



زمین‌شناسی، کانی‌سازی، ژئوشیمی اکتشافی، پتروژنز، سن‌سنجی U-Pb و ایزوتوپ‌های Lu-Hf روی کانی زیر کن توده‌های نیمه‌عمیق در محدوده اکتشافی سیمرخ، بلوک لوت، شرق ایران

رضا برآبادی^۱، سیداحمد مظاهری^{۱*} و محمدحسن کریم‌پور^۲

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

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

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۳، پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۱۸

چکیده

منطقه اکتشافی سیمرخ در مرکز بلوک لوت و جنوب‌غربی نهبندان قرار دارد. در این منطقه طیف گسترده‌ای از توده‌های نیمه‌عمیق به شکل استوک و دایک در درون واحدهای آتشفشانی نفوذ کرده‌اند و دگرسانی‌های مهمی مانند سیلیسی، کوارتز + سریسیت + پیریت، کربنات + کوارتز + سریسیت + پیریت، پروپیلیتیک و آرژیلیک را به وجود آورده‌اند. این توده‌ها متالومینوس با ماهیت کالک‌آلکان تا کالک‌آلکان پتاسیم بالا هستند. غنی‌شدگی عناصر LREE نسبت به HREE همراه با آنومالی منفی Eu نشان‌دهنده تشکیل ماگما در زون فرورانش است. سه نوع کانی‌سازی افشان، رگچه‌ای و برش‌های هیدروترمال در این منطقه دیده می‌شود. میزان عنصر مس از ۲ تا ۲۴۰ گرم در تن، مولیدن ۰/۵ تا ۴۹ گرم در تن، آرسنیک ۲ تا ۲۰۷ گرم در تن و طلا ۱ تا ۹۳ میلی‌گرم در تن متغیر است. سن‌سنجی U-Pb در دو دایک گرانیت پورفیری سن‌های $25/37 \pm 0/56$ و $25/94 \pm 0/76$ میلیون سال و توده پیروکسن دیوریت پورفیری سن $24/85 \pm 0/51$ میلیون سال را نشان می‌دهد. مقادیر مثبت پایین $\epsilon_{Hf}(t)$ منشأ این توده‌ها را گوشته نشان می‌دهد که مقدار کمی با پوسته آغشتگی پیدا کرده است.

واژه‌های کلیدی: کانی‌سازی، توده‌های نیمه‌عمیق، کالک‌آلکان، سن‌سنجی U-Pb، ایزوتوپ‌های Lu-Hf، سیمرخ، بلوک لوت

مقدمه

فرونت‌های جازموریان محدود می‌شود (شکل ۱). بلوک لوت به دلیل داشتن موقعیت‌های زمین‌ساختی مختلف در زمان‌های گذشته و به دنبال آن وجود حجم عظیم ماگماتیسیم با ویژگی‌های متفاوت، دارای توانایی بسیار مناسبی برای تشکیل انواع کانی‌سازی‌هاست. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، توده‌های نفوذی مرتبط با کانی‌سازی در بلوک لوت از پوسته‌های

بلوک لوت با روند شمالی-جنوبی در شرق خرده قاره ایران مرکزی قرار دارد و یکی از ده زون ساختاری مهم ایران محسوب می‌شود (Alavi, 1991). این بلوک از شمال توسط گسل درونه و زون سبزوار، از شرق توسط گسل نهبندان و بلوک افغان، از غرب با گسل نایبند و بلوک طبس و از جنوب با

تفکیک توده‌های نفوذی عقیم از بارور، شناسایی انواع برش‌های هیدروترمال، تهیه نقشه دگرسانی-کانی‌سازی و ژئوشیمیایی اکتشافی منطقه، پترولوژی و سن‌سنجی توده‌های نیمه‌عمیق و در نهایت ارائه مدل احتمالی کانی‌سازی است.

