگن شدن بین ۲۰۰-۲۴۹ درجه سانتی‌گراد با شوری ۲-۴ درصد وزنی معادل نمک طعام است. بر اساس نتایج به دست آمده از این تحقیق، بخش I با اسکارن کلسیمی دما پایین و بخش II، با کانه‌زایی نوع اکسید آهن-مس-طلا (IOCG) شباهت بیشتری نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: زمین شناسی، کانی شناسی، ژئوشیمی، آهن، رباعی، دامغان.

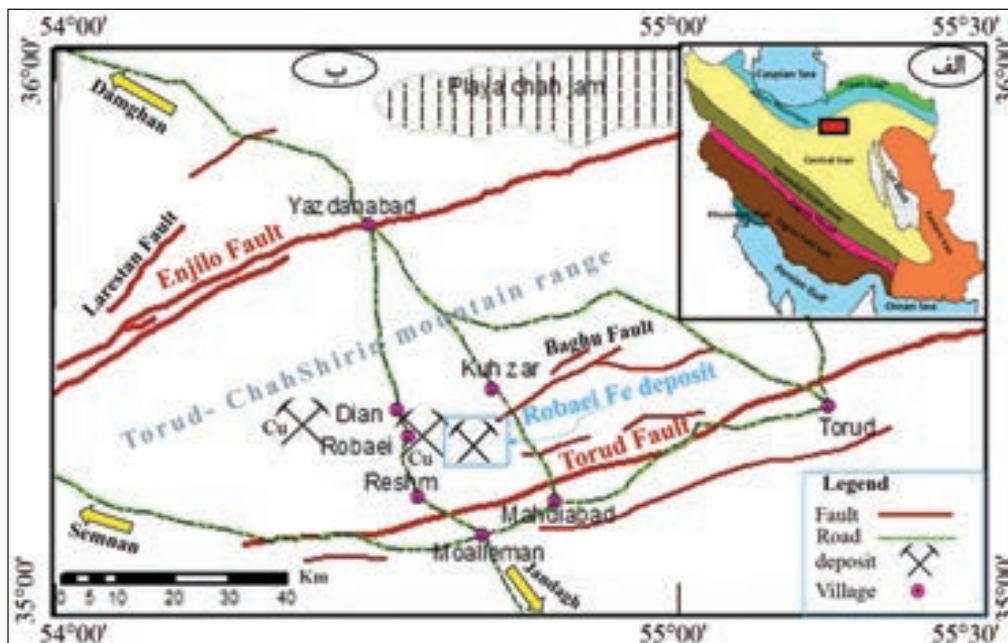
***نویسنده مسئول:** فرج‌اله فردوست

E-mail: Faraj_Fardoost@yahoo.com

۱- پیش‌نوشتار

۳۳° ۳۵' عرض شمالی، در بخش شمالی پهنه ساختاری-رسوبی ایران مرکزی و رشته کوه آتشفشانی-رسوبی طرود-چاه شیرین واقع شده است (شکل‌های ۱-الف و ب).

کانسار آهن رباعی در ۹۶ کیلومتری جنوب شهرستان دامغان در استان سمنان، ۶ کیلومتری جنوب شرق روستای دیان، با مختصات جغرافیایی ۲۲° ۵۴' طول شرقی و



شکل (۱-الف) نقشه ساده شده پهنه‌های ساختاری-رسوبی ایران (آقاناتی، ۱۳۸۳) و نمایش موقعیت منطقه مورد مطالعه در بخش شمالی پهنه ساختاری ایران مرکزی (ب) موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به کانسار آهن رباعی در نوار آتشفشانی-رسوبی طرود-چاه شیرین و موقعیت قرارگیری آن در بین دو گسل اصلی طرود در جنوب و انجیلو در شمال برگرفته از هوشمندزاده و همکاران (۱۳۵۷).

شامل مجموعه شیست، سنگ آهک و دولومیت دگرگون شده، ماسه‌سنگ، توف و سنگ‌های آتشفشانی دگرگون شده با سن اردوویسین - سیلورین هستند. واحدهای کرتاسه پسین در منطقه تناوبی از لایه‌ها و بخش‌های شیل سبز رنگ، آهک نازک تا ضخیم لایه و آهک مارنی خاکستری متمایل به سبز با میان‌لایه‌های ماسه‌ای و ماسه‌سنگ آهکی و گاهی نیز لایه‌های میکروکنگلومرها را شامل می‌شود. یک توده نیمه‌عمیق (ساب ولکانیک) با ترکیب داسیت به سن ائوسن - الیگوسن؟ به داخل این مجموعه نفوذ کرده که در مجاورت با بخش‌های آهکی، اسکارن‌زایی آهن رخ داده است. بعد از واحدهای کرتاسه پسین، مهم‌ترین واحدهای رخنمون یافته در منطقه عبارت از واحدهای آتشفشانی - رسوبی با سن ائوسن که شامل گدازه‌های زیردریایی با ترکیب آندزیت، آندزیت - بازالتی، تراکی آندزیت، توف برش، توف ماسه‌ای و آگلومرا هستند. واحدهای ائوسن پتانسیل کانه‌زایی فلزات پایه از جمله مس، سرب، روی، طلا و همچنین کانه‌زایی آهن دارند که کانسار آهن رباعی (بخش II) نمونه‌ای از آنهاست. در پایان، رسوبات جوان کواترنری از جمله کنگلومراهای جوان فاقد سیمان یا با سیمان ضعیف و رسوبات آبرفتی سطح منطقه را می‌پوشانند.

۴- زمین‌شناسی محدوده معدنی

مهم‌ترین واحدهای سنگی موجود در محدوده کانه‌زایی شامل واحدهای آهکی کرتاسه پسین و واحدهای آتشفشانی - رسوبی ایوسن است (شکل ۲). واحدهای کرتاسه از لحاظ سنگ‌نگاری شامل تناوبی از آهک‌های شیلی سبز رنگ دارای انواع فسیل‌های گاستروپود، آمونیت، مرجان‌ها و فسیل شاخص گلوبوترونکانا مربوط به کرتاسه پسین، میکروکنگلومرها و آهک‌های توده‌ای هستند (شکل ۳). میکروکنگلومرها حاوی دانه‌های کوارتز هستند که در سیمان آهکی قرار دارند. همچنان که بیشتر گفته شد، در نتیجه تریزیک توده‌های داسیتی نیمه‌عمیق مربوط به ائوسن - الیگوسن؟ اسکارن‌زایی آهن در داخل سنگ آهک‌های کرتاسه پسین تشکیل شده است. داسیت‌ها بافت پورفیری و گاهی میکروگرانولار دارند و کانی‌های اصلی آن شامل پلاژیوکلاز، کوارتز و آلکالی فلدسپات است. آلکالی فلدسپات‌ها معمولاً متحمل دگرسانی به کانی‌های رسی شده‌اند. کانی‌های مافیک شامل بیوتیت و هورنبلند هستند (شکل‌های ۴- الف و ت). بلورهای پلاژیوکلاز به صورت خودشکل تا بی‌شکل با ماکل پلی‌سنتیک و گاه با منطقه‌بندی مشاهده می‌شوند. کوارتزها به صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و دارای حالت خلیج‌خوردگی هستند. کانی‌های فرومنیزین آب‌دار نظیر آمفیبول و بیوتیت حاشیه سوخته دارند؛ به عبارتی آپاسیتی و به اکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند. آپاسیت شدن ناشی از کاهش فشار (H_2O) در حین صعود ماگما و افزایش دما در طی اختلاط ماگمایی است (Kawabata and Shuto, 2005). کانی‌های تشکیل‌دهنده زمینه داسیت‌ها شامل کوارتز، کانی‌های رسی، پلاژیوکلاز، کلسیت و مقدار کمی اپیدوت است. واحدهای آتشفشانی - رسوبی ائوسن براساس مطالعات صحرایی به دو دسته گدازه و آذرآواری قابل تفکیک هستند. واحدهای گدازه‌ای شامل آندزیت و آندزیت بازالتی به رنگ خاکستری متمایل به قرمز و تراکی آندزیت قهوه‌ای رنگ متمایل به کرم و سنگ‌های آذرآواری نظیر توف ماسه‌ای، توف برش، توف‌های دگرسان شده، لیتیک توف و آگلومرا می‌باشند که واحد توف ماسه‌ای، میزبان اصلی بخش II کانسار آهن رباعی است. تراکی آندزیت‌ها در مقاطع نازک میکروسکوپی، بافت پورفیری و میکروولیتی جریانی دارند. کانی‌های تشکیل‌دهنده تراکی آندزیت‌ها، بلورهای درشت پلاژیوکلاز هستند که در خمیره ریزیلور از همین کانی‌ها قرار دارند (شکل‌های ۴- ب و ت). پلاژیوکلازها در برخی موارد حالت تحلیل‌رفتگی دارند که ناشی از تغییرات دما و فشار در طی صعود ماگما یا تغییرات شیمیایی آن است (Chen and Zhang, 2008). کوارتز به صورت ثانویه در محل حفرات تشکیل شده است. کانی کدر در این نمونه‌ها بیشتر پیریت است که به صورت ثانویه و معمولاً به حالت دانه پراکنده و گاه به شکل تجمعی مشاهده می‌شود. توف‌های ماسه‌ای دارای کانی‌های کوارتز، اکسی‌هورنبلند، مقدار کمی

در این رشته کوه، تعدادی از کانسارهای آهن از جمله پنج کوه، چالو و شیخاب وجود دارند که کانسار آهن رباعی یکی دیگر از آنهاست. با توجه به مطالعات انجام شده بر روی برخی از این کانسارها، از اسکارنی بودن آنها صحبت شده است. به عنوان مثال، کانسار آهن پنج کوه از نوع اسکارنی معرفی شده است و تا حدی ویژگی‌های اسکارن‌های طلا و مس را نیز نشان می‌دهد (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۸۵). کانسار آهن چالو نیز دیگر کانسار اسکارنی واقع در محور طرود - چاه شیرین است (تقی‌پور و همکاران، ۱۳۹۰). کانه‌زایی آهن را در منطقه رباعی براساس سنگ‌میزبان می‌توان به دو بخش تقسیم‌بندی نمود: الف) سنگ‌میزبان کربناته و در مجاورت با داسیت (بخش I) و ب) سنگ‌میزبان توف ماسه‌ای و تراکی آندزیت (بخش II). بنا به مطالعات بادوزاده کانرش (۱۳۹۰)، بخش I کانه‌زایی آهن رباعی، اسکارنی است. اما با توجه به گستردگی کانی‌زایی آهن و رخداد آن در واحدهای آتشفشانی - رسوبی ائوسن منطقه (تشکیل بخش II کانه‌زایی)، مطالعه زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و الگوی تشکیل کانسار آهن رباعی در استان سمنان و در رشته کوه طرود - چاه شیرین هم از لحاظ علمی و هم از نظر اکتشافی حایز اهمیت است.

۲- روش مطالعه

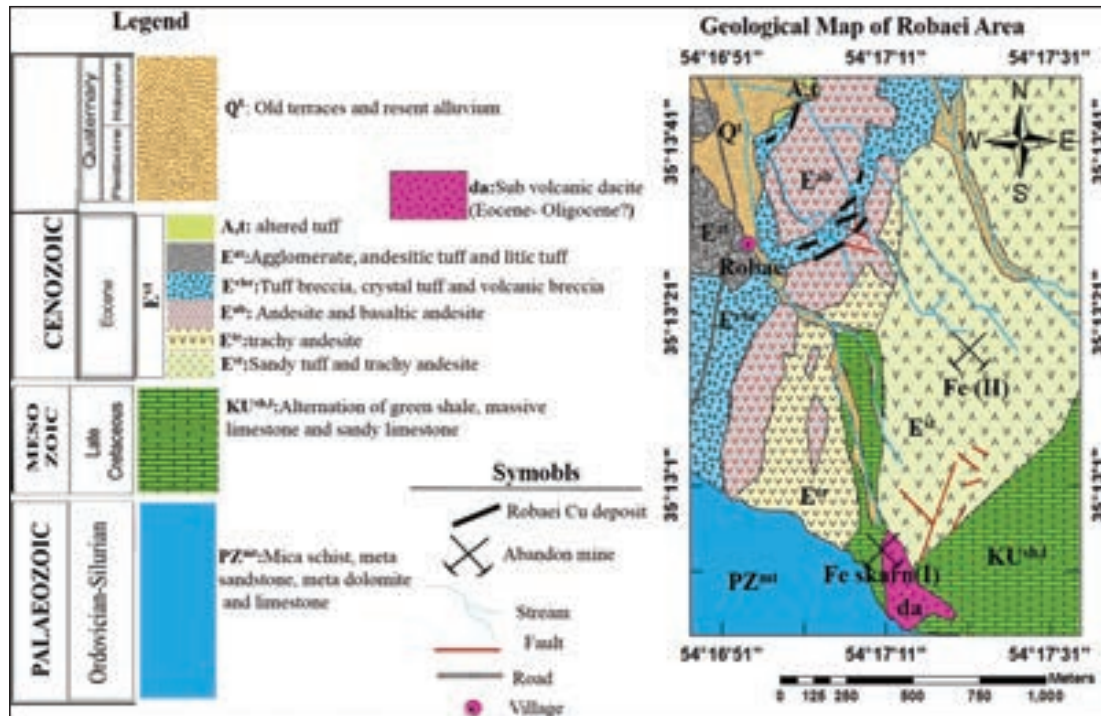
جهت انجام این تحقیق طی چند مرحله بازدید صحرایی، ۴۰ نمونه از سنگ‌های دربرگیرنده و کانسنگ ماده معدنی با مختصات جغرافیایی و بر مبنای تنوع و تغییرات سنگ‌شناسی به صورت سیستماتیک جمع‌آوری شدند. برای انجام مطالعات میکروسکوپی، ۱۵ مقطع نازک، ۱۰ مقطع صیقلی و ۵ مقطع نازک - صیقلی در کارگاه تهیه و در آزمایشگاه کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی دانشگاه صنعتی شاهرود مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور مطالعه ژئوشیمی کانسار و برای تعیین عناصر کمیاب و عناصر کمیاب خاکی، ۶ نمونه آنالیز ICP-MS در آزمایشگاه BRIUG (Analytical Laboratory Beijing Research, Institute of Uranium Geology) نمونه جهت تعیین اکسیدهای اصلی در آزمایشگاه IGGCAS (Rock-Mineral preparation and analysis lab, Institute of geology and geophysics) آکادمی علوم چین (Chinese Academy of Sciences; CAS)، ۲ نمونه در شرکت مطالعات مواد معدنی زرآزما به روش XRF، ۵ نمونه با حمایت مالی سازمان توسعه معادن و صنایع معدنی ایران (IMIDRO) در مرکز تحقیقات و فرآورده‌های معدنی ایران به روش XRF و ۱ نمونه به روش ICP-MS آنالیز شد. همچنین برای مشخص کردن حضور طلا در کانسار مورد مطالعه، ۱ نمونه پس از آماده‌سازی به روش Fire Assay در مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران آنالیز شد. به منظور تعیین میزان دما و شوری سیالات تشکیل‌دهنده ماده معدنی، مطالعه میانبارهای سیال بر روی ۱ مقطع دوبر صیقل از کوارتز که به صورت اولیه همراه ماده معدنی در بخش II کانه‌زایی بود، در مرکز تحقیقات و فرآورده‌های معدنی ایران انجام گرفت.

۳- زمین‌شناسی ناحیه‌ای

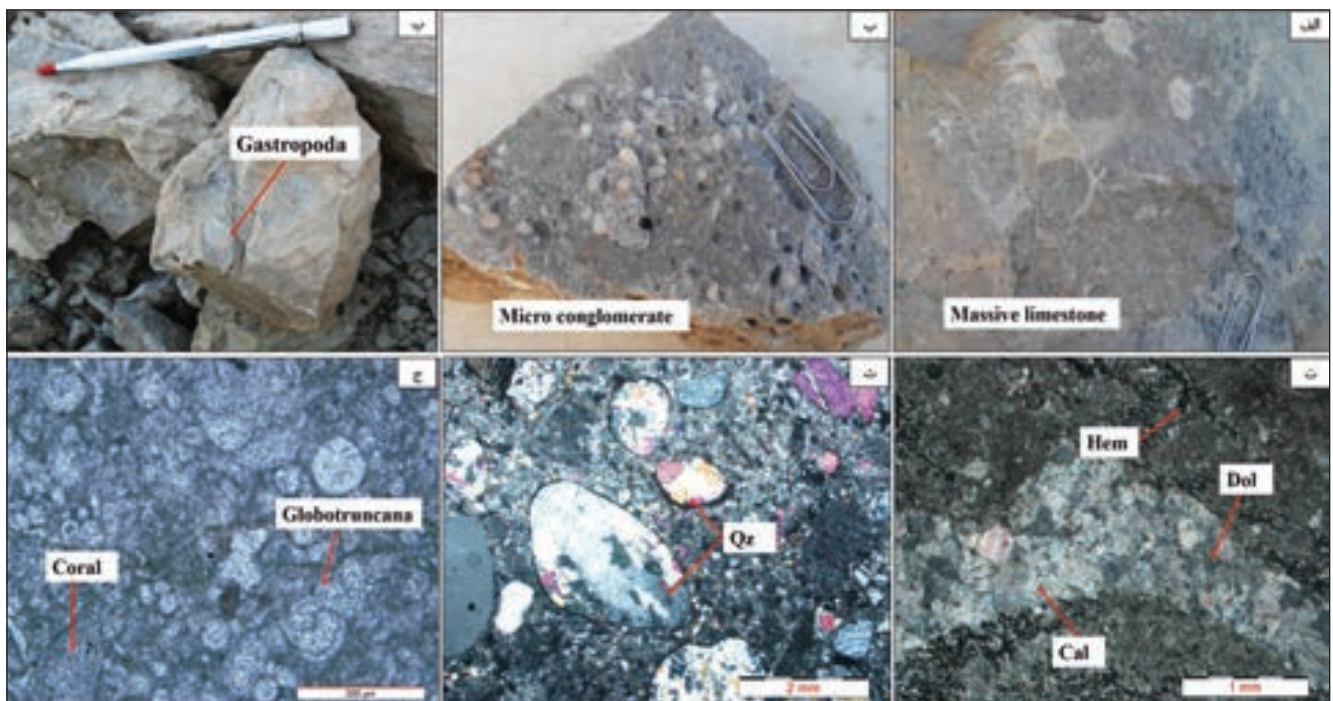
رشته کوه طرود - چاه شیرین در تقسیمات پهنه‌بندی ساختاری - رسوبی ایران جزئی از پهنه ایران مرکزی (آق‌ناباتی، ۱۳۸۳)، زیرپهنه سبزواری (Alavi, 1991)، کمان ماگمایی البرز (Shamania et al., 2004) و یا کمان ماگمایی جدا شده از ارومیه - دختر به وسیله کشیدگی میان کمانی ایران (Hassanzadeh et al., 2002) محسوب می‌شود. این رشته کوه از شمال به گسل انجیلو و از جنوب به گسل طرود محدود می‌شود. روند کلی این رشته کوه موازی با دو گسل محصورکننده آن، شمال شرقی - جنوب غربی (N70E) است (هوشمندزاده و همکاران، ۱۳۵۷). منطقه مورد مطالعه در محدوده چهارگوش نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ طرود (علوی و هوشمندزاده، ۱۳۵۵)، ۱:۱۰۰۰۰۰ کلاته - رشم (جعفریان، ۱۳۷۳) و ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان (اشراقی و جلیلی، ۱۳۸۵) واقع شده است. طبق نقشه‌های زمین‌شناسی یادشده، از لحاظ چینه‌شناسی، توالی لیتولوژیکی منطقه از پالئوزوئیک تا کواترنر را در بر می‌گیرد. واحدهای پالئوزوئیک

کانی‌های ثانویه غیرفلزی در توف‌های ماسه‌ای شامل کلریت، سربیسیت و رگچه‌های کلسیت می‌باشند.

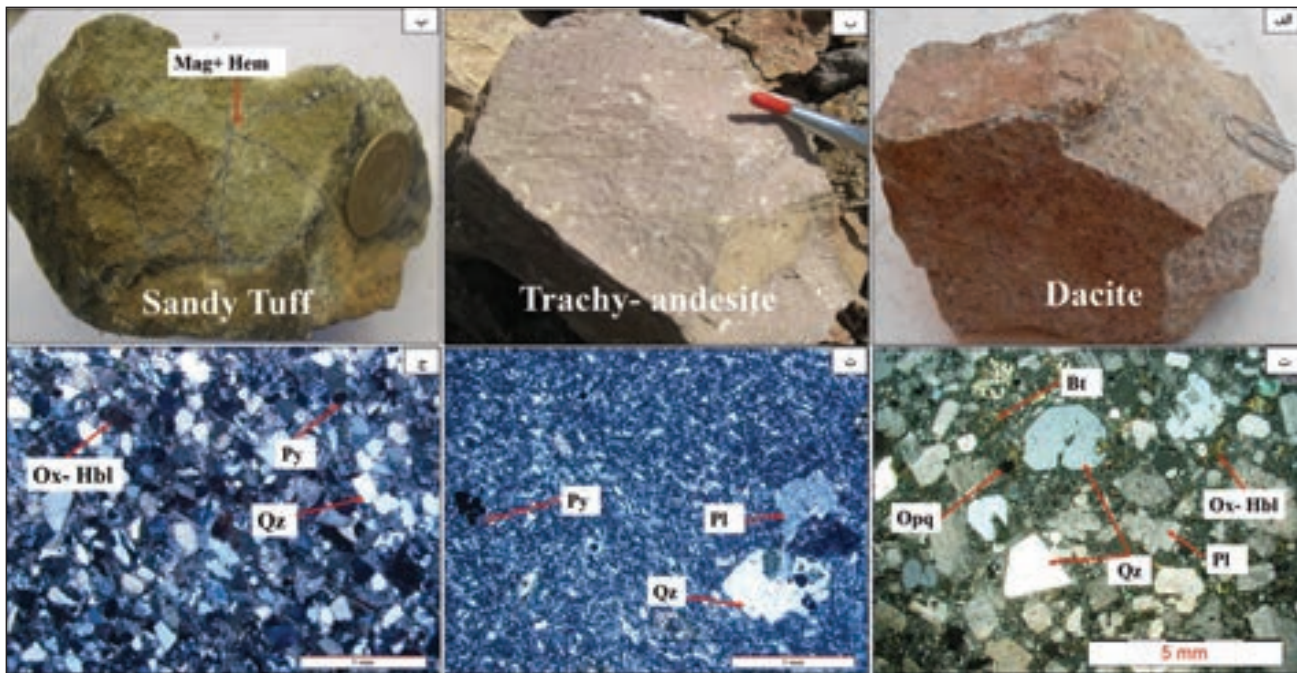
پلاژیوکلاز و کانی‌های فلزی (هماتیت، مگنتیت و پیریت) به صورت رگه-رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی بین دانه‌های هستند (شکل‌های ۴- پ و ج).



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی محدوده معدنی آهن رباعی. موقعیت دو رخداد کانه‌زایی آهن رباعی، بخش I (اسکارنی) و بخش II (IOCG) نشان داده شده است.



شکل ۳- الف) نمای نزدیک از سنگ آهک توده‌ای منطقه رباعی؛ ب) تصویر نمونه دستی میکروکنگلوмера در منطقه؛ پ) تصویر نمونه دستی سنگ آهک شیلی کرتاسه پسین حاوی فسیل‌های گاستروپود؛ ت) تصویر میکروسکوپی از کانی‌های کلسیت (Cal) و دولومیت (Dol) تبلور مجدد یافته بر اثر نفوذ سیالات کانه‌دار در سنگ آهک توده‌ای؛ ث) تصویر میکروسکوپی میکروکنگلو با دانه‌های کوارتز (Qz) در خمیره (زمینه) کربناته؛ ج) تصویر مقطع نازک میکروسکوپی از آهک‌های شیلی حاوی فسیل‌های مرجان و فسیل شاخص گلوبوترونکانا مربوط به کرتاسه پسین. علائم اختصاری کانی‌ها بر اساس (Whitney and Evans 2010) است.



شکل ۴- الف) نمونه دستی توده نیمه عمیق داسیتی به رنگ کرمی متمایل به سبز؛ ب) تصویر نمونه دستی تراکی آندزیت کرمی رنگ در منطقه مورد مطالعه؛ پ) توف ماسه‌ای سبز متمایل به زرد رنگ همراه با رگچه‌های ماده معدنی هماتیت ورقه‌ای (اسپیکولاریت) (Hem) و مگنتیت (Mag)؛ ت) تصویر میکروسکوپی نمونه داسیت نشان‌دهنده بلورهای کوارتز (Qz) خودشکل و نیمه‌شکل دار گاه با بافت خلیجی، اکسی‌هورنبلند (Ox-Hbl) و اکسی‌بیوتیت (Bt)، پلاژیوز کلازهای (Pl) سریستی شده و کانی‌های کدر در نور عبوری ساده (PPL)؛ ث) درشت‌بلور پلاژیوز کلاز (Pl) با حاشیه تحلیل‌یافته، کوارتز ثانویه و پیریت‌های (Py) تجمع‌یافته در زمینه میکرولیتی تراکی آندزیت در نور عبوری نیکول‌های متقاطع (XPL)؛ ج) کانی‌های کوارتز (Qz)، اکسی‌هورنبلند (Ox-Hbl) و دانه‌های پراکنده پیریت (Py) در توف ماسه‌ای نور عبوری نیکول‌های متقاطع (XPL). علائم اختصاری کانی‌ها بر اساس Whitney and Evans (2010) و Chace (1956) است.

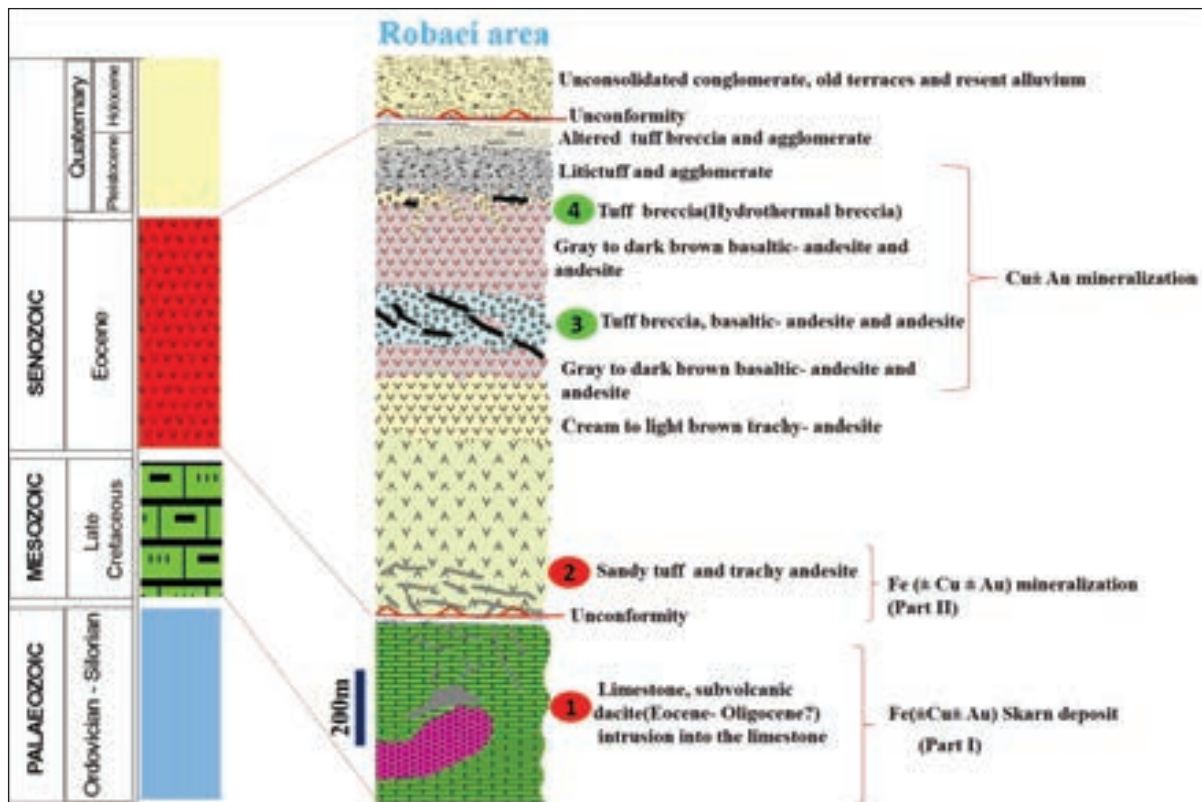
۵- کانه‌زایی و دگرسانی در منطقه

ج) روند شرقی- غربی که برخی از آنها دارای شیب قائم و اغلب دارای شیب متغیر از ۴۰ درجه به سمت شمال و تا ۶۰ درجه به سمت جنوب هستند. یکی از بهترین روش‌ها برای پیدا کردن دگرسانی‌ها، کمک گرفتن از پردازش داده‌های ماهواره‌ای است. با استفاده از پردازش داده‌های تصاویر ماهواره استر، کانی‌های معرف دگرسانی در منطقه شناسایی شده که در محدود اکتشافی رباعی شامل کلریت، اپیدوت، سریست- کلسیت، هماتیت و گوتیت هستند (کریم‌پور، ۱۳۹۵). بر اساس مشاهدات صحرایی، مطالعات میکروسکوپی و بنا به نتایج آنالیز XRD که توسط بادوزاده کانش (۱۳۹۰) انجام گرفته، دگرسانی‌های بخش اسکارنی آهن رباعی (بخش I) را می‌توان به دو دسته دگرسانی در توده نیمه عمیق داسیتی و سنگ میزبان کربناته (آهک‌ها) تقسیم‌بندی نمود. دگرسانی در داسیت‌ها شامل سریستی، آرژیلیتی، پروپیلیتی، کلریتی و سیلیسی و در قسمت آهکی شامل کربناتی، سیلیسی و هماتیتی شدن است. مهم‌ترین دگرسانی‌های موجود در بخش II کانسان آهن رباعی شامل کلریتی، آرژیلیتی، سیلیسی، کربناتی، هماتیتی و لیمونیتی شدن می‌باشد. دگرسانی‌ها از نظر موقعیت کانه‌زایی (فاصله نسبت به کانه‌زایی) در بخش II به ترتیب سیلیسی و کربناتی سپس کلریتی و در نهایت آرژیلیتی است (شکل‌های ۶- پ، ت و ث). بنا به نظر Gally et al (2007). کلریتی شدن یکی از مهم‌ترین پدیده‌هایی است که در اثر محلول‌های گرمابی غنی از Fe و Mg ایجاد می‌شود و در اثر این فرایند، سنگ ظاهری سبز رنگ پیدا می‌کند. هیدرولیز سیلیکات‌های آلومینیم‌دار در محیط اسیدی سبب تشکیل سریست و کانی‌های رسی می‌شود که دگرسانی‌های سریستی و آرژیلیتی را به وجود می‌آورد (Montoya and Hemley, 1975). علاوه بر دگرسانی‌های کلریتی و آرژیلیتی، دگرسانی سیلیسی یکی دیگر از دگرسانی‌های موجود در منطقه است. سیلیسی شدن یکی از متداول‌ترین دگرسانی‌های گرمابی است که در اثر افزایش کوارتز و سایر اشکال سیلیس (چرت، اوپال و کلسدون) در سنگ ایجاد می‌شود (Pirajno, 2009).

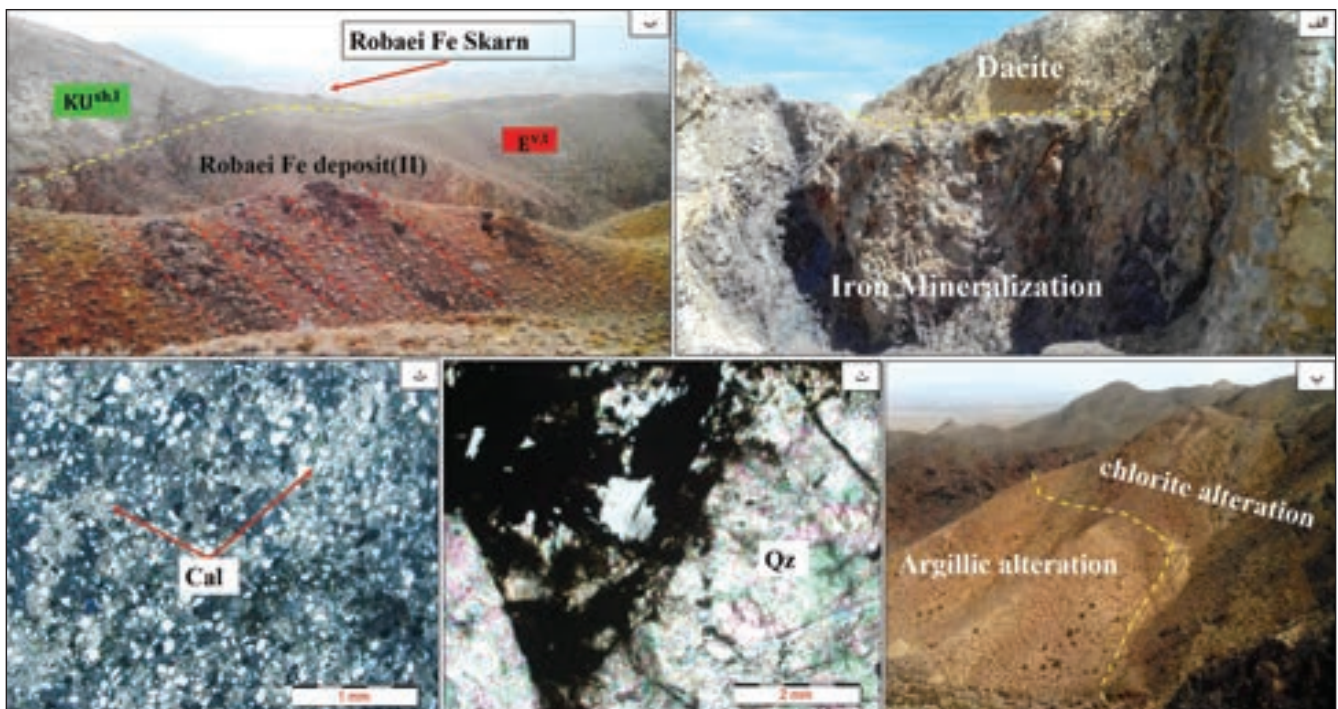
در منطقه مورد مطالعه دو نوع کانه‌زایی آهن و مس وجود دارد که در ۴ بخش مختلف تشکیل شده‌اند. بخش‌های I و II مرتبط با کانه‌زایی آهن و بخش‌های دیگر مرتبط با کانه‌زایی مس است (شکل ۵). ابعاد رخنمون‌های کانه‌زایی آهن در بخش I حدوداً ۳۰۰ متر طول و ۲۵۰ متر عرض و در بخش II ۳۵۰ متر طول و ۱۰۰ متر عرض دارند. کانه‌زایی بخش I از نوع اسکارنی بوده و در داخل آهک‌های کرتاسه پسین و در نتیجه نفوذ توده‌های نیمه عمیق داسیتی تشکیل شده است (شکل ۶- الف). کانی‌های اسکارنی مشاهده شده شامل گارنت، اپیدوت و کلریت هستند. همچنین، سیالات این توده‌های نیمه عمیق داسیتی، واحدهای آتشفشانی رسوبی ائوسن را تحت تأثیر خود قرار داده و کانه‌زایی بخش II کانسان آهن رباعی را تشکیل داده‌اند (شکل ۶- ب). سنگ میزبان اصلی کانسان آهن رباعی II بیشتر توف ماسه‌ای است که کانه‌زایی به صورت رگه- رگچه‌ای، پراکنده درز و شکاف‌ها و فضای بین دانه‌ای توف‌هاست. علاوه بر توده‌های نیمه عمیق داسیتی، ساختارهای زمین‌شناسی (گسل‌ها و درز و شکاف‌ها) یکی دیگر از عوامل اصلی کنترل‌کننده کانه‌زایی در محدوده رباعی است. بنابر نظر کریم‌نژاد (۱۳۸۳) سامانه‌های گسلی و درزه و شکاف‌های حاوی کانه‌زایی در منطقه مورد مطالعه از نظر روند، شیب و جهت شیب به سه دسته به شرح زیر تقسیم می‌شوند:

الف) روند شمال شرقی- جنوب غربی که عموماً با شیب قائم و یا بیش از ۶۰ درجه به سمت شمال غرب و جنوب شرق شیب دارند. این سیستم درزه‌ها با گسل‌های اصلی طرود، انجیلو و گسل باغو موازی هستند. توده‌های نفوذی و دایک‌های منطقه مورد مطالعه از این روند تبعیت می‌کنند.

ب) روند شمال غربی- جنوب شرقی که شیب آنها عموماً قائم است یا حدود ۶۰ تا ۷۰ درجه به سمت جنوب شرقی دارند و تعداد اندکی از آنها با شیب کمتر از ۶۰ درجه (در حدود ۳۰ تا ۴۰ درجه) به سوی شمال شرق متمایل هستند.



شکل ۵- ستون چینه‌شناسی از واحدهای سنگی منطقه و نمایش محل رخداد کانه‌زایی آهن رباعی (بخش‌های I و II).

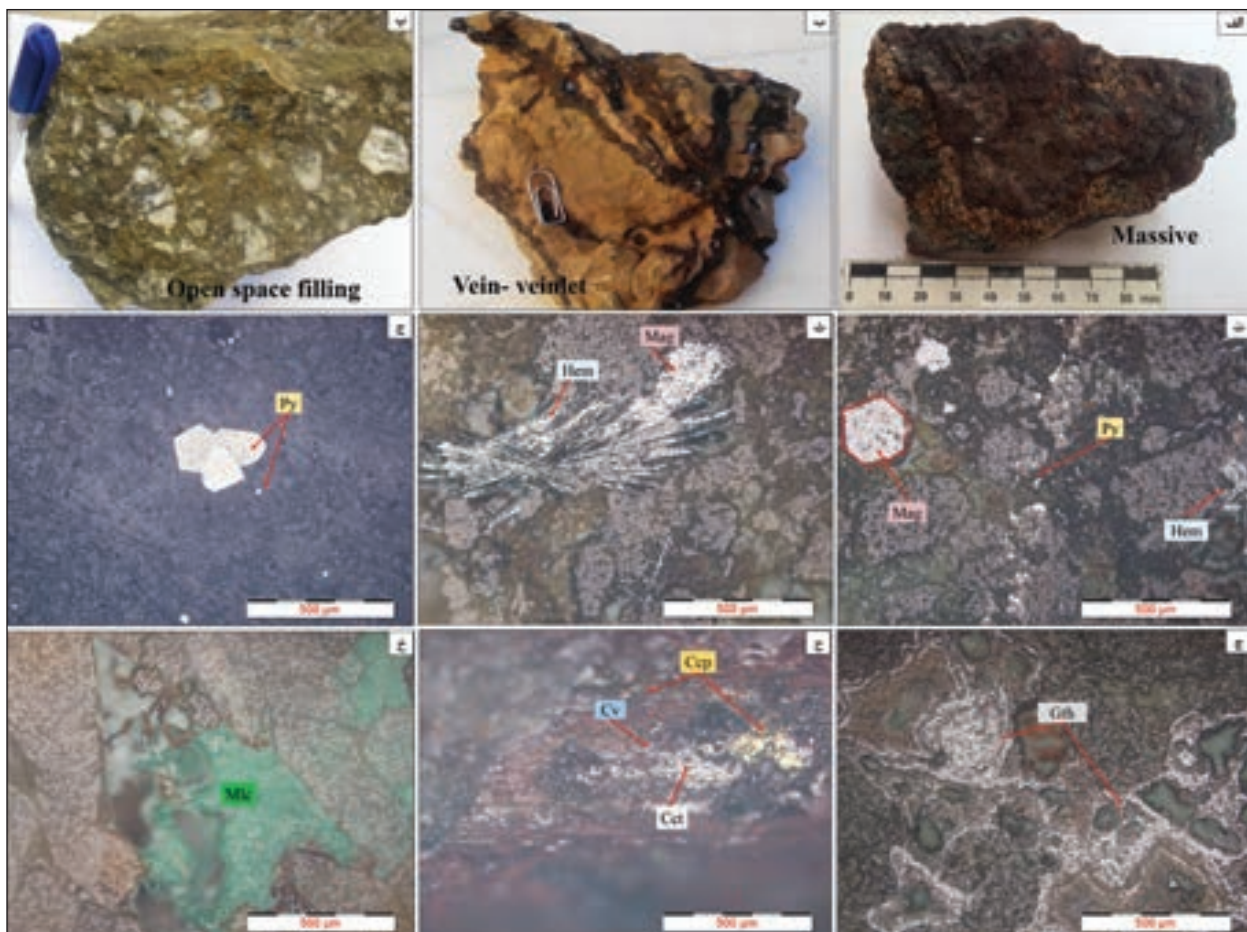


شکل ۶- الف) عکس صحرایی مرز توده نیمه عمیق داسیتی با آهک‌های کرتاسه و رخداد کانه‌زایی آهن به صورت توده‌ای و رگه‌ای (دید به سمت شمال)؛ ب) نمایی از مرز بین واحدهای کرتاسه پسین (KU^{sh1}) با ولکانیک‌های اتوسن (E³) و محل رخداد کانه‌زایی بخش اسکارنی و بخش II آهن رباعی و نمایش رگه‌های کانی‌سازی آهن همراه با دگرسانی کلریتی و هماتیته در بخش II کانسار آهن رباعی در داخل توالی آتشفشانی- رسوبی (دید به سمت جنوب)؛ پ) تصویر صحرایی از دگرسانی‌های کلریتی و آرژیلیکی در واحد توف ماسه‌ای منطقه مورد مطالعه (دید به سمت شمال غرب)؛ ت) تصویر مقطع میکروسکوپی از دگرسانی‌های سیلیسی (Qz) در نور عبوری نیکول‌های متقاطع (XPL)؛ ث) دگرسانی کربناته (Cal) در نمونه توف ماسه‌ای در نور عبوری نیکول‌های متقاطع (XPL) علایم اختصاری کانی‌ها بر اساس Whitney and Evans (2010) است.

۶- کانی‌شناسی، ساخت، بافت و توالی پاراژنتیک

در طی آن مگنتیت در امتداد سطوح (۱۱۱) توسط هماتیت جانشین می‌شود (Craig et al., 1981). مگنتیت از لحاظ فراوانی در کانسار آهن رباعی بعد از هماتیت قرار می‌گیرد که در مقاطع میکروسکوپی به صورت بلورهای خودشکل چندوجهی با بافت دانه پراکنده همراه با سایر کانه‌ها یافت می‌شود (شکل‌های ۷-۷-ت و ث). پیریت یکی دیگر از کانه‌های آهن است که در مقاطع میکروسکوپی به حالت رگه-رگچه‌ای، دانه پراکنده و الحاق سه‌گانه با بلورهای خودشکل قابل مشاهده است (شکل‌های ۷-۷-ت و ج). گوتیت از کانه‌های ثانویه آهن است و در مقاطع میکروسکوپی همراه با سایر اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن (هماتیت‌های ثانویه و لیمونیت) دیده می‌شود (شکل‌های ۷-۷-ج و ح). بنابر نظر (Nesse 2000) گوتیت جزو کانی‌های هیدروکسید آهن، رشته‌ای و موازی با محور C است. این کانه بافت کلوفرمی دارد و از دگرسانی کانی‌های سولفیدی از جمله پیریت و کالکوپیریت تشکیل شده است. کالکوپیریت فراوانی بسیار کمی در کانسار مورد مطالعه دارد و در مقاطع میکروسکوپی به کالکوسیت، کولیت، اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن در حال جانشینی است (شکل ۷-۷-ح). مالاکیت در منطقه مورد مطالعه به وفور یافت می‌شود و این کانی در نمونه دستی و مقاطع میکروسکوپی به حالت شکافه‌پرکن دیده می‌شود (شکل ۷-۷-خ).

بنا به مشاهدات صحرایی و مطالعات میکروسکوپی انجام گرفته بر روی مقاطع صیقلی و نازک-صیقلی، کانه‌های تشکیل‌دهنده کانسار آهن رباعی را می‌توان به سه دسته کانه‌های فلزی آهن‌دار (مگنتیت، هماتیت، پیریت، پیروتیت، گوتیت و لیمونیت)، کانه‌های فلزی مس‌دار (کالکوپیریت، کالکوسیت، کولیت، مالاکیت و آزوریت) و کانی‌های باطله (کلسیت، دولومیت، کوارتز، گارنت، اپیدوت و کلریت) تقسیم‌بندی نمود. کانی پیروتیت تنها در بخش I کانسار مشاهده شده است. کالکوپیریت، پیریت، کالکوسیت و کولیت در بخش II کانسار فراوانی بیشتری نسبت به بخش I دارند. مهم‌ترین ساخت و بافت ماده معدنی در کانسار آهن رباعی شامل رگه-رگچه‌ای، شکافه‌پرکن، توده‌ای، دانه پراکنده و جانشینی است (شکل ۷-۷). ساخت و بافت توده‌ای بیشتر در بخش اسکارنی مشاهده شده و در بخش II کانسار رباعی، بافت غالب از نوع رگه-رگچه‌ای و شکافه‌پرکن است (شکل‌های ۷-۷-الف، ب و پ). هماتیت (اسپیکولاریت) یکی از فراوان‌ترین کانه‌ها در کانسار مورد مطالعه است که به شکل تیغه‌ای، شعاعی، سوزنی با ساخت و بافت رگه-رگچه‌ای، شکافه‌پرکن و توده‌ای یافت می‌شود (شکل ۷-۷-ث). هماتیت گاه با مگنتیت حالت مارتیتی از خود نشان می‌دهد. مارتیتی شدن نوع خاصی از پدیده جانشینی است که



شکل ۷- تصاویر نمونه دستی و مقاطع میکروسکوپی از نوع ماده معدنی و ساخت و بافت آن‌ها در کانسار آهن رباعی (I) و (II): الف) بافت توده‌ای کانی هماتیت در بخش (I) اسکارنی کانسار (سنگ میزبان آهن‌کی)؛ ب) ساخت رگه-رگچه‌ای کانی هماتیت در نمونه توف ماسه‌ای در بخش II کانسار رباعی؛ پ) توف ماسه‌ای برشی شده و کانی هماتیت به صورت سیمان برشی در بخش II کانسار آهن رباعی؛ ت) مگنتیت‌های (Mag) خودشکل چندوجهی با بافت دانه پراکنده، پیریت‌های (Py) رگه-رگچه‌ای و هماتیت (Hem) به شکل تیغه‌ای در بخش II کانسار آهن رباعی؛ ث) هماتیت (Hem) به شکل تیغه‌ای و شعاعی و مگنتیت (Mag) به حالت مارتیتی شده در بخش II کانسار آهن رباعی؛ ج) پیریت‌های خودشکل دانه پراکنده و الحاق سه‌گانه در بخش II کانسار آهن رباعی؛ چ) گوتیت (Gth) دارای بافت کلوفرمی در بخش II کانسار آهن رباعی؛ ح) کالکوپیریت (Ccp) دارای بافت جانشینی با کالکوسیت (Cct)، اکسید و هیدرواکسیدهای آهن و کالکوسیت در اطراف در حال جانشینی با کولیت (Cv) در بخش II کانسار آهن رباعی؛ خ) مالاکیت (Mlc) با بافت شکافه‌پرکن در بخش II کانسار آهن رباعی. علائم اختصاری کانی‌ها براساس (Whitney and Evans (2010) و Chace (1956) است.

گارنت و اپیدوت در مرحله پیشرونده و کلریت در مرحله پسرونده اسکارن‌زایی شکل گرفته‌اند. پاراژنز کانه‌هایی مربوط به بخش اسکارنی (I) و بخش (II) کانسار آهن رباعی در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است.

از نظر ترتیب زمانی، مگنتیت نسبت به هماتیت در مراحل اول کانه‌زایی سپس کانه‌هایی سولفیدی و در نهایت کانی‌های برون‌زاد تشکیل شده‌اند. کانی‌های کوارتز، کلسیت و دولومیت هم به صورت اولیه و هم به صورت تأخیری تشکیل شده‌اند.

Mineral	metamorphism (Isochemical)	Metasomatism (allochemical)		Weathering
		Prograde skarn	Retrograde skarn	
Magnetite		██████████		
Hematite			██████████	██████████
Pyrite			██████████	
Chalcopyrite			██████████	
Chalcocite				██████████
Covellite				██████████
Pyrrhotite			██████████	
Garnet(Gr)	██████████			
Goethite				██████████
Limonite				██████████
Malachite/Azurite				██████████
Quartz	██████████		██████████	
Calcite	██████████		██████████	
Dolomite	██████████		██████████	
Epidote			██████████	
Chlorite			██████████	

شکل ۸- توالی پاراژنتیک کانه‌ها و کانی‌ها در بخش (I) اسکارنی کانسار آهن رباعی با تغییرات اقباس از بادوزاده کانرش (۱۳۹۰).

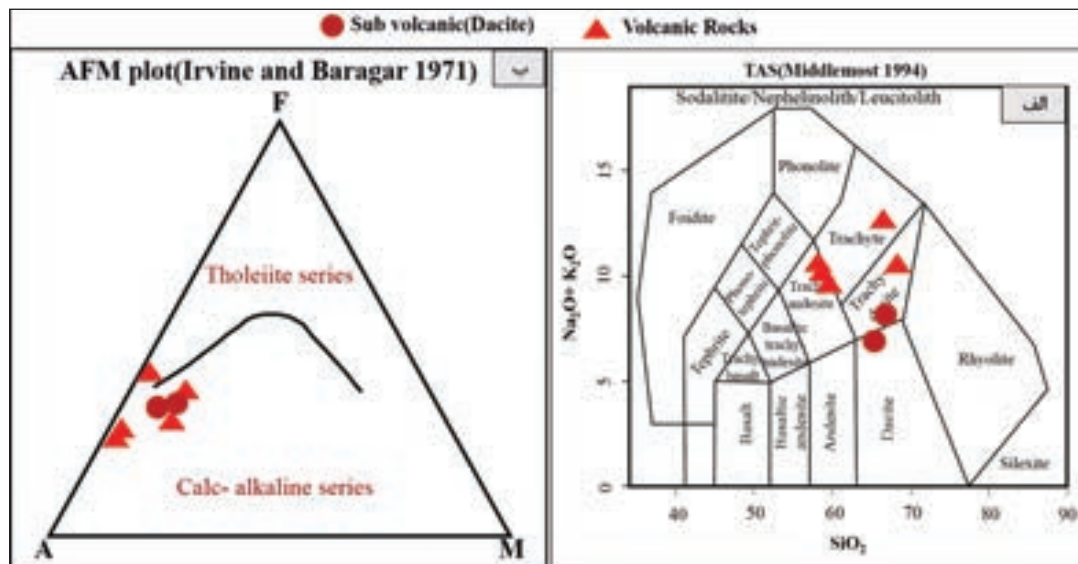
Mineral/Texture		Hypogen		Supergen
		Early stage	Late stage	
Iron	Magnetite	██████████		
	Hematite	██████████		
	Pyrite		██████████	
	Goethite			██████████
	Limonite			██████████
Copper	Chalcopyrite		██████████	
	Chalcocite			██████████
	Covellite			██████████
	Malachit			██████████
Gangue	Quartz	██████████		
	Calcite	██████████		
	Dolomite	██████████		
	Chlorite		██████████	
Texture	Disseminated	██████████		
	Vein-Veinlets	██████████		
	Open space filling	██████████		
	Replacement			██████████
	Colloform			██████████

شکل ۹- توالی پاراژنتیک کانه‌ها و ساخت و بافت موجود در بخش II کانسار آهن رباعی.

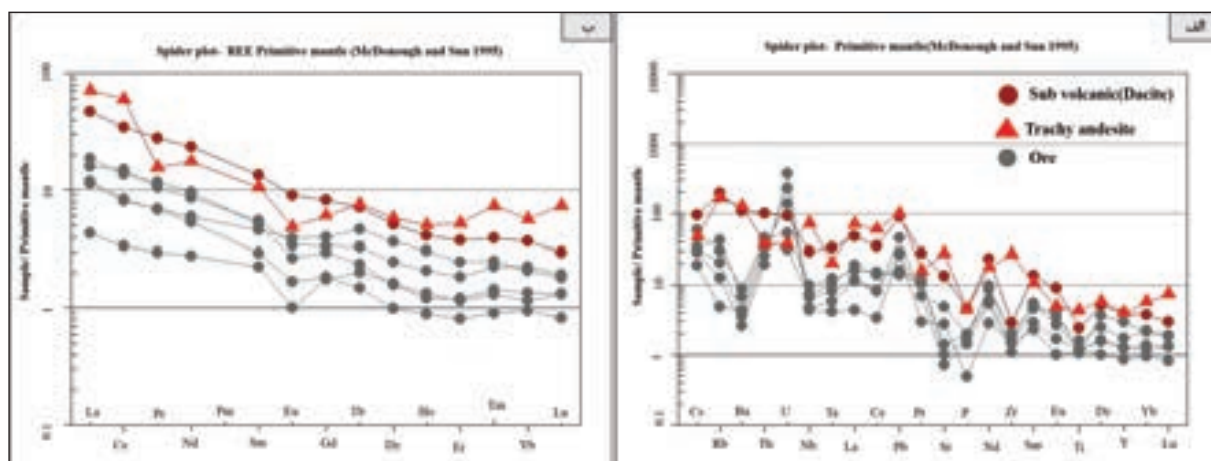
۷- ژئوشیمی

عناصر در گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995) به هنجار شده‌اند (شکل ۱۱). در توده‌های نیمه‌عمیق داسیتی تهی‌شدگی عناصر با پتانسیل یونی بالا مانند P، Ti، Nb، Ta و غنی‌شدگی عناصر لیتوفیل درشت یون (LILE) به همراه آنومالی مثبت عنصر Pb (شکل ۱۱- الف) معرف جایگاه کمان قاره‌ای مرتبط با فرورانش است (Wilson, 1989). الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی در توده‌های داسیتی نیمه‌عمیق کانسار رباعی دارای روند نزولی از سمت عناصر کمیاب خاکی سبک به سمت عناصر کمیاب خاکی سنگین است (شکل ۱۱- ب). این الگو نشان‌دهنده سازگاری توده‌های داسیتی نیمه‌عمیق منطقه با سری ماگمایی کالک‌آلکالن مرتبط با کمان آتشفشانی می‌باشد (Muller et al., 1993). بر اساس نتایج آنالیز انجام شده توسط بادوزاده کانرش (۱۳۹۰) و کریم‌نژاد (۱۳۸۳) در بخش I کانسار آهن رباعی، میزان عیار فلزات آهن کل برابر با ۶۰ درصد، مس ۰/۷ درصد و طلا ۲/۷ گرم در تن است.

چگونگی توزیع و پراکندگی عناصر مختلف در محیط‌های سنگی هر منطقه و تشخیص ارتباط و وابستگی آنها با یکدیگر از مهم‌ترین جنبه‌هایی است که همواره در مطالعات ژئوشیمیایی مد نظر قرار می‌گیرند. با استفاده از این داده‌ها می‌توان به ویژگی‌های محیط تشکیل و فرایندهای مؤثر در تشکیل یک ذخیره معدنی پی برد (Piercey, 2011). نتایج آنالیز انجام گرفته جهت مطالعه ژئوشیمی کانسار در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. بر اساس نمودار رده‌بندی TAS (Middlemost, 1994)، سنگ‌های آذرین (توده داسیتی نیمه عمیق و واحدهای آتشفشانی-رسوبی اتوسن) تشکیل‌دهنده منطقه کانسار آهن رباعی با ماهیت آلکالن تا ساب‌آلکالن و در محدوده تراکی‌آندزیت، تراکیت، تراکی داسیت و داسیت قرار می‌گیرند (شکل ۱۰- الف). نمونه‌های مورد مطالعه بر روی نمودار AFM (Irvine and Baragar, 1971)، غالباً سری کالک‌آلکالن را نشان می‌دهند (شکل ۱۰- ب). فراوانی عناصر کمیاب در توده‌های نیمه‌عمیق داسیتی منطقه رباعی با فراوانی این



شکل ۱۰- الف) نامگذاری ژئوشیمیایی سنگ‌های منطقه مورد مطالعه براساس نمودار TAS (Middlemost, 1994) که محدوده قرارگیری آنها تراکی‌آندزیت، داسیت، تراکی‌داسیت و تراکیت است؛ ب) موقعیت قرارگیری نمونه‌های منطقه بر روی نمودار مربوط به سری ماگمایی AFM (Irvine and Baragar, 1971) که غالب نمونه‌ها در محدوده سری کالک‌آلکالن قرار گرفته‌اند.



شکل ۱۱- الف) الگوی پراکندگی عناصر کمیاب در توده داسیتی نیمه‌عمیق، تراکی‌آندزیت و کانسنگ در کانسار آهن رباعی بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995)؛ ب) الگوی عناصر کمیاب خاکی در توده داسیتی نیمه‌عمیق، تراکی‌آندزیت و کانسار آهن رباعی به هنجار شده به گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995).

جدول ۲- نتایج آنالیز شیمیایی ICP-MS برای نمونه‌های سنگ میزبان و کانستگ در کانسار آهن رباعی (غلظت بر حسب ppm است).

Sample No.	Sample type	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr
TRA-1	Dacite	19.5	1.88	6.56	57.5	13	4.22	9.73	45.8	56.5	20.1	119	261
TRA-2	Ore	21.2	1.11	3.17	40.1	32	3.36	9.34	20761	77.9	7.87	12.3	95.4
TRA-3	High-grade ore	14.9	0.653	2.91	49.2	21	0.639	6.31	884	73.7	14.4	7.4	54.3
TRA-4	(Limestone tuff (Ore	35.3	0.781	3.1	25.1	25.3	1.94	10.1	8601	95.1	7.63	2.92	20
TRA-5	(Sandy tuff (Ore	24.3	0.847	4.45	32.6	29.2	5.58	15.1	275	70.5	6.77	17.9	27.6
TRA-6	Sandy tuff	26.2	0.639	2.97	30.5	31.7	5.48	16.5	32	65.5	5.37	24.9	14.3
TRA-7	Trachy andisite	17	2.37	7	31	2	4	1	1043	79	17	100	543
Sample No.	Sample type	Y	Mo	Cd	In	Sb	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm
TRA-1	»	16.8	3.6	0.021	0.066	0.066	2.02	711	30.6	58.3	7.1	29.3	5.47
TRA-2	»	12.7	7.45	0.026	1.29	1.29	0.648	23.2	7.38	13.6	1.77	7.41	1.86
TRA-3	»	5.52	11.2	0.09	0.392	0.392	0.593	17.2	2.79	5.66	0.751	3.49	0.919
TRA-4	»	5.29	2.51	0.002>	0.393	0.393	0.392	28.6	12.1	22.9	3	12	2.07
TRA-5	»	7.42	1.57	0.002>	0.076	0.076	1.24	58.1	10.3	25.1	2.66	10.7	2.22
TRA-6	»	3.74	1.01	0.002>	0.011	0.011	0.724	44.7	7.7	14	1.74	6.71	1.18
TRA-7	»	17	24	3.3	1>	1>	1	841	46	101	4	22	4.3
Sample No.	Sample type	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	W	Re	Tl
TRA-1	»	1.39	4.47	0.712	3.46	0.612	1.64	0.267	1.63	0.203	2.91	0.002>	0.831
TRA-2	»	0.606	2.18	0.458	2.45	0.455	1.08	0.17	0.924	0.124	24.5	0.002>	0.105
TRA-3	»	0.154	0.961	0.201	1.1	0.197	0.51	0.089	0.514	0.089	150	0.002>	0.064
TRA-4	»	0.413	1.62	0.232	1.06	0.181	0.53	0.097	0.598	0.09	1.07	0.002>	0.027
TRA-5	»	0.528	1.83	0.327	1.65	0.309	0.809	0.153	0.985	0.131	1.78	0.002>	0.13
TRA-6	»	0.26	1	0.146	0.668	0.132	0.353	0.061	0.42	0.056	0.772	0.002>	0.196
TRA-7	»	0.75	3.3	0.75	3.9	0.75	2.3	0.5	2.5	0.5	1>	0	0.75
Sample No.	Sample type	Pb	Bi	Th	U	Nb	Ta	Hf	Zr	Au	Location		
TRA-1	»	13.6	0.146	8.13	1.88	19.3	1.22	30.3	1.26	2.7	Part I		
TRA-2	»	6.75	11.2	2.04	4.53	3.12	0.214	15.6	0.52	0.89	Part II		
TRA-3	»	3.94	3.59	1.55	7.46	2.83	0.154	16	0.51				
TRA-4	»	2.39	2	2.74	2.72	4.95	0.372	21.8	0.694				
TRA-5	»	2.05	1.36	3.61	1.06	6.43	0.447	19	0.69				
TRA-6	»	4.18	0.274	3.12	0.629	4.29	0.296	11.5	0.383				
TRA-7	»	15	1>	3	0.75	48	0.75	5.2	279				

۸- مطالعات میانبارهای سیال

می‌شوند. اندازه آنها از ۶ تا ۱۵ میکرون متغیر است. پدیده باریک‌شدگی بر اثر عدم تعادل در میانبارها با کانی میزبان و ناپایداری انرژی درونی است که اطلاعات این میانبارها قابل اعتماد نیست (Shepherd et al., 1985). نتایج میکروترموتری بیانگر این است که دمای همگن شدن میانبارهای سیال (LV) در کانسار آهن رباعی بخش II بین ۲۴۹-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و شوری سیال بین ۲-۴ درصد وزنی معادل نمک طعام است (شکل‌های ۱۴-الف و ب). دمای همگن‌شدگی در کانسار آهن رباعی بخش I بین ۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است (بادوزاده کانراش، ۱۳۹۰). در بین میانبارهای سیال، یک نمونه شوری بالا (۲۱/۴۳ Wt%) نشان داده و دمای ذوب $TmCO_2$ اندازه‌گیری شده تقریباً ۵۷/۹- درجه سانتی‌گراد بوده که احتمالاً حاکی از وجود گازهای CH_4 ، N_2 و H_2S است. طبق نظر Anderson et al. (2004) حضور گازهای CH_4 ، N_2 و H_2S باعث افزایش شوری می‌شود. ترکیب سیالات غالباً از آب خالص و یا شورابهایی با شوری متغیر، گاز

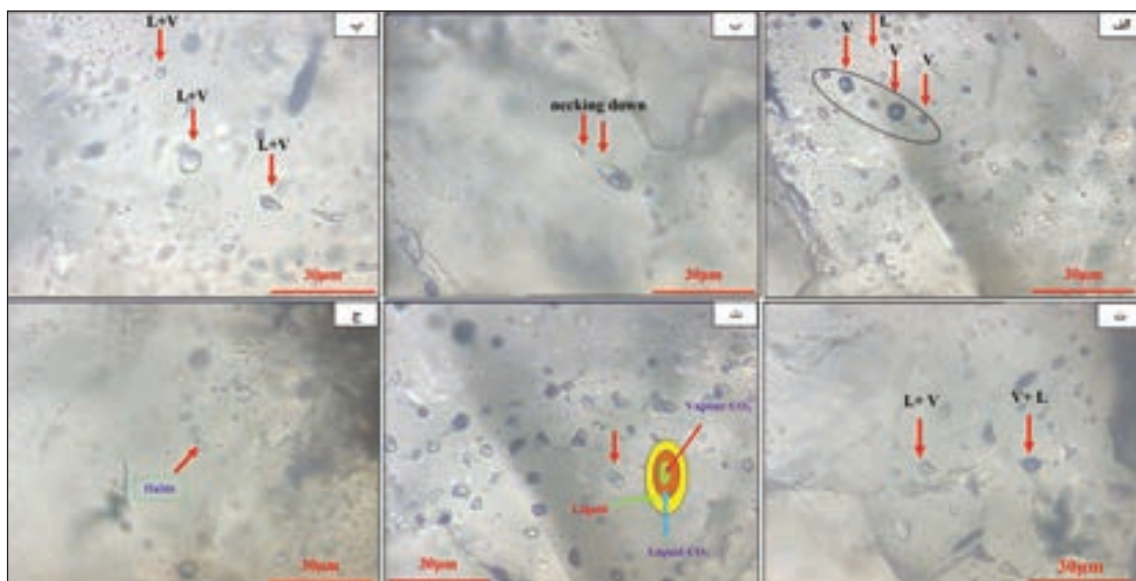
یکی از روش‌های تعیین شرایط تشکیل کانه‌زایی، مطالعه بر روی میانبارهای سیال است. مطالعات میانبارهای سیال در بخش II کانسار آهن رباعی بر روی کانی شفاف کوآرتز انجام شد که همراه با کانه‌زایی بود و تمامی میانبارهای مطالعه شده از نوع اولیه (Primary) هستند (جدول ۳). بر اساس مطالعات پتروگرافی میانبارهای سیال، فازهای تشکیل‌دهنده سیالات در کانسار آهن رباعی II به حالت تک‌فازی گاز (V)، تک‌فازی مایع (L)، دو فازی غنی از مایع (V+L)، دو فازی غنی از گاز (L+V)، سه فازی متشکل از $Liquid CO_2$ ، $Vapour CO_2$ و $Liquid CO_2$ (L1+L2+V) و همچنین سه فازی متشکل از مایع آبگین، حباب بخار و هالیت (L+V+S) هستند (شکل ۱۳). وجود تک‌فازهای بخار همراه با تک‌فازی‌های مایع در میانبارها نشانه مهم پدیده جوشش است (Davidson et al., 2007). از لحاظ شکل ظاهری، میانبارها در کانسار به اشکال کشیده، چند وجهی نامنظم، شکل منفی بلور (Negative crystal) و گاه با پدیده باریک‌شدگی (Necking down) مشاهده

سیال کانه‌زایی بخش II کانسار آهن رباعی بیش از ۴۰۰ متر است (شکل ۱۴-پ). در نمودار شوری در برابر دمای همگن شدن (Wilkinson, 2001) به منظور تعیین عوامل مؤثر در تکامل سیال و ته‌نشست مواد معدنی در کانسار آهن رباعی بخش II، روند ۴ که مربوط به سرد شدن سیالات گرمایی بوده در نمونه‌های مورد مطالعه قابل مشاهده است (شکل ۱۴-ت).

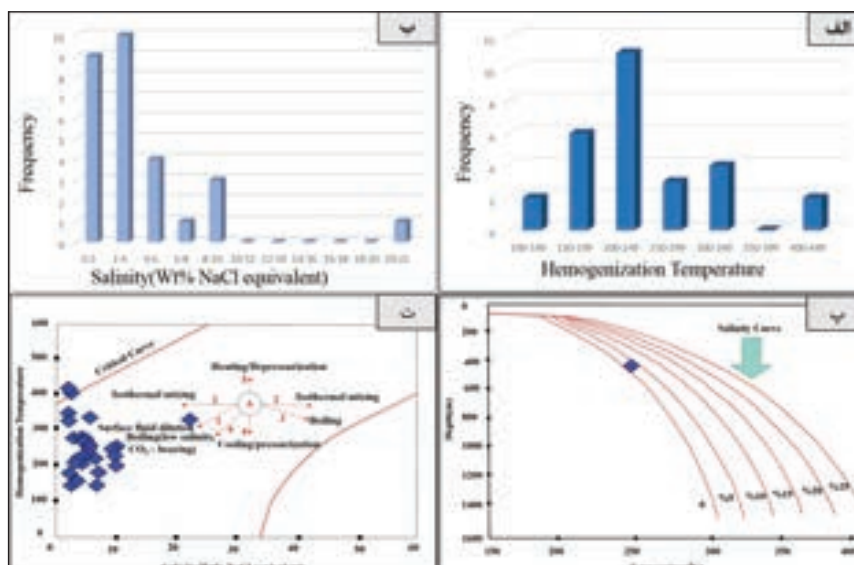
یا مایعات گازدار یا گازهای سولفیدی و کربناتی هستند (Bodnar, 2003). حضور پیریت در کانسار مورد مطالعه می‌تواند بیانگر این باشد که فشار گاز H_2S بالا بوده که توانسته پیریت و سایر فازهای سولفیدی را ته‌نشین سازد. همچنین، حضور احتمالی گازهای CH_4 و N_2 را می‌توان به مواد آلی موجود در سنگ‌های میزبان نسبت داد. بر اساس نمودار هاس (Hass, 1971)، عمق به دام افتادن میانبارهای

جدول ۳- داده‌های ریز دماسنجی میانبارهای سیال در کانسار آهن رباعی.

Sample No.	Mineral	Type	Origin	Size	n	Th total(°C)	Tm ice(°C)	Salinity wt%NaCl
R3	Qz	L+V	P	6-15	27	to 420 145	to 7.5 0.3	to 8.75 0.21
		L+V+S	-	12	1	321	-	21.43



شکل ۱۳- الف) میانبارهای سیال تک فاز گاز (V) و تک فازی مایع (L)؛ ب) پدیده باریک‌شدگی (necking down) در میان‌بارهای سیال؛ پ) سیال‌های دو فاز غنی از مایع (L+V)؛ ت) سیال‌های دو فاز غنی از مایع (L+V) و غنی از گاز (V+L)؛ ث) سه فاز متشکل از CO_2 Vapour، Liquid و CO_2 Liquid (L₁+L₂+V)؛ ج) سه فاز متشکل از مایع آبگین، حباب بخار و هالیت (L+V+S).



شکل ۱۴- الف) نمودار توزیع فراوانی دمای همگن شدن در میان‌بارهای سیال در کانسار آهن رباعی بخش II؛ ب) نمودار توزیع فراوانی میزان شوری سیال؛ پ) تعیین عمق به دام افتادن میانبارهای سیال در منطقه مورد مطالعه بر اساس نمودار (Hass 1971)؛ ت) نمودار دمای همگن شدن- شوری به منظور تعیین عوامل مؤثر در تکامل سیال و ته‌نشست مواد معدنی (Wilkinson, 2001).

۹- چگونگی تشکیل کانسار و مقایسه آن با تعدادی از کانسارهای ایران و سایر نقاط جهان

عوامل مختلفی در تشکیل کانسار آهن رباعی دخالت داشته‌اند که مهم‌ترین آنها عبارتند از: الف) توده نفوذی نیمه عمیق داسیتی، ب) سنگ میزبان، پ) ساختارهای منطقه و ت) سیالات گرمایی.

به همراه تبلور، تزریق و جایگیری توده‌های نفوذی، مراحل تشکیل و تکوین کانسارهای اسکارنی آغاز می‌شود (Einaudi, 1981). در کانسار آهن رباعی، با نفوذ توده‌های نیمه عمیق داسیتی و تقابل بین سیالات ماگمایی و سنگ‌های میزبان، یک محیط گرمایی-ماگمایی ایجاد شده است. با توجه به اینکه توده تشکیل‌دهنده کانسار آهن رباعی یک توده نیمه عمیق و کم حجم بوده، پس از جایگیری در داخل سنگ آهک‌های کرتاسه، باعث ایجاد متاسوماتیسم و دگرگونی ضعیف و تشکیل کانی‌های اسکارنی نظیر گارنت، اپیدوت و کلریت شده است. کانه‌زایی در کانسار آهن رباعی در کنترل گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه بوده که بیشتر به شکل رگه‌های تشکیل شده است. همچنین، بخشی از سیالات این توده‌های نیمه عمیق، واحدهای آتشفشانی-رسوبی (توف ماسه‌ای و تراکی آندزیت) ائوسن در منطقه را تحت تأثیر خود قرار داده و باعث تشکیل کانه‌زایی آهن بخش II رباعی شده است.

در این بخش، تمرکز کانه‌زایی غالباً در توف‌های ماسه‌ای به صورت رگه-رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی شکل گرفته است. فراوانی دمای همگن شدن میانبراهای سیال در کانسار آهن رباعی در بخش اسکارنی (I)، ۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد (بادوزاده کانرش، ۱۳۹۰) و در بخش آتشفشانی-رسوبی (II) بین ۲۰۰ تا ۲۴۹ درجه سانتی‌گراد با شوری ۲ تا ۴ درصد وزنی معادل نمک طعام است که طبق نمودار شوری در برابر دمای همگن شدن (Wilkinson, 2001)، عامل مؤثر در تکامل سیال و ته‌نشست مواد معدنی سرد شدن سیالات گرمایی است. برخی ویژگی‌های مهم کانسار آهن رباعی با تعدادی کانسارهای آهن موجود در ایران و سایر نقاط جهان در جدول ۴ مقایسه شده است. در این مقایسه کانسار مورد مطالعه از لحاظ نوع سنگ میزبان، نوع توده نفوذی، دگرسانی، کانه‌های تشکیل‌دهنده، شکل هندسی کانسار، فلزات همراه، شوری و دمای همگن شدن سیال کانه‌دار با کانسارهای آهن چالو و آهن پنج‌کوه جنوب دامغان، آهن ورتاوه جنوب کاشان و کانسار آهن ال اسپینو (El Espino) شیلی مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به خصوصیات ذکر شده، بخش I کانسار آهن رباعی شباهت‌هایی با کانسارهای آهن اسکارنی کلسیمی و بخش II شباهت‌هایی با کانسارهای نوع اکسید آهن-مس-طلا (IOCG) نظیر کانسار آهن ال اسپینو (El Espino) شیلی دارد.

جدول ۴- مقایسه کانسار آهن رباعی با چند کانسار دیگر در ایران و جهان.

کانسار	کانسار آهن ورباوه جنوب کاشان	کانسار آهن پنج کوه دامغان	کانسار آهن چالو جنوب دامغان	کانسار آهن رباعی		ویژگی‌های شاخص برخی کانسارها
				بخش آتشفشانی-رسوبی (بخش II)	مجاور توده نیمه عمیق (بخش I اسکارنی)	
El Espino شیلی						
سنگ میزبان	توف کربناتی، توف برش	سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری	آهک، آندزیت، داسیت	توف ماسه‌ای و تراکی آندزیت	سنگ آهک	
نوع توده نفوذی	دیوریت و کوارتز دیوریت	کوارتز مونزونیت	دیوریت	-	توده داسیتی نیمه عمیق	
دگرسانی	اپیدوتی، کلریتی، سربستی، آرزپلیتی	دگرسانی‌های سدیمی-کلسیمی و دگرسانی پتاسیک	پروپلیتی، آرزپلیتی، سربستی، کربناتی	کلریتی، سیلیسی، کربناتی، آرزپلیتی	اپیدوتی، کلریتی، سربستی، آرزپلیتی	
کانی‌شناسی	گارنت، اپیدوت، کلریت، ولاستونیت، پیروکسن	اسکاپولیت آلپیت، دیوپسید، اکتینولیت، ترمولیت، اپیدوت، کلریت کوارتز و کلسیت	گارنت، کلسیت، اکتینولیت، کوارتز، تالک، مسکوویت	کلریت، کوارتز، کلسیت	اپیدوت، گارنت، کلریت	
کانه‌ها	مگنتیت، هماتیت، کالکوپیریت، پیریت	مگنتیت، هماتیت، پیریت، کالکوپیریت	هماتیت، مگنتیت، کالکوپیریت، لیمونیت، گوتیت، مالاکیت	هماتیت، مگنتیت، کالکوپیریت، پیریت، کالکوسیت، کولیت، مالاکیت، گوتیت، لیمونیت	هماتیت، مگنتیت، کالکوپیریت، پیریت، کالکوسیت، مالاکیت، آزروریت، گوتیت، لیمونیت	
ساخت	توده‌ای، رگه‌ای، عدسی، برشی	عدسی شکل و پراکنده	توده‌ای، رگه‌ای	رگه‌ای	رگه‌ای، استوک و رک، توده‌ای	
فلزات همراه	Cu, Au	Cu, Au	Cu, Au	Cu, Au	Cu, Au	
فراوانی دمای همگن شدن سیال	150- 310 °C	-	140- 276 °C	200- 249 °C	250- 300 °C	
شوری	5.47- 15.78 wt% NaCl	-	3- 11 wt% NaCl	2- 4 wt% NaCl	-	
تیپ کانسار	اسکارنی کلسیمی	اسکارنی	اسکارنی کلسیمی	اکسید آهن مس و طلا (IOCG)	اسکارنی کلسیمی دما پایین	
منابع	و کیلی نوش آبادی (۱۳۹۳)	اسماعیلی و همکاران (۱۳۸۵)؛ پیروزفر (۱۳۸۵)؛ عرب عامری و همکاران (۱۳۹۰)	تقی پور و همکاران (۱۳۹۰)؛ مهرابی و همکاران (۱۳۹۳)	این تحقیق	بادوزاده کانرش (۱۳۹۰)	www.SID.ir

۱۰- نتیجه گیری

و انتشار سیالات سبب رخداد کانه‌زایی گرمایی در فاصله‌ای از توده و در داخل شکستگی‌ها و گسل‌های موجود در توف‌های ماسه‌ای ائوسن (بخش II) شده است. از نظر کانی‌شناسی، دگرسانی، ساخت و بافت، پاراژنز کانه‌ها و کانی‌ها، ژئوشیمی، دماسنجی و منشأ کانه‌زایی، بخش اسکارنی (I) با مشخصات ذخایر تیپ کانسارهای آهن اسکارن کلسیمی دما پایین و بخش II با نوع اکسید آهن-مس-طلا (IOCG) مطابقت دارد.

مشاهدات و بررسی‌های صحرایی، مطالعات پتروگرافی، کانه‌نگاری، ژئوشیمی و مینرالوژی سیال انجام گرفته بر روی کانه‌زایی آهن رباعی حاکی از آن است که در اثر تزریق توده نفوذی نیمه عمیق با ترکیب داسیت با سن ائوسن-الیگوسن؟، حجم قابل توجهی از سیالات آهن‌دار به داخل سنگ‌های آهنکی کرتاسه نفوذ کرده و باعث بروز متاسوماتیسم و نهشته شدن کانسار آهن اسکارنی رباعی (بخش I) شده است. در این راستا، گسل‌های منطقه نیز به عنوان مجراهایی برای عبور

کتابنگاری

- اسماعیلی، د.، شبی، م. و کنعانیان، ع.، ۱۳۸۵- شواهد پتروگرافی و ژئوشیمیایی آلتراسیون سدی کلسیک و پتاسیک در توده نفوذی پنج کوه دامغان (جنوب شرق ایران)، مجله علوم دانشگاه تهران، شماره ۸۹، صص. ۸۹ تا ۹۹.
- اشراقی، س. و جلیلی، ا.، ۱۳۸۵- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه معلمان، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- آقباتی، ع.، ۱۳۸۳- زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۶۰۸ ص.
- بادوزاده کانرش، ح.، ۱۳۹۰- بررسی کانه‌زایی کانسار آهن رباعی دامغان بر اساس مطالعات پتروگرافی و ژئوشیمی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه دامغان.
- پیروفر، پ.، ۱۳۸۵- کانی‌شناسی، ژئوشیمی و خاستگاه آهن پنج کوه، جنوب شرق دامغان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- تقی پور، ن.، قربانی، ق. و درانی، م.، ۱۳۹۰- زمین‌شناسی، پتروگرافی و ژئوشیمی سنگ‌های آذرین مرتبط با کانسار آهن اسکارن چالو، جنوب دامغان، استان سمنان، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، جلد ۲، شماره ۱.
- جعفریان، م.، ۱۳۷۳- نقشه زمین‌شناسی چهارگوش کلاته- رشم با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- عرب عامری، ف.، یزدی، م.، بهزادی، م. و مرادی، م.، ۱۳۹۰- پتروگرافی، مینرالوژی و دگرسانی در معدن آهن پنج کوه دامغان، دومین همایش علوم زمین.
- علوی، م. و هوشمندزاده، ا.، ۱۳۵۵- نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه طرود، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- کریم پور، م. ح.، ۱۳۹۵- تصویر پردازش داده‌های ماهواره استر برای شناسایی کانی‌های معرف دگرسانی در محدوده اکتشافی رباعی، برگرفته از گزارش پایان عملیات اکتشاف مس رباعی، مرداد ۱۳۹۵.
- کریم‌نژاد، س.، ۱۳۸۳- بررسی زمین‌شناسی اقتصادی کانسار آهن رباعی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شمال، ۱۶۸ ص.
- مهرابی، ب.، قاسمی سیانی، م. و طالع فاضل، ا.، ۱۳۹۳- بررسی سامانه کانه‌زایی فلزات پایه و گرانها در محدوده‌های معدنی چشمه‌حافظ و چالو، کمان ماگمایی ترو-چاه‌شیرین، پاییز ۹۳، سال بیست و چهارم، شماره ۹۳، صص. ۱۰۵ تا ۱۱۸.
- و کیلی نوش‌آبادی، م.، ۱۳۹۳- کانی‌شناسی، ژئوشیمی و الگوی تشکیل کانسار آهن ورتاوه، جنوب کاشان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- هوشمندزاده، ا.، علوی نائینی، م. و حقی پور، ع.، ۱۳۵۷- تحول پدیده‌های زمین‌شناسی ناحیه ترو، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

References

- Alavi, M., 1991- Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. *Geol. Soc. Of Amer. Bull.* V. 103, PP. 983-992.
- Anderson, R., Graham, C. M., Boyce, A. J. and Fallick, A. E., 2004- Metamorphic and basin fluids in quartz-carbonate-sulphide veins in the SW Scottish Highlands: a stable isotope and fluid inclusion study. *Geofluids*, 4(2), 169-185.
- Bodnar, R. J., 2003- Introduction to aqueous-electrolyte fluid inclusions. *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*, 32, pp.81-100.
- Chace, F. M., 1956- Abbreviations in field and mine geological mapping. *Economic Geology*, 51(7), pp.712-723.
- Chen, Y. and Zhang, Y., 2008- Olivine dissolution in basaltic melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72, 4756-4777.
- Craig, J. R., Vaughan, D. J. and Hagni, R. D., 1981- Ore microscopy and ore petrography, (Vol. 406). New York: Wiley.
- Davidson, G. J., Paterson, H., Meffre, S. and Berry, R. F., 2007- Characteristics and origin of the oak dam East Breccia-hosted, iron oxide Cu-U(Au) deposit: Olympic Dam region, Gawler Craton, South Australia". *Economic Geology*, 102(8), pp.1471-1498.
- Einaudi, M. T., 1981- Skarn associated with porphyry plutons. I. Description of deposits, southwestern North America, II. General features and origin, in Titley, S.R., (ed.), *Advances in geology of the porphyry copper deposits of southwestern North America Tucson, Univ. Ariz. Press*, p. 139-183.
- Galley, A. G., Hannington, M. D. and Jonasson, I., 2007- Volcanogenic massive sulphide deposits. *Journal of Mineral Deposits of Canada*, 5, 141-161.
- Haas J. L., 1971-The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure". *Economic Geology*, 66(6), pp.940-946.

- Hassanzadeh, J., Gazi, A. M., Axen, G. and Guest, B., Stockli, D. and Tucker, P., 2002- Oligocene mafic magmatism in north-west of Iran: Evidence for the separation of the Alborz from the Urumieh-Dokhtar magmatic arc. *Geological Society of America Abstracts with Program*, v. 34, no. 6, p. 331.
- Irvine, T. N., and Baragar, W. R. A., 1971- A guide to the Chemical classification of the common volcanic rocks". *Canadian Journal of Earth Science*, v. 8, 523-548.
- Kawabata, H. and Shuto, K., 2005- magma mixing recorded in intermediate rocks associated with high-Mg andesites from the Stouchi volcanic belt, Japan: implications for Archean TTG formation. *Journal of Volcanology and geothermal Research* Volume 140,241-271.
- Komninou, A. and Sverjensky, D. A., 1996- Geochemical modeling of the formation of an unconformity-type uranium deposit". *Economic Geology*, 91(3), 590-606.
- Lopez, G. P., Hitzman, M. W. and Nelson, E. P., 2013- Alteration patterns and structural controls of the El Espino IOCG mining district, Chile *Mineralium Deposita*, 49(2), pp.235-259.
- McDonough, W. F. and Sun, S. S., 1995- The composition of the Earth". *Chem. Geol.*, 120, 223– 253.
- Middlemost, E. A. K., 1994- Naming materials in the magma / igneous rock system. *Longman Group u. k.*, 73 – 86.
- Montoya, J. W., and Hemley, J. J., 1975- Activity relations and stabilities in alkali feldspar- and mica alteration reactions. *Econ Geol*, V. 70, pp. 577-594.
- Muller, D., Groves, D. L. and Stumpfl, E. F., 1993- Potassic igneous rocks and shoshonites as potential exploration targets In: IAVCEI". *General Assembly, Canberra, September 1993, Ancient Volcanism and Modern Analogues, Abstracts. International Association for Volcanology and Chemistry of the earth's Interior, Canberra*, 76p.
- Nesse, W. D., 2000-Introduction to mineralogy Oxford University Press, 442p.
- Piercy, S. J., 2011- The setting, style, and role of magmatism in the formation of Volcanogenic massive sulfide deposits. *Mineralium Deposita*,46(5-6), pp. 449-471.
- Pirajno, F., 2009- *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer, Berlin, Germany, 1250.
- Shamian, G., Hedenquist, J., Hattori, K. and Hassanzadeh, J., 2004- The Gandy and Abolhassani Epithermal prospects in the Alborz Magmatic Arc, Semnan Province, Northern Iran. *Economic Geology*, Vol. 99, PP. 691-712.
- Shepherd, T. J., Rankin, A. H. and Alderton, D. H., 1985- A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie.
- Weaver, B. L. and Tarney J., 1984- Major and trace element composition of the continental lithosphere. *Physics and Chemistry of the Earth*, 15, 39-68.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W., 2010- Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American mineralogist*, 95(1), pp.185-187.
- Wilkinson, J. J., 2001- Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1), pp.229-272.
- Wilson, M., 1989- *Igneous Petrogenesis*. UnwinHyman, London, 461p.

Study of geology, mineralogy and geochemistry of the Robaei iron deposit, South of Damghan

F. Fardoost^{1*}, A. Abdollahi Hydarbaghi² and S. Baluchi³

¹Associate Professor, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

²M.Sc., Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

³Ph.D. Student, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 2018 June 19

Accepted: 2019 February 12

Abstract

The Robaei Iron deposit is located in 96km south of Damghan. Host rocks of deposit are Late Cretaceous limestones (part I) and Eocene volcano- sedimentary rocks including sandy tuff (part II). The alterations include chloritization, epidotization, argillation, silicification, carbonatization and hematitization. Minerals forming can be divided into three groups; iron minerals (hematite, magnetite, pyrite, pyrrhotite goethite and limonite), copper- minerals (chalcopyrite, chalcocite, covellite and malachite) and gangue minerals (calcite, dolomite, quartz, garnet, epidote and chlorite). The structure and textures of ore minerals are massive, vein- veinlet, open space filling and disseminated. In part I, the metals grade of Fet is about 60%, Cu 0.7 % and Au 2.7 ppm and in the part II, the Fet are variables between 5.88 to 82.91% (average 31.2%), Cu between 275 to 20761 ppm and Au 0.89 ppm. Fluid inclusion studies were carried out on quartz mineral from the part II that homogenization temperature is frequency variables between 200 to 249°C with salinity of 2-4% wt. %NaCl. Based on the results of this investigation, part I has similarities with calcic skarn of low temperature and part II showed more similarities with iron oxide- copper- gold (IOCG) deposits.

Keywords: Geology, Mineralogy, Geochemistry, Iron, Robaei, Damghan.

For Persian Version see pages 61 to 74

*Corresponding author: F. Fardoost; E-mail: Fardoost@yahoo.com