



زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی، زمین‌شیمی، بررسی سیالات درگیر، پتروژنز و سن‌سنجی دایک‌های دیوریتی محدوده مس رباعی (جنوب دامغان)

مهدی مهدوی آکردی¹، آزاده ملکزاده شفارودی^{1*}، محمدحسن کریم‌پور¹ و بهنام رحیمی²

(1) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(2) گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

دریافت مقاله: 1398/08/01، پذیرش: 1398/10/18

چکیده

محدوده اکتشافی مس رباعی در کمربند تروند-چاه شیرین در فاصله 95 کیلومتری جنوب دامغان واقع شده است. سنگ‌شناسی منطقه از واحدهای آتشفشانی ائوسن با ترکیب آندزیت و تراکی آندزیت تشکیل شده که دایک‌هایی با ترکیب دیوریتی در این واحدها نفوذ کرده است. زون‌های دگرسانی رخنمون‌یافته در این منطقه شامل پروپیلیتیک، سریسیتی، آرژیلیک و کربناتی شدن است. کانی‌سازی به صورت رگه‌ای با شیب بین 60 تا 80 درجه با روند شمال شرقی - جنوب غربی و عرض 1 تا 5 متر در امتداد شکستگی‌ها و گسل‌ها رخ داده است. کانی‌های اولیه شامل کالکوپیریت، بورنیت و پیریت و کانی‌های ثانویه شامل کالکوسیت، کولیت، مالاکیت، آزوریت، گوتیت، لیمونیت و هماتیت است. مقدار مس بین 0/01 تا 5/6 درصد متغیر است و همچنین مقدار عناصر سرب، روی، نقره و طلا در منطقه، پایین است. دایک‌های دیوریتی منطقه غنی شدگی در عناصر لیتوفیل بزرگ یون¹ و عناصر نادر خاکی سبک²، و تهی شدگی در عناصر نادر خاکی سنگین³ و عناصر با شدت میدان بالا⁴ نشان می‌دهند.

مقدار $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ، $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ اولیه و ایزوتوپ‌های اولیه ϵNdi بیوتیت-هورنبلند دیوریت پورفیری به ترتیب برابر با 0/705664، 0/518426 و 1/7- است. همه این شواهد با تشکیل شدن دایک‌های دیوریتی محدوده اکتشافی مس رباعی از گوشته اولیه با ذوب بخشی گوه گوشته‌ای در بالای زون فرورانش همسو است. بر اساس داده‌های U-Pb بر روی کانی زیرکن، سن دایک‌ها برابر با $50/0 \pm 49/49$ میلیون سال مربوط به اشکوب ایپرزین (ائوسن زیرین) است. دماسنجی بر روی سیالات درگیر اولیه موجود در کانی کلسیت مرتبط با کانی‌سازی، بیانگر تشکیل این نوع کانی‌سازی در دمای حدود 165 تا 300 درجه سانتی‌گراد از سیالی با شوری متوسط (7 تا 16 درصد وزنی معادل نمک طعام) است. مخلوط شدن سیال‌ها با شوری متفاوت و در نتیجه کاهش شوری مهم‌ترین عامل در ته‌نشست مس در منطقه است. شواهد سنگ‌شناسی، دگرسانی، شکل و حالت کانی‌سازی، کنترل ساختاری، سیالات درگیر و ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که کانی‌سازی مس رگه‌ای محدوده اکتشافی رباعی از نوع اپی‌ترمال است.

واژه‌های کلیدی: کانی‌سازی، سیالات درگیر، ایزوتوپ‌های Nd-Sr، سن‌سنجی U-Pb، رباعی، تروند-چاه شیرین، ایران

1. Large-Ion-Lithophile Elements (LILE)
2. Light Rare Earth Elements (LREE)
3. Heavy Rare Earth Elements (HREE)
4. High-Field-Strength-Elements (HFSE)

مقدمه

محدوده اکتشافی مس رباعی در 95 کیلومتری جنوب شهر دامغان، 5 کیلومتری جنوب شرق روستای دیان و 2 کیلومتری کلاته رباعی در استان سمنان قرار دارد. منطقه مورد نظر بین طول جغرافیایی " 27' 30" 54° تا " 42/71' 30" 54° و عرض جغرافیایی " 29/41' 22" 35° تا " 23/47' 54" 35° بر روی نقشه زمین‌شناسی 1:100000 کلاته-رشم قرار گرفته است (Nogol Sadat and Alavi, 1993) (شکل A-1 و B). این منطقه از دیدگاه زمین‌شناسی ساختاری ایران در پهنه ایران مرکزی و در بخش شمالی آن در کمربند آتشفشانی نفوذی تروود-چاه شیرین قرار گرفته است (Houshmandzadeh et al., 1978). کمربند آتشفشانی-نفوذی تروود-چاه شیرین حاصل ماگماتیسم ترشیاری در پهنه ایران مرکزی است که از سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب غالب آندزیتی و توده‌های گرانودیوریتی با ترکیب غالب دیوریتی تشکیل شده است (Fard et al., 2001). این کمربند به علت دارا بودن محیط زمین‌ساختی مناسب و وجود سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی انوسن، شرایط زمین‌شناسی مناسبی را برای تشکیل فلزات پایه از جمله مس، سرب، روی، طلا، نقره و سایر فلزات قیمتی و گران‌بها ایجاد کرده است که کانسار مس رباعی نمونه‌ای از آن است. به دلیل بالا بودن پتانسیل معدنی، وجود معادن و کانسارهای با ارزش فلزات پایه و گران‌بها، پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه پترولوژی، زمین‌شناسی اقتصادی، زمین‌ساخت و همچنین بررسی‌های پی‌جویی برای عناصر مختلف در این کمربند انجام شده است که از آن جمله می‌توان کانسار طلا-مس کوه‌زر (Rohbakhsh et al., 2018)، طلای گندی و ابولحسنی شمال معلمان (Shamanian et al., 2004)، کانه‌زایی رگه‌ای مس (سرب، روی) چاه‌مسی (Imamjome et al., 2009)، کانه‌زایی رگه‌ای مس چالو (Mehrabi and Ghasemi, 2012)، کانی‌زایی طلا-مس باغو (Niroomand et al., 2010; Moradi, 2018)، کانه‌زایی کانسار اسکارن آهن

رباعی (Badozadeh Kanrish, 2011)، کانسار سرب (روی) انارو (Shiri, 2013) و کانسار مس دیان (Nahidifar et al., 2014) را نام برد. تاکنون گزارش پایان عملیات اکتشاف مس رباعی مربوط به سازمان صنایع و معادن استان سمنان، توسط شرکت زمین پویان فراز آسیا تهیه شده است. شرکت زمین پویان فراز آسیا تعداد 7 گمانه در منطقه حفر کرده و 45 نمونه ژئوشیمیایی از گمانه‌ها تجزیه کرده است (Taghipour, 2016). همچنین پژوهشی بر روی زمین‌شناسی، کانی‌سازی، زمین‌شیمی و سیالات درگیر در منطقه انجام شده است (Abdollahi Heidari and Fardoust, 2015). در پژوهش انجام شده توسط نویسندگان، علاوه بر تجزیه گمانه‌های حفاری، تعداد 8 نمونه از کانی‌سازی سطحی و 4 نمونه برای تجزیه طلا بعد از آماده‌سازی به روش فایر اسی¹ و اندازه‌گیری به روش ICP-MS مورد تجزیه قرار گرفت. همچنین یک نمونه از دایک دیوریتی میزبان کانی‌سازی برای تعیین منشأ و سن ماگما به روش Rb-Sr و U-Pb مورد تجزیه قرار گرفت که در پژوهش قبلی انجام نشده بود. هدف از این پژوهش، بررسی‌های جامع‌تر سنگ‌شناسی، کانی‌سازی، دگرسانی، و زمین‌شیمی دایک‌های دیوریتی و مناطق کانی‌سازی، سن‌سنجی دایک‌های دیوریتی میزبان کانی‌سازی و بررسی ایزوتوپ‌های رادیواکتیو Rb-Sr دایک‌های دیوریتی منطقه برای ارزیابی چگونگی تشکیل ماگماست تا راهی برای شناسایی این نوع کانسارها در کمربند تروود-چاه شیرین و منطقه باشد.

روش مطالعه

برای انجام بررسی‌های سنگ‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی، بافت و روابط پاراژنتیکی، 40 عدد مقطع نازک، 10 عدد مقطع نازک صیقلی و 6 عدد بلوک صیقلی تهیه و مورد بررسی قرار گرفت. تعداد 3 نمونه از دایک‌های دیوریتی با کمترین دگرسانی از مناطق مورد بررسی انتخاب شدند و نمونه‌ها پس از خردایش و آماده‌سازی، برای اندازه‌گیری اکسیدهای اصلی به روش فلورئورسان پرتو ایکس² در شرکت کانساران

1. Fire Assay

2. X-ray Fluorescence (XRF)

بینالود تهران (نوع دستگاه فیلیپس مدل PW 1480) تجزیه شدند. همچنین این سه نمونه برای تجزیه عناصر فرعی و نادر خاکی به روش محلول‌سازی ذوب قلی‌ایی و استفاده از روش پلاسمای جفت‌شده القایی¹ در آزمایشگاه ACME کانادا تجزیه شدند. برای تجزیه زمین‌شیمیایی تعداد 8 نمونه از رگه‌های کانی‌سازی به روش ICP-OES در شرکت زرآزما تهران و 45 نمونه از گمانه‌های حفاری در آزمایشگاه زرآزما و کانپژوه به روش ICP-AES مورد تجزیه قرار گرفتند. همچنین تعداد 4 نمونه از رگه‌های کانی‌سازی برای تعیین مقدار عنصر طلا به روش آماده‌سازی Fire assay و اندازه‌گیری به روش ICP-MS در شرکت زرآزما تهران تجزیه شد. پس از بررسی جامع زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی و تعیین توالی پاراژنتیکی در منطقه، نمونه‌های کلسیتی که بهترین معرف برای شرایط تشکیل کانی‌سازی هستند انتخاب شدند و تعداد 6 عدد مقطع دوبرصیقل از رگچه‌های کانی‌سازی برای بررسی سیالات درگیر تهیه شد. دماسنجی سیالات درگیر با دستگاه سردکننده و گرم‌کننده لینگام مدل THMSG 600 در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. گستره دمایی دستگاه بین 190- تا 600+ درجه سانتی‌گراد و با دقت $2 \pm ^\circ\text{C}$ است. شوری و چگالی سیالات درگیر با استفاده از نرم‌افزار اکسل Hokie Flincs اندازه‌گیری شد (Lecumberri-Sanchez et al., 2012; Steele-). (MacInnis et al., 2012).

تعداد 1 نمونه از دایک‌های دیوریتی در منطقه رباعی به روش U-Pb بر روی کانی زیرکن سن‌سنجی شد. آماده‌سازی نمونه‌ها در شرکت زمین ریزکاوان تهران انجام شد. تعداد 100 عدد زیرکن جداسازی شد. از زیرکن‌ها در نور عبوری، انعکاسی و نیز در زیر میکروسکوپ کاتدولومینسانس عکس‌برداری شد. 25 عدد از این زیرکن‌ها در مرکز آریزونا (دانشگاه آریزونا امریکا) به روش Laser Ablation ICP-MS مورد سن‌سنجی قرار گرفت. ترکیبات ایزوتوپی با محاسبه خط‌ای میانگین 2σ به دست آمد.

تعداد 1 نمونه از دایک‌های دیوریتی با حداقل دگرسانی از منطقه برای ایزوتوپ‌های Rb-Sr و Sm-Nd تجزیه شد. تجزیه ایزوتوپ‌های رادیوژنیک Rb-Sr و Sm-Nd در دانشگاه آویرو پرتغال بر روی نمونه سنگ کل توسط دستگاه Mass Spectrometer (TIMS) VG Sector 54 در هاون آگاتی پودر شدند. نمونه‌های پودر شده در محلول HF/HNO_3 در مخزن‌های اسید Teflon Parr در دمای 200 درجه سانتی‌گراد به مدت 3 روز حل شدند. پس از تبخیر محلول نهایی، نمونه‌ها در HCl (6 نرمال) حل و خشک شدند. عناصر برای تجزیه با استفاده از روش کروماتوگرافی یون متعارف در دو مرحله خالص شد، جدایش Sr در ستون تبادل یونی با رزین تبادل کاتیونی AG8 50 W Bio-Rad و خالص‌سازی Nd از دیگر لانتانیدها در ستون‌ها با رزین تبادل کاتیون Ln Resin (فناوری‌های Elchrom) انجام شد. هم‌اکنون واکنشگرهایی که در جدایش نمونه‌ها استفاده شد، از تقطیر زیر نقطه جوش به دست آمد و آب توسط یک دستگاه عنصر- Milli-Q (Millipore) حاصل شد. Sr در یک تک رشته Ta با H_3PO_4 ذخیره شد؛ اما Nd در بخش خارجی رشته Ta با HCl در یک آرایش رشته سه‌گانه ذخیره شد. نسبت‌های ایزوتوپی Sr و Nd برای تفکیک جرمی نسبت به استاندارد SRM-988 دارای مقدار میانگین ($\text{conf. lim}=95\%$) $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0/7219$ و $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0/1194$ (N=12: دارای مقدار میانگین $\text{conf. lim}=95\%$) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0/16 \pm 710279$ و استاندارد JNdi-1 (N=13: $\text{conf. lim}=95\%$) $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0/78 \pm 5120984$ بوده است.

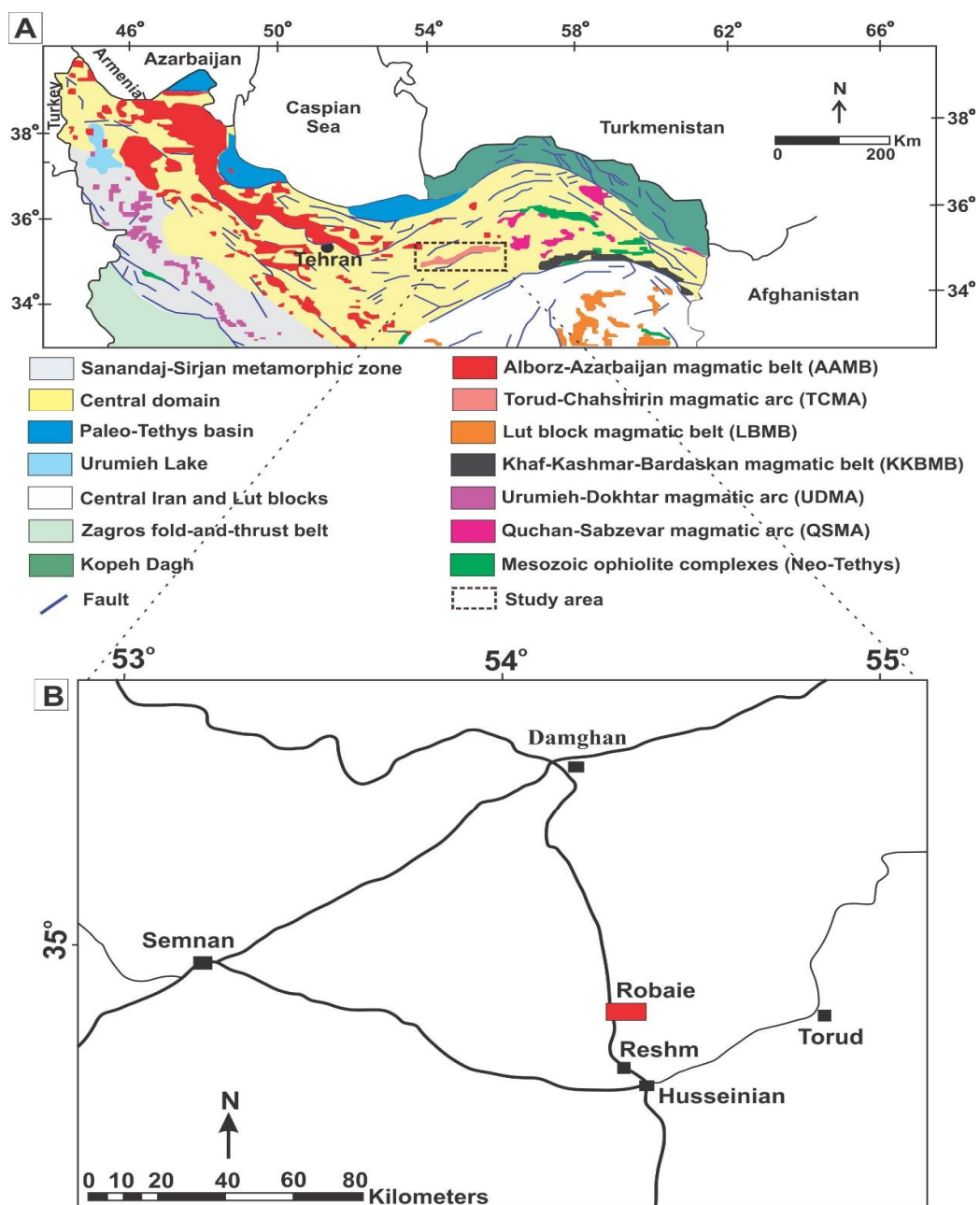
زمین‌شناسی منطقه

محدوده مورد بررسی در نقشه زمین‌شناسی 1:250000 تروود-چاه‌شیرین و ورقه زمین‌شناسی 1:100000 کلاته-رشم واقع شده است (Nogol Sadat and Alavi, 1993). بر پایه این نقشه‌ها، همه محدوده اکتشافی مس رباعی از سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب حدواسط آندزیتی تشکیل شده است؛ اما بررسی‌های

1. Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)

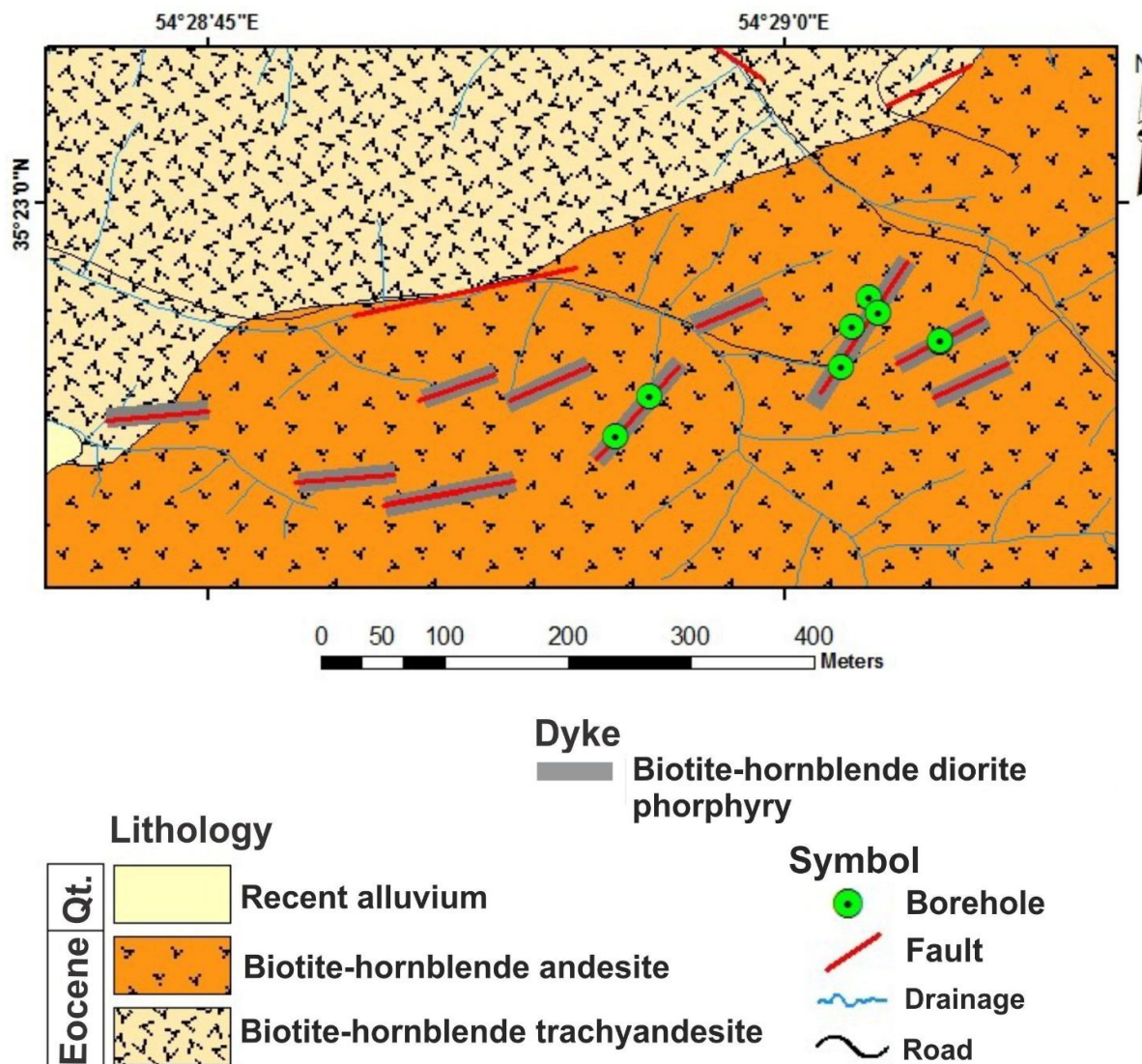
بررسی نفوذ کردند که میزبان اصلی کانی‌سازی مس هستند (شکل 2).

تفضیلی و تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس 1:1000 نشان می‌دهند افزون بر سنگ‌های آتشفشانی، توده‌های آذرین نفوذی نیمه‌عمیق به صورت دایک (دیوریت پورفیری) در منطقه مورد



شکل 1. A: نقشه زمین‌شناسی-ساختاری ایران اصلاح‌شده از ریچارد و همکاران (Richards et al., 2012) و B: راه‌های دسترسی به منطقه رباعی

Fig. 1. A: Geological-structural map of Iran (modified from Richards et al., 2012), and B: Access roads to the Robaie area



شکل 2. نقشه زمین‌شناسی محدوده مس رباعی (مقیاس 1:1000)

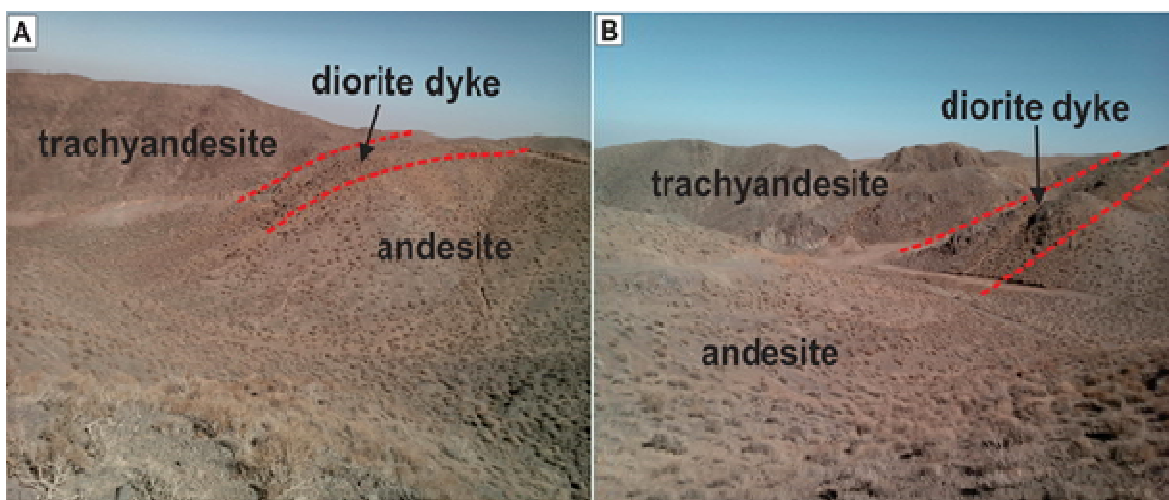
Fig. 2. Geological map of the Robaie copper area (scale 1:1,000)

هورنبلند تراکی آندزیت پوشیده شده است. بیوتیت-هورنبلند آندزیت در مشاهدات صحرایی به صورت رخنمون برجسته و تیره‌رنگ و در سطح تازه به رنگ خاکستری تیره و گاهی متمایل به رنگ قهوه‌ای (آغستگی به اکسیدهای آهن) در قسمت جنوبی منطقه قابل مشاهده است (شکل 2). این واحد دارای بافت پورفیری بوده و درشت بلورهای پلاژیوکلاز و هورنبلند و بیوتیت در نمونه دستی قابل مشاهده است. آندزیت‌ها

رگه‌های کانی‌سازی در داخل این دایک‌ها تشکیل شده‌اند. بر اساس بازدید صحرایی و بررسی‌های آزمایشگاهی، واحدهای زمین‌شناسی شناسایی شده در محدوده اکتشافی مس رباعی به سه دسته شامل سنگ‌های آتشفشانی به سن ائوسن (Houshmandzadeh et al., 1978)، دایک‌های دیوریتی و رسوبات کواترنری تقسیم می‌شوند (شکل 2). بیشتر منطقه از سنگ‌های آتشفشانی بیوتیت-هورنبلند آندزیت و بیوتیت-

تیره تا خاکستری دیده می‌شوند (شکل‌های 2 و A-3 و B). دارای بافت پورفیری بوده و درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و هورنبلند و بیوتیت در نمونه دستی قابل مشاهده است. دایک‌ها با عرض 1 تا 8 متر و طول 10 تا 100 متر با شیب بین 60 تا 80 درجه و در برخی بالای 80 درجه با روند شمال شرقی - جنوب غربی در واحدهای آتشفشانی نفوذ کرده‌اند (شکل‌های 2 و A-3 و B). مهم‌ترین دگرسانی همراه این واحدها کربناتی و سریستی است. واحدهای کواترنری شامل رسوبات آبرفتی عهد حاضر هستند که در بخش غربی منطقه وجود دارند (شکل 2).

با شدت‌های مختلف دچار دگرسانی پروپلیتیک، سریستی و آرژیلیک شده‌اند. بیوتیت-هورنبلند تراکی آندزیت در مشاهدات صحرایی به صورت مورفولوژی برجسته و تیره‌رنگ در قسمت شمالی منطقه مشاهده می‌شود (شکل‌های 2 و A-3 و B). این واحد دارای بافت پورفیری بوده و درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و هورنبلند و بیوتیت در نمونه دستی قابل مشاهده است. دگرسانی غالب این واحدها سریست-آرژیلیک است. دایک‌های موجود در منطقه رباعی دارای ترکیب بیوتیت-هورنبلند دیوریت پورفیری هستند که در داخل سنگ‌های آتشفشانی منطقه نفوذ کرده‌اند. در مشاهدات صحرایی به رنگ



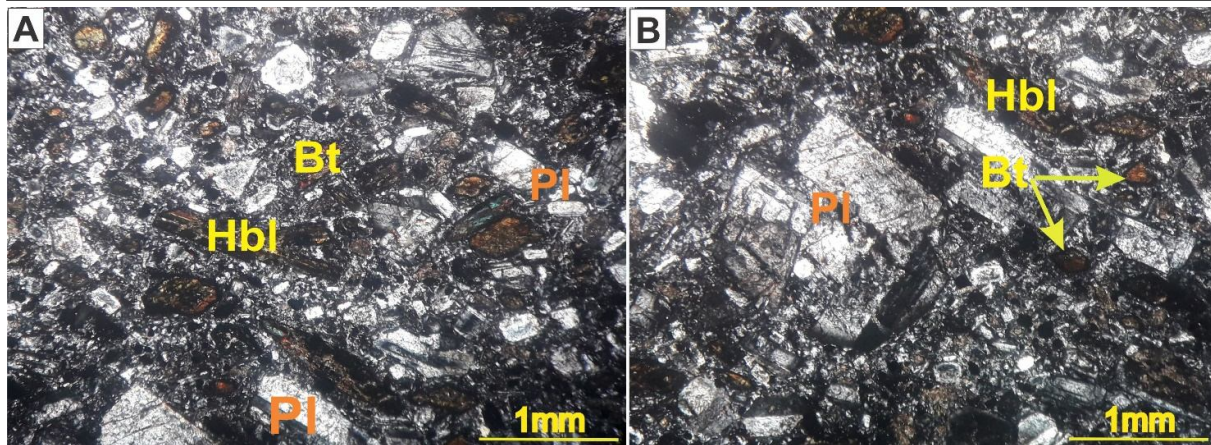
شکل 3. A و B: تصویر صحرایی از بیرون‌زدگی سنگ‌های آتشفشانی و دیوریت پورفیری محدوده مس رباعی (دید به سمت شمال شرق)

Fig. 3. A and B: Outcrop and field photographs of volcanic rocks and diorite porphyry in the Robaie copper area (view to the northeast)

است. پلاژیوکلازها و فلدسپات‌های پتاسیم 15 تا 20 درصد به سریست و کانی‌های رسی تبدیل شدند. هورنبلند و بیوتیت با حاشیه‌های سوخته هستند که در بعضی نمونه‌ها تا 60 درصد توسط کلسیت جایگزین شدند و در بعضی دیگر از نمونه‌ها 15 تا 20 درصد به کلریت دگرسان شدند. کانی‌های کدر موجود در واحد بیوتیت هورنبلند دیوریت پورفیری، مگنتیت و به مقدار کم پیریت است که کمتر از یک درصد سنگ را تشکیل می‌دهند (شکل 4-A و B).

پتروگرافی دیوریت پورفیری

واحد بیوتیت-هورنبلند دیوریت پورفیری دارای بافت پورفیری با زمینه دانه‌ریز تا دانه متوسط است. این سنگ نزدیک به 40 تا 45 درصد درشت‌بلور دارد. این کانی‌ها عبارتند از: پلاژیوکلاز (30 تا 35 درصد حجمی)، فلدسپات پتاسیم (3 تا 5 درصد حجمی)، هورنبلند (3 تا 5 درصد حجمی) و بیوتیت (1 تا 2 درصد حجمی). زمینه سنگ نیز از کانی‌های مشابه درشت‌بلورها تشکیل شده است. کانی‌های فرعی شامل آپاتیت و زیرکن



شکل 4. A و B: تصاویر میکروسکوپی از دایک‌های دیوریت پورفیری در محدوده مس رباعی (تصاویر در XPL). علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و ایوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Pl: پلاژیوکلاز، Hbl: هورنبلند، Bt: بیوتیت).

Fig. 4. A and B: Microscopic images of dioritic porphyry dykes from the Robaie copper area (XPL). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Pl: Plagioclase, Hbl: Hornblende, Bt: Biotite).

دگرسانی و کانی‌سازی

با توجه به بررسی‌های صحرایی و پتروگرافی انجام شده بر روی نمونه‌های سطحی و مغزه‌های حفاری، در این منطقه چهار نوع دگرسانی اصلی در سطح و عمق شناسایی شده است که عبارتند از: 1- پروپیلیتیک، 2- آرژلیک، 3- سربست-کربنات و 4- کربناتی. این چهار نوع دگرسانی بر اساس فراوانی و کانی‌های به دست آمده و شدت دگرسانی به زیر زون‌هایی تفکیک شده‌اند (شکل 5). کانی‌سازی در منطقه بیشتر با دگرسانی کربناتی همراه است.

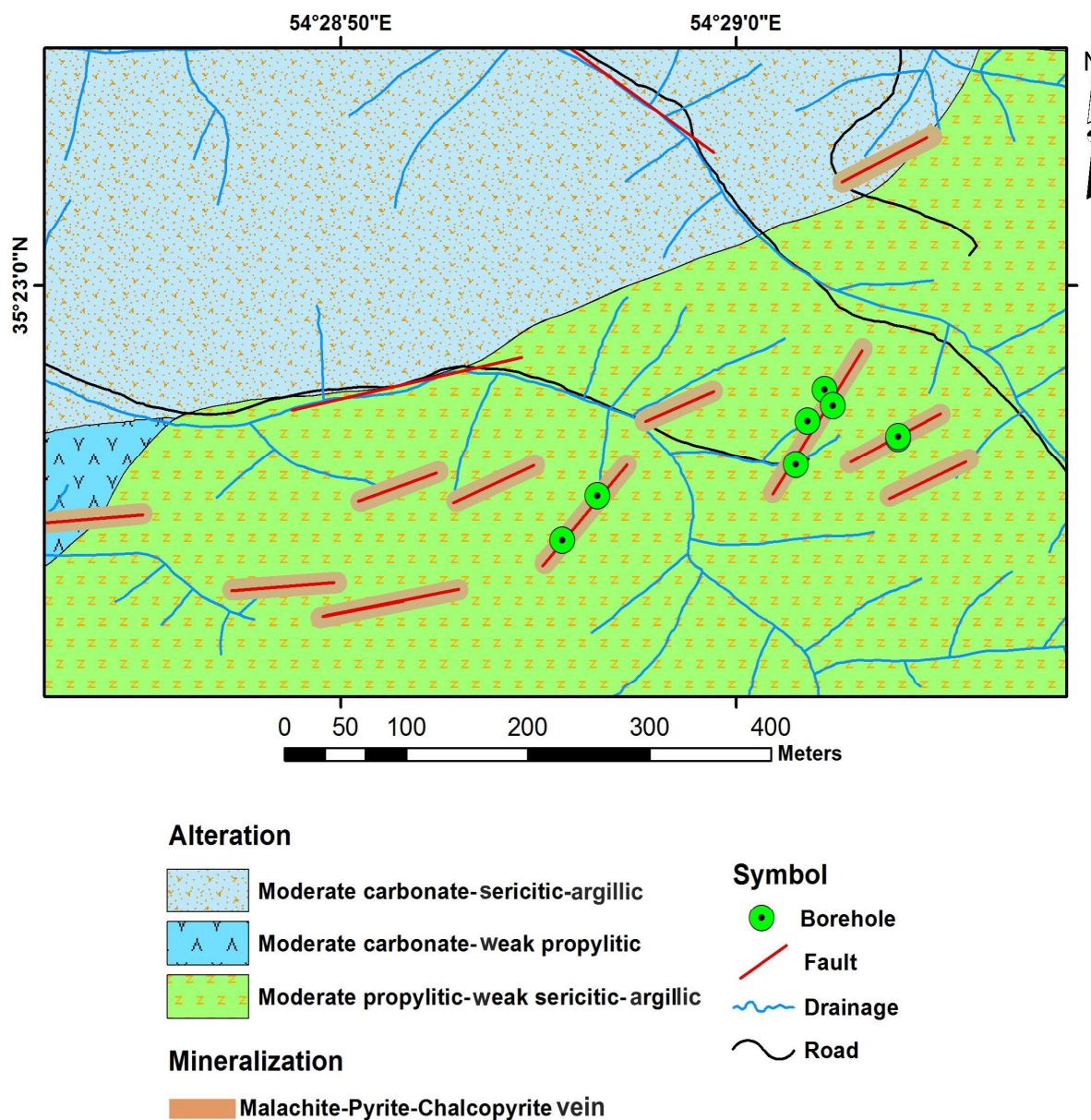
دگرسانی پروپیلیتیک: این نوع دگرسانی در بخش جنوبی منطقه رخنمون داشته و واحدهای بیوتیت-هورنبلند آندزیت را تحت تأثیر قرار داده که بیشترین وسعت را در منطقه دارد و در صحرا به رنگ سبز کم‌رنگ دیده می‌شود (شکل A-6). مقدار این نوع دگرسانی در مغزه‌های حفاری به صورت محلی و بسیار کم نسبت به سایر دگرسانی‌هاست. کانی‌های اصلی تشکیل دهنده این دگرسانی، کلریت و کانی‌های فرعی این زون، سربست و کانی‌های رسی است. شدت این دگرسانی در منطقه ضعیف تا متوسط است. ویژگی بارز این دگرسانی تبدیل 30 تا 60 درصد هورنبلند و بیوتیت به کلریت و

تبدیل 3 تا 10 درصد پلاژیوکلازها به سربست و کانی‌های رسی است (شکل‌های 5 و 6-C).

دگرسانی سربست-کربنات: این نوع دگرسانی در بخش شمالی منطقه رخنمون داشته و واحد بیوتیت-هورنبلند تراکی آندزیت را تحت تأثیر قرار داده است که وسعت زیادی در منطقه داشته و در صحرا به رنگ سفید دیده می‌شود (شکل 6-A). کانی‌های اصلی تشکیل دهنده این دگرسانی، سربست و کانی‌های فرعی این زون، کانی‌های رسی و کلسیت است. ویژگی بارز این دگرسانی تبدیل 40 تا 60 درصد پلاژیوکلازها به سربست و جانشینی 20 تا 30 درصد پلاژیوکلاز، هورنبلند و بیوتیت توسط کربنات (کلسیت) است (شکل 6-D). شدت این دگرسانی در منطقه ضعیف تا متوسط است. همچنین این دگرسانی در اطراف رگه‌های کانی‌سازی دیده می‌شود که عرضی حدود 2 تا 6 متر دارد (شکل 6-B). کانی‌های اصلی تشکیل دهنده این دگرسانی سربست و کوارتز و کانی‌های فرعی این زون، کانی‌های کلسیت و اکسیدهای آهن است. ویژگی بارز این دگرسانی تبدیل 60 تا 70 درصد پلاژیوکلازها به سربست است (شکل 6-E).

اصلی تشکیل دهنده این دگرسانی، کانی‌های رسی و کوارتز و کانی‌های فرعی این زون، سریسیت و کلسیت است. ویژگی بارز این دگرسانی تبدیل 50 تا 70 درصد پلاژیو کلازها به کانی رسی و جانشینی 10 تا 20 درصد پلاژیو کلاز، هورنبلند و بیوتیت توسط سریسیت و کربنات (کلسیت) است (شکل A-6).

دگرسانی آرژیلیک: این نوع دگرسانی در بخش شمالی منطقه رخنمون داشته و واحد بیوتیت-هورنبلند تراکی آندزیت را تحت تأثیر قرار داده است. این زون وسعت خیلی زیادی در منطقه نداشته و در صحرا به رنگ سفید دیده می‌شود (شکل A-6). شدت این دگرسانی در منطقه ضعیف تا متوسط است. کانی‌های



شکل 5. نقشه دگرسانی و کانی‌سازی محدوده مس رباعی با مقیاس 1:1000

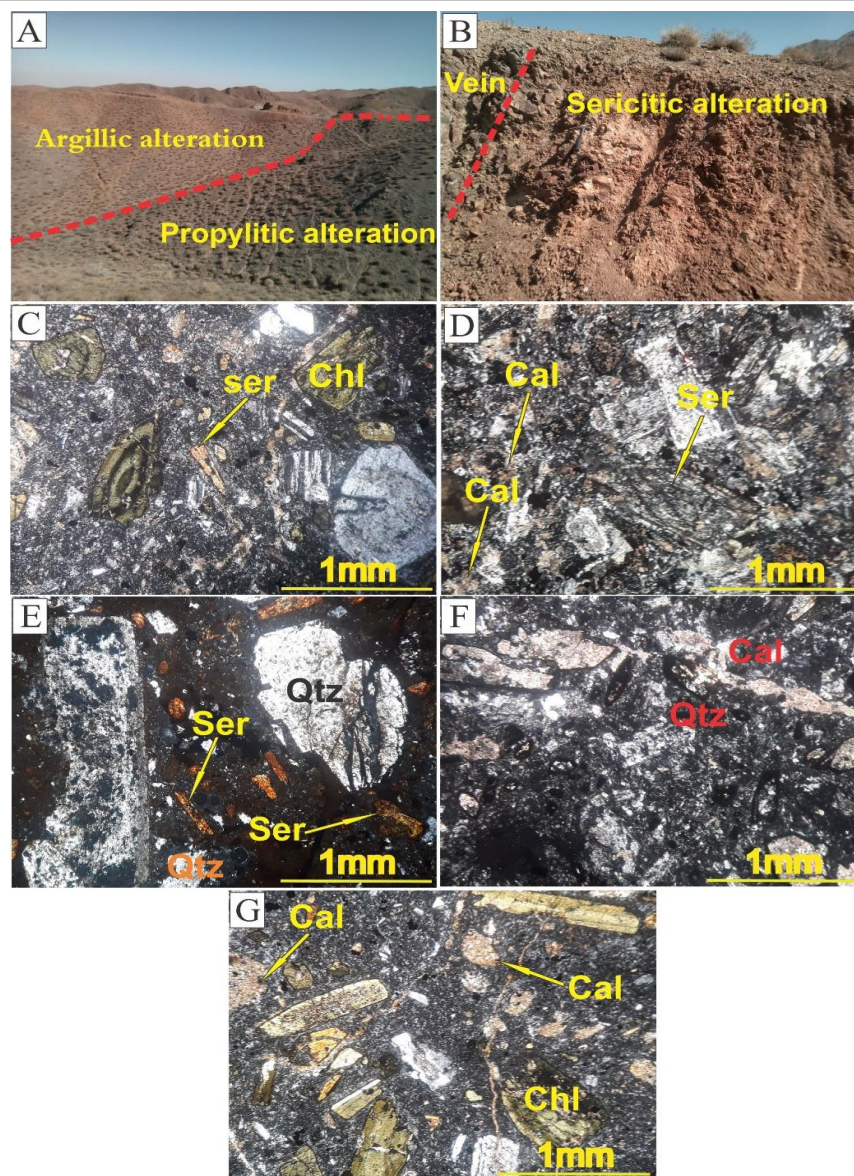
Fig. 5. Alteration and mineralization map of the Robaie copper area (scale 1:1000)

کربناتی شدن: دگرسانی غالب همراه کانی‌سازی کربناتی شدن است که بیشتر به صورت رگچه‌هایی به ضخامت 0/1 میلی‌متر تا 0/5 سانتی‌متر دیده می‌شوند. کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده این دگرسانی، کلسیت است. این دگرسانی بیشتر واحد بیوتیت هورنبلند دیوریت پورفیری را تحت تأثیر قراردادده است. همچنین در بخش‌هایی از زون کانی‌سازی دگرسانی کربناتی به صورت پراکنده و جانشینی در کانی‌های هورنبلند (60 تا 80 درصد) و پلاژیو و کلاز (10 تا 15 درصد) مشاهده شد (شکل 6-F). همچنین این دگرسانی همراه با کلریتی شدن در بخش شرقی منطقه نیز دیده می‌شود و واحدهای بیوتیت-هورنبلند آندزیت را تحت تأثیر قراردادده است که کمترین وسعت را در منطقه دارد. در این واحد کانی اصلی، کلسیت و کانی‌های فرعی آن، کلریت و سریسیت است. این بخش از دگرسانی با تبدیل حدود 30 تا 50 درصد پلاژیو کلاز به کربنات (کلسیت) و 5 تا 10 درصد بیوتیت و هورنبلند به کلریت تشکیل شده است (شکل 5 و 6-G).

کانه‌زایی مس در محدوده اکتشافی رباعی، شامل چندین رگه معدنی، در منطقه‌ای به طول 1 کیلومتر و عرض بین 1 تا 5 متر متفاوت است. کانی‌سازی به شکل رگه‌هایی با شیب بین 60 تا 80 درجه و در بعضی رگه‌ها بیش از 80 درجه با روند شمال شرقی-جنوب غربی در داخل زون‌های گسلی با روند NS-SW رخ داده است (شکل 7-A و B). کانه‌زایی مس در منطقه رباعی اغلب در سطح کربناتی (مالاکیت) و در عمق سولفیدی است. کانی‌سازی اولیه شامل کالکوپیریت (1 تا 2 درصد)، بورنیت و پیریت (0/5 تا 1 درصد) است. پیریت و کالکوپیریت با بافت توده‌ای و پراکنده اغلب بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار در عمق بیش از 18 متر در مغزه‌های حفاری دیده می‌شوند. اندازه این کانی‌ها از چند میکرون تا 1 میلی‌متر متغیر است (شکل 7-F و E). بورنیت به مقدار کم در منطقه تشکیل شده است. این کانی در شکستگی‌ها در اثر جانشینی به کالکوسیت و کوولیت تبدیل شده است. همچنین این کانی از حاشیه‌ها به کانی کالکوسیت (15 تا 20 درصد) و مالاکیت (15 تا 30 درصد) جانشین شده است (شکل 7-D).

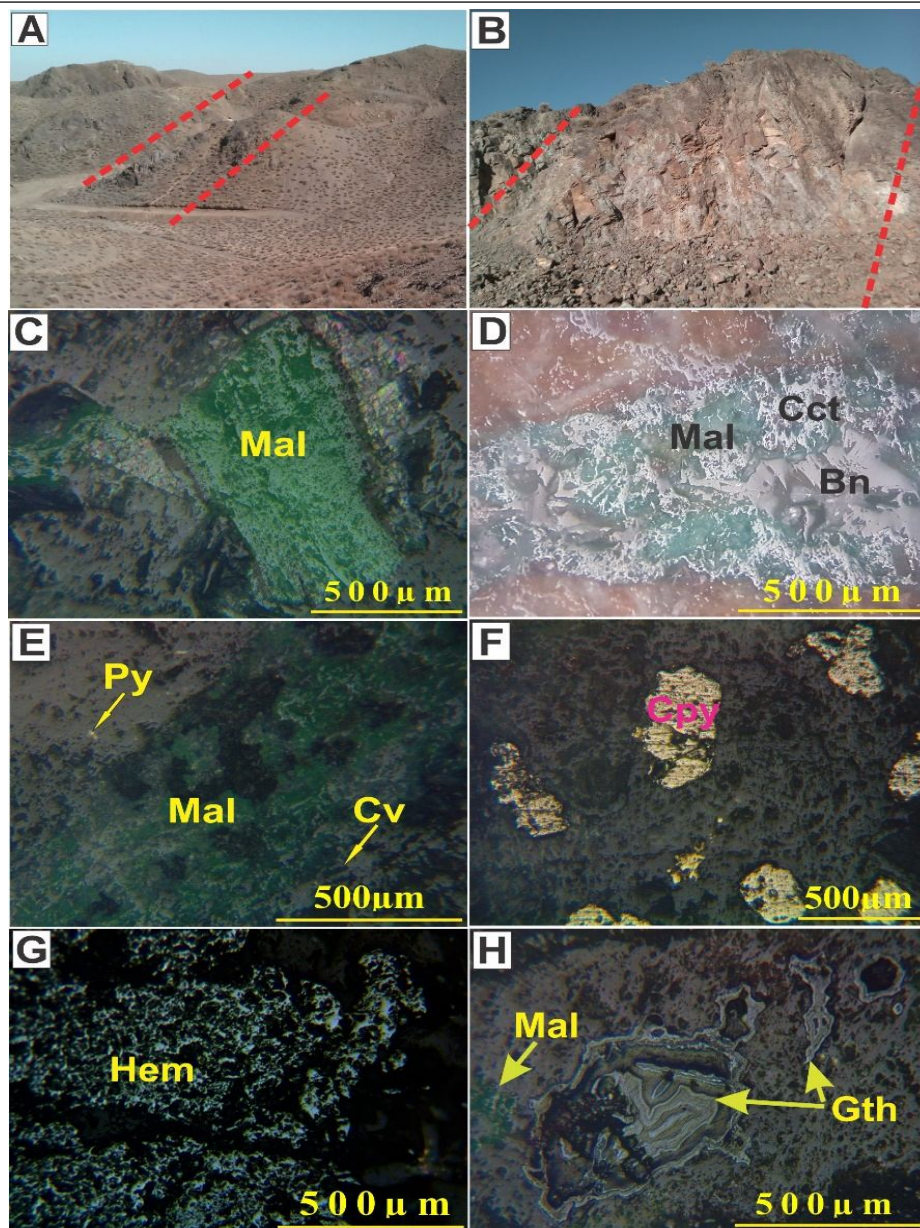
کانی‌های ثانویه شامل مالاکیت، کالکوسیت، کوولیت، آزوریت، هماتیت، لیمونیت و گوتیت است. این کانی‌ها در قالب بافت‌های رگچه‌ای، پراکنده و جانشینی ثانویه دیده می‌شوند. بافت رگچه‌ای و جانشینی فراوان‌ترین حالات کانی‌سازی در منطقه رباعی است. کانی مالاکیت با بافت رگچه‌ای (0 تا 1/5 سانتی‌متر) و جانشینی فراوان‌ترین کانی کربناتی مس در منطقه است که بخش وسیعی از منطقه را دربر گرفته است (شکل 7-C، D و E). گسترش جانبی اکسیدهای آهن در اطراف رگه‌های کانی‌سازی به 3 تا 4 متر می‌رسد. کالکوسیت و کوولیت در اثر تبدیل کالکوپیریت و به صورت جانشینی شکل گرفتند. میزان تبدیل کالکوپیریت به کالکوسیت 90 تا 100 درصد و کالکوسیت به کوولیت 30 تا 60 درصد است (شکل 7-D و E). کانی آزوریت به مقدار خیلی کم همراه با مالاکیت تشکیل شده است. هماتیت در قسمت‌های سوپرژن منطقه به صورت پراکنده و رگچه‌ای بر اثر هوازدگی کانی پیریت (80 تا 100 درصد) تشکیل شده است (شکل 7-G). گوتیت با بافت کلوفرمی در قسمت‌های سطحی بر اثر اکسیداسیون کانی‌های پیریت و کالکوپیریت تشکیل شده است (شکل 7-H).

توالی همیافتی کانسار مس رباعی به سه بخش زون هیوژن، زون اکسیده و زون سوپرژن تقسیم می‌شود. در مرحله هیوژن محلول کانهدار حاوی مس و آهن از طریق گسل‌ها و شکستگی‌ها در دایک‌های دیوریتی نفوذ کرده و در فضای خالی و شکستگی‌های ایجاد شده، موجب تشکیل کالکوپیریت، بورنیت و پیریت شده است. در مرحله اکسیدان، کانی‌سازی در سطح یا نزدیک سطح زمین تحت تأثیر فرایندهای هوازدگی و اکسیداسیون قرار گرفته و موجب تغییر و تبدیل کانی‌های اولیه به کانی‌های ثانویه سولفیدی مس کالکوسیت و کوولیت و همچنین کانی‌های کربناتی مس مالاکیت و آزوریت و کانی‌های اکسیدی و هیدروکسیدی مانند هماتیت، لیمونیت و گوتیت شده است (شکل 8). همچنین کانی‌های کوارتز و کلسیت کانی‌های باطله مراحل اولیه همراه کانی‌سازی هستند.



شکل 6. تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از دگرسانی واحدهای آتشفشانی و دایک‌های دیوریتی محدوده مس رباعی (تصاویر در XPL). A: مرز بین دگرسانی پروپیلیتیک و آرژیلیک (دید به سمت شمال)، B: دگرسانی سریسیتی در اطراف رگه‌های کانی‌سازی (دید به سمت شمال)، C: دگرسانی پروپیلیتیک با تبدیل بیوتیت و هورنبلند به کلریت در آندزیت‌ها، D: دگرسانی سریسیتی با تبدیل پلاژیوکلاز به سریسیت و کلسیت، E: دگرسانی سریسیتی با تبدیل پلاژیوکلاز به سریسیت، F: دگرسانی کربناتی شدن در داخل رگه‌ها و G: دگرسانی کربناتی با تبدیل پلاژیوکلاز، بیوتیت و هورنبلند به کربنات و کلریت. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و ایوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ser: سریسیت، Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Qtz: کوارتز).

Fig. 6. Field and microscopic image of alteration assemblages of volcanic rock and dioritic dykes from the Robaie copper area (XPL). A: Border between argillic and propylitic alterations (view to the north), B: sericitic alteration in around of mineralization vein (view to the north), C: propylitic alteration with convert of biotite and hornblende to chlorite in andesite, D: Sericitic alteration with covert of plagioclase to sericite and calcite, E: Sericitic alteration with convert of plagioclase to sericite, F: Carbonate alteration in veins, and G: Carbonate alteration with convert of plagioclase, biotite, and hornblende to carbonate and chlorite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Qtz: quartz, Chl: chlorite, Ser: sericite, Cal: Calcite).



شکل 7. تصویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی از کانی‌سازی‌های محدوده مس رباعی. A و B: رخنمون رگه‌های کانی‌سازی (دید به سمت شمال شرق)، C: کانی‌سازی مالاکیت در رگچه‌ها، D: جانشینی کالکوسیت و مالاکیت در حاشیه کانی بورنیت، E: تشکیل مالاکیت و کوولیت در رگچه‌ها، F: کانی‌سازی پراکنده کالکوپیریت در دایک دیوریتی، G: تشکیل کانی هماتیت بر اثر جانشینی پیریت و H: بافت کلوفرمی گوتیت که بر اثر هوازدگی پیریت تشکیل شد. علایم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و ایوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cpy: کالکوپیریت، Mal: مالاکیت، Cct: کالکوسیت، Cv: کوولیت، Bn: بورنیت، py: پیریت، Hem: هماتیت، Gth: گوتیت).

Fig. 7. Macroscopic and microscopic images of ore minerals from the Robaie copper area .A and B: Outcrops of veins mineralization (view to the northeast), C: Mineralization of malachite in veinlet, D: Substitution of malachite and chalcocite at the margin of the bornite mineral, E: Formation of malachite and covellite in veinlet, F: Scattered mineralization of chalcopyrite within dioritic dyke, G: Formation of hematite due to pyrite replacement, and H: Goethite cloformic texture formed by weathering of pyrite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cpy: chalcopyrite, Mal: Malachite, Cct: chalcocite, Cv: covellite, Bn: Bornite, Py: pyrite, Hem: hematite, Gth: goethite).

Minerals	Hypogene Stage	Oxidized zone	Supergene Stage
Chalcopyrite	—————		
Pyrite	-----		
Bornite		
Calcite	—————		
Quartz	—————		
Sericite	-----		
Chlorite	-----		
Clay mineral	-----		
Chalcocite		-----
Covellite			-----
Malachite		—————	
Azurite		
Goethite		
Hematite		-----	
Limonite		

شکل 8. توالی همیافتی کانی‌های محدوده مس رباعی

Fig. 8. Paragenetic sequence of mineral assemblages in the Robaie copper area

کمتر از 5 تا 7 گرم در تن، سرب از 9 تا 105 گرم در تن، روی از 59 تا 178 گرم در تن و آنتیموان از کمتر از 5 تا 23 گرم در تن متغیر است. به‌طور کلی مقدار عناصر نقره، سرب، روی، آرسنیک و آنتیموان در منطقه پایین است. از این 8 نمونه 4 نمونه برای تعیین مقدار عنصر طلا به روش آماده‌سازی Fire assay و اندازه‌گیری به روش ICP-MS انتخاب شدند که نتایج آن در جدول 1 ارائه شد. میزان طلا در منطقه خیلی پایین است که قابل اندازه‌گیری نبود (کوچک‌تر از میزان حد تشخیص دستگاه).

مطالعات سیالات درگیر

ریخت‌شناسی و نوع سیال درگیر

برای بررسی سیالات درگیر آزمایش‌های گرمایشی و سرمایشی بر روی سیالات درگیر اولیه موجود در رگچه‌های کلسیت-کالکوپیریت-پیریت انجام شد. بررسی‌های سنگ‌نگاری سیالات درگیر در کانی کلسیت مرتبط با کانی‌سازی نشان داد که اغلب سیالات از نوع اولیه و به مقدار کمی ثانویه هستند. شکل سیالات اولیه به صورت میله‌ای، کشیده، دایره‌ای، بیضوی و بی‌شکل بوده

زمین‌شیمی اکتشافی

نتایج تجزیه زمین‌شیمیایی محدوده اکتشافی مس رباعی در جدول 1 ارائه شده است. از میان 35 عنصر که تجزیه شدند، فقط 7 عنصر Zn و Au, Ag, As, Sb, Cu, Pb مورد بررسی قرار گرفتند. این عناصر همراه با دگرسانی کربناتی در داخل رگه‌های کانی‌سازی در میزبان دیوریت پورفیری قرار دارند. مقدار مس از 0/3 تا 1/3 درصد متغیر است. بیشترین میزان مس مربوط به نمونه C.V.C.H12 بوده که حدود 1/3 درصد است که این میزان مس اغلب مربوط به کانی مالاکیت است که قسمت‌های وسیعی از رگه‌های کانی‌سازی منطقه را تشکیل داده است. همچنین مقدار مس در مغزه‌های حفاری از 0/09 تا 5/57 درصد متغیر است. به‌طور کلی میانگین عیار مس در محدوده اکتشافی مس رباعی 0/8 درصد است. میزان نقره از کمتر از 1 تا 7 گرم در تن، آرسنیک کمتر از 2 تا 3 گرم در تن، سرب از 8 تا 149 گرم در تن، روی از 55 تا 142 گرم در تن و آنتیموان از کمتر از 1 تا 1 گرم در تن متغیر است (جدول 1). در مغزه‌های حفاری میزان نقره از کمتر از 1 تا 25 گرم در تن، آرسنیک

(B). اثری از نمک‌هایی چون هالیت، سیلویت و ... در سیالات درگیر دیده‌نشده که این موضوع نشان می‌دهد که میزان شوری سیال‌های کانه‌ساز در منطقه کم است. همچنین شواهدی از جوشش مشاهده‌نشده. در کل، مقدار سیال‌های درگیر تک‌فازی مایع (L) از بقیه انواع سیال‌ها در منطقه خیلی بیشتر است.

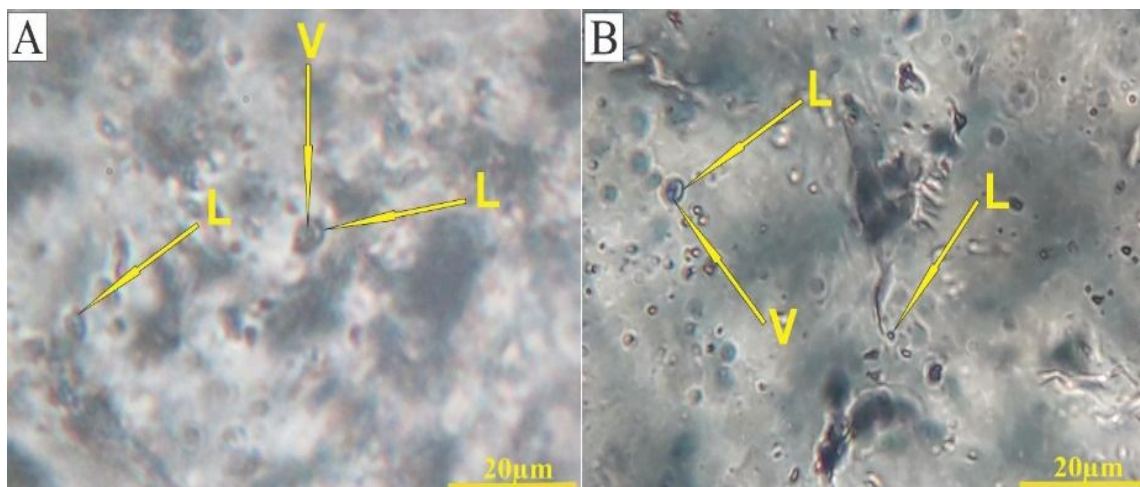
و در اندازه‌های کمتر از 5 تا 8 میکرون حضور دارند (شکل 9-). (A و B). بررسی‌های سنگ‌نگاری سیالات درگیر بر روی کانی کلسیت نشان‌داد که دو نوع سیالات درگیر که شامل دو فاز مایع (نوع L+V) با مقدار مایع 90 تا 95 درصد و بخار 5 تا 10 درصد و تک‌فازی مایع (L) حضور دارند (شکل 9-A و

جدول 1. نتایج آنالیز ژئوشیمیایی محدوده مس رباعی (ppm)

Table 1. Geochemical analyses data of the Robaie copper area (ppm)

No.	C.V.C.H2	C.V.C.H4	C.V.C.H6	C.V.C.H7	C.V.C.H9	C.V.C.H10	C.V.C.H12	C.V.C.H13
Long.	54°28'48"	54°28'55"	54°28'53"	54°28'58"	54°29'02"	54°29'04"	54°29'03"	54°29'05"
Lat.	35°22'52"	35°22'54"	35°22'55"	35°22'57"	35°22'57"	35°22'56"	35°22'59"	35°23'02"
Cu	6783	8035	3388	11238	3316	4857	13085	7262
Pb	11	12	14	39	14	11	8	149
Zn	121	58	63	69	142	84	58	55
Ag	3.8	1.5	0.64	7.2	0.49	0.58	0.63	1.9
As	1.9	2.4	2	2.1	2	2.9	2.8	2.4
Sb	1.01	0.81	0.96	1.02	0.94	1.07	0.9	0.84
Au	< DL	< DL		< DL				< DL

<DL= Smaller than the detection limit



شکل 9. A و B: تصاویر میکروسکوپی و فازهای سیالات درگیر محدوده مس رباعی

Fig. 9. A and B Microscopic images and phases of fluid inclusions in the Robaie copper area

ریزدماسنجی سیالات درگیر

در طی این پژوهش، دمای همگن‌شدگی (T_h) در 60 عدد و نقطه ذوب (T_m) در 25 عدد سیال برای تعیین شوری اندازه‌گیری شد (جدول 2). دمای همگن‌شدن (T_h) سیالات درگیر اولیه بین 165 تا 300 درجه سانتی‌گراد با میانگین دمای 219 درجه سانتی‌گراد است (جدول 2 و شکل A-10). این دما بیانگر حداقل دمای تشکیل کانی است. نخستین دمای ذوب‌شدگی (T_{fm}) در سیالات درگیر بین 53- تا 54- درجه سانتی‌گراد (میانگین 53/08- درجه سانتی‌گراد) متغیر است (جدول 2 و شکل B-10). نخستین دمای ذوب‌شدگی رابطه‌ای مستقیم با ترکیب نمک موجود در گرماب‌ها دارد (Siemens,)

(2003). مقدار T_{fm} به دست آمده، بیان‌کننده آن است که سامانه سیال از نوع $\text{H}_2\text{O}-\text{CaCl}_2-\text{NaCl}$ بوده است. در مواردی که T_{fm} اندازه‌گیری شده پایین‌تر از 55- درجه سانتی‌گراد است، احتمالاً نمک‌های دیگری از قبیل Mg و K در سیستم حضور دارد (Siemens, 2003). دمای نهایی ذوب (T_m) نیز مقدار شوری را مشخص می‌کند. مقدار T_m بین 8/4- تا 11/7- درجه سانتی‌گراد با میانگین 88/8- درجه سانتی‌گراد متغیر است (جدول 2 و شکل C-10). شوری سیالات درگیر بین 7 تا 16 درصد وزنی NaCl (میانگین 12 درصد وزنی NaCl) متغیر است (جدول 2 و شکل D-10).

جدول 2. داده‌های دماسنجی سیالات درگیر اولیه در کانی کلسیت محدوده مس رباعی

Table 2. Microthermometric data of primary fluid inclusions within calcite of the Robaie copper area

Sample No.	Number	T_h (°C)	T_{mice} (°C)	T_{fm} (°C)	Salinity (NaCl wt.% equiv.)
8	11	190-300	-	-	-
18	15	200-230	-	-	-
17	17	165-237	-5 to -10	-52.9 to -53.2	7-14
21	17	204-239	-10 to -12	-53 to -53.6	14-16

زمین‌شیمی دایک‌های دیوریت پورفیری

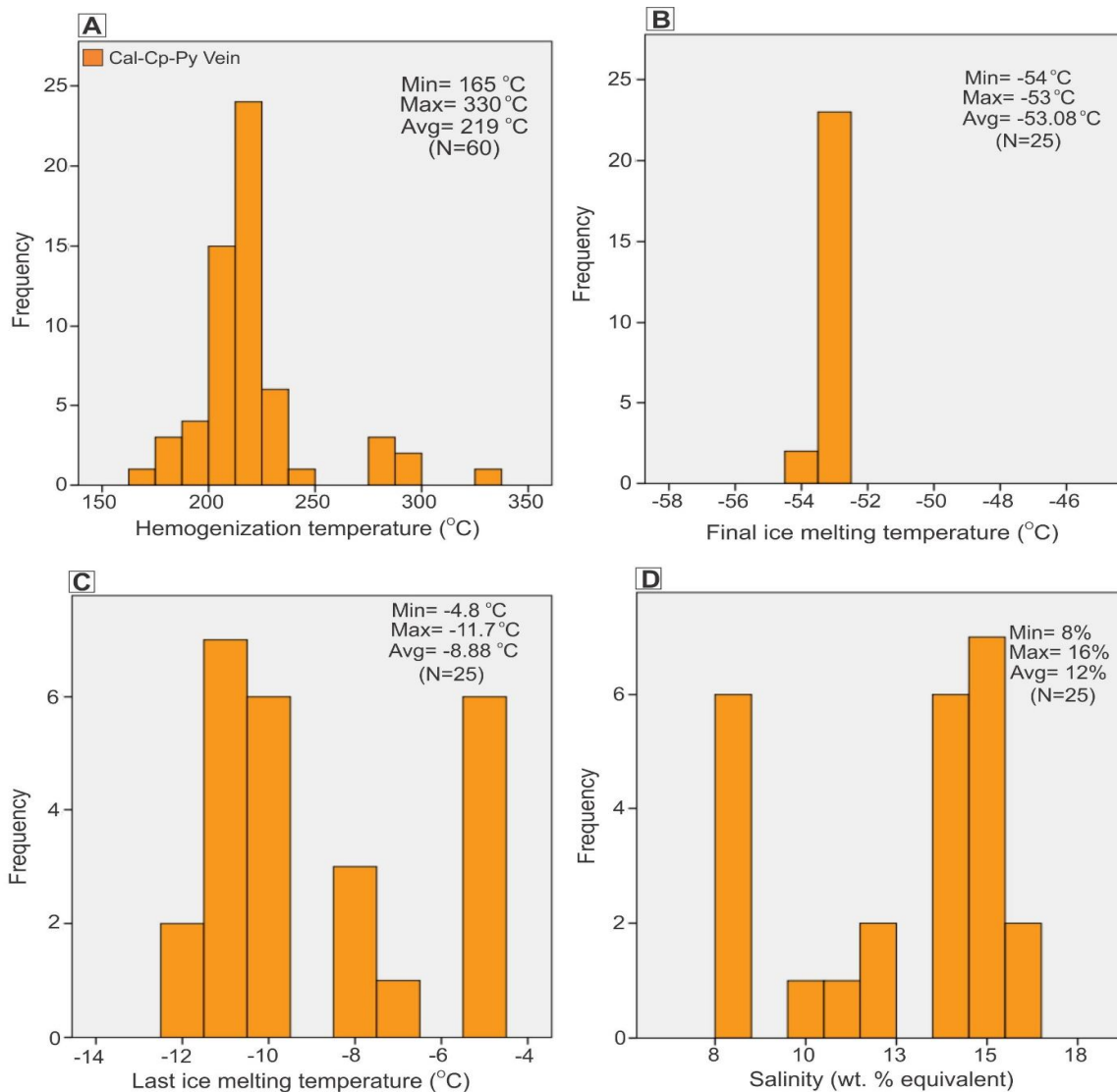
با توجه به اینکه دایک‌های دیوریتی خیلی دگرسان شده‌اند (میزان مواد فرار (L.O.I) بین 2/6 تا 4/32 درصد)، فقط سه نمونه برای آنالیز انتخاب شدند. لذا در این بخش فقط زمین‌شیمی عناصر فرعی و نادر خاکی که کمتر تحت‌تأثیر دگرسانی قرار گرفته‌اند، توضیح داده می‌شود (جدول 3).

عناصر نادر خاکی¹ نسبت به سایر عناصر کمتر تحت‌تأثیر هوازدگی و دگرسانی قرار می‌گیرند. از این رو، الگوی فراوانی آنها می‌تواند خاستگاه آذرین سنگ‌ها را نشان دهد (Boynton, 1984; Rollinson, 1993). شکل A-11، نمودار عنکبوتی عناصر جزئی و نادر خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت (Boynton, 1985) و همچنین شکل B-11، نمودار عنکبوتی عناصر جزئی و نادر خاکی بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه

(Sun and McDonough, 1989) دایک‌های دیوریتی محدوده اکتشافی مس رباعی را نشان می‌دهد. در نمودار عناصر نادر خاکی برای دایک‌های دیوریتی بهنجار شده نسبت به کندریت (Boynton, 1985)، عناصر نادر خاکی سبک در برابر عناصر نادر خاکی سنگین غنی‌شدگی بیشتری نشان می‌دهند. همچنین، HREE یک روند کم و بیش هموار دارند (شکل A-11). این روند غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی سبک در برابر عناصر نادر خاکی سنگین نشان‌دهنده ماگماهای پهنه فرورانش است (Wilson, 1989; Gill, 1981; Asiabanha, 2012, Etemadi et al., 2018). مقدار نسبت Eu/Eu^* در دایک‌های دیوریتی محدوده اکتشافی مس رباعی بین 0/84 تا 0/98 متغیر است. وجود ناهنجاری‌های منفی جزئی

نشان‌دهنده عمق و میزان ذوب سنگ مادر است. این نسبت در دایک‌های دیوریتی برابر با 7 تا 12 است. این مقدار گویای این است که ماگما از قسمت‌های بالایی گوشته منشأ گرفته و از قسمت پایبداری گارنت دور بوده است (Cotton et al., 1995).

در Eu نشان‌دهنده حضور کم پلاژیوکلاز در منشأ ماگما و شرایط اکسیدان‌تر محلول (آلودگی کمتر با پوسته قاره‌ای) است (Tepper et al., 1993). نسبت $(La/Yb)_N$ در دایک‌های دیوریتی منطقه بین 11-17 متغیر بوده (جدول 3) که این مقدار کم در تمامی نمونه‌ها همراه الگوی عناصر REE ناشی از کم‌بودن گارنت در منشأ ماگماست. نسبت $(Ce/Yb)_N$



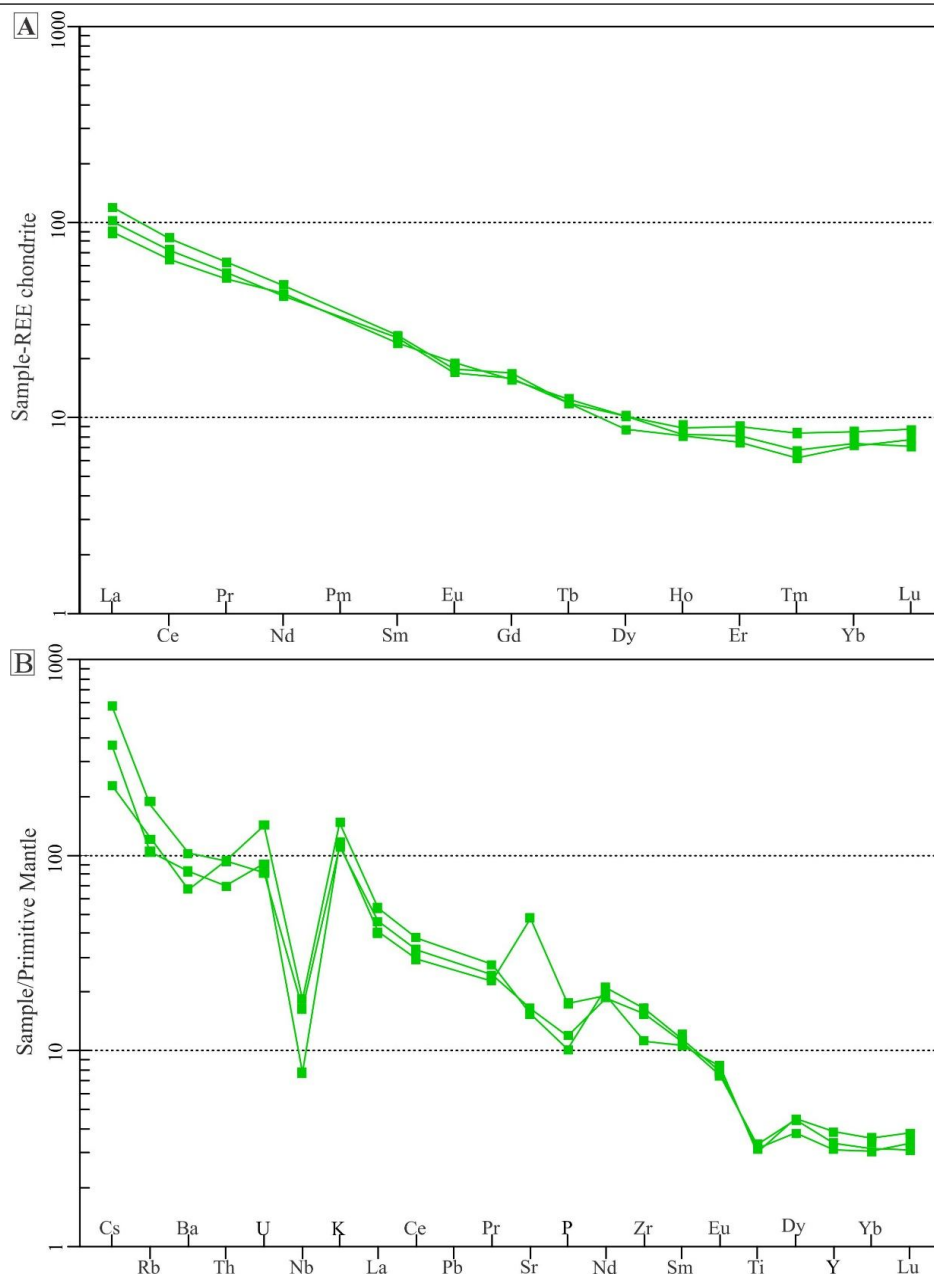
شکل 10. نمودارهای نشان‌دهنده داده‌های ترمودینامیک سیالات درگیر در محدوده مس رباعی. A: نمودار دمای همگن‌شدن، B: نمودار نخستین دمای ذوب شدگی، C: دمای نهایی ذوب و D: نمودار شوری

Fig. 10. Histogram showing the thermodynamic data of primary fluid inclusions in the Robaie copper area. A: Homogenization temperature histogram, B: First melting temperature histogram, C: Last ice melting temperature, and D: Salinity (wt.% NaCl equivalent) histogram

جدول 3. تجزیه عناصر فرعی و خاکی نادر دایک‌های دیوریتی محدوده مس رباعی بر حسب ppm

Table 3. Trace and rare earth element (ppm) analysis of dioritic dykes in the Robaie copper area

No.	22	24	C17
Long.	54°29'01"	54°29'04"	54°28'52"
Lat.	35°22'56"	35°22'56"	35°22'58"
Ba	712	469	578
Be	1	1	2
Co	17.8	21.4	17.1
Cs	4.6	1.8	2.9
Ga	15.2	15	16.2
Hf	4.5	4.5	3.3
Nb	13.1	11.7	5.5
Rb	115.9	77.8	66.2
Sn	1	1	1
Sr	323.1	347.5	1007
Ta	0.9	0.8	0.4
Th	7.9	8	5.9
U	3	1.7	1.9
V	89	82	180
W	0.9	0.5	0.6
Zr	183.5	171.6	125.8
Y	14.2	15.3	17.5
La	36.9	31.5	27.8
Ce	67.1	58.4	52.3
Pr	7.6	6.71	6.27
Nd	28.6	25.2	25.9
Sm	5.14	4.9	4.7
Eu	1.31	1.25	1.4
Gd	4.35	4.1	4.06
Tb	0.56	0.56	0.59
Dy	2.79	3.26	3.3
Ho	0.58	0.59	0.64
Er	1.56	1.7	1.88
Tm	0.2	0.22	0.27
Yb	1.5	1.55	1.77
Lu	0.25	0.23	0.28
(La/Yb)_N	16.59	13.7	10.59
(Ce/Yb)_N	11.57	9.75	7.64
Eu/Eu*	0.85	0.84	0.98



شکل 11. A: نمودار عناصر نادر خاکی بهنجارشده نسبت به کندریت (Boynton, 1985) و B: نمودار عناصر کمیاب بهنجارشده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) دایک‌های دیوریتی محدوده مس رباعی

Fig. 11. A: Chondrite-normalized rare earth elements diagram (Boynton, 1985), and B: Primitive Mantle-normalized trace elements diagram (Sun and McDonough, 1989) dioritic dykes in Robaie copper area

با شدت میدان بالا مانند Nb و Ti برای دایک‌های دیوریتی با ترکیب حدواسط دیده می‌شود (شکل B-11). این تغییرات در مقادیر عناصر نادر خاکی سبک و سنگین از ویژگی‌های

در نمودار نرمالیزه‌شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) غنی‌شدگی در عناصر لیتوفیل بزرگ یون (مانند Cs، K، Rb و Ba) و تهی‌شدگی در عناصر

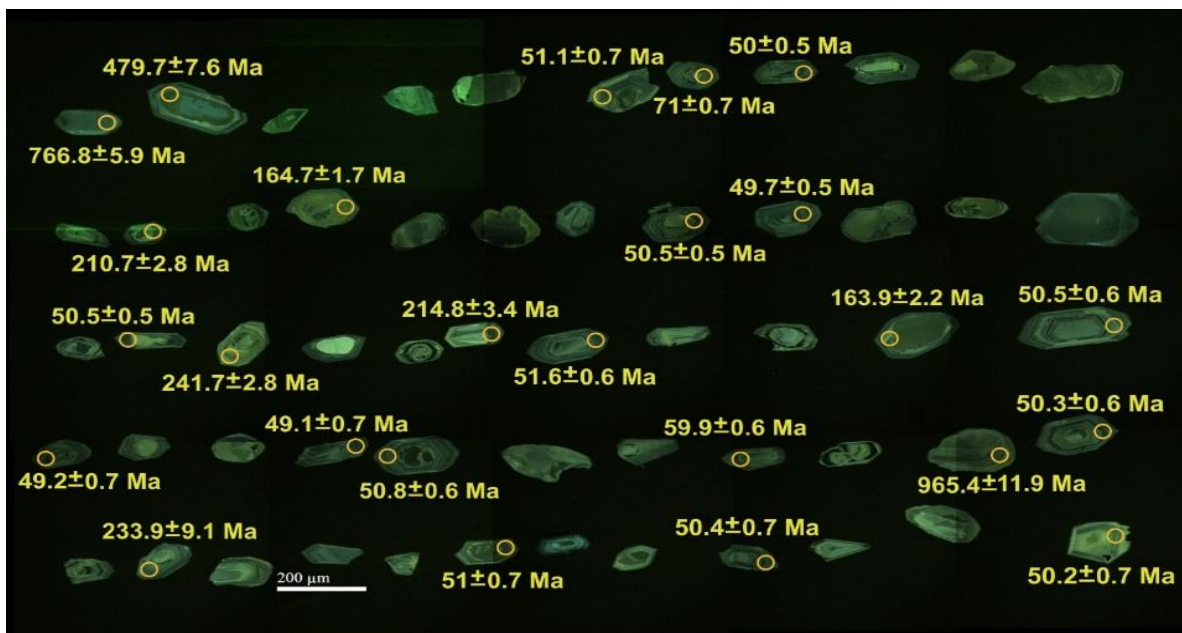
شکستگی، اینکلوژن و هسته وراثتی جدا شد و از این تعداد 25 نمونه مورد تجزیه قرار گرفت (جدول 4). در تصویر کاتدولومینسانس بلورهای زیرکن سفید تا بی‌رنگ، شکل‌دار تا بی‌شکل، بعضی‌ها دارای منطقه‌بندی و در اندازه‌های کوچک تا متوسط (250 تا 250 میکرون) هستند. تعیین منشأ دانه‌های زیرکن از لحاظ آذرین، دگرگونی یا گرمایی و مشخص کردن ساختارها و منطقه‌بندی در دانه‌های زیرکن که با تصویرهای کاتدولومینسانس فراهم می‌شود، به تفسیر بهتر داده‌های حاصل از سن‌سنجی U-Pb بر روی زیرکن‌ها، کمک می‌کند (Katongo et al., 2004).

نمودار کونکوردیا و بهترین سن به دست از داده‌های U-Pb در شکل 13-A و B نشان داده شد. بر اساس تجزیه 25 نقطه و حذف اعداد بزرگ‌تر، میانگین سن به دست آمده با خطای 2 سیکما برابر با $50/49 \pm 0/49$ میلیون سال مربوط به اشکوب ایزوپزین (اوسن زیرین) است.

شاخص ماگماهای در ارتباط با زون فرورانش است (Wilson, 1989). بی‌هنجاری منفی P, Ti, Nb به جدایش آپاتیت، تیتانومگنتیت، روتیل، ایلمنیت و پرووسکیت (Reagan and Gill, 1989) و آغستگی ماگما با مواد پوسته‌ای (Zhou et al., 2009) (et al., 2009) حسین صعود و جایگزینی آن در مناطق فرورانش مربوط است (Kaygusuz and Aydınçakır, 2009; Lin et al., 2012; Mirnejad et al., 2013).

تعیین سن به روش U-Pb بر روی کانی زیرکن

پس از انجام بررسی‌های دقیق پتروگرافی و پترولوژیکی، نمونه‌ای از واحد بیوتیت-هورنبلند دیوریت پورفیری (C.V.C.H) به علت ارتباط با کانی‌سازی که ممکن بود منشأ یا بخشی از منشأ باشد، برای سن‌سنجی به روش U-Pb انتخاب شد و به روش LA-ICP-MS مورد تجزیه قرار گرفت. نتایج تجزیه U-Th-Pb در جدول 4 و همچنین تصویر کاتدولومینسانس از زیرکن‌ها در شکل 12 نشان داده شد. برای انجام تجزیه سن‌سنجی 100 زیرکن با ویژگی‌های مثل شکل‌دار بودن، نبود



شکل 12. تصویر کاتدولومینسانس از ویژگی‌های زیرکن‌ها در نمونه بیوتیت-هورنبلند دیوریت پورفیری (C.V.C.H) محدوده مس رباعی

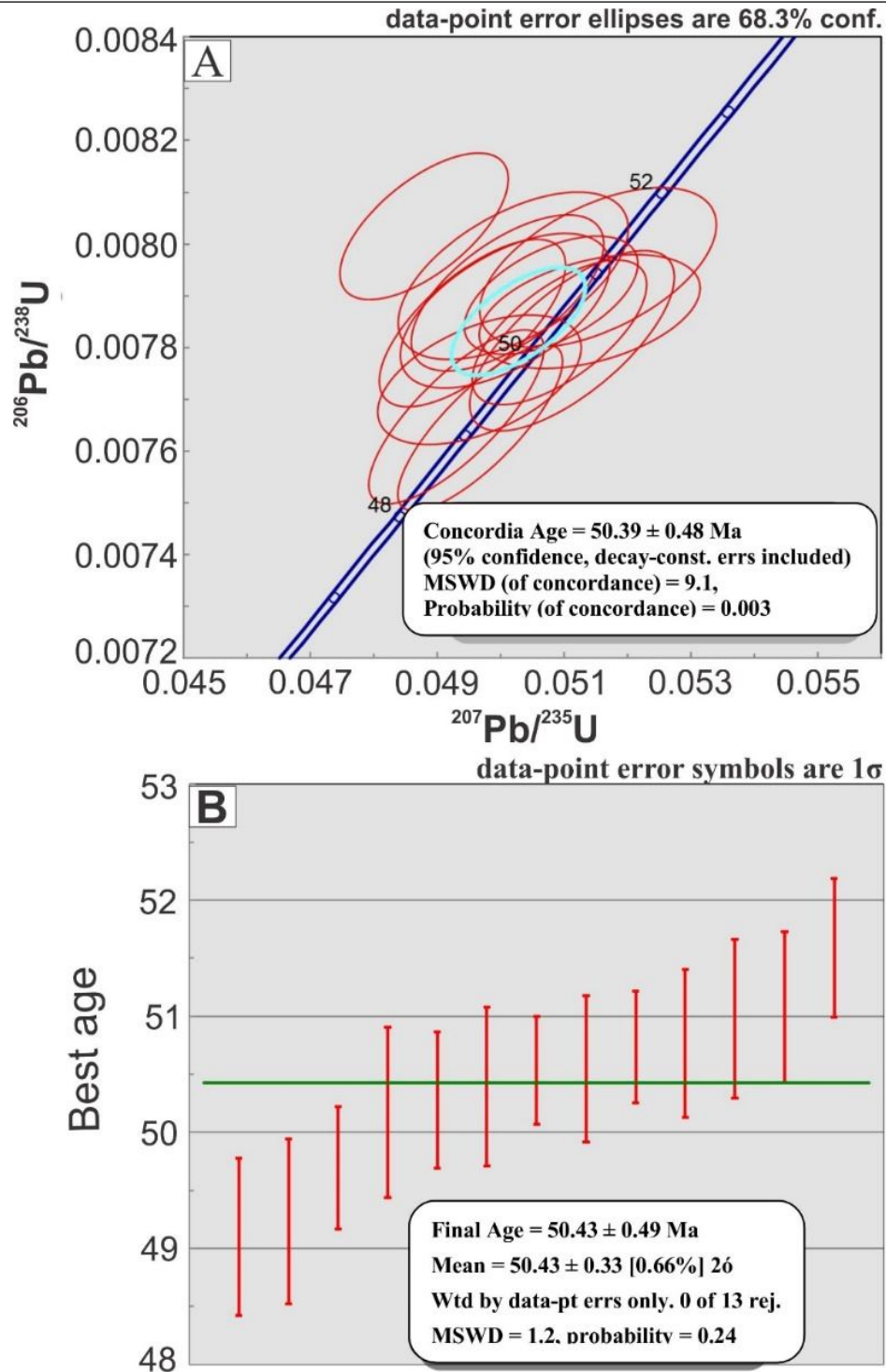
Fig. 12. Cathodoluminescence image of zircon characteristics from biotite-hornblende diorite porphyry (C.V.C.H) in the Robaie copper area

جدول 4. نتایج آنالیز سن‌سنجی داده‌های U-Pb بر روی زیرکن‌های بیوتیت-هورنبلند دیوریت پورفیری محدوده مس رباعی
Table 4. U- Pb dating results of zircons from biotite-hornblende diorite porphyry of Robaie copper area

Analysis	U (ppm)	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	U/Th	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ Ratio	\pm (%)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ Ratio	\pm (%)
C-1	564	78284	2.5	21.2108	1.0	0.0497	1.7
C-2	825	45289	0.9	21.4315	1.2	0.0493	1.8
C-3	379	145791	2.5	21.4727	1.8	0.0497	2.1
C-4	427	29076	2.7	21.0626	1.5	0.0511	2.1
C-5	532	18219	4.7	21.1888	1.3	0.0509	1.8
C-6	735	73392	2.3	21.8252	1.4	0.0496	2.0
C-7	229	13404	4.3	21.1000	2.0	0.0514	2.2
C-8	400	17813	2.0	21.6664	1.8	0.0501	2.2
C-9	623	15399	1.7	21.4384	1.5	0.0508	1.8
C-10	382	14243	4.8	21.7441	1.6	0.0501	2.0
C-11	334	12925	1.8	21.7962	2.0	0.0502	2.4
C-12	328	17305	2.1	21.2730	2.0	0.0515	2.4
C-13	567	8968	2.2	22.6936	1.4	0.0488	1.8
C-14	360	695796	2.1	21.0966	1.4	0.0610	1.7
C-15	460	64944	2.2	20.3359	1.1	0.0751	1.5
C-16	399	85926	7.8	19.9022	0.8	0.1783	1.6
C-17	368	15940	21.6	20.1807	0.9	0.1767	1.4
C-18	692	72792	22.5	18.4230	1.0	0.2485	1.7
C-19	316	127790	12.1	19.1584	1.0	0.2438	1.9
C-20	257	67576	3.4	17.6332	2.3	0.2888	4.6
C-21	371	77833	12.3	18.8190	0.9	0.2798	1.5
C-22	481	236624	7.7	16.8945	0.8	0.6302	1.9
C-23	52	15357	1.5	15.4602	1.3	1.1260	1.5
C-24	239	121032	1.6	14.0238	0.6	1.5770	1.0

ادامه جدول 4. نتایج آنالیز سن‌سنجی داده‌های U-Pb بر روی زیرکن‌های بیوتیت-هورنبلند دیوریت پورفیری محدوده مس رباعی
Table 4 (Continued). U- Pb dating results of zircons from biotite-hornblende diorite porphyry of Robaie copper area

Analysis	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Ratio	\pm (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Ratio	\pm (Ma)	Best age (Ma)	\pm (Ma)
C-1	0.0076	1.4	49.1	0.7	49.1	0.7
C-2	0.0077	1.4	49.2	0.7	49.2	0.7
C-3	0.0077	1.1	49.7	0.5	49.7	0.5
C-4	0.0078	1.5	50.2	0.7	50.2	0.7
C-5	0.0078	1.2	50.3	0.6	50.3	0.6
C-6	0.0078	1.4	50.4	0.7	50.4	0.7
C-7	0.0079	0.9	50.5	0.5	50.5	0.5
C-8	0.0079	1.3	50.5	0.6	50.5	0.6
C-9	0.0079	1.0	50.7	0.5	50.7	0.5
C-10	0.0079	1.3	50.8	0.6	50.8	0.6
C-11	0.0079	1.3	51.0	0.7	51.0	0.7
C-12	0.0080	1.3	51.1	0.7	51.1	0.7
C-13	0.0080	1.2	51.6	0.6	51.6	0.6
C-14	0.0093	1.1	59.9	0.6	59.9	0.6
C-15	0.0111	1.0	71.0	0.7	71.0	0.7
C-16	0.0258	1.4	163.9	2.2	163.9	2.2
C-17	0.0259	1.0	164.7	1.7	164.7	1.7
C-18	0.0332	1.4	210.7	2.8	210.7	2.8
C-19	0.0339	1.6	214.8	3.4	214.8	3.4
C-20	0.0369	4.0	233.9	9.1	233.9	9.1
C-21	0.0382	1.2	241.7	2.8	241.7	2.8
C-22	0.0773	1.7	479.7	7.6	479.7	7.6
C-23	0.1263	0.8	766.8	5.9	766.8	5.9
C-24	0.1605	0.9	959.3	7.6	965.4	11.9



شکل 13. داده‌های U-Pb بر روی زیرکن‌های واحد بیوتیت-هورنبلند دیوریت پورفیری (نمونه C.V.C.H) در محدوده مس رباعی. A: نمودار کونکورديا و B: نمودار بهترین سن به دست آمده از داده‌های زیرکن

Fig. 13. Zircon U-Pb dating from the biotite-hornblende diorite porphyry (dyke) unit (sample C.V.C.H) in the Robaie copper area. A: Concordia diagram, and B: Best age plot diagram obtained from zircon dating

ایزوتوپ‌های Rb-Sr و Sm-Nd

دایک‌های دیوریتی (بیوتیت-هورنبلند دیوریت پورفیری) در جدول 5 ارائه شده است.

نتایج تجزیه ایزوتوپ‌های رادیوژنیک Rb-Sr و Sm-Nd

جدول 5. داده‌های ایزوتوپ‌های Rb-Sr و Sm-Nd دایک دیوریتی محدوده مس رباعی (خطای 2 سیکما)

Table 5. Rb-Sr and Sm-Nd isotopic data from dioritic dyke in the Robaie copper area. Errors are in 2σ

Sample	Sr ppm	Rb ppm	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr initial	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	Erro (2s)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr initial	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr Measured	Erro (2s)
Diorite porphyry	323	116	0.967	1.04	0.029	0.7057	0.7064	0.000023
Sample	Sm ppm	Nd ppm	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	Erro (2s)	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd Measured	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd initial	Erro (2s)	εNdi
Diorite porphyry	5.1	28.6	0.109	0.006	0.51252	0.512486	0.000016	-1.7

پورفیری منشأ فرورانش با آرایش پوسته قاره‌ای را نشان می‌دهد. افزایش مقدار ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr اولیه از 0/705 و کاهش εNdi به کمتر از صفر برای توده بیوتیت-هورنبلند دیوریت پورفیری، به آلودگی ماگما با پوسته هنگام بالا آمدن مربوط است. همچنین، ایزوتوپ‌های Sr ممکن است به وسیله فرایندهایی مانند دگرسانی (Menzies et al., 1993; Arjmandzadeh et al., 2013) و واکنش سیال‌های پوسته‌ای با ماگماهای مشتق‌شده از گوشته (Nabatian et al., 2014) تحت تأثیر قرار گرفته و موجب قرار گرفتن نمونه‌ها در سمت راست (خارج از) محدوده گوشته شود. مقدار ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr اولیه زیر 0/708 و همچنین حضور کانی‌های بیوتیت، هورنبلند و مگنتیت از ویژگی‌های گرانیتوئیدهای گروه I (مگنتیت) است (Chappell and White, 2001). کانی‌شناسی و زمین‌شیمی دایک‌های دیوریتی و مقدار Rb/Sr < 1 نیز نشان‌دهنده ماهیت گرانیتوئیدهای گروه I پدیدآمده در پهنه فرورانش است. نسبت‌های ایزوتوپی εNdi منفی نشان‌دهنده ویژگی‌های مذاب پوسته‌ای و εNdi مثبت نشان‌دهنده ویژگی‌های مذاب گوشته‌ای است (Kemp et al., 2007; Yang et al., 2007; Li et al., 2011). برای تعیین موقعیت زمین‌ساختی دایک‌های دیوریتی محدوده اکتشافی مس رباعی از نمودار Rb در برابر Ta+Yb و

⁸⁷Sr/⁸⁶Sr و ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd اولیه نمونه‌ها برای سن 50 میلیون سال که از داده‌های U-Pb زیرکن در بخش قبل به دست آمده، محاسبه شدند. مقدار ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr و ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd اولیه برای نمونه دایک دیوریتی (بیوتیت-هورنبلند دیوریت پورفیری) به ترتیب برابر با 0/705664 و 0/518426 است. میزان ایزوتوپ‌های اولیه εNdi در نمونه یادشده برابر با -1/7 است (جدول 5). در نمودار εNdi در برابر ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr اولیه (شکل 14)، نمونه بیوتیت-هورنبلند دیوریت پورفیری در سمت راست محدوده گوشته و در منطقه پوسته قاره‌ای قرار گرفته است. خاستگاه ماگما از گوه گوشته‌ای جای گرفته روی صفحه فرورانه شده است.

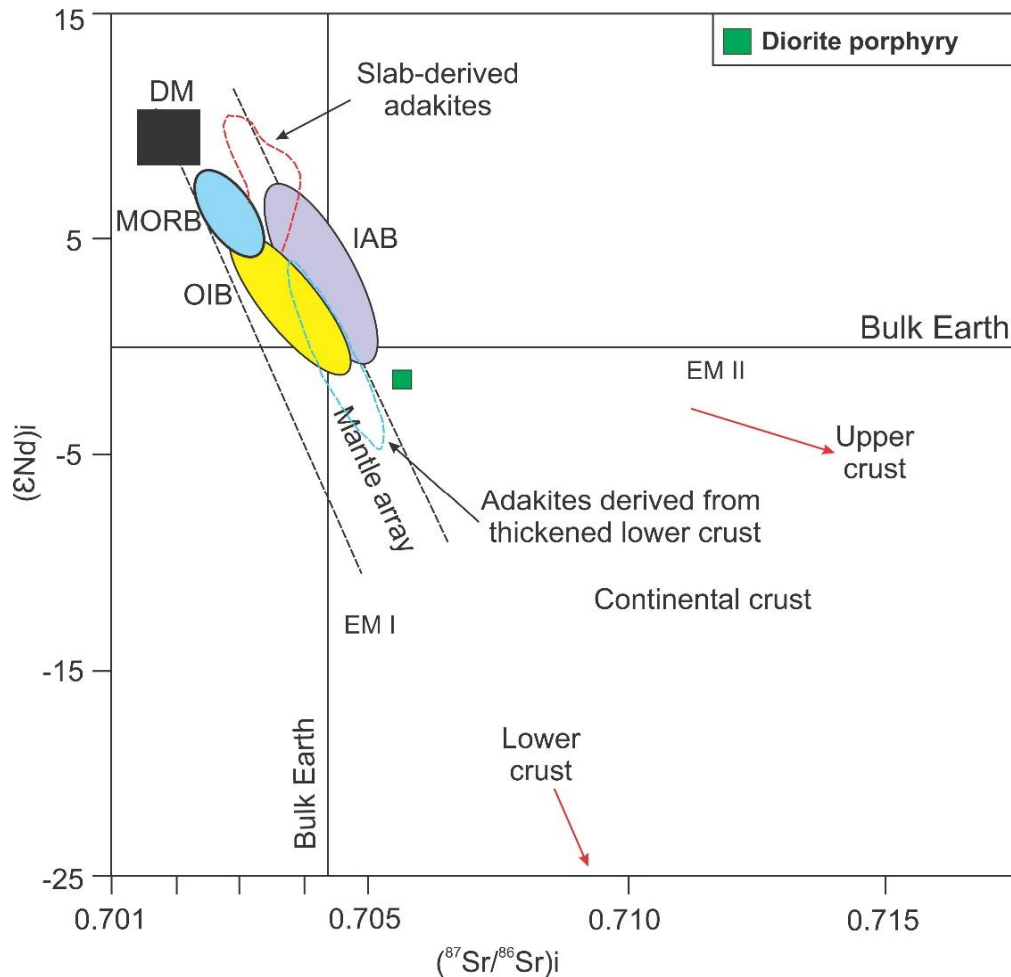
بحث

منشأ ماگما و پتروژنز دایک‌های دیوریت پورفیری

بر اساس بررسی‌های سن‌سنجی، زمین‌شیمی و داده‌های ایزوتوپ‌های Sr-Nd فعالیت‌های ماگمایی برای دایک‌های دیوریتی محدوده اکتشافی مس رباعی نشان می‌دهند که این دایک‌ها از گوشته غنی شده منشأ گرفتند. مقدار ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr (0/705664)، ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd (0/518426) اولیه و میزان ایزوتوپ‌های اولیه εNdi (-1/7) بیوتیت-هورنبلند دیوریت

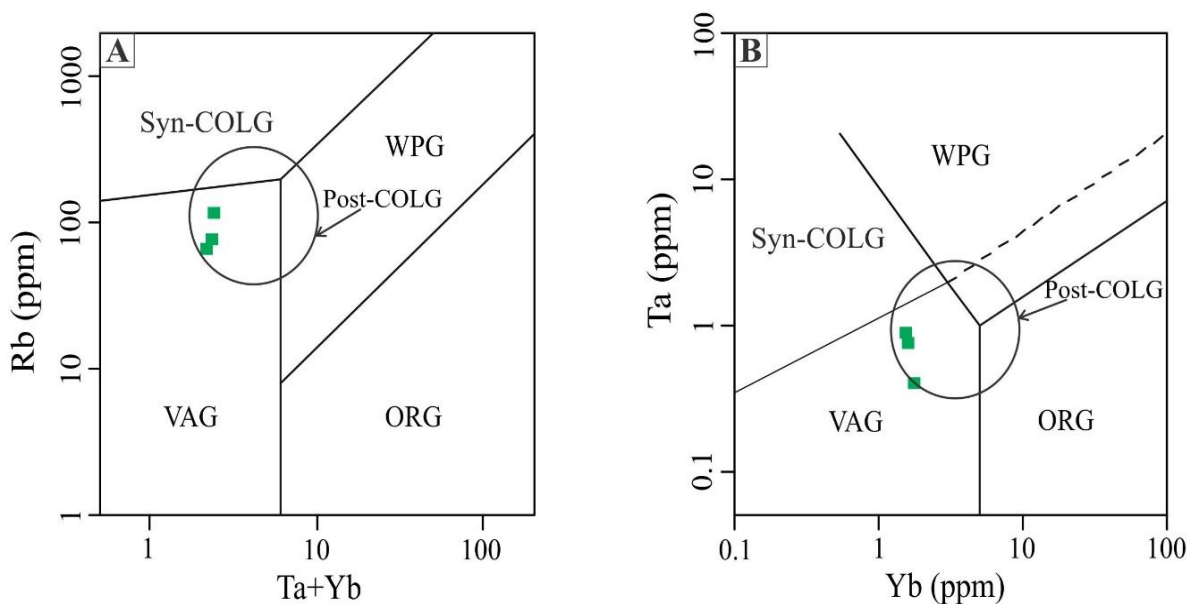
ویژگی‌های متاآلومینوس و گروه I (مگنتیت) دایک‌های دیوریتی منطقه مطابقت دارد.

Ta در برابر Yb (Pearce et al, 1984) استفاده شد. این توده‌ها در محدوده گرانیتوئیدهای کمان آتشفشانی و موقعیت پس از برخورد قرار گرفتند (شکل 15-A و B). که با



شکل 14. نمودار $\epsilon\text{Nd}(i)$ در برابر $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه در برابر $\epsilon\text{Nd}(i)$ دایک دیوریتی محدوده اکتشافی مس رباعی. منابع: آداکیت‌های مشتق شده از ذوب صفحه فرورونده، (Defant et al., 1992; Kay and Kay, 1993; Sajona et al., 2000; Aguillón-Robles et al., 2001); آداکیت‌های مشتق شده از پوسته ضخیم زیرین، (Atherton and Petford, 1993; Muir et al., 1995; Petford and Atherton, 1996). MORB: بازالت‌های پشته‌های میان اقیانوسی، DM: گوشته تهی شده، OIB: بازالت‌های جزایر اقیانوسی، IAB: بازالت‌های جزایر کمانی (Zindler and Hart, 1986). EMI و EMII: به ترتیب نشان‌دهنده دو نوع از اعضای پایانی گوشته (Hou et al., 2011). نسبت‌های اولیه برای 50 میلیون سال محاسبه شده است.

Fig. 14. $\epsilon\text{Nd}(i)$ vs. initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values diagram dioritic dyke in the Robaie area. The field of adakites related to slab melting is defined after (Defant et al., 1992; Kay and Kay, 1993; Sajona et al., 2000; Aguillón-Robles et al., 2001); The data for underplated thick lower crust adakites are after (Atherton and Petford, 1993; Muir et al., 1995; Petford and Atherton, 1996). MORB: mid-ocean ridge basalts; DM: depleted mantle; OIB: ocean-island basalts; IAB: island-arc basalts after (Zindler and Hart, 1986); EMI and EMII represent two types of mantle end-members, respectively (Hou et al., 2011). Initial ratios calculated for 50 Ma.



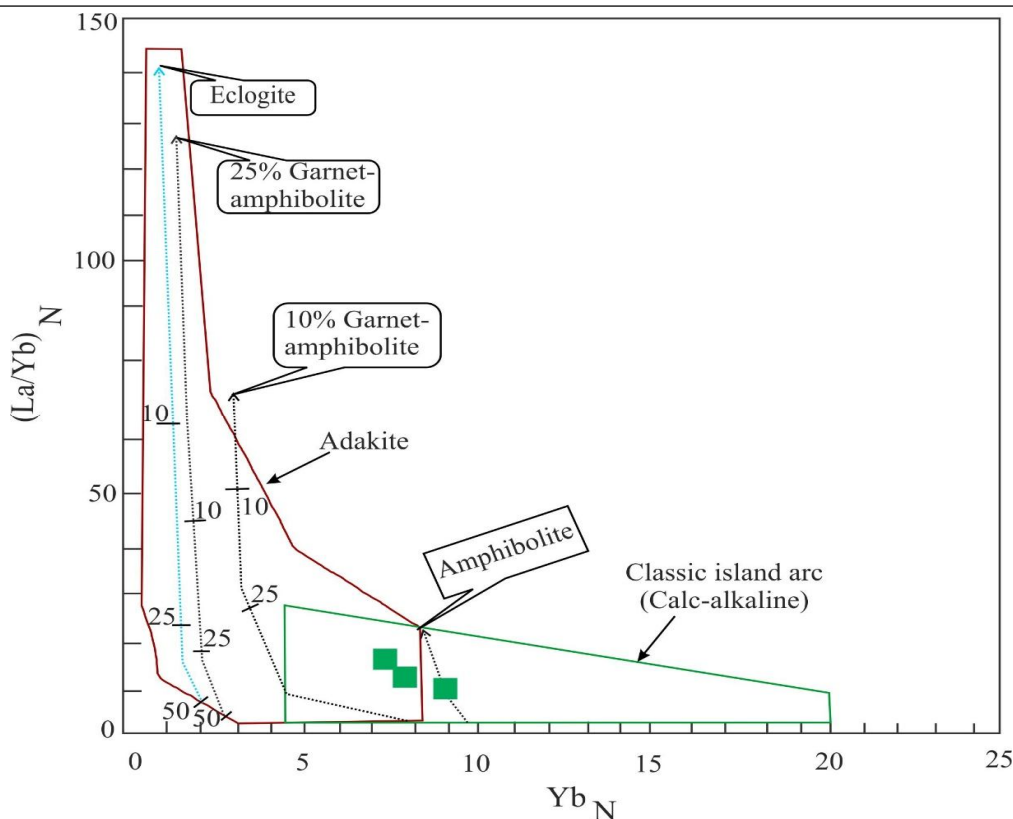
شکل 15. A و B: ترسیم دایک‌های دیوریتی محدوده مس رباعی در نمودار تکتونو-ماگمایی (Pearce et al., 1984). WPG: گرانیتوئیدهای درون صفحه‌ای، Syn-COLG: گرانیتوئیدهای هم‌زمان با برخورد، ORG: گرانیتوئیدهای پشته اقیانوسی، VAG: گرانیتوئیدهای کمان آتشفشانی، Post-COLG: گرانیتوئیدهای بعد از برخورد

Fig. 15. A and B: Plot of dioritic dykes of Robaie copper area on the tectono-magmatic diagram (Pearce et al., 1984). WPG: within plate granitoid; Syn-COLG: syn-collisional granitoid; ORG: ocean ridge granitoid; VAG: volcanic arc granitoid; Post-COLG: post-collisional granitoid.

نمودار Dy/Yb به Dy (Shaw, 1970) دایک‌های دیوریتی از 10 تا 20 درصد ذوب‌بخشی ماگمای مشتق شده از اسپینل-فلوگوپیت لرزولیت تشکیل شده‌اند (شکل 17).

بر طبق نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb (Pearce, 1983) و نمودار Ba/La در برابر Th/Nd (Shaw, 1970)، دایک‌های دیوریتی منطقه از سیالات مشتق شده از صفحه فرورونده در زون فرورانش حاشیه قاره‌ها تشکیل شدند (شکل A-18 و B). با توجه به شکل A-18، دایک‌های دیوریتی منطقه از گوشته غنی شده منشأ گرفته است و موازی جهت گوشته متاسوماتیزم شده قرار گرفتند. این سیال، مذاب حاصل از رسوبات نیست و سیال مشتق شده از گوه گوشته‌ای است که با گوه گوشته‌ای (اسلب) بالایی واکنش داده و موجب متاسوماتیزم شده و به سمت بالا صعود کرده است.

همچنین در نمودار $(La/Yb)_N$ در برابر Yb_N (Defant and Drummond, 1990)، بیشتر نمونه‌ها ماهیت کالک‌آلکان داشته و ماهیت آداکیتی ندارند (شکل 16). ماگماهای کالک‌آلکان در پهنه فرورانش، معمولاً در پی ذوب‌بخشی پریدوتیت گوه گوشته‌ای به وجود می‌آیند که دچار سیال‌های آزاد شده از صفحه اقیانوسی فرورانده باشد؛ اما ماگماهای آداکیتی از ذوب‌بخشی خود صفحه اقیانوسی فرورانده پدید می‌آیند (Tatsumi and Takahashi, 2006). از آنجایی که دایک‌های دیوریتی محدوده اکتشافی مس رباعی سرشت آداکیتی ندارند، پس پیشنهاد اول برای آنها قابل‌پذیرش است. به‌طور کلی، ترکیب و ذوب‌بخشی ماگماهای مشتق شده از گوشته را می‌توان از عناصر نادر خاکی و نسبت‌های آن تعیین کرد (برای مثال، La/Sm ، Sm/Yb ، La/Yb و Dy/Yb) (Aldanmaz et al., 2000; Duggen et al., 2005).



شکل 16. ترسیم دایک‌های دیوریتی محدوده مس رباعی در نمودار $(La/Yb)_N$ در برابر Yb_N (Defant and Drummond, 1990)

Fig. 16. Plot of dioritic dykes from Robaie copper area in the Yb_N vs. $(La/Yb)_N$ diagram (Defant and Drummond, 1990)

(1999)، فشار تعیین شده برای منطقه تقریباً برابر با کمتر از 10 مگاپاسکال بوده که این فشار تقریباً معادل عمق کمتر از 1 کیلومتر فشار لیتواستاتیک است (شکل 20) که این موضوع نشان‌دهنده آن است که کانی‌سازی منطقه در عمق کم اتفاق افتاده است.

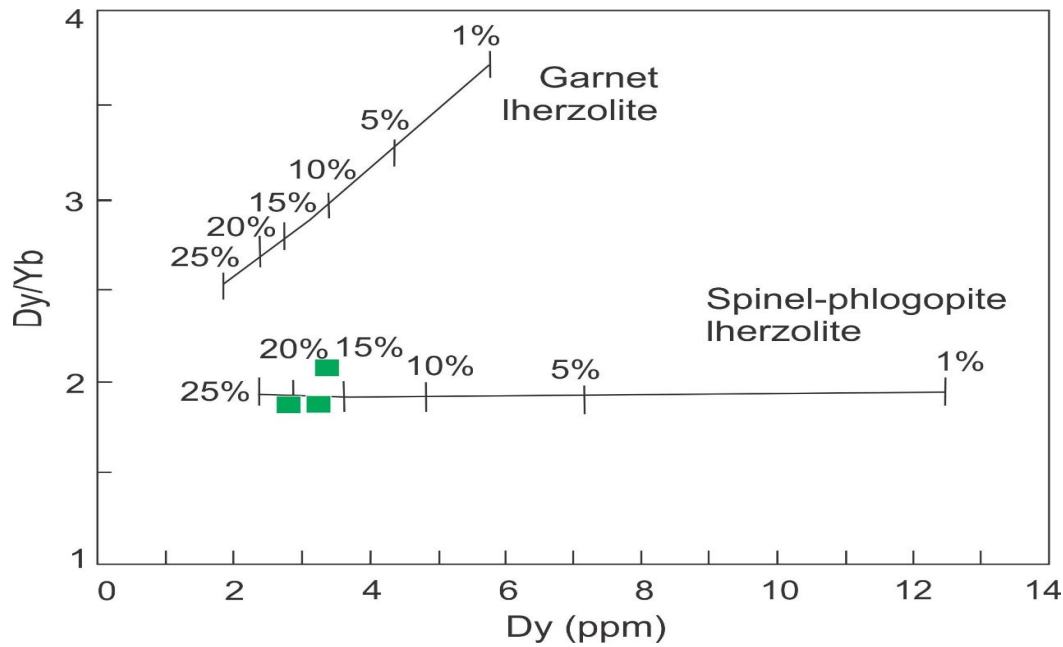
بررسی‌های سیالات درگیر نشان می‌دهد که ارتباط بسته‌ای بین دمای همگن شدن و شوری سیالات درگیر وجود دارد (Shepherd et al., 1985, Wilkinson, 2001). ترکیبات شیمیایی سیالات درگیر را می‌توان در نمودار دمای همگن شدن به شوری برای تعیین نوع سیال هیدروترمال و نهشت کانسار رسم کرد (Kesler, 2005). رگه‌های مس منطقه از طریق مخلوط شدن سیال‌های با دمای یکسان و شوری متفاوت به وجود

ویژگی و تکامل سیال‌های کانی‌ساز

داده‌های سیالات درگیر و تجمع کانی‌ها نشان می‌دهند که سیال‌های کانی‌ساز دارای درجه حرارت متوسط تا پایین و شوری متوسط تا پایین هستند. در سیال‌های گرمابی با دماهای بالا، کمپلکس‌های کلریدی و در دماهای پایین، کمپلکس‌های سولفیدی فلزات پایدار هستند (Barnes, 1997). سازوکاری که باعث ته‌نشست فلزات از کمپلکس‌های Cl^- و HS^- می‌شود، شامل کاهش دما، کاهش فشار، جدایش فازی، رقیق یا مخلوط شدن سیال و واکنش سیال/سنگ و تغییر pH و Eh است (Ramboze et al., 1982, Robb, 2004, Chi and Xue, 2011). بر اساس نمودار دمای همگن سازی (Th) و شوری سیالات درگیر کمپلکس سولفیدی مهم‌ترین عامل انتقال فلزات در منطقه است (شکل 19). در نمودار دما به فشار (Fournier,)

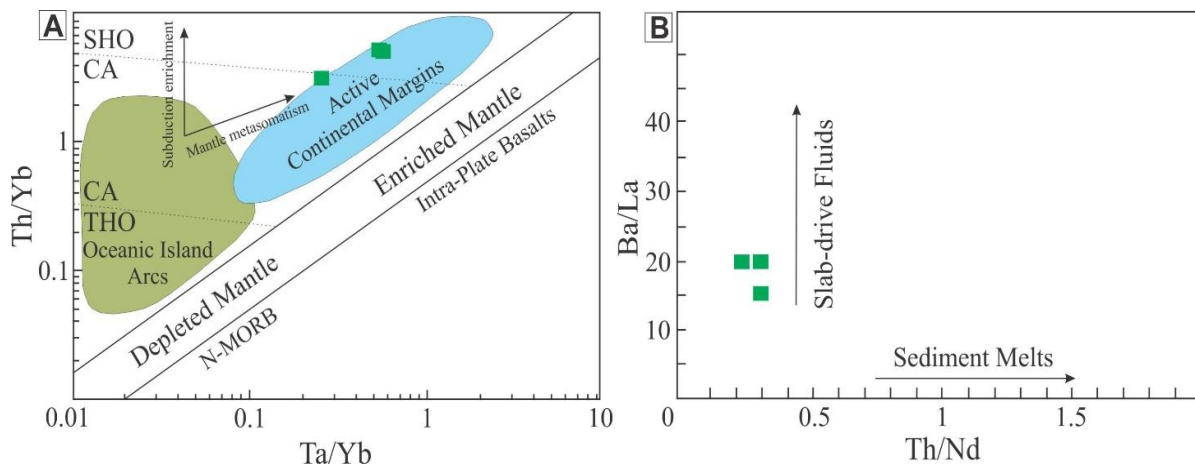
احتمالاً مخلوط شدن سیال‌های ماگمایی با سیالات جوی و کاهش شوری مهم‌ترین عامل ته‌نشست فلزات در محدوده اکتشافی مس رباعی است (شکل 22).

آمدند (شکل 21). به‌هرحال، تغییرات عامل‌های دیگر مثل pH، Eh، کاهش فشار، مخلوط و رقیق شدن سیال و فوگاسیته اکسیژن مؤثر است (Robb, 2004, Chi and Xue, 2011). ارتباط بین دمای همگن شدن و شوری سیالات درگیر نشان می‌دهد که



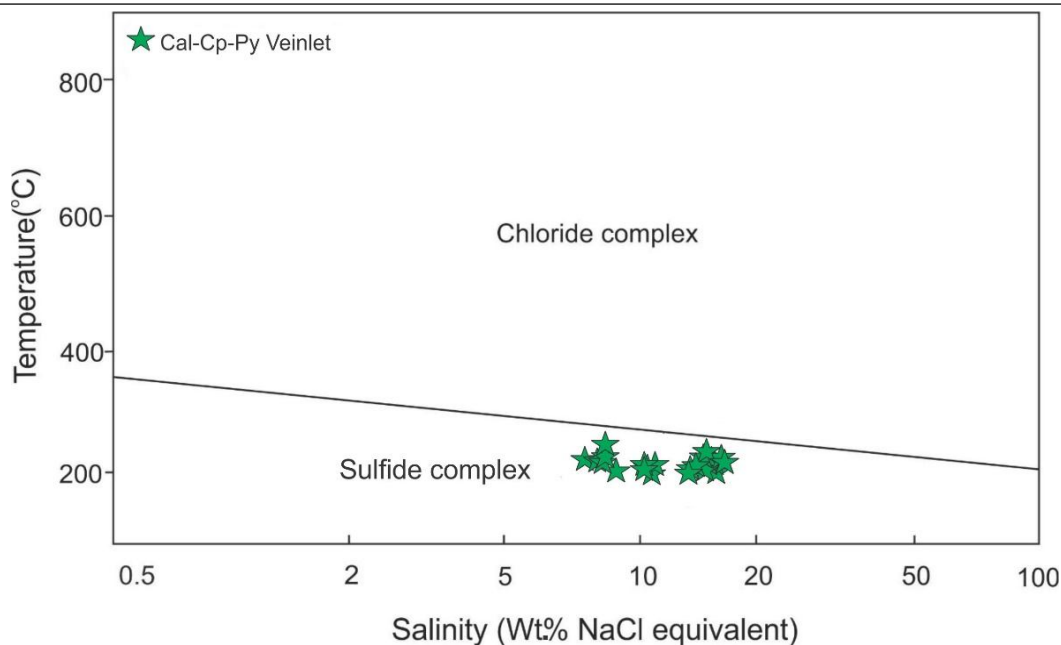
شکل 17. نمودار Dy/Yb در برابر Dy برای دایک‌های دیوریتی محدوده اکتشافی مس رباعی (Shaw, 1970)

Fig. 17. Dy/Yb vs. Dy diagram of diorite dykes in the Robaie copper area (Shaw, 1970)



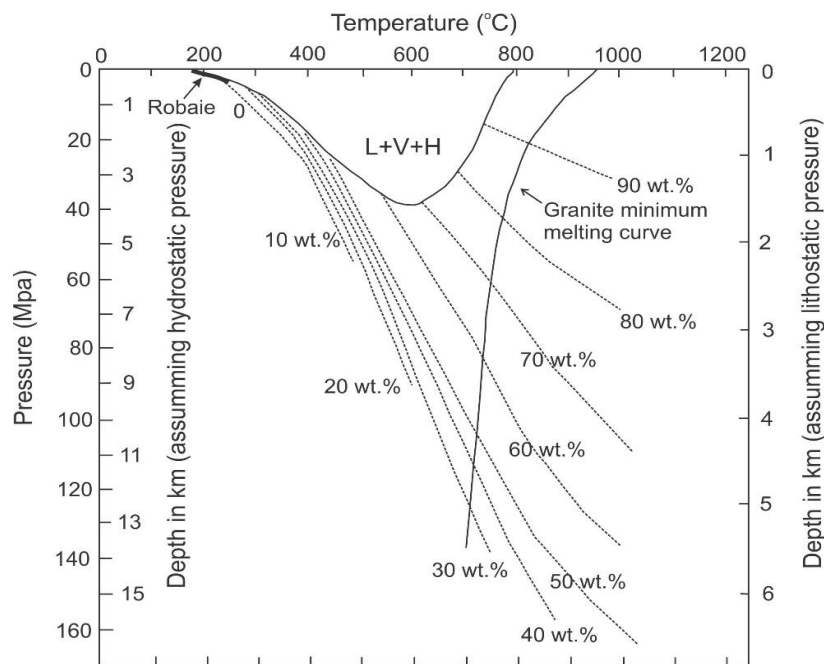
شکل 18. A: نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb (Pearce, 1983) و B: نمودار Ba/La در برابر Th/Nd (Shaw, 1970) دایک‌های دیوریتی محدوده اکتشافی مس رباعی

Fig. 18. A: Th/Yb vs. Ta/Yb diagram (Pearce, 1983), and B: Ba/La vs. Th/Nd diagram (Shaw, 1970) dioritic dykes in the Robaie copper area



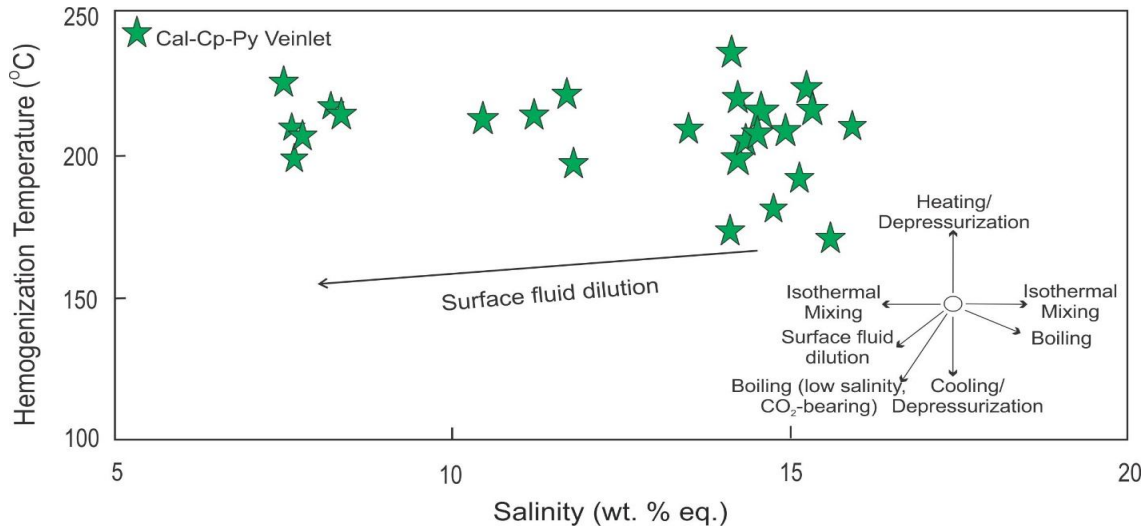
شکل 19. نمودار دما در برابر شوری برای تعیین کمپلکس احتمالی حمل فلزات در محدوده مس رباعی (Large et al, 1988)

Fig. 19. Temperature versus salinity diagram for determine the possible transport complexe of metals in the Robaie copper area (Large et al, 1988)



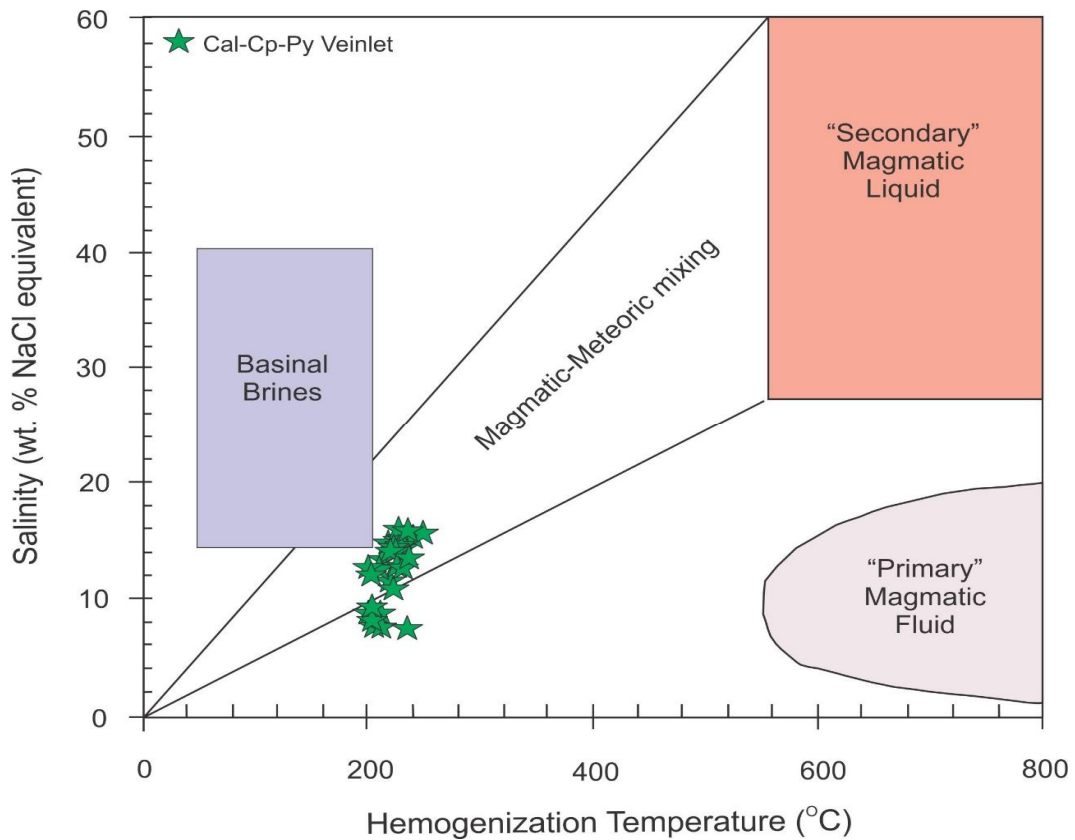
شکل 20. نمودار دما-فشار نشان‌دهنده ارتباط‌های فازی در سیستم $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ در فشارهای لیتواستاتیک و هیدرواستاتیک در منطقه محدوده مس رباعی (Fournier, 1999). L=مایع، V=بخار، H=هالیت

Fig. 20. Pressure-temperature diagram showing phase relationships in the $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ system at lithostatic and hydrostatic pressures in the Robaie copper area (Fournier, 1999). L= liquid, V= vapor, H= halite



شکل 21. دمای همگن‌شده در برابر شوری سیالات درگیر محدوده مس رباعی. روندهای تکامل سیال در نمودار دما به شوری برگرفته از شفرد و همکاران (Shepherd et al., 1985)

Fig. 21. Homogenization temperature versus salinity of fluid inclusions in the Robaie area. Trends of fluid evolution in a temperature-salinity diagram from Shepherd et al. (1985)



شکل 22. نمودار دمای همگن‌شده در برابر شوری سیالات درگیر در محدوده اکتشافی مس رباعی (Beane, 1983)

Fig. 22. Homogenization temperature versus salinity diagram for fluid inclusions in the Robaie area (Beane, 1983)

نتیجه‌گیری

داده‌های U-Pb، ایزوتوپ‌های Nd-Sr، سیالات درگیر، بررسی‌های زمین‌شیمی و کانی‌شناسی دایک‌های دیوریتی و زون‌های کانی‌سازی در منطقه رباعی به نتایج زیر منجر شده است:

کانی‌سازی در منطقه رباعی به شکل رگه و رگچه در زون‌های گسلی با روند NS-SW در ارتباط با زون فرورانش حاشیه قاره‌ای تشکیل شدند. کانی‌سازی جوان‌تر از ائوسن‌زیرین است که احتمال دارد با فعالیت‌های ماگمایی مشابه ترکیب دایک‌های دیوریتی در عمق در ارتباط باشد. کانی‌سازی اولیه شامل رگچه‌های کلسیت-کالکوپیریت-پیریت است. نتایج آنالیز زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که تنها مقادیر مس در منطقه بالاست و مقادیر عناصر Ag, Sb, Pb, Zn پایین است. پایین بودن مس در سنگ‌های آتشفشانی و بالابودن مس در رگه‌ها بیانگر آن است که زون‌های گسلی نقشی مهم در انتقال مس از سیال‌های ماگمایی و تشکیل کانی‌سازی در منطقه رباعی داشتند. ارتباط بین دمای همگن‌شدن و شوری سیالات درگیر نشان می‌دهد که مخلوط شدن سیال‌هایی با شوری بالا با سیالاتی با شوری پایین باعث ته‌نشست مس و تشکیل کانی‌سازی در منطقه رباعی شده است و کمپلکس سولفیدی مهم‌ترین عامل حمل فلزات بوده است. سیالات با دما کمی بالا و شوری بیشتر احتمالاً

ماگمایی، مس را از توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق در عمق گرفته و ضمن حرکت به سمت بالا در زون‌های گسلی با آب‌های جوی مخلوط شده‌اند. این مخلوط شدن باعث کاهش شوری شده و باعث ناپایداری کمپلکس‌های سولفیدی و ته‌نشست مس شده است.

داده‌های زمین‌شیمیایی و نسبت‌های $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ اولیه و مقدار εNdi بیوتیت-هورنبلند دیوریت پورفیری بیانگر آن است که ماگما از گوشته غنی شده با ذوب بخشی 10 تا 20 درصد اسپینل-فلوگوپیت لرزولیت در زون فرورانش حاشیه قاره‌ای فعال تشکیل شده است.

شواهد سنگ‌شناسی، آلتراسیون، بررسی‌های سیالات درگیر، شکل و حالت کانی‌سازی و ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که کانی‌سازی مس رباعی از نوع اپی ترمال است.

قدردانی

این پروژه با حمایت مالی دانشگاه فردوسی در ارتباط با طرح پژوهشی شماره 42842/3 مورخه 1396/3/10 انجام شده است. از آقای مهندس احسان عزیزیان از شرکت زمین پویان فراز آسیا برای انجام عملیات صحرایی و در اختیار گذاشتن داده‌های منطقه تقدیر و تشکر می‌نمایم.

References

- Abdollahi, A. and Fardoust, F.A., 2015. Mineralogy, Geochemistry and Forming of Robaie Cu-Fe Mines, South of Damghan. M.Sc. Thesis, Shahroud University of Technology, Shahroud, Iran, 211 pp. (in Persian)
- Aguillón-Robles, A., Calmus, T., Benoit, M., Bellon, H., Maury, R.C., Cotton, J., Bourgois, J. and Michaud, F., 2001. Late Miocene

- adakites and Nb-enriched basalts from Vizcaino Peninsula, Mexico: indicators of East Pacific Rise subduction below southern Baja California. *Geology*, 29(6): 531-534.
- Aldanmaz, E., Pearce, J.A., Thirlwall, M.F. and Mitchell, J.G., 2000. Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 102(1): 67-95.

- Arjmandzadeh, R., Santos, J.F. and Ribeiro, S., 2013. Sr–Nd isotope geochemistry and tectonomagmatic setting of the Dehsalm Cu–Mo porphyry mineralizing intrusives from Lut Block, eastern Iran. *International Journal of Earth Sciences*, 103(2): 123–140.
- Asiabanha, A., Bardintzeff, J.M., Kananian, A. and Rahimi G., 2012. Post-Eocene volcanics of the Abazar district, Qazvin, Iran: Mineralogical and geochemical evidence for a complex magmatic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 45(1): 79–94.
- Atherton, M.P. and Petford, N., 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362(6423): 144–146.
- Badozadeh Kanrishi, H., 2011, Investigation of ore mineralization Robaie-Fe Damaghan based on Petrography and Geochemistry studies. M.Sc. Thesis, Damghan University, Damghan, Iran, 211 pp. (in Persian)
- Barnes, H.L., 1997. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Wiley Interscience, New York, 978 pp.
- Beane, R.E., 1983. The magmatic-meteorite transition. *Geothermal Resources Council, Special Report*, 13: 245–253.
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements; meteorite studies. In: P. Henderson (Editor), *the rare earth element geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 115–1522.
- Boynton, W.V., 1985. Cosmochemistry of the rareearth elements: Meteorite studies, In *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 522 pp.
- Chappell, B.W. and White, A.J.R., 2001. Two contrasting granite types, 25 years later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 489–500.
- Chi, G.X. and Xue, C.J., 2011. An overview of hydrodynamic studies of mineralization. *Geoscience Frontiers*, 2(3): 423–438.
- Cotton, J., Le Dez, A., Bau, M., Caroff, M., Maury, R.C., Dulski, P., Fourcade, S., Bohn, M. and Brousse, R., 1995. Origin of anomalous rare earth element and yttrium enrichments in subaerially exposed basalts, evidence from French Polynesia. *Chemical Geology*, 119(1–4): 115–138.
- Defant, M.J. and Drummond, M.S., 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662–665.
- Defant, M.J., Jackson, T.E., Drummond, M.S., De Boer, J.Z., Bellon, H., Feigenson, M.D., Maury, R.C. and Stewart, R.H., 1992. The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: an overview. *Journal of Geological Society*, 149(4): 569–579.
- Duggen, S., Hoernle, K., Van Den Bogaard, P. and Garbe-Schönberg, D., 2005. Post-Collisional Transition from Subduction- to Intraplate-type Magmatism in the Westernmost Mediterranean: Evidence for Continental-Edge Delamination of Subcontinental Lithosphere. *Journal of Petrology*, 46(6): 1155–1201.
- Etemadi, A., Karimpour, M.H. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2018. Geology, petrography, alteration, mineralization and petrogenesis of intrusive bodies in the Hamech prospect area, Southwest of Birjand. *Journal of Economic Geology*, 10(1): 113–137. (in Persian with English abstract)
- Fard, M., Rastad, E., Rashidnejad-Omran, N. and Ghaderi, M., 2001. Mineralization and potential of gold in Torud- Chahshirin volcano-plutonic complex (south Damghan). 5th Symposium of Geological Society of Iran, Tehran University, Tehran, Iran.
- Fournier, R.O., 1999. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment. *Economic Geology*, 94(8): 1193–1211.
- Gill, J.B., 1981. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Springer Verlag, Berlin, 390 pp.
- Hou, Z.Q., Zhang, H., Pan, X. and Yang, Z., 2011. Porphyry Cu (-Mo-Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust: examples from the eastern Tethyan metallogenic domain. *Ore Geology Reviews*, 39(1–2): 21–45.
- Houshmandzadeh, A.R., Alavi Naini, M. and Haghypour, A.A., 1978. Evolution of geological phenomenon in Torud area. Geological Survey of Iran, Tehran, Report 5H, 138 pp.
- Imamjome, A., Rastad, E., Bouzari, F. and Rashidnezhad, N., 2009. An introduction to individual disseminated veinlet and vein

- mineralization system of Cu (Pb-Zn) in the Chah Messi and Ghole Kaftaran mining district, eastern part of the Troudeh-Chah Shirin magmatic arc. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 18(70): 112–125.
- Katongo, C., Koller, F., Klötzli, U., Koeberl, Ch., Tembo, F. and Waele, B., 2004. Petrography, geochemistry, and geochronology of granitoid rocks in the Neoproterozoic- Paleozoic Lufilian-Zambezi belt, Zambia: Implications for tectonic setting and regional correlation. *Journal of African Earth Sciences*, 40(5): 219–244.
- Kay, R.W. and Kay, S.M., 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219(1–3): 177–189.
- Kaygusuz, A. and Aydınçakır, E., 2009. Mineralogy, whole-rock and Sr–Nd isotope geochemistry of mafic microgranular enclaves in Cretaceous Dagbasi granitoids, Eastern Pontides, NE Turkey: Evidence of magma mixing, mingling and chemical equilibration. *Geochemistry*, 69(3): 247–277.
- Kemp, A.I.S., Hawkesworth, C.J., Foster, G.L., Paterson, B.A., Woodhead, J.D., Hergt, J.M., Gray, C.M. and Whitehouse, M.J., 2007. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from hafnium and oxygen isotopes in zircon. *Journal of Science*, 315(5811): 980–983.
- Kesler, S.E., 2005. Ore-forming fluids. *Elements*, 1(1): 13–18.
- Large, R.R., McGoldrick, J., Berry, R.F. and Young, C.H., 1988. A tightly folded, gold-rich, massive sulphide deposit: Que River mine, Tasmania. *Economic Geology*, 83(4): 681–693.
- Li, J-X., Qin, K-Zh., Li, G-M., Xiao, B., Chen, L. and Zhao, J-X., 2011. Post-collisional orebearing adakitic porphyries from Gangdese porphyry copper belt, southern Tibet: Melting of thickened juvenile arc lower crust. *Lithos*, 126(3–4): 265–277.
- Lin, I.J., Chung, S.L., Chu, C.H., Lee, H.Y., Gallet, S., Wu, G., Ji, J. and Zhang, Y., 2012. Geochemical and Sr–Nd isotopic characteristics of Cretaceous to Paleocene granitoids and volcanic rocks, SE Tibet: petrogenesis and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 131–150.
- Mehrabi, B. and Ghasemi, M.S., 2012. Intermediate sulfidation epithermal Pb-Zn-Cu (\pm Ag-Au) mineralization at Cheshmeh Hafez deposit, Semnan province, Iran. *Journal of Geological Society of India*, 80(4): 563–578.
- Menzies, M.A., Long, A., Ingeram, G., Talnfi, M. and Janfcky, D., 1993. MORB preidiotite-seawater interaction: experimental constrains on the behavior of trace elements. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratios. In: H.M. Princhard, T. Alabaster, N.B.W. Harris and C.R. Neary (Editors), *Magmatic Process and Plate Tectonics*. Geological Society, London, pp. 309–322.
- Mirnejad, H., Lalonde, A.E., Obeid, M. and Hassanzadeh, J., 2013. Geochemistry and petrogenesis of Mashhad granitoids: An insight into the geodynamic history of the Paleo-Tethys in northeast of Iran. *Lithos*, 170–171: 105–116.
- Moradi, S., 2010. Investigation of Gold mineralization in the Baghu area, southeast of Damghan. M.Sc. Thesis, University of Damghan, Damghan, Iran, 103 pp. (in Persian)
- Muir, R.J., Weaver, S.D., Bradshaw, J.D., Eby, G.N. and Evans, J.A., 1995. The Cretaceous separation point batholith, New Zealand: granitoid magmas formed by melting of mafic lithosphere. *Journal of the Geological Society*, 152(4): 689–701.
- Nabatian, G., Ghaderi, M., Neubauer, F., Honarmand, M., Liu, X., Dong, Y., Jiang, S., Quadt, A. and Bernroide, M., 2014. Petrogenesis of Tarom high-potassic granitoids in the Alborz-Azarbaijan belt, Iran: geochemical, U-Pb zircon and Sr-Nd-Pb isotopic constraints. *Lithos*, 184(187): 324–345.
- Nahidifar, L., Fardost, F.A. and Rezai, M., 2014. Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Dian Copper Deposit (South Damghan). M.Sc. Thesis, Shahroud University of Technology, Shahroud, Iran, 169 pp. (in Persian)
- Niroomand, S., Hassanzadeh, J., Tajeddin, H.A. and Asadi, S., 2018. Hydrothermal evolution and isotope studies of the Baghu intrusion-related gold deposit, Semnan province, north-central Iran. *Ore Geology Reviews*, 95: 1028–1048.
- Nogol Sadat, M. and Alavi, A., 1993. Geological map of moalleman, scale 1: 100000. Geological Survey of Iran.

- Pearce, J.A., 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: C.J. Hawkesworth and M.J. Norry (Editors), *Continental basalts and mantle xenoliths*. Shiva Publications, Nantwich, United Kingdom, pp. 230–249.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983.
- Petford, N. and Atherton, A., 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37(6): 1491–1521.
- Ramboze, C., Pichavant, M. and Weisbrod, A., 1982. Fluid immiscibility in natural processes: use and misuse of fluid data. II. Interpretation of fluid inclusion data in terms of immiscibility. *Chemical Geology*, 37(1–2): 29–48.
- Reagan, M.K. and Gill, J.B., 1989. Coexisting calcalkaline and high niobium basalts from Turrialba volcano, Costa Rica: implication for residual titanates in arc magma source. *Journal of Geophysical Research*, 94(B4): 4619–4633.
- Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Razique, A. and Fletcher, T., 2012. High Sr/Y Magmas Reflect Arc Maturity, High Magmatic Water Content, and Porphyry Cu±Mo±Au Potential: Examples from the Tethyan Arcs of Central and Eastern Iran and Western Pakistan. *Economic Geology*, 107(2): 295–332.
- Robb, L., 2004. Hydrothermal processes. In: L. Robb (Editor), *Introduction to Ore forming processes*. Wiley, New York, pp. 125–215.
- Rohbakhsh, P., Karimpour, M.H. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2018. Geology, mineralization, geochemistry and petrology of intrusive bodies in Kuh-Zar Cu-Au deposit, Damghan. *Journal of Economic Geology*, 10(1): 1–23. (in Persian with English abstract)
- Rollinson, H., 1993. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Singapore Publishers, England, 352 pp.
- Sajona, F.G., Naury, R.C., Pubellier, M., Leterrier, J., Bellon, H. and Cotton, J., 2000. Magmatic source enrichment by slab-derived melts in a young post-collision setting, central Mindanao (Philippines). *Lithos*, 54(3): 173–206.
- Shamanian, G.H., Hedenquist, J.W., Hattori, K.H. and Hassanzadeh, J., 2004. The Gandy and Abolhassani Epithermal Prospects in the Alborz Magmatic Arc, Semnan Province, Northern Iran. *Economic Geology*, 99(4): 691–712.
- Shaw, D.M., 1970. Trace element fractionation during anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34(2): 237–243.
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. Blackie Academic and Professional, Glasgow, 239 pp.
- Shiri, Z., 2013. *Geology, Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Anaru Zinc (Lead), south of Damghan*. M.Sc. Theses, Damghan University, Damghan, Iran, 150 pp. (in Persian)
- Siemens, H., 2003. Texture, microstructure and strength of hematite ore, experimentally deformed in the temperature range 600°–1100°C and at strain rates between 10⁻⁴–10⁻⁶ s⁻¹. *Journal of Structural Geology*, 25(9): 1371–1391.
- Steele-MacInnis, M., Lecumberri-Sanchez, P. and Bodnar, R.J., 2012. HOCKIEFLINCS-H₂O-NaCl: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H₂O-NaCl. *Computers and Geosciences*, 49: 334–337.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A.D. Saunders and M.J. Norry (Editors), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London Special Publication, London, pp. 313–345.
- Taghipour, N., 2016. Final report of the Robaie copper exploration. Geological Survey of Iran, Semnan, Final report, 110 pp.
- Tatsumi, Y. and Takahashi, T., 2006. Operation of subduction factory and production of andesite. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 101(1): 145–153.
- Tepper, J.H., Nelson, B.K., Bergantz, G.W. and Irving, A.J., 1993. Petrology of the Chilliwack batholith, North Cascades, Washington: generation of calc-alkaline granitoids by melting of mafic lower crust with variable water fugacity. *Contributions to Mineralogy*

- and Petrology, 113(3): 333–351.
- Whitney, D.L. and Evans, B., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis*. Chapman and Hall, London, 466 pp.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusion in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55 (1–4): 229–272.
- Yang, J.H., Wu, F.Y., Wilde, S.A., Xie, L.W., Yang, Y.H. and Liu, X.M., 2007. Tracing magma mixing in granite genesis, in situ U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 153(2): 177–190.
- Zhou, M.F., Zhao, J.H., Jiang, C.Y., Gao, J.F., Wang, W. and Yang, S.H., 2009. OIB-like, heterogeneous mantle sources of Permian basaltic magmatism in the western Tarim Basin, NW China: implications for a possible Permian large igneous province. *Lithos*, 113(3–4): 583–594.
- Zindler, A., Hart, S., 1986. Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Science* 14: 493–571.



Geology, alteration, mineralization, Geochemistry, fluid inclusion, petrology, petrogenesis and U-Pb zircon dating of diorite dykes in the Robaie copper area (South of Damghan)

Mehdi Mahdavi Akerdi¹, Azadeh Malekzadeh Shafaroudi^{1&2*}, Mohammad Hassan Karimpour^{1&2} and Behnam Rahimi^{1&2}

1) Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2) Research Center for Ore Deposit of Eastern Iran, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Submitted: Oct. 23, 2019

Accepted: Jan. 08, 2020

Keywords: Mineralization, fluid inclusion, Nd-Sr isotopes, U-Pb geochronology, Robaie, Torud-Chahshirin, Iran

Introduction

The Robaie copper area is located 95 kilometers South of Damghan in the Semnan province. The study area has coordinates between 54°30'37" to 54°30'42.71" latitude and 35°22'29.41" to 35°23'47.54" longitude. Geotectonically, the study area is located in the central Iran and in the northern part of the Torud-Chahshirin volcanic-plutonic belt (Houshmandzadeh et al., 1978). The Torud-Chahshirin volcanic-plutonic belt is a Tertiary magmatism in central Iran which is composed of volcanic rocks with dominant andesite composition and granodiorite intrusive with dominant diorite composition (Fard et al., 2001). Torud-Chahshirin volcanic-plutonic belt has created a favorable geological situation for base metals such as copper, lead, zinc, gold, silver and other precious and base metals, such as the Robaie copper area, Chah Messi (Cu±Pb-Zn; Imamjome et al., 2009), Kuh-Zar (Cu-Au; Rohbakhsh et al., 2018) and other instances. The main objective of this study is geology, petrography, U-Pb zircon dating and Sr-Nd isotope and also alteration, mineralization, geochemistry and fluid inclusion in the study area.

Materials and methods

60 samples were collected from the study area. Petrographic studies were done on 40 thin

sections. Mineralization and paragenesis of the system were studied based on 10 polished-thin sections and 6 polished sections. The measurements were conducted on a Linkam THMSG 600 at the Ferdowsi University of Mashhad. REE (ICP-MS method-ACME Laboratory in Vancouver, Canada) elements were analyzed for 3 samples of diorite dykes. Eight samples for geochemistry and four samples for fire assay were analyzed at the Zar Azma Company. U-Pb dating in zircon of diorite dyke was conducted by the ICP-MS method in the Arizona LaserChron Center. Sr and Nd isotopic compositions were determined at the Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade de Aveiro, Portugal.

Results

The geology of the area is dominated by volcanic rocks (andesite and trachyandesite), which were intruded by diorite dykes. Alteration zones are propylitic, argillic, sericitic and carbonate. The Copper deposit in the study area occurs as ore veins situated along fault zone with NS-SW trending. Vein thickness varies from 1-5m. Vein thickness varies from 1-5m. The primary minerals are chalcocite, pyrite and chalcocite, covellite, bornite, malachite, azurite, hematite, goethite and limonite are secondary minerals. The amount of

*Corresponding author Email: shafaroudi@um.ac.ir

Cu is between 0.01 to 5.6 % and amount of Ag, Sb, Pb, Zn, As elements is low. The homogenization temperature (T_h) values ranged from 165 to 300 °C. Salinities of ore-forming fluids ranged from 7 to 16 wt. % NaCl equivalents. Diorite dykes in the Robaie area have characteristics of enrichment in LREE versus HREE, enrichment of LILE and depletion in HFSE. The initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratios of biotite-hornblende diorite are 0.705664 and 0.512486, respectively. The ϵNdI value is -1.7. In the ϵNdI versus initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ diagram diorite dykes of the Robaie area plot to the right part of the mantle array. The mean age of diorite dyke is 50.49 ± 0.49 Ma. Therefore, the U-Th-Pb zircon dating indicates that diorite dyke formed in the early Eocene (Ypresian) era.

Discussion

Diorite dykes originated from mantle-derived magmas. The parental melt would have originated in a non-depleted mantle source. Isotopic data from diorite dykes show that subduction source with contamination to continental crust. In tectonic setting diagrams (Pearce et al., 1984) diorite dykes plot on the fields of the volcanic arc granites (VAG). In the Dy/Yb vs. Dy system (Shaw, 1970) diorite dykes of Robaie area were formed by 15-20% partial melting of spinel-phlogopite lherzolite. According to Yh/Yb vs. Ta/Yb (Pearce et al., 1984) and Ba/La vs. Th/Nd diagrams (Shaw, 1970) diorite dykes were formed from slab-drive fluid in the active continental margins.

Fluid inclusions data of the Robaie area manifest that the ore-forming fluids were medium to low temperature and medium to low salinity. The pressure determined for the Robaie area was approximately < 10 MPa, which is equivalent to a depth of approximately < 1 km assuming lithostatic pressure. Fluid inclusion studies indicate that there is a positive correlation between homogenization temperature and fluid salinity, similar to the process of fluid mixing. The decrease in salinity has been the most important factor in the precipitation of copper in

the area. All of evidence shows that mineralization in the Robaie area is of epithermal type deposit.

Acknowledgment

The financial support provided by grant no. 42842.3, date: 3 Jan 2017 is greatly appreciated. We would like to thank Mr. Ehsan Azizian of the Zamin Pouyan Fraz Assia Company for the generous support and the access to mine data.

References

- Fard, M., Rastad, E., Rashidnejad-Omran, N. and Ghaderi, M., 2001. Mineralization and potential of gold in Torud- Chahshirin volcano-plutonic complex (south Damghan). 5th Symposium of Geological Society of Iran, Tehran University, Tehran, Iran.
- Houshmandzadeh, A.R., Alavi Naini, M. and Haghypour, A.A., 1978. Evolution of geological phenomenon in Torud area. Geological Survey of Iran, Tehran, Report 5H, 138 pp.
- Imamjome, A., Rastad, E., Bouzari, F. and Rashidnezhad, N., 2009. An introduction to individual disseminated veinlet and vein mineralization system of Cu (Pb-Zn) in the Chah Messi and Ghole Kaftaran mining district, eastern part of the Troudeh-Chah Shirin magmatic arc. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 18(70): 112–125.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983.
- Rohbakhsh, P., Karimpour, M.H. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2018. Geology, mineralization, geochemistry and petrology of intrusive bodies In Kuh-Zar CU-Au deposit, Damghan. *Journal of Economic Geology*, 10(1): 1–23. (in Persian with English abstract)
- Shaw, D.M., 1970. Trace element fractionation during anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34(2): 237–243.