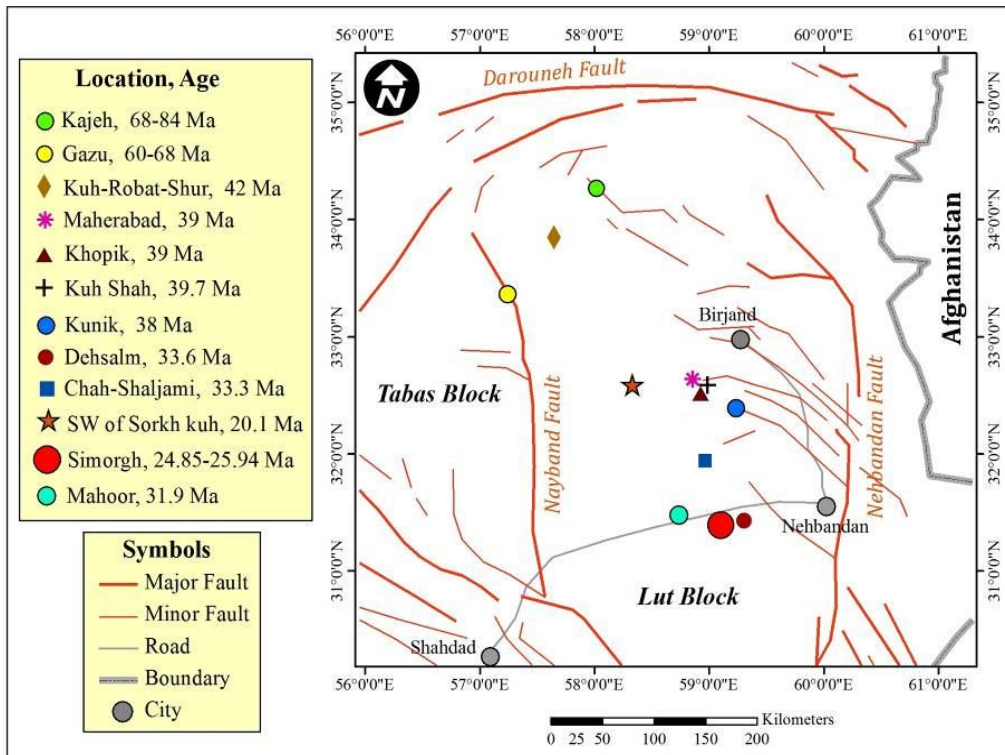
روش مطالعه

- (۱) تهیه مطالعه ۳۳۶ عدد مقطع نازک برای بررسی سنگ‌شناسی، دگرسانی و تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی و دگرسانی،
- (۲) تهیه و مطالعه ۲۵ عدد مقطع نازک صیقلی و ۳۲ عدد بلوک صیقلی برای بررسی‌های کانی‌سازی،
- (۳) آنالیز ۴۵ نمونه خرده‌سنگی سطحی در آزمایشگاه زرآزما و تجزیه با روش Fire assay برای عنصر Au و با دستگاه ICP-OES برای ۳۴ عنصر از جمله Sb, As, Pb, Zn, Mo, Au, Cu و غیره (روش محلول‌سازی چهار اسید (IEX) است)،
- (۴) آنالیز ۱۶۰ نمونه خرده‌سنگی زیر سطحی در آزمایشگاه زرآزما و تجزیه با روش Fire assay برای عنصر Au و با دستگاه ICP-OES برای ۳۴ عنصر از جمله Sb, As, Pb, Zn, Mo, Au, Cu و غیره (روش محلول‌سازی چهار اسید است)،
- (۵) تجزیه ۱۷ نمونه از توده‌های نفوذی نیمه عمیق مرتبط با کانی‌سازی با حداقل دگرسانی با دستگاه ICP-MS برای ۳۱ عنصر فرعی و عناصر خاکی کمیاب به روش LF100 (ذوب قلیایی) در آزمایشگاه AcmeLabs کانادا،
- (۶) جداسازی و تعیین سن زیرکن‌های ۳ نمونه از توده‌های نفوذی نیمه عمیق مرتبط با کانی‌سازی با روش اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های U-Pb به‌منظور سن‌سنجی توده‌های منشأ کانی‌سازی با دستگاه Laser-Ablation quadruple ICP-MS در مرکز CODES^۱ در دانشگاه تاسمانیای استرالیا و
- (۷) اندازه‌گیری مقادیر ایزوتوپ ناپایدار Lu-Hf موجود در زیرکن‌های ۳ نمونه انتخاب‌شده برای تعیین سن به روش U-Pb، با دستگاه Multi-collector ICP-MS در مرکز CCFS^۲ دانشگاه مک‌کوری سیدنی استرالیا.

اقیانوسی متفاوتی منشأ گرفته و در نسبت‌های مختلف با پوسته قاره‌ای آلاش داشته‌اند (Karimpour et al., 2012). در بازه زمانی ۲۰ تا ۴۲ میلیون سال قبل (ائوسن میانی تا اوایل الیگوسن)، کانی‌سازی در این بلوک به اوج خود رسیده است و ماگماتیسم ویژه‌ای با ژئوشیمی خاص در این فاصله زمانی بر منطقه حاکم بوده که عامل تشکیل انواع کانی‌سازی‌ها در منطقه شده است (Karimpour et al., 2012; Hosseinkhani et al., 2017). گستره سیمرخ از نظر ساختاری جزئی از بخش مرکزی بلوک لوت است و بنابراین تحت تأثیر فرایندهای زمین‌ساختی و ماگماتیسم این بلوک قرار دارد. منطقه اکتشافی سیمرخ در ۱۱۳ کیلومتری جنوب غرب شهرستان نهبندان قرار دارد (شکل ۱). این محدوده با وسعت حدود ۴۰ کیلومتر مربع، در بین طول‌های جغرافیایی "۰۰' ۱۱' ۵۹" تا "۵۶' ۱۵' ۵۹" و عرض‌های جغرافیایی "۴۳' ۵۸' ۳۰" تا "۳۷' ۵' ۳۱" واقع شده است. در اطراف این محدوده اکتشافی، کانسارها و اندیس‌های معدنی مختلفی از جمله مس-طلای پورفیری ماهرآباد در ۷۰ کیلومتری جنوب غربی بیرجند (Malekzadeh Shafaroudi et al., 2010; Malekzadeh Shafaroudi and Karimpour, 2011)، مس-طلای پورفیری کوه‌شاه در ۹۰ کیلومتری جنوب بیرجند (Abdi and Karimpour, 2012; Abdi and Karimpour, 2013)، مس-طلای پورفیری خویپک در ۷۰ کیلومتری جنوب غربی بیرجند (Malekzadeh Shafaroudi et al., 2015) و مس-مولیبدن پورفیری ده‌سلم در ۹۰ کیلومتری جنوب غربی نهبندان (Arjmandzadeh and Santos, 2013) و مس‌چاه شلجمی در ۱۹۰ کیلومتری جنوب بیرجند (Arjmandzadeh et al., 2011) و مس-روی ماهور (Miri Beydokhti et al., 2015) گزارش شده است (شکل ۱). از این‌رو، اهمیت بررسی محدوده اکتشافی سیمرخ دو چندان شده است. به‌دلیل دور افتاده بودن منطقه اکتشافی سیمرخ، تاکنون بررسی‌های اکتشافی دقیقی در این منطقه انجام نشده است. هدف از این پژوهش، تهیه نقشه زمین‌شناسی با تأکید بر

1. CODES is the Australian Research Council (ARC) Centre of Excellence in Ore Deposits

2. ARC Centre of Excellence for Core to Crust Fluid Systems



شکل ۱. موقعیت کنسارهای مس پورفیری و اپی‌ترمال در بلوک لوت همراه با موقعیت محدوده اکتشافی سیمرغ (Karimpour et al., 2011)

Fig. 1. Location of Cu porphyry and epithermal deposits and Simorgh area in Lut block. (Karimpour et al., 2011)

بلور توف‌های سبز (توف آندزیتی)، ماسه سنگ‌های توفی، کوارتز لایت لاپیلی توف، توف ریولیتی و آندزیت است. (۲) توده‌های نیمه عمیق حدواسط با بافت پورفیری به شکل استوک‌های کوچک شامل دیوریت پورفیری و پیروکسن دیوریت پورفیری و دایک‌های اسیدی سفیدرنگ شامل گرانیت پورفیری و هورنبلند گرانودیوریت پورفیری که درون واحدهای قبلی نفوذ کرده‌اند. (۳) واحدهای آتشفشانی جوان شامل ریولیت تا هورنبلند ریولیت دارای کانی‌سازی سولفیدی که در مرکز محدوده قابل مشاهده هستند. (۴) برش‌های هیدروترمال که با وسعت حدود ۷۵۰ × ۴۰۰ متر مربع در قسمت مرکزی محدوده رخنمون دارند. در این پژوهش، توده‌های نفوذی نیمه عمیق، واحد ریولیت تا هورنبلند ریولیت و برش‌های گرمابی میزبان کانی‌سازی هستند و

زمین‌شناسی

طبق نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ ده‌سلم (چاه‌وک) (Griffis et al., 1992) و نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ نخیل‌آباد (آب سرد) (Babakhani et al., 1988) آندزیت تنها واحد سنگی است که در محدوده اکتشافی سیمرغ رخنمون دارد. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش، بخش قابل توجهی از سنگ‌های منطقه شامل واحدهای نفوذی نیمه عمیق حدواسط و اسیدی است که در همدیگر و در سنگ‌های آتشفشانی قدیمی تر نفوذ کرده‌اند. بر اساس روابط صحرائی و بررسی‌های میکروسکوپی انجام‌شده، واحدهای زمین‌شناسی موجود در منطقه را می‌توان به‌ترتیب سن به چهار بخش از قدیم به جدید به شرح زیر تقسیم کرد (شکل ۲):

(۱) واحدهای آتشفشانی قدیمی که قسمت زیادی از رخنمون‌های سنگی منطقه را به‌خود اختصاص داده‌اند و شامل

است. زمینه سنگ را بیشتر فلدسپات پتاسیم و کوارتز دانه‌ریز تشکیل داده‌اند. در زمینه نیز حدود ۴ درصد پیریت اکسید شده دیده می‌شود.

واحد هورنبلند گرانودیوریت پورفیری به شکل چند دایک سفید با عرض ۱ تا ۳ متر و طول ۵۰ تا ۵۰۰ متر در غرب منطقه با توپوگرافی تپه ماهوری و ملایم و با ابعاد حدود ۴۰ هزار متر مربع گسترش یافته است (شکل ۲). بافت این واحد پورفیری با زمینه دانه متوسط تا دانه‌ریز با حدود ۳۵ تا ۴۰ درصد فنوکریست است. کانی‌های مهم این واحد شامل ۳۰ درصد کوارتز، ۴۱ درصد پلاژیوکلاز، ۲۶ درصد فلدسپات پتاسیم و ۳ درصد هورنبلند است. زمینه سنگ را فلدسپات پتاسیم و کوارتز دانه‌ریز تشکیل داده‌اند. در زمینه سنگ حدود ۱ تا ۲ درصد پیریت اکسید شده دیده می‌شود.

توده پروکسن دیوریت پورفیری به شکل استوک‌های کشیده با امتداد شمال شرق - جنوب غرب بیشترین گسترش را در جنوب، شمال و شمال شرق منطقه دارد (شکل ۲). این توده در مجموع با وسعت حدود ۱/۵ کیلومتر مربع در سطح منطقه مورد بررسی با توپوگرافی نسبتاً هموار رخنمون دارد. بافت این واحد پورفیری با زمینه دانه متوسط و سری ایت است. کانی‌های مهم این واحد شامل ۴ درصد کوارتز، ۷۷ درصد پلاژیوکلاز، ۷ درصد فلدسپات پتاسیم و ۱۲ درصد پروکسن نوع اوژیت و دیوپسید است. حدود ۴ درصد بلورهای شکل دار مگنتیت در زمینه سنگ دیده می‌شود.

ریولیت تا هورنبلند ریولیت

جوان‌ترین واحدهای آتشفشانی با ترکیب ریولیت تا هورنبلند ریولیت با توپوگرافی ملایم و رنگ سفید تا قهوه‌ای روشن با وسعت حدود ۲۰۰×۱۰۰ متر مربع در مرکز منطقه (شکل ۳) رخنمون دارد. بافت این سنگ پورفیری با زمینه دانه‌ریز است. فنوکریست‌های تشکیل دهنده سنگ شامل ۵ تا ۷ درصد فلدسپات پتاسیم، ۳ تا ۴ درصد پلاژیوکلاز و ۱ تا ۲ درصد هورنبلند است. بقیه حجم سنگ را زمینه، شامل کانی‌های

دارای اهمیت زیادی نیز هستند، بنابراین در زیر به توضیح دقیق آنها پرداخته می‌شود.

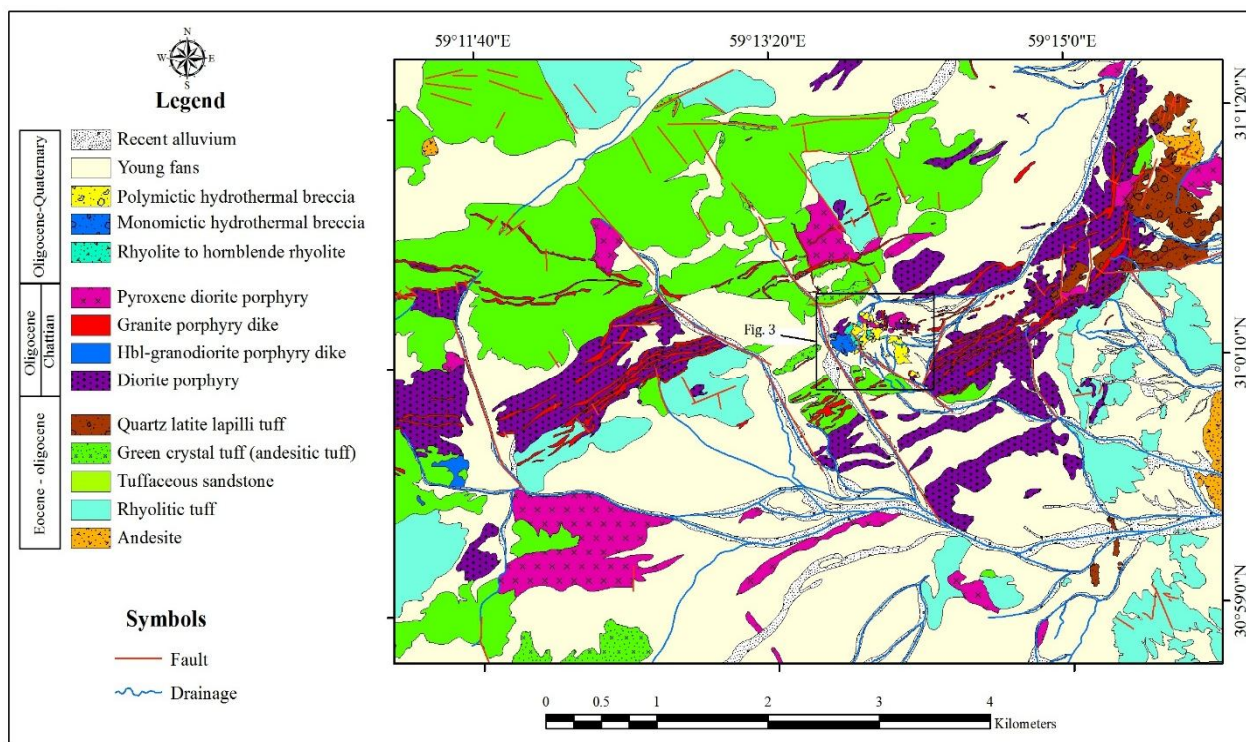
توده‌های نفوذی نیمه عمیق

توده‌های نفوذی نیمه عمیق موجود در این ناحیه عامل اصلی دگرسانی در منطقه هستند. این توده‌ها از نظر ترکیب و سن به سه نوع تقسیم می‌شوند: نوع اول، توده‌های نیمه عمیق حدواسط با ترکیب دیوریت پورفیری هستند. نوع دوم، دایک‌های سفیدرنگی هستند که با عرض حدود ۱ تا ۱۰ متر و طول بین ۱۰۰ متر تا ۳ کیلومتر در سطح منطقه به راحتی قابل مشاهده هستند و واحدهای آتشفشانی قدیمی‌تر و توده‌های دیوریت پورفیری را قطع می‌کنند، بنابراین آنها از نظر سنی جوان‌تر هستند. این دایک‌ها دارای ترکیب گرانتیت پورفیری و هورنبلند گرانودیوریت پورفیری هستند. در نقشه زمین‌شناسی این دایک‌ها با روند شمال شرقی - جنوب غربی در منطقه دیده می‌شوند (شکل ۲). نوع سوم، توده‌های پروکسن دیوریت پورفیری هستند که جوان‌ترین توده‌های نیمه عمیق موجود در منطقه نیز هستند. در زیر به توضیح این توده‌ها پرداخته می‌شود. توده دیوریت پورفیری به شکل استوک در سرتاسر منطقه پراکنده‌اند (شکل ۲). این توده در مجموع با وسعت حدود ۳ کیلومتر مربع در سطح منطقه سیمرخ با توپوگرافی نسبتاً هموار رخنمون دارد. بافت سنگ پورفیری با زمینه دانه‌ریز است. فنوکریست‌های تشکیل دهنده سنگ شامل ۳ درصد کوارتز، ۸۹ درصد پلاژیوکلاز، ۸ درصد فلدسپات پتاسیم است. ۵ درصد بلورهای شکل دار مگنتیت در زمینه دیده می‌شود.

واحد گرانتیت پورفیری به صورت دایک‌های سفید با توپوگرافی تپه ماهوری و ملایم با عرض ۱ تا ۱۰ متر و طول ۱۰۰ تا ۳ کیلومتر در غرب و شمال شرق منطقه در مجموع با ابعاد حدود ۱/۵ کیلومتر مربع گسترش یافته است (شکل ۲). بافت این واحد پورفیری با زمینه دانه متوسط تا دانه‌ریز با حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد فنوکریست است. کانی‌های مهم این واحد شامل ۲۵ درصد کوارتز، ۳۰ درصد پلاژیوکلاز و ۴۱ درصد فلدسپات پتاسیم

پیریت بین ۲ تا ۱۰ درصد در زمینه سنگ دیده می‌شوند.

دانه‌ریز کوارتز، فلدسپات پتاسیم و مقدار کمی پلاژیوکلاز همراه با دگرسانی سیلیسی تشکیل می‌دهد. بلورهای شکل‌دار



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده اکتشافی سیمرغ با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰

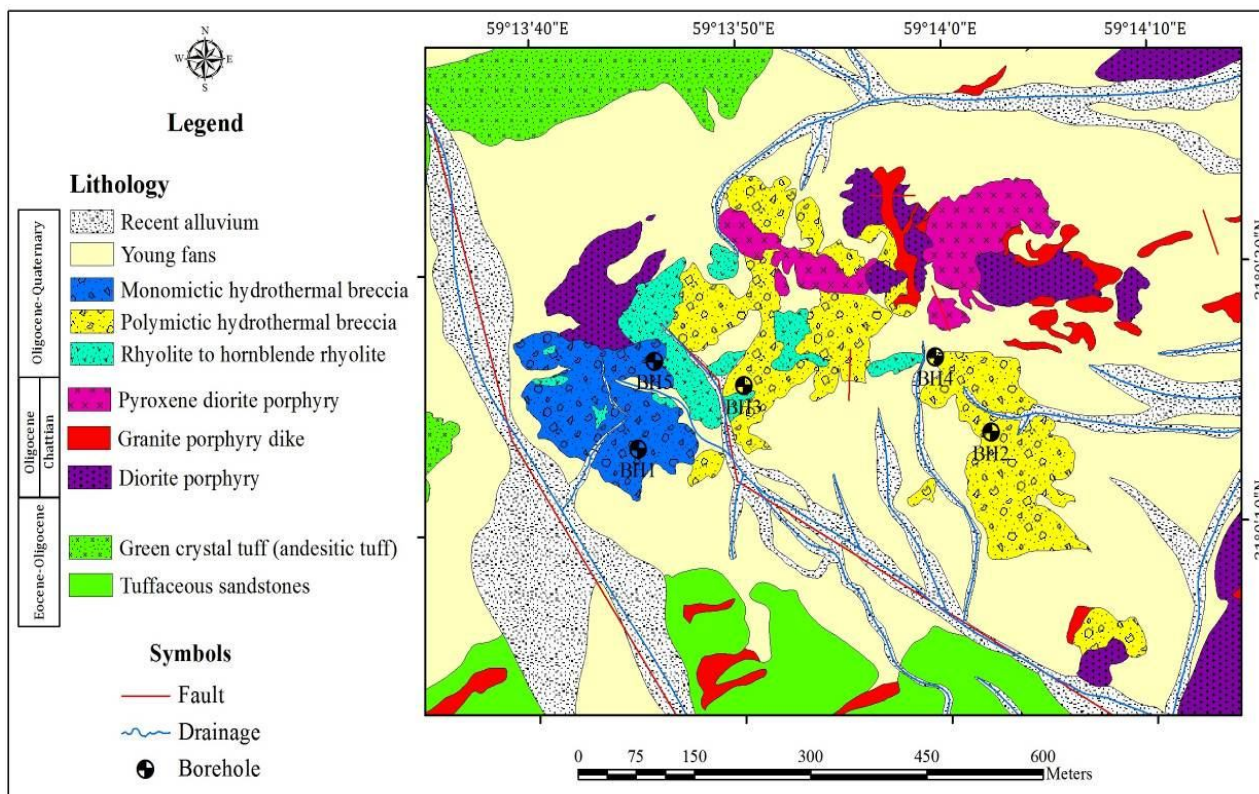
Fig. 2. Geological map of the Simorgh prospect area (Scale 1:10000)

دگرسانی

دگرسانی تمام واحدهای سنگی منطقه را تحت تأثیر قرارداده است. بر طبق مشاهدات صحرایی و بررسی‌های پنج‌گانه اکتشافی، ۱۱ نوع دگرسانی مختلف در محدوده سیمرغ شناسایی شده است که مهم‌ترین آنها دگرسانی کوارتز+ سریسیت+ پیریت، کربنات+ کوارتز+ سریسیت+ پیریت، پروپیلیتیک، آرژیلیک، سیلیسی و کربناته هستند (شکل ۵). در این بین دگرسانی‌های کوارتز+ سریسیت+ پیریت، کربنات+ کوارتز+ سریسیت+ پیریت و سیلیسی شدید+ کربناته که همراه با کانی‌سازی هستند، از اهمیت بیشتری برخوردارند. این دگرسانی‌ها برش‌های هیدروترمال و ریولیت و هورنبلند ریولیت‌های مرکز محدوده سیمرغ را تحت تأثیر قرار داده‌اند.

برش‌های گرمایی

در محدود اکتشافی سیمرغ به دلیل داشتن شرایط زمین‌شناسی و زمین‌ساختی فعال و حضور حجم عظیم سیالات گرمایی، انواع مختلفی از برش‌های گرمایی رخنمون دارند. این برش‌ها بر اساس دو عامل تنوع قطعات (مونومیکتیک یا پلی‌میکتیک بودن) و درصد قطعات نسبت به زمینه (غالب بودن قطعات یا غالب بودن زمینه) به چهار نوع برش مونومیکتیک قطعه غالب سفیدرنگ، برش مونومیکتیک قطعه غالب سبزرنگ، برش پلی‌میکتیک قطعه غالب و برش پلی‌میکتیک زمینه غالب تقسیم می‌شوند. در جدول ۱، به توضیح کامل ویژگی‌های پتروگرافی این برش‌ها پرداخته شده است. در شکل ۴-A، B، C و D انواع این برش‌ها نشان داده شده است.



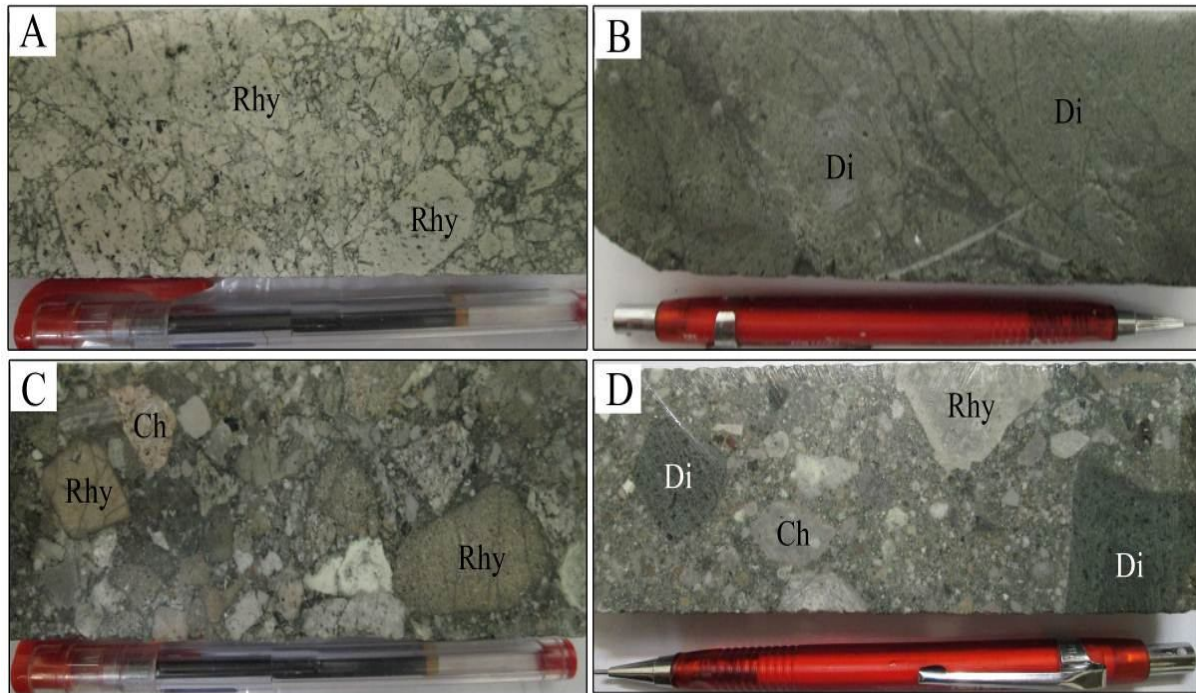
شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی قسمت مرکزی محدوده اکتشافی سیمرغ با مقیاس ۱:۱۰۰۰

Fig. 3. Geological map of the central part of the Simorgh prospect area (Scale 1:1000)

جدول ۱. مقایسه انواع مختلف برش‌های هیدروترمال موجود در محدوده اکتشافی سیمرغ

Table 1. Comparison of different types of hydrothermal breccias in the Simorgh prospect area

Type of hydrothermal breccia	fragment	Type of fragments	Type of matrix	Alteration
Green monomictic hydrothermal breccia with dominantly fragment	60 to 95	diorite porphyry and pyroxene diorite porphyry	Quartz, carbonate, sercite and less chlorite and iron oxide	Propylitic
Monomictic hydrothermal breccia with dominantly fragment	70 to 90	Rhyolite to hornblende rhyolite	Quartz, carbonate, sercite and less chlorite	Silicified + carbonate
Polymictic hydrothermal breccia with dominantly fragment	55 to 70	Rhyolite, diorite porphyry, andesite, tuff, quartz, chert	Carbonate, sercite, quartz and less chlorite, epidote and clay minerals	QSP and CQSP
Polymictic hydrothermal breccia with dominantly matrix	10 to 35	Rhyolite, diorite porphyry, andesite, tuff, quartz monzonite porphyry, quartz, chert	Carbonate, sercite, quartz and less chlorite, epidote and clay minerals	QSP



شکل ۴. انواع برش‌های هیدروترمال محدوده سیمرغ. A: برش هیدروترمال مونومیکتیک قطعه غالب سفیدرنگ، با بافت موزاییکی و ماتریکس کوارتز، کربنات، سریسیت و کلریت (دگرسانی سیلیسی + کربناته) و با ۸۰ درصد قطعه. B: برش هیدروترمال مونومیکتیک سبزرنگ (دیوریت برشی) با دگرسانی پروپیلیتیک و ۹۵ درصد قطعه، C: برش هیدروترمال پلی‌میکتیک قطعه غالب با دگرسانی QSP و ۷۰ درصد قطعه و D: برش هیدروترمال پلی‌میکتیک زمینه غالب با دگرسانی QSP و ۳۰ درصد قطعه. Di: دیوریت پورفیری، Ch: چرت، Rhy: ریولیت. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 4. Types of hydrothermal breccias in the Simorgh area. A: White monomictic hydrothermal breccia with dominantly fragment and with mosaic texture and quartz, carbonate, sericite and chlorite matrix (Silicified + carbonate alteration) and with 80% fragments, B: Green monomictic hydrothermal breccia (brecciated diorite) with propylitic alteration and 95% fragments, C: Polymictic hydrothermal breccia with dominantly fragments with QSP alteration and 70% fragments, and D: Polymictic hydrothermal breccia with dominantly matrix with QSP alteration and 30% fragments. Di: diorite porphyry. Ch: chert, Rhy: rhyolite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010)

کانی‌سازی

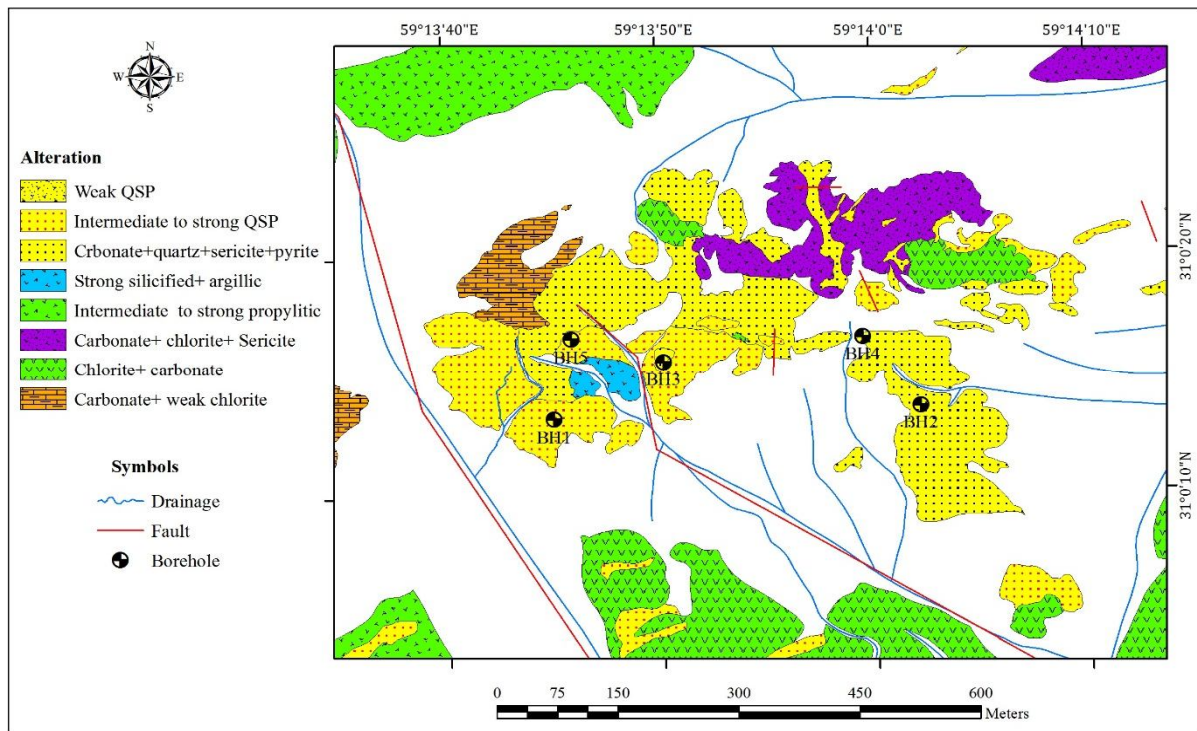
در منطقه اکتشافی سیمرغ، انواع کانی‌سازی به شکل‌های رگچه‌ای، پراکنده و برش هیدروترمال در زون‌های دگرسانی QSP، CQSP و سیلیسی + کربناته دیده می‌شود. در سطح به دلیل شدت اکسیداسیون، بخشی از سولفیدهای اولیه اکسید شده‌اند و در بیشتر موارد اکسیدهای آهن مانند گوتیت، ژاروسیت و لیمونیت در زون‌های کانی‌سازی دیده می‌شود. در زیر انواع مختلف کانی‌سازی رگچه‌ای، پراکنده و کانی‌سازی درون برش‌های هیدروترمال توضیح داده می‌شود.

کانی‌سازی رگچه‌ای

کانی‌سازی رگچه‌ای به میزبانی دایک‌های گرانیت پورفیری و گرانودیوریت پورفیری، ریولیت و هورنبلند ریولیت و برش‌های هیدروترمال در سرتاسر منطقه اکتشافی سیمرغ دیده می‌شود. رگچه‌های مهم دایک‌های گرانیت پورفیری و گرانودیوریت پورفیری شامل رگچه‌های کوارتز-پیریت و رگچه‌های کوارتز هستند. در این توده‌ها رگچه‌های مویی کوارتز توسط رگچه‌های کوارتز-پیریت قطع می‌شوند بنابراین رگچه‌های کوارتز-پیریت جوان‌تر از رگچه‌های کوارتز است (شکل ۶- A). پیریت تنها کانی سولفیدی این رگچه‌هاست و به‌طور کامل به گوتیت و

دیده شده است. در برش‌های هیدروترمال انواع رگچه‌های کوارتز، کوارتز-پیریت، کوارتز-کربنات، کوارتز-کربنات-پیریت، کوارتز-کلریت-پیریت، کربنات-کربنات، کربنات-پیریت وجود دارد. در شکل ۶- C، یک برش هیدروترمال پلی‌میکتیک زمینه غالب با رگچه‌های کوارتز و ژیس قابل مشاهده است. در برش‌های هیدروترمال، ضخامت رگچه‌ها بین ۱۰ میکرون تا ۴ میلی‌متر متغیر است. میزان تراکم رگچه‌ها نیز از ۱۰ تا ۵۰ رگچه در واحد سطح متغیر است.

ژاروسیت تبدیل شده است. در ریولیت و هورنبلند ریولیت واقع در مرکز محدوده سیمرغ نیز انواع رگچه‌های کوارتز، کوارتز-پیریت، کوارتز-کربنات، کوارتز-کربنات-پیریت، کربنات، گالن-کوارتز-پیریت، کالکوپیریت، کوارتز-کربنات-پیریت، رگچه گالن-کوارتز-پیریت-کالکوپیریت را قطع می‌کند؛ بنابراین از آن جوان‌تر است (شکل ۶- B). تمام کانی‌های سولفیدی موجود در این رگچه‌ها پیریت است و فقط مقدار بسیار جزئی گالن و کالکوپیریت در این رگچه‌ها



شکل ۵. نقشه دگرسانی قسمت مرکزی محدوده اکتشافی سیمرغ با مقیاس ۱:۱۰۰۰

Fig. 5. Alteration map of the central part of the prospect Simorgh area (Scale 1:1000)

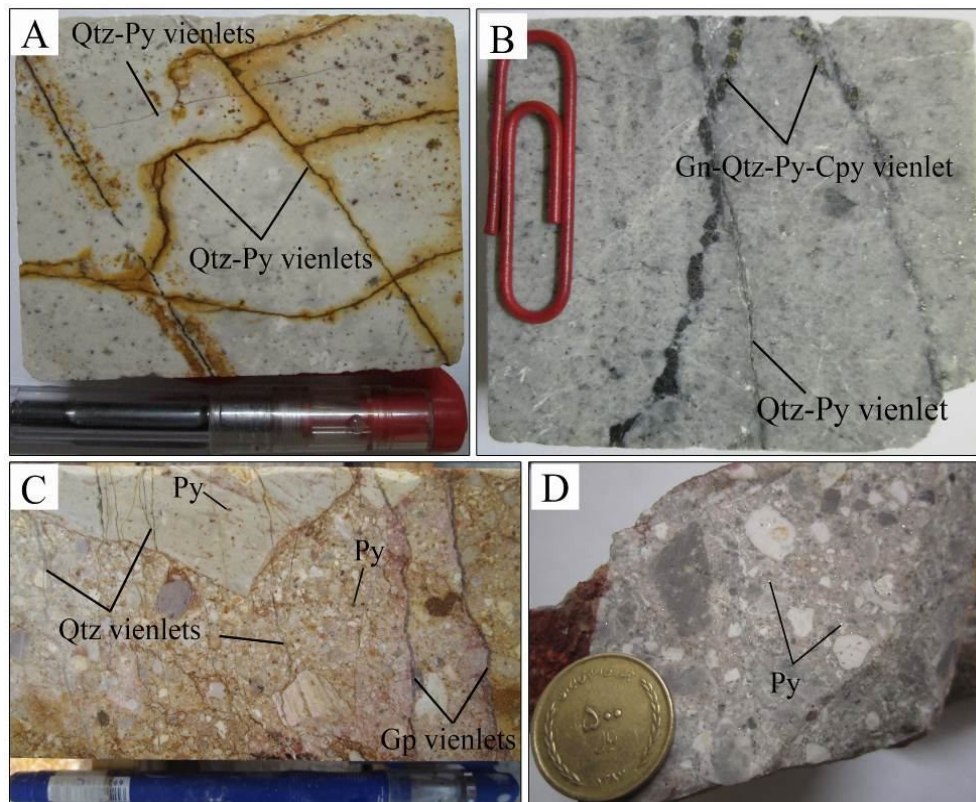
در این واحدهاست. در دایک‌های گرانیت پورفیری و گرانودیوریت پورفیری، میزان پیریت بین ۱ تا ۵ درصد متغیر است (شکل ۶- A). اندازه بلورهای پیریت از ۱۰ میکرون تا ۲ میلی‌متر در تغییر است. این پیریت‌ها به‌طور کامل به گوتیت و ژاروسیت تبدیل شده‌اند. در گمانه‌های اکتشافی، در زمینه واحد

کانی‌سازی پراکنده

کانی‌سازی سولفید پراکنده نیز مانند کانی‌سازی رگچه‌ای در دایک‌های گرانیت پورفیری و گرانودیوریت پورفیری، در واحد ریولیت و هورنبلند ریولیت و در برش‌های هیدروترمال در منطقه سیمرغ دیده می‌شود. پیریت تنها کانی‌سازی سولفیدی پراکنده

کانی‌سازی پراکنده پیریت وجود دارد (شکل ۶- C و D). در این برش‌ها کانی‌سازی پیریت بین ۲ تا ۱۵ درصد و اندازه آنها بین ۱۰ میکرون تا ۵ میلی‌متر متغیر می‌کند.

ریولیت و هورنبلند ریولیت بین ۰/۵ تا ۱۰ درصد پیریت پراکنده مشاهده می‌شود (شکل ۶- B). اندازه این پیریت‌ها از ۵۰۰ میکرون تا ۳/۵ میلی‌متر متغیر است. در برش‌های هیدروترمال نیز



شکل ۶. انواع سنگ‌ها با کانی‌سازی رگچه‌ای در منطقه سیمرغ. A: گرانیت پورفیری با رگچه‌های کوارتز و کوارتز- پیریت. رگچه کوارتز- پیریت جوان‌تر از رگچه کوارتز است. پیریت در رگچه کوارتز- پیریت اکسید شده است. در زمینه این سنگ کانی‌سازی پراکنده پیریت نیز وجود دارد. B: ریولیت با رگچه‌های کوارتز- پیریت و گالن- کوارتز- پیریت- کالکوپیریت. رگچه کوارتز- پیریت از رگچه گالن- کوارتز- پیریت- کالکوپیریت جوان‌تر است؛ زیرا آن را قطع می‌کند. کانی‌سازی پراکنده پیریت در زمینه این سنگ وجود دارد. C: برش هیدروترمال پلی‌میکتیک زمینه غالب با رگچه‌های کوارتز و ژپس. در زمینه این برش کانی‌سازی پراکنده پیریت دیده می‌شود. در بالای این تصویر قطعه‌ای ریولیتی وجود دارد که کانی‌سازی پراکنده پیریت و چند رگچه کوارتز در آن قابل مشاهده است و D: برش هیدروترمال پلی‌میکتیک زمینه غالب با کانی‌سازی پراکنده پیریت در زمینه برش. Cpy: کالکوپیریت، Gn: گالن، Gp: ژپس، Py: پیریت، Qtz: کوارتز. علایم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 6. Type of rocks with veinlet mineralization in the Simorgh area. A: Granite porphyry with quartz and quartz-pyrite vienlets. Quartz-pyrite veinlet is younger than quartz veinlet. Pyrite in the quartz-pyrite veinlets are oxidized. There is also disseminated pyrite mineralization in background, B: Rhyolite with quartz-pyrite and galena-quartz-pyrite-chalcocopyrite veinlets. Quartz-pyrite veinlet is younger than galena-quartz-pyrite-chalcocopyrite veinlet because interrupts it. There is disseminated pyrite mineralization in background, C: Hydrothermal polymictic breccia with dominantly matrix with quartz and gypsum veinlets. Pyrite mineralization is visible in matrix of this breccia. There is a rhyolite fragment at the top of this image with disseminated pyrite mineralization and several quartz vienlets, and D: Hydrothermal polymictic breccia with dominantly fragment with disseminated pyrite mineralization into matrix. Cpy: chalcocopyrite, Gn: galena, Gp: gypsum, Py: pyrite, Qtz: quartz. Abbreviations after Whitney and Evans (2010)

کانی‌سازی در برش هیدروترمال

سه شکل کانی‌سازی در برش هیدروترمال واقع در مرکز محدوده سیمرغ شناسایی شده است. کانی‌سازی رگچه‌ای، کانی‌سازی پراکنده و کانی‌سازی درون قطعات برشی، سه شکل این کانی‌سازی هستند. در بخش قبلی کانی‌سازی رگچه‌ای و پراکنده در زمینه برش‌ها توضیح داده شد. کانی‌سازی درون قطعات برشی خود به دو نوع کانی‌سازی رگچه‌ای و پراکنده تقسیم می‌شوند (شکل ۶- C). در بیشتر موارد قطعات ریولیتی و قطعات دیوریت پورفیری در این برش‌ها میزبان کانی‌سازی پراکنده پیریت هستند. تقریباً ۹۰ درصد قطعات ریولیتی و ۵۰

درصد قطعات دیوریت پورفیری موجود در این برش‌ها دارای کانی‌سازی پراکنده پیریت هستند. پیریت تنها کانی سولفیدی موجود در این قطعات است. قطعات ریولیتی بین ۱ تا ۵ درصد و قطعات دیوریتی بین ۱ تا ۱۵ درصد پیریت دارند. برخی قطعات ریولیتی دارای رگچه‌های کوارتز و کوارتز پیریت هستند (شکل ۶- C). این رگچه‌ها قدیمی‌ترین فاز کانی‌سازی رگچه‌ای در برش‌های هیدروترمال هستند. در شکل ۷، توالی همیافت کلی و رابطه زمانی کانی‌های فلزی و کانی‌های حاصل از دگرسانی در منطقه سیمرغ به تفکیک زون‌های دگرسانی نشان داده شده است.

Time	Late → Early						
	QSP	CQSP	Silicified+ argillic	Silicified+ carbonate	CCS	Propylitic	Oxidized
Quartz					
Calcite						
Sericite						
Pyrite				
Kaolinite					
Chlorite					
Epidote							
Chalcopyrite						
Galena						
Hematite						
Goetite						
Gypsum						

QSP: quartz+ sericite+ pyrite, CQSP: carbonate+ quartz+ sericite+ pyrite, CCS: carbonate+ quartz+ sericite+ pyrite

شکل ۷. توالی همیافت کانی‌های فلزی و کانی‌های حاصل از دگرسانی در منطقه سیمرغ

Fig. 7. The paragenetic sequence of the metallic and altered minerals in the Simorgh area

ژئوشیمی اکتشافی

برای بررسی ژئوشیمی سطحی بر مبنای داده‌های خرده‌سنگی سعی شده است که نمونه‌ها از زون‌های کانی‌سازی و مناطقی با

بیشترین تراکم رگچه و درصد اکسید آهن، انتخاب شود. در گمانه‌های اکتشافی، نمونه‌ها از محل‌هایی با بیشترین مقدار کانی‌سازی و با فواصل دو متری برداشت شده است. بر این

کمتر از ۴ تا ۵۰ گرم در تن متغیر است. بالاترین مقدار آرسنیک در ارتباط با واحد برش هیدروترمال پلی‌میکتیک زمینه غالب است که در مرکز محدوده واقع شده است و دارای دگرسانی سیلیسی شدید + آرژلیک است. مقدار عنصر آرسنیک در گمانه‌های اکتشافی بین ۲ تا ۲۰۷ گرم در تن متغیر است (شکل‌های ۸ تا ۱۲). بیشترین میزان این عنصر در گمانه چهارم (شکل‌های ۸ تا ۱۲) در واحد برش هیدروترمال مونومیکتیک قطعه غالب سبز رنگ با دگرسانی پروپیلیتیک اندازه‌گیری شده است.

عنصر طلا: مقدار ناهنجاری این عنصر در نمونه‌های سطحی بین ۵ تا ۹۳ میلی‌گرم در تن متغیر است. بیشترین میزان طلا بر برش هیدروترمال پلی‌میکتیک زمینه غالب با دگرسانی سیلیسی شدید + آرژلیک منطبق است که در مرکز محدوده رخنمون دارد. میزان عنصر طلا در گمانه‌های اکتشافی نیز بین کمتر از ۱ تا ۴۰ میلی‌گرم در تن متغیر است (شکل‌های ۸ تا ۱۲). بیشترین میزان این عنصر در واحد برش هیدروترمال مونومیکتیک قطعه غالب سفید رنگ با دگرسانی سیلیسی + کربناته، در گمانه پنجم دیده شده است.

اساس، بی‌هنجاری عناصر در محدوده اکتشافی سیمرخ به شرح زیر است:

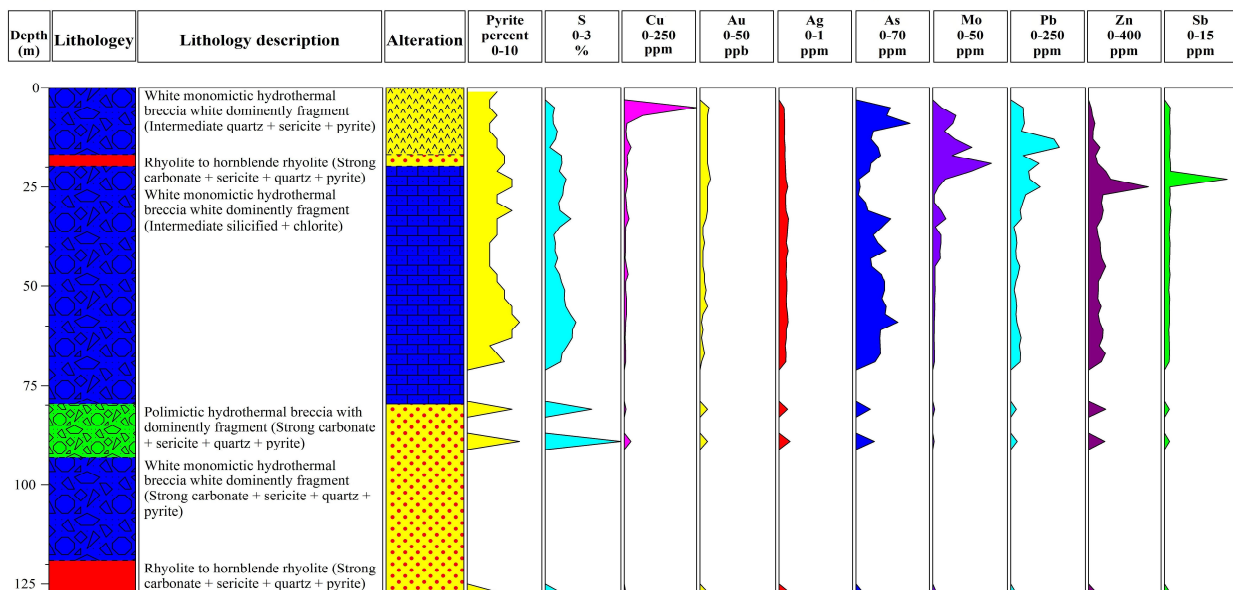
عنصر مