مطالعه زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی کانسار آهن رباعی، جنوب دامغان

فرج‌اله فردوست [۱*]، اکبر عبدالهی‌حیدرباغی [۲] و سولماز بلوچی [۳]

[۱] دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

[۲] کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

[۳] دانشجوی 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 آهکی کرتاسه‌پسین (بخش I) و سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی ائوسن از جمله توف‌های ماسه‌ای (بخش II) هستند. دگرسانی‌ها شامل کلریتی، اپیدوتی، آرژیلیتی، سیلیسی، کربناتی و هماتیتی‌شدن است. کانی‌های تشکیل‌دهنده به سه دسته فلزی آهن‌دار (مگنتیت، هماتیت، پیریت، پیروتیت، گوتیت و لیمونیت)، فلزی مس‌دار (کالکوپیریت، کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت و آزوریت) و باطله (کلسیت، دولومیت، کوارتز، گارنت، اپیدوت و کلریت) تقسیم می‌شوند. ساخت و بافت ماده معدنی به‌صورت توده‌ای، رگه- رگچه‌ای، شکافه پرکن، دانه‌پراکنده 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 همگن‌شدن 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.

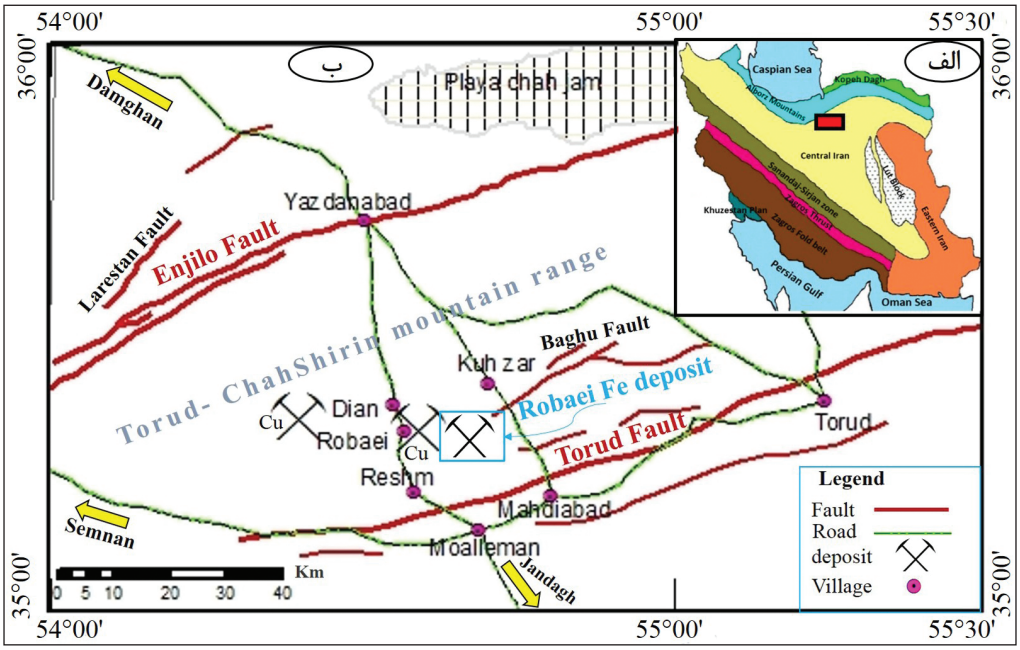
کلیدواژه‌ها: زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی، آهن، رباعی، دامغان.

***نویسنده مسئول:** فرج‌اله فردوست

E-mail: Faraj_Fardoost@yahoo.com

۱- پیش‌نوشتار

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 ´۲۳ °۳۵ عرض شمالی، در بخش شمالی پهنه ساختاری- رسوبی ایران مرکزی و رشته کوه آتشفشانی- رسوبی طرود- چاه‌شیرین واقع شده است (شکل‌های ۱- الف و ب).



شکل ۱- الف) نقشه ساده‌شده پهنه‌های ساختاری- رسوبی ایران (آقانباتی، 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- چاه‌شیرین و موقعیت قرارگیری آن در بین دو گسل اصلی طرود در جنوب و انجیلو در شمال برگرفته از هوشمندزاده و همکاران (۱۳۵۷).

در این رشته‌کوه، 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- چاه‌شیرین است (تقی‌پور و همکاران، ۱۳۹۰). کانه‌زایی آهن را در منطقه رباعی براساس سنگ میزبان می‌توان به دو بخش تقسیم‌بندی نمود: الف) سنگ میزبان کربناته و در مجاورت با داسیت (بخش I) و ب) سنگ میزبان توف ماسه‌ای و تراکی‌آندزیت (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 رشته‌کوه 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 به‌صورت 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 درآزمایشگاه BRIUG (Analytical Laboratory Beijing Research, Institute of Uranium Geology)، ۴ 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 به‌صورت اولیه همراه ماده معدنی در بخش II کانه‌زایی بود، در مرکز تحقیقات و فرآورده‌های معدنی ایران انجام گرفت.

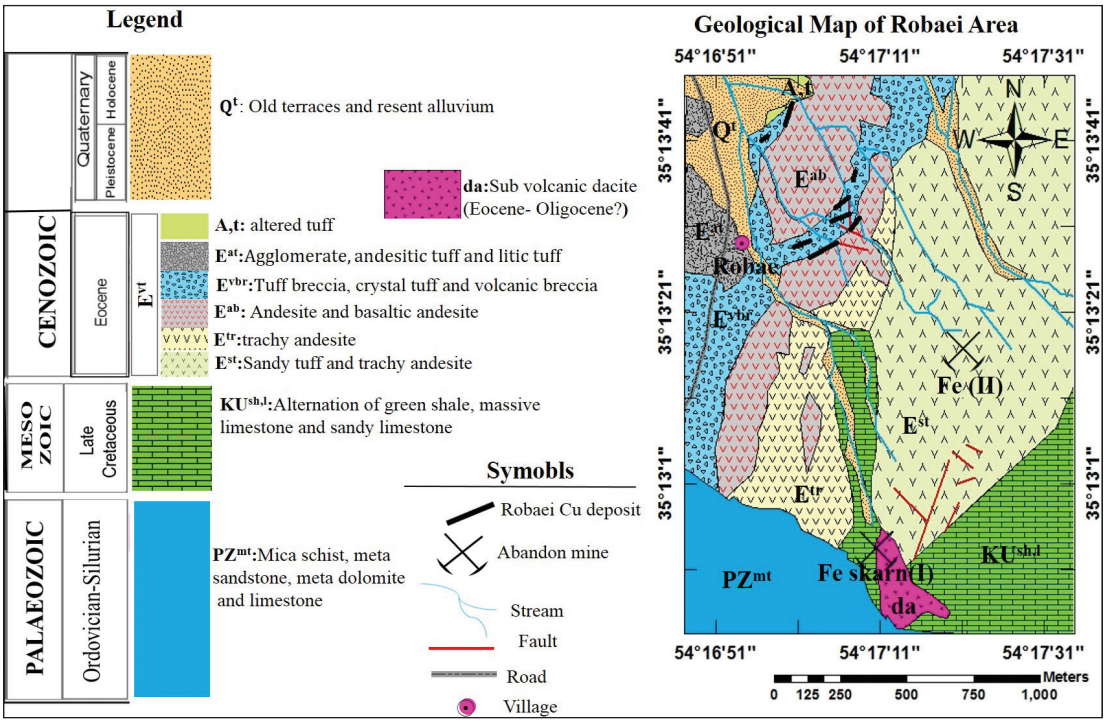
۳- زمین‌شناسی ناحیه‌ای

رشته‌کوه طرود- چاه شیرین در تقسیمات پهنه‌بندی ساختاری- رسوبی ایران جزیی از پهنه ایران مرکزی (آقانباتی، ۱۳۸۳)، زیرپهنه سبزوار (Alavi, 1991)، کمان ماگمایی البرز (Shamanian 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 رشته‌کوه از شمال به گسل انجیلو و از جنوب به گسل طرود محدود می‌شود. روند کلی این رشته‌کوه 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 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 ضخیم‌لایه و آهک مارنی خاکستری متمایل به سبز با میان‌لایه‌های ماسه‌ای و ماسه‌سنگ آهکی و گاهی نیز لایه‌های میکروکنگلومرا 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، تراکی‌آندزیت، 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.

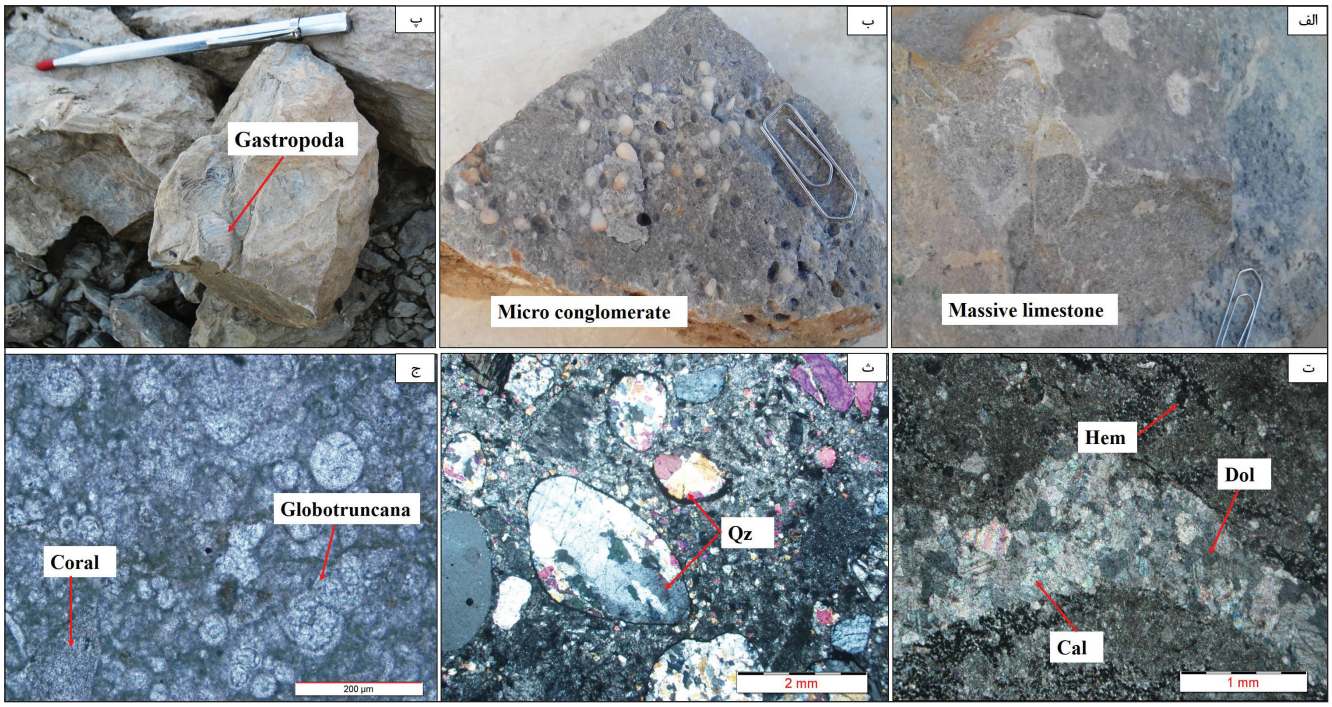
۴- زمین‌شناسی محدوده معدنی

مهم‌ترین واحدهای سنگی موجود در محدوده کانه‌زایی شامل واحدهای آهکی کرتاسه‌پسین 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، میکروکنگلومرا و آهک‌های توده‌ای هستند (شکل ۳). میکروکنگلومراها حاوی دانه‌های کوارتز هستند که در سیمان آهکی قرار دارند. همچنان که پیشتر گفته شد، در نتیجه تزریق 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 به‌صورت خودشکل تا بی‌شکل با ماکل پلی‌سنتتیک و گاه با منطقه‌بندی مشاهده می‌شوند. کوارتزها به‌صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و دارای حالت خلیج‌خوردگی هستند. کانی‌های فرومنیزین آب‌دار نظیر آمفیبول و بیوتیت حاشیه سوخته دارند؛ به عبارتی اُپاسیتی و به اکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند. اُپاسیته 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، توف‌برش، توف‌های دگرسان شده، لیتیک‌توف و آگلومرا می باشند که واحد توف ماسه‌ای، میزبان اصلی بخش II کانسار آهن رباعی است. تراکی‌آندزیت‌ها در مقاطع نازک میکروسکوپی، بافت پورفیری و میکرولیتی جریانی دارند. کانی‌های تشکیل‌دهنده تراکی‌آندزیت‌ها، بلورهای درشت پلاژیوکلاز هستند که در خمیره ریزبلور از همین کانی‌ها قرار دارند (شکل‌های ۴- ب و ث). 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 به‌صورت ثانویه در محل حفرات تشکیل شده است. کانی کدر در این نمونه‌ها بیشتر پیریت است که به‌صورت ثانویه و معمولاً به حالت دانه‌پراکنده و گاه به شکل تجمعی مشاهده می‌شود. توف‌های ماسه‌ای دارای کانی‌های کوارتز، اکسی‌هورنبلند، مقدار کمی

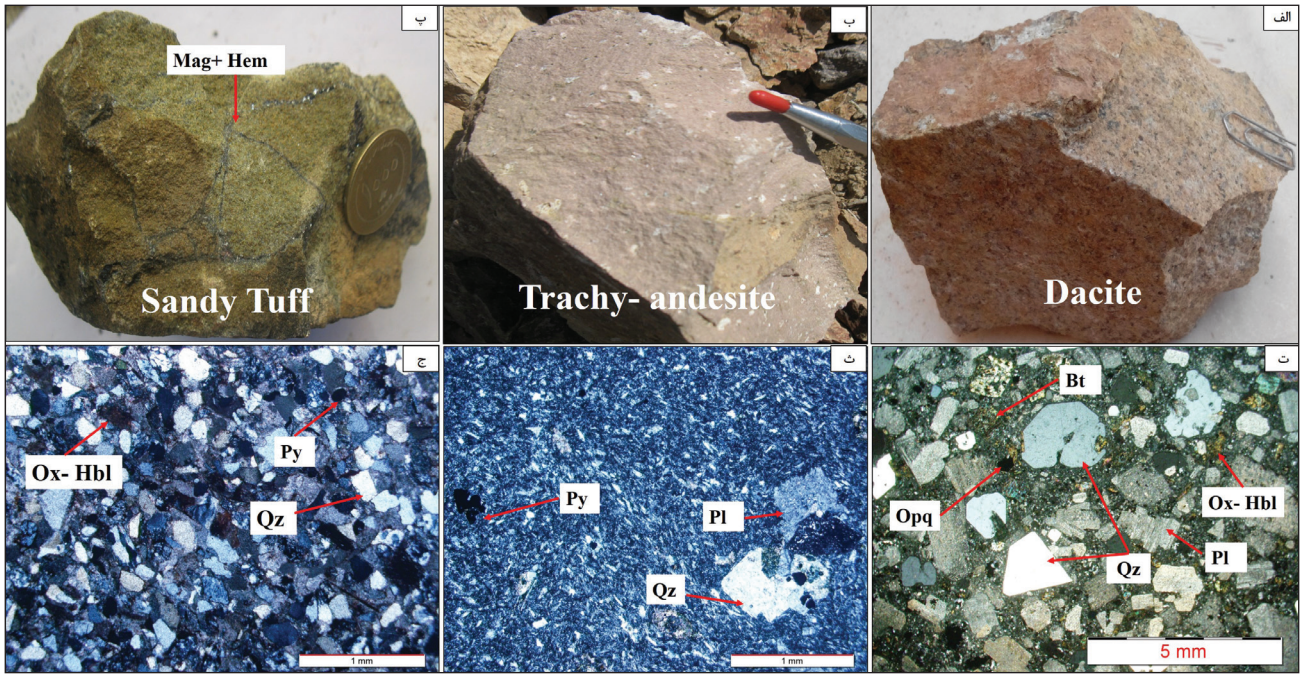
پلاژیوکلاز و کانی‌های فلزی (هماتیت، مگنتیت و پیریت) به‌صورت رگه-رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی بین دانه‌ای هستند (شکل‌های ۴- پ و ج). کانی‌های ثانویه غیرفلزی در توف‌های ماسه‌ای شامل کلریت، سریسیت و رگچه‌های کلسیت می‌باشند.



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) نمایی نزدیک از سنگ آهک توده‌ای منطقه رباعی؛ ب) تصویر نمونه دستی میکروکنگلومرا در منطقه؛ پ) تصویر نمونه دستی سنگ آهک‌شیلی کرتاسه پسین حاوی فسیل‌های گاستروپود؛ ت) تصویر میکروسکوپی از کانی‌های کلسیت (Cal) و دولومیت (Dol) تبلور مجدد یافته براثر نفوذ سیالات کانه‌دار در سنگ‌آهک توده‌ای؛ ث) تصویر میکروسکوپی میکروکنگلومرا 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. علایم اختصاری کانی‌ها براساس Whitney and Evans (2010) است.



شکل ۴- الف) نمونه دستی توده نیمه‌عمیق داسیتی به رنگ کرمی متمایل به سبز؛ ب) تصویر نمونه دستی تراکی‌آندزیت 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 نیمه‌شکل‌دار گاه با بافت خلیجی، اکسی‌هورنبلند (Ox- Hbl) و اکسی‌بیوتیت (Bt)، پلاژیوکلازهای (Pl) سریسیتی شده و کانی‌های کدر در نور عبوری ساده (PPL)؛ ث) درشت‌بلور پلاژیوکلاز (Pl) با حاشیه تحلیل‌یافته، کوارتز ثانویه و پیریت‌های (Py) تجمع‌یافته در زمینه میکرولیتی تراکی‌آندزیت 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). علایم اختصاری کانی‌ها بر اساس Whitney and Evans (2010) و Chace (1956) است.

۵- کانه‌زایی و دگرسانی در منطقه

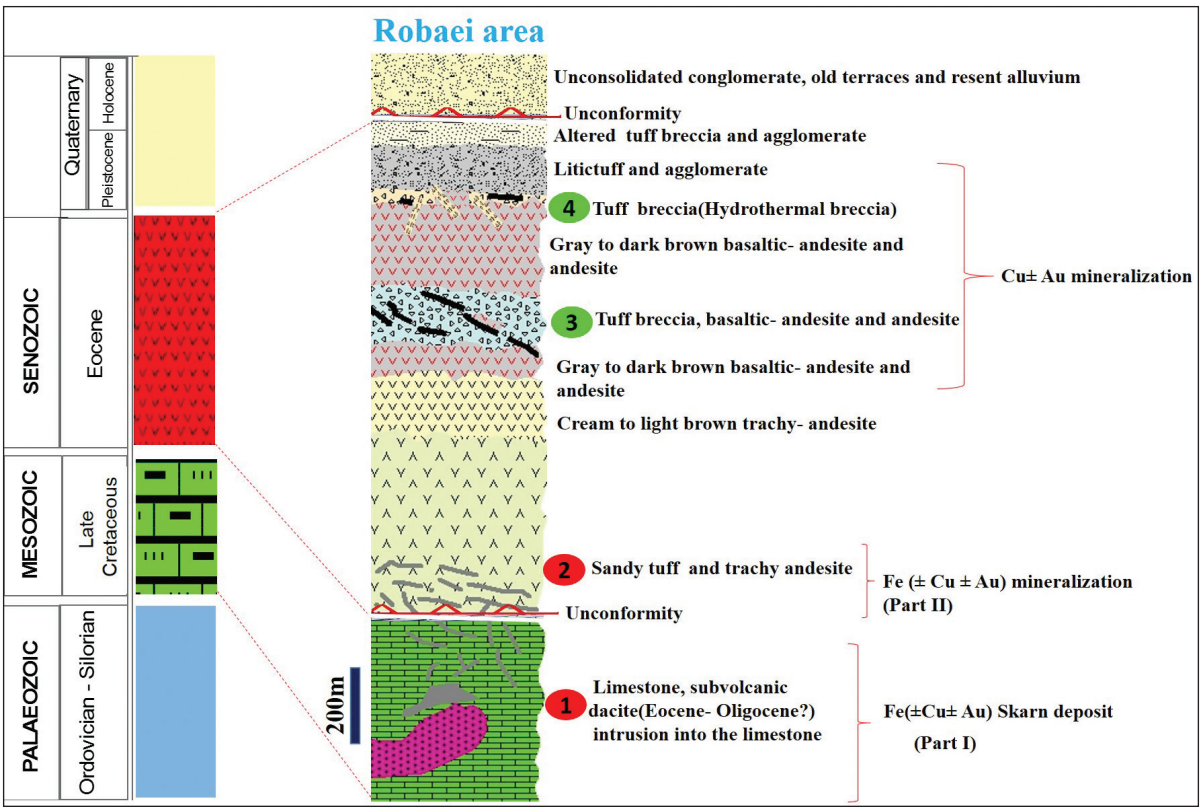
در منطقه مورد مطالعه دو نوع کانی‌زایی آهن و مس وجود دارد که در ۴ بخش مختلف تشکیل شده‌اند. بخش‌های I و II مرتبط با کانه‌زایی آهن و بخش‌های دیگر مرتبط با کانه‌زایی مس است (شکل ۵). ابعاد رخنمون‌های کانه‌زایی آهن در بخش I حدوداً ۳۰۰ متر طول و ۲۵۰ متر عرض و در بخش II ۳۵۰ متر طول و ۱۰۰ متر عرض دارند. کانه‌زایی بخش I از نوع اسکارنی بوده و در داخل آهک‌های کرتاسه پسین و در نتیجه نفوذ توده‌های نیمه‌عمیق داسیتی تشکیل شده است (شکل ۶- الف). کانی‌های اسکارنی مشاهده شده شامل گارنت، اپیدوت و کلریت هستند. همچنین، سیالات این توده‌های نیمه‌عمیق داسیتی، واحدهای آتشفشانی رسوبی ائوسن را تحت تأثیر خود قرار داده و کانه‌زایی بخش II کانسار آهن رباعی را تشکیل داده‌اند (شکل ۶- ب). سنگ میزبان اصلی کانسار آهن رباعی II بیشتر توف ماسه‌ای است که کانه‌زایی به‌صورت رگه- رگچه‌ای، پرکننده درز و شکاف‌ها و فضای بین دانه‌ای توف‌هاست. علاوه بر توده‌های نیمه‌عمیق 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 یا 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.

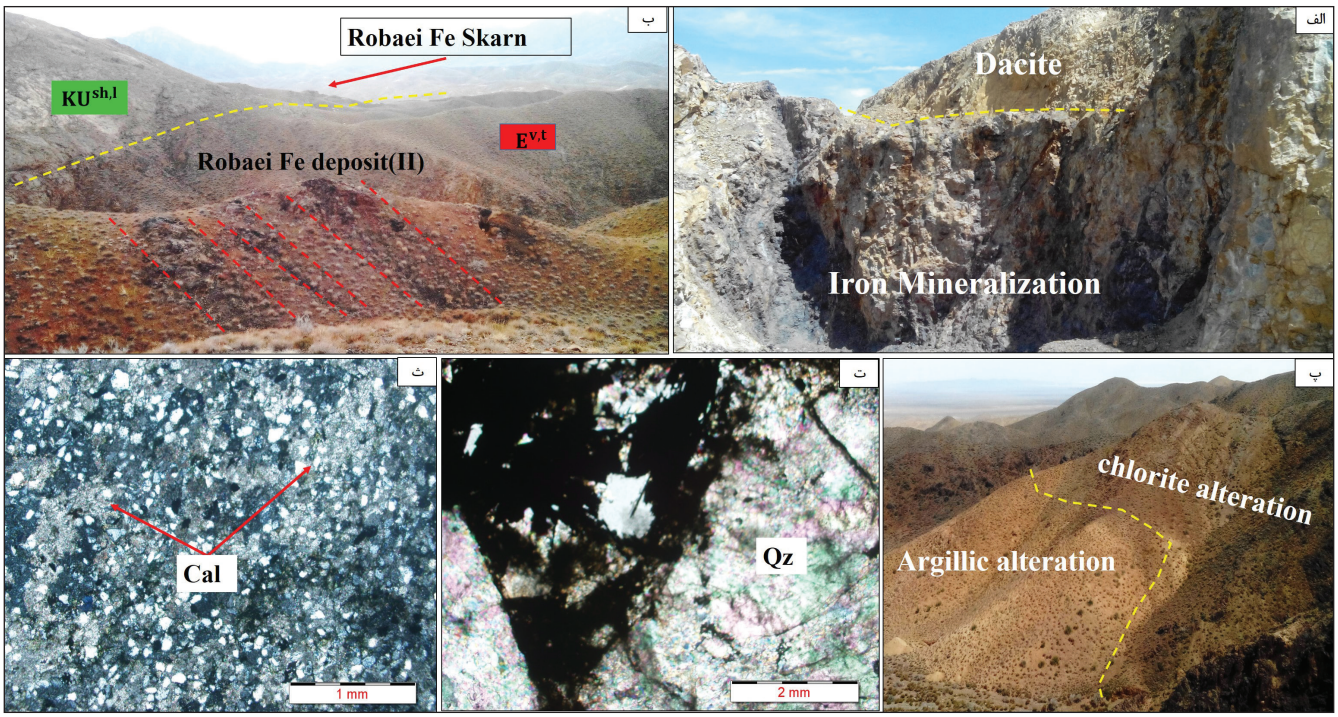
ب) روند شمال غربی- جنوب شرقی که شیب آنها عموماً قائم است یا حدود ۶۰ تا ۷۰ درجه به سمت جنوب غرب شیب دارند و تعداد اندکی از آنها با شیب کمتر از ۶۰ درجه (در حدود ۳۰ تا ۴۰ درجه) به سوی شمال شرق متمایل هستند.

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، سریسیت- کلسیت، هماتیت و گوتیت هستند (کریم‌پور، ۱۳۹۵). بر اساس مشاهدات صحرایی، مطالعات میکروسکوپی و بنا به نتایج آنالیز XRD که توسط بادوزاده کانرش (۱۳۹۰) انجام گرفته، دگرسانی‌های بخش اسکارنی آهن رباعی (بخش I) را می‌توان به دو دسته دگرسانی در توده نیمه‌عمیق داسیتی و سنگ میزبان کربناته (آهک‌ها) تقسیم‌بندی نمود. دگرسانی در داسیت‌ها شامل سریسیتی، آرژیلیتی، پروپیلیتی، کلریتی و سیلیسی و در قسمت آهکی شامل کربناتی، سیلیسی و هماتیتی شدن است. مهم‌ترین دگرسانی‌های موجود در بخش II کانسار آهن رباعی شامل کلریتی، آرژیلیتی، سیلیسی، کربناتی، هماتیتی و لیمونیتی شدن می باشد. 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 أثر محلول‌های گرمابی غنی از Fe و Mg ایجاد می‌شود و در اثر این فرایند، سنگ ظاهری سبز رنگ پیدا می کند. هیدرولیز سیلیکات‌های آلومینیم‌دار در محیط اسیدی سبب تشکیل سریسیت و کانی‌های رسی می‌شود که دگرسانی‌های سریسیتی و آرژیلیتی را به وجود می‌آورد (Montoya and Hemley, 1975). علاوه بر دگرسانی‌های کلریتی و آرژیلیتی، دگرسانی سیلیسی یکی دیگر از دگرسانی موجود در منطقه است. سیلیسی شدن یکی از متداول‌ترین دگرسانی‌های گرمابی است که در اثر افزایش کوارتز و سایر اشکال سیلیس (چرت، اوپال و کلسدونی) در سنگ ایجاد می‌شود (Pirajno, 2009).



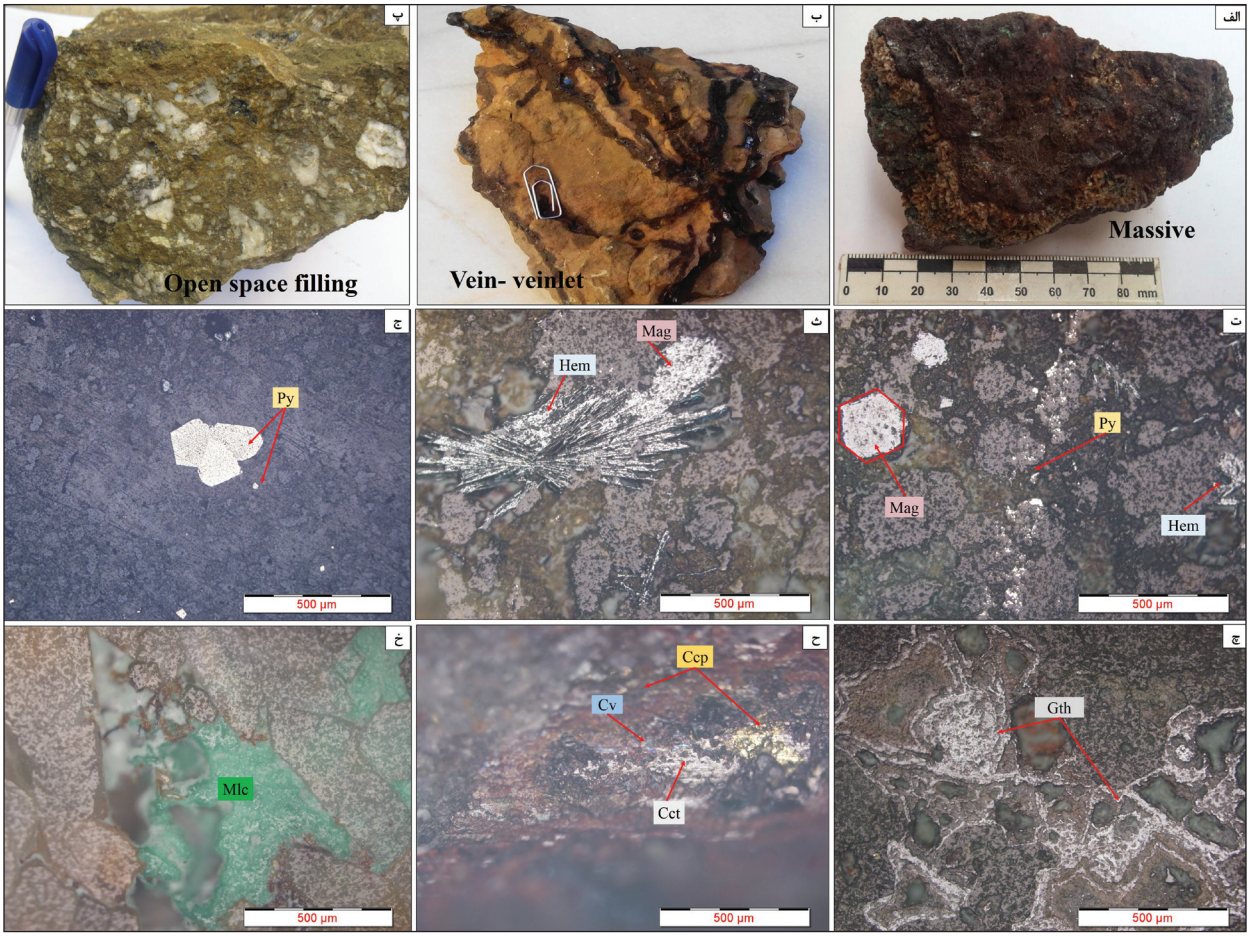
شکل ۵- ستون چینه‌شناسی از واحدهای سنگی منطقه و نمایش محل رخداد کانه‌زایی آهن رباعی (بخش های I و II).



شکل ۶- الف) عکس صحرایی مرز توده نیمه‌عمیق داسیتی با آهک‌های کرتاسه و رخداد کانه‌زایی آهن به‌صورت توده‌ای و رگه‌ای (دید به سمت شمال)؛ ب) نمایی از مرز بین واحدهای کرتاسه پسین ($KU^{sh,l}$) با ولکانیک‌های ائوسن ($E^{v,t}$) و محل رخداد کانه‌زایی بخش اسکارنی و بخش II آهن رباعی و نمایش رگه‌های کانی‌سازی آهن همراه با دگرسانی کلریتی و هماتیتی 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

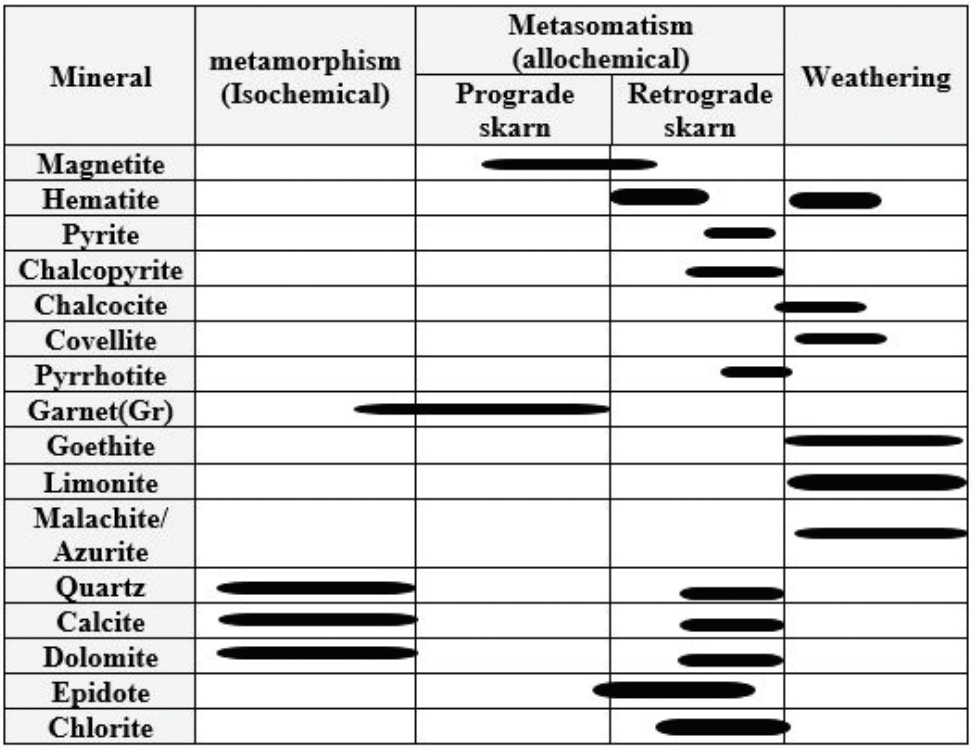
بنا به مشاهدات صحرایی و مطالعات میکروسکوپی انجام گرفته بر روی مقاطع صیقلی و نازک- صیقلی، کانه‌های تشکیل‌دهنده کانسار آهن رباعی را می‌توان به سه دسته کانه‌های فلزی آهن‌دار (مگنتیت، هماتیت، پیریت، پیروتیت، گوتیت و لیمونیت)، کانه‌های فلزی مس‌دار (کالکوپیریت، کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت و آزوریت) و کانی‌های باطله (کلسیت، دولومیت، کوارتز، گارنت، اپیدوت و کلریت) تقسیم‌بندی نمود. کانی پیروتیت تنها در بخش I کانسار مشاهده شده است. کالکوپیریت، پیریت، کالکوسیت وکوولیت در بخش II کانسار فراوانی بیشتری نسبت به بخش I دارند. مهم‌ترین ساخت و بافت ماده معدنی در کانسار آهن رباعی شامل رگه- رگچه‌ای، شکافه پرکن، توده‌ای، دانه‌پراکنده و جانشینی است (شکل ۷). ساخت و بافت توده‌ای بیشتر در بخش اسکارنی مشاهده شده و در بخش II کانسار رباعی، بافت غالب از نوع رگه- رگچه‌ای و شکافه پرکن است (شکل‌های ۷- الف، ب و پ). هماتیت (اسپکیولاریت) یکی از فراوان‌ترین کانه‌ها در کانسار مورد مطالعه است که به شکل تیغه‌ای، شعاعی، سوزنی با ساخت و بافت رگه- رگچه‌ای، شکافه پرکن و توده‌ای یافت می‌شود (شکل ۷- ث). هماتیت گاه با مگنتیت حالت مارتیتی از خود نشان می‌دهد. مارتیتی شدن نوع خاصی از پدیده جانشینی است که 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 میکرسکوپی به‌صورت بلورهای خودشکل چندوجهی با بافت دانه‌پراکنده همراه با سایر کانه‌ها یافت می‌شود (شکل‌های ۷- ت و ث). پیریت یکی دیگر از کانه‌های آهن است که در مقاطع میکروسکوپی به حالت رگه- رگچه‌ای، دانه‌پراکنده و الحاق سه‌گانه با بلورهای خودشکل قابل مشاهده است (شکل‌های 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- چ 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 وکالکوپیریت تشکیل شده است. کالکوپیریت فراوانی بسیار کمی در کانسار مورد مطالعه دارد و در مقاطع میکروسکوپی به کالکوسیت، کوولیت، اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن در حال جانشینی است (شکل 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- خ).



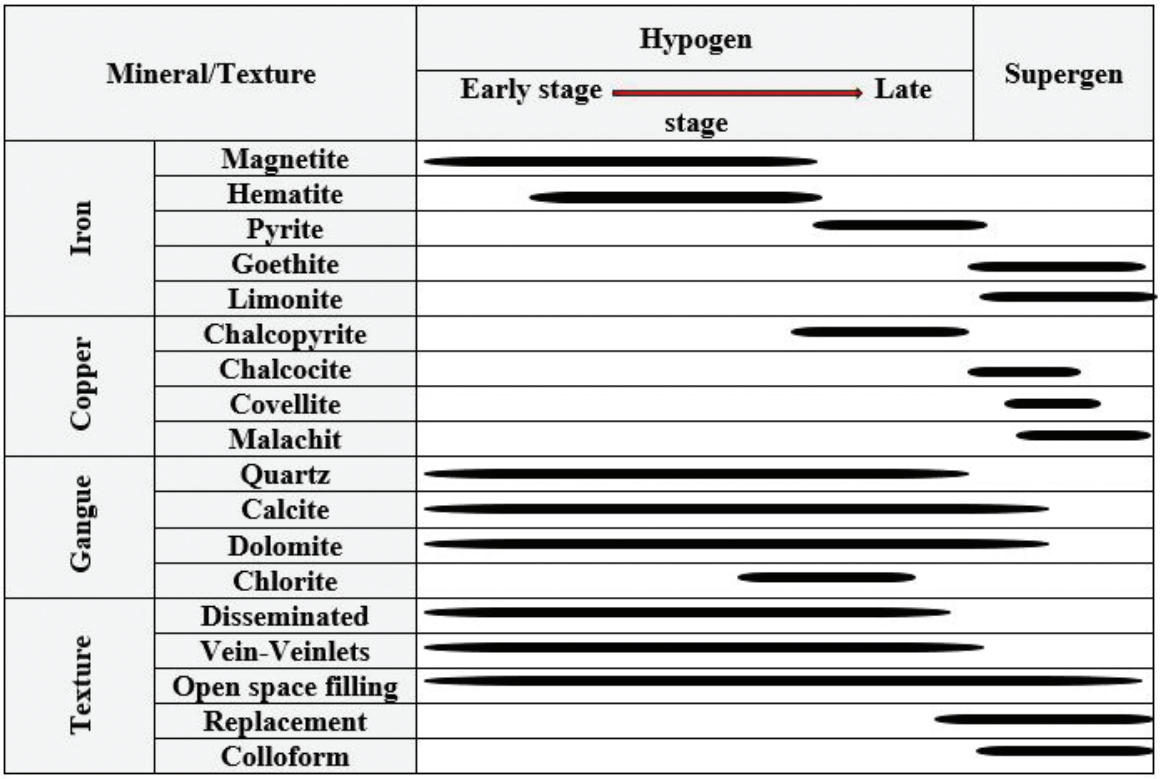
شکل ۷- تصاویر نمونه دستی و مقاطع میکروسکوپی از نوع ماده معدنی و ساخت و بافت آن‌ها در کانسار آهن رباعی (I) و (II): الف) بافت توده‌ای کانی هماتیت در بخش (I) اسکارنی کانسار (سنگ میزبان آهکی)؛ ب) ساخت رگه- رگچه‌ای کانی هماتیت در نمونه توف ماسه‌ای در بخش II کانسار رباعی؛ پ) توف ماسه‌ای برشی‌شده و کانی هماتیت به‌صورت 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 مارتیتی‌شده در بخش II کانسار آهن رباعی؛ ج) پیریت‌های خودشکل دانه‌پراکنده 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 کوولیت (Cv) در بخش II کانسار آهن رباعی؛ خ) مالاکیت (Mlc) با بافت شکافه‌پرکن در بخش II کانسار آهن رباعی. علایم اختصاری کانی‌ها براساس Whitney and Evans (2010) و Chace (1956) 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 به‌صورت اولیه و هم به‌صورت تأخیری تشکیل شده‌اند.

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.



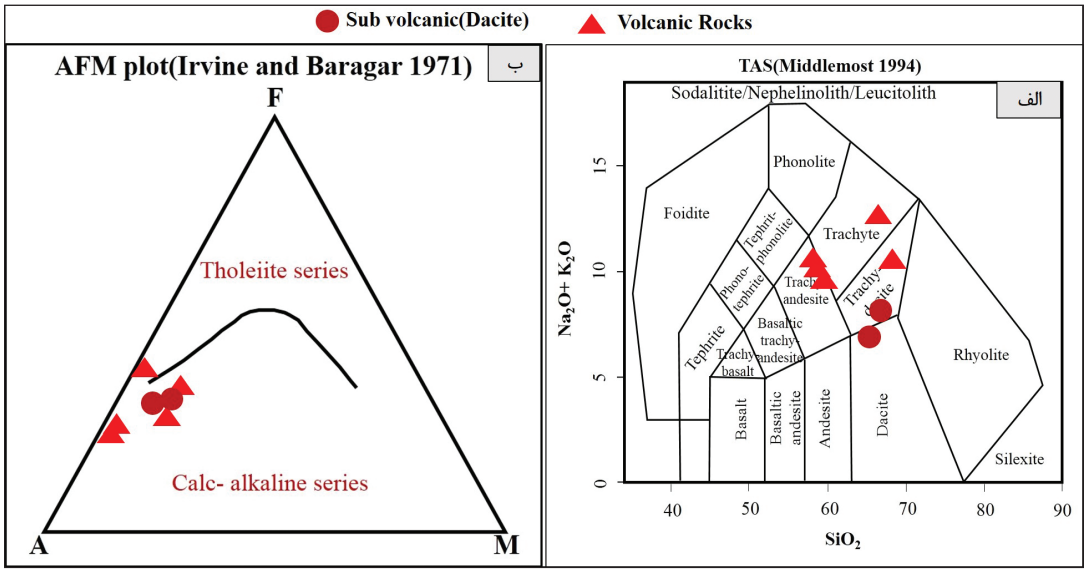
شکل ۸- توالی پاراژنتیک کانه‌ها و کانی‌ها در بخش (I) اسکارنی کانسار آهن رباعی با تغییرات اقتباس از بادوزاده کانرش (۱۳۹۰).



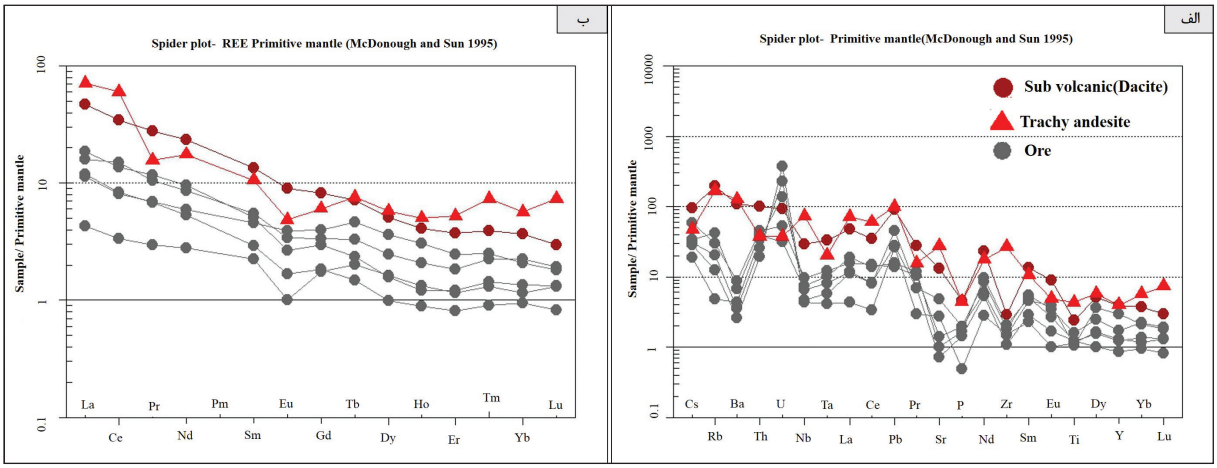
شکل ۹- توالی پاراژنتیک کانه‌ها و ساخت و بافت موجود در بخش II کانسار آهن رباعی.

۷- ژئوشیمی

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 ائوسن) 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 (IrvineandBaragar,1971)، غالباً سری کالک‌آلکالن را نشان می‌دهند (شکل ۱۰-ب). فراوانی عناصر کمیاب در توده‌های نیمه‌عمیق داسیتی منطقه رباعی با فراوانی این 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 می باشد (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.



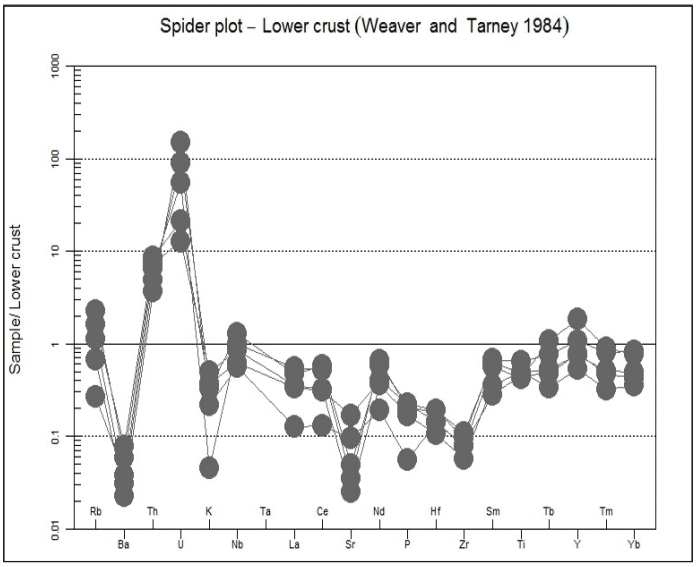
شکل ۱۰- الف) نامگذاری ژئوشیمیایی سنگ‌های منطقه مورد مطالعه براساس نمودارTAS (Middlemost, 1994) که محدوده قرارگیری آنها تراکی‌آندزیت، داسیت، تراکی‌داسیت و تراکیت است؛ ب) موقعیت قرارگیری نمونه‌های منطقه بر روی نمودار مربوط به سری ماگمایی AFM (Irvine and Baragar, 1971) که غالب نمونه‌ها در محدوده سری کالک‌آلکالن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

بر اساس مطالعات ژئوشیمی کانسنگ، میزان عیار فلزات آهن کل در بخش II بین ۸۲/۹۱– ۵/۸۸ درصد (عیار میانگین ۳۱/۲ درصد)، مس بین ۲۰۷۶۱– ۲۷۵ گرم در تن و طلا در حدود ۰/۸۹ گرم درتن متغیر است (جدول‌های ۱ و ۲). غنی شدگی ۱۰۰ برابری اورانیم نسبت به پوسته‌زیرین (Weaver and Tarney, 1984) در نمونه‌های کانسنگ مربوط به کانسار آهن رباعی، از نکات درخور توجه است (شکل ۱۲).

مطالعات نشان داده است که اورانیم قابلیت حل شدن فراوانی در سیالات در تعادل با هماتیت دارد (Komninou and Sverjensky, 1996) و به همین خاطر در پهنه‌های اکسیدی فراوانی بیشتری دارد. نمونه‌های کانسنگ مورد مطالعه در نمودارهای عنکبوتی با سنگ‌های ساب‌ولکانیکی همخوانی دارند (شکل ۱۱– ب) که می‌تواند نشانگر منشأ گرفتن سیالات کانه‌ساز از این سنگ‌ها باشد.



شکل ۱۲– نمودار چند عنصری در کانسار آهن رباعی، بهنجار شده نسبت به پوسته زیرین (Weaver and Tarney, 1984).

جدول ۱– نتایج آنالیز شیمیایی XRF برای تعیین اکسیدهای اصلی نمونه‌های مورد مطالعه در منطقه (غلظت برحسب درصد % است).

Sample No.	Sample type	Location	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5
TRA-1	Dacite	Part I	66.82	0.48	16.57	4.61	0.05	1.05	2.15	4.25	3.84	0.19
TRA-2	Ore	Part I	49.8	0.21	5.25	36.14	0.29	0.38	7.06	0.06	0.74	0.08
TRA-3	High-grade ore	Part II	5.29	0.23	3.78	82.91	0.23	0.25	6.84	0.02	0.43	0.02
TRA-4	(Limestone tuff (Ore	Part II	79.21	0.24	4.56	13.51	0.06	1.62	0.58	0.05	0.09	0.07
TRA-5	(Sandy tuff (Ore	Part II	74.38	0.32	4.98	17.63	0.06	1.22	0.60	0.07	0.65	0.08
TRA-6	(Quartz vein (Ore	Part II	86.63	0.25	5.08	5.88	0.04	0.78	0.32	0.07	0.89	0.06
TR03	Trachy andisite	Part II	58.95	0.88	17.35	6.74	0.00	2.54	2.85	4.41	5.51	0.47
TR07	Dacite	Part I	65.80	0.65	14.11	4.29	0.00	1.62	5.63	2.26	4.79	0.50
TR014	Trachy andisite	Part II	67.86	0.33	16.05	3.32	0.00	0.51	2.29	4.38	5.25	0.00
TR16	Trachy andisite	Part II	64.91	0.33	15.21	3.66	0.00	0.51	2.99	5.81	6.03	0.00
TR18	Trachy andisite	Part II	60.32	0.68	17.67	3.90	0.00	2.11	5.87	3.88	5.18	0.22
TR19	Trachy andisite	Part II	59.40	0.87	16.09	7.01	0.00	0.51	5.12	5.61	4.11	0.69

جدول ۲- نتایج آنالیز شیمیایی ICP-MS برای نمونه‌های سنگ میزبان و کانسنگ در کانسار آهن رباعی (غلظت برحسب 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				

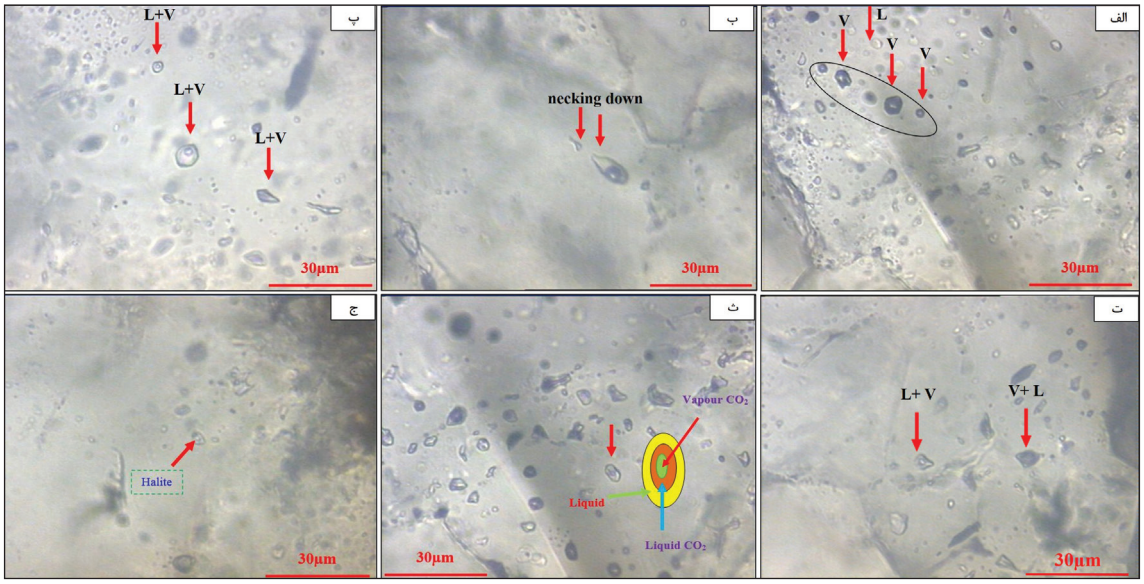
۸- مطالعات میانبارهای سیال

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 کواتز 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 تک فازی گاز (V)، تک فازی مایع (L)، دو فازی غنی از مایع (V +L)، دو فازی غنی از گاز (L+ V)، سه فازی متشکل از Liquid، 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 تک فازهای بخار همراه با تک فازی‌های مایع در میانبارها نشانه مهم پدیده جوشش است (Davidson et al., 2007). از لحاظ شکل ظاهری، میانبارها در این کانسار به اشکال کشیده، چند وجهی نامنظم، شکل منفی بلور (Negative crystal) و گاه با پدیده باریک‌شدگی (Necking down) مشاهده می‌شوند. اندازه آنها از ۶ تا ۱۵میکرون 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 میکروترمومتری بیانگر این است که دمای همگن‌شدن 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 N_2، CH_4 و H_2S است. طبق نظر Anderson et al. (2004) حضور گازهای N_2، CH_4 و H_2S باعث افزایش شوری می‌شود. ترکیب سیالات غالباً از آب خالص و یا شوراب‌هایی با شوری متغیر، گاز

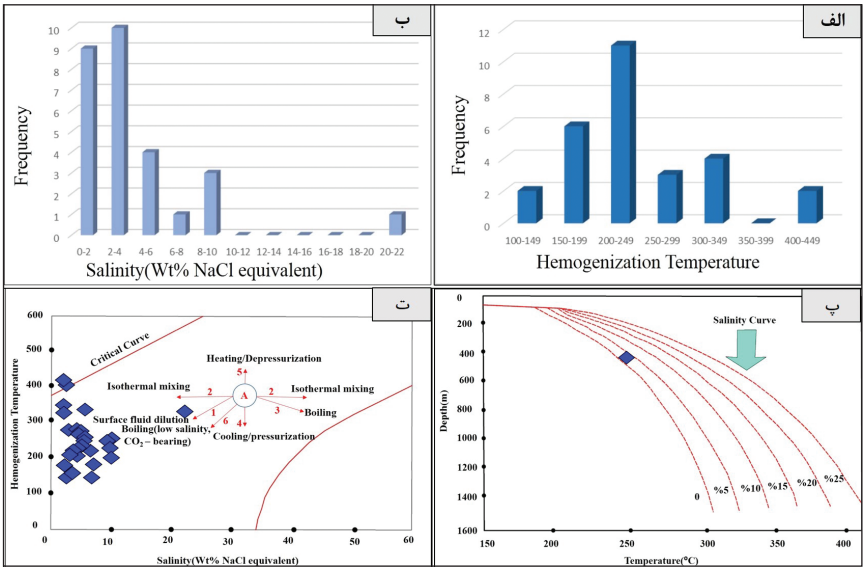
یا مایعات گازدار یا گازهای سولفیدی و کربناتی هستند (Bodnar, 2003). حضور پیریت در کانسار مورد مطالعه می‌تواند بیانگر این باشد که فشار گاز H_2S بالا بوده که توانسته پیریت و سایر فازهای سولفیدی را ته‌نشین سازد. همچنین، حضور احتمالی گازهای N_2 و CH_4 را می‌توان به مواد آلی موجود در سنگ‌های میزبان نسبت داد. بر اساس نمودار هاس (Hass, 1971)، عمق به دام افتادن میانبارهای سیال کانه‌زایی بخش II کانسار آهن رباعی بیش از ۴۰۰ متر است (شکل ۱۴- پ). در نمودار شوری در برابر دمای همگن‌شدن (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 گرمابی بوده در نمونه‌های مورد مطالعه قابل مشاهده است (شکل ۱۴- ت).

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 فازی گاز(V) و تک فاری مایع (L)؛ ب) پدیده باریک‌شدگی(necking down) در میان‌بارهای سیال؛ پ) سیال‌های دو فازی غنی از مایع (L+V)؛ ت) سیال‌های دوفازی غنی از مایع (L+V) و غنی از گاز (V+L)؛ ث) سه فازی متشکل از Vapour CO_2 ، Liquid و CO_2 Liquid (L_1+L_2+V)؛ ج) سه فازی 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 عبارتنداز: الف) توده نفوذی نیمه عمیق داسیتی، ب) سنگ میزبان، پ) ساختارهای منطقه و ت) سیالات گرمابی.

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 نیمه‌عمیق داسیتی و تقابل بین سیالات ماگمایی و سنگ‌های میزبان، یک محیط گرمابی- 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 رگه‌ای تشکیل شده است. همچنین، بخشی از سیالات این توده‌های نیمه‌عمیق، واحدهای آتشفشانی- رسوبی (توف ماسه‌ای و تراکی‌آندزیت) 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 به‌صورت رگه- رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی شکل گرفته است. فراوانی دمای همگن‌شدن میانبارهای سیال در کانسار آهن رباعی در بخش اسکارنی (I)، ۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی گراد (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 همگن‌شدن (Wilkinson, 2001)، عامل مؤثر در تکامل سیال و ته‌نشست مواد معدنی سرد شدن سیالات گرمابی 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 همگن‌شدن سیال کانه‌دار با کانسارهای آهن چالو وآهن پنج‌کوه جنوب دامغان، آهن ورتاوه جنوب کاشان و کانسار آهن ال اسپینو (El Espino) شیلی مورد توجه قرارگرفته است. باتوجه به خصوصیات ذکر شده، بخش I کانسار آهن رباعی شباهت‌هایی با کانسارهای آهن اسکارن 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.

ویژگی‌های شاخص برخی کانسارها	کانسار آهن رباعی		کانسار آهن چالو جنوب دامغان	کانسار آهن پنج کوه دامغان	کانسار آهن ورتاوه جنوب کاشان	کانسار El Espino شیلی
	مجاور توده نیمه عمیق (بخش I اسکارنی)	بخش آتشفشانی- رسوبی (بخش II)				
سنگ میزبان	سنگ آهک	توف ماسه‌ای و تراکی‌آندزیت	آهک، آندزیت، داسیت	سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری	توف کربناتی، توف برش	آندزیت، توف ماسه‌ای
نوع توده نفوذی	توده داسیتی نیمه عمیق	-	دیوریت	کوارتز مونزونیت	دیوریت و کوارتزدیوریت	-
دگرسانی	اپیدوتی، کلریتی، سریسیتی، آرژیلیتی	کلریتی، سیلیسی، کربناتی، آرژیلیتی	پروپیلیتی، آرژیلیتی، سریسیتی، کربناتی	دگرسانی‌های سدیمی-کلسیمی ودگرسانی پتاسیک	اپیدوتی، کلریتی، سریسیتی، آرژیلیتی	آلبیتی، اپیدوتی، کربناتی، سریسیتی، آرژیلیتی
کانی شناسی	اپیدوت، گارنت، کلریت	کلریت، کواتز، کلسیت	گارنت، کلسیت، اکتینولیت، کوارتز، تالک، مسکوویت	اسکاپولیت آلبیت، دیوپسید، اکتینولیت، ترمولیت، اپیدوت، کلریت کوارتز و کلسیت	گارنت، اپیدوت، کلریت، ولاستونیت، پیروکسن	آلبیت، اپیدوت، اکتینولیت، کلریت، کوارتز، کلسیت
کانه ها	هماتیت، مگنتیت، کالکوپیریت، پیریت، پیروتیت، کالکوسیت، مالاکیت، آزوریت، گوتیت، لیمونیت	هماتیت، مگنتیت، کالکوپیریت، پیریت، کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت، گوتیت، لیمونیت	هماتیت، مگنتیت، کالکوپیریت، لیمونیت، گوتیت، مالاکیت	مگنتیت، هماتیت، پیریت، کالکوپیریت	مگنتیت، هماتیت، کالکوپیریت، پیریت	هماتیت، مگنتیت، کالکوپیریت، پیریت
ساخت	رگه‌ای، استوک ورک، توده‌ای	رگه‌ای	توده‌ای، رگه‌ای	عدسی‌شکل و پراکنده	توده‌ای، رگه‌ای، عدسی، برشی	رگه‌ای
فلزات همراه	Cu, Au	Cu, Au	Cu, Au	Cu, Au	Cu, Au	Cu, Au
فراوانی دمای همگن‌شدن سیال	250- 300 °C	200- 249 °C	140- 276 °C	-	150- 310 °C	280- 350 °C
شوری	-	2- 4 wt% NaCl	3- 11 wt% NaCl	-	5.47- 15.78 wt% NaCl	30- 34 wt% NaCl
تیپ کانسار	اسکارن کلسیمی دما پایین	اکسید آهن مس و طلا (IOCG)	اسکارن کلسیمی	اسکارن	اسکارن کلسیمی	اکسید آهن مس و طلا (IOCG)
منابع	بادوزاده کانرش (۱۳۹۰)	این تحقیق	تقی‌پور و همکاران (۱۳۹۰)؛ مهرابی و همکاران (۱۳۹۳)	اسماعیلی و همکاران (۱۳۸۵)؛ پیروزفر (۱۳۸۵)؛ عرب‌عامری و همکاران (۱۳۹۰)	وکیلی نوش آبادی (۱۳۹۳)	Lopez et al. (2013)

۱۰- نتیجه‌گیری

مشاهدات و بررسی‌های صحرایی، مطالعات پتروگرافی، کانه‌نگاری، ژئوشیمی و میانبارهای 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 آهکی کرتاسه نفوذ کرده و باعث بروز متاسوماتیسم و نهشته‌شدن کانسار آهن اسکارنی رباعی (بخش I) شده است. در این راستا، گسل‌های منطقه نیز به عنوان مجراهایی برای عبور و انتشار سیالات سبب رخداد کانه‌زایی گرمابی 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.

کتابنگاری

اسماعیلی، د.، شیبی، م. و کنعانیان، ع.، ۱۳۸۵- شواهد پترگرافی و ژئوشیمیایی آلتراسیون سدی کلسیک و پتاسیک در توده نفوذی پنج‌کوه 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.

آقانباتی، ع.، ۱۳۸۳- زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی 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.

پیروزفر، پ.، ۱۳۸۵- کانی‌شناسی، ژئوشیمی و خاستگاه آهن پنج‌کوه، جنوب‌شرق دامغان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

تقی‌پور، 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، جلد۲، شماره۱.

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 ، مینرالوگرافی و دگرسانی در معدن آهن پنج کوه دامغان، دومین همایش علوم زمین.

علوی، م. و هوشمندزاده، ا.، ۱۳۵۵- نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰منطقه طرود، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

کریم‌پور، 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، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شمال، ۱۶۸ص.

مهرابی، ب.، قاسمی سیانی، م. و طالع‌فاضل، ا.، ۱۳۹۳- بررسی سامانه کانه زایی فلزات پایه و گرانبها در محدوده های معدنی چشمه‌حافظ و چالو،کمان ماگمایی ترود- چاه‌شیرین، پاییز ۹۳ ، سال بیست و چهارم، شماره ۹۳ ، صص. ۱۰۵ تا ۱۱۸.

وکیلی 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 ترود، 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 I nterpretation, 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 Acta72, 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 Groun 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 aspotential 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.

Piercey, 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.

Shamanian, 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 Hydarbaghi[2] and S. Baluchi[3]

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

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

[3]Ph.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, pyrrotite 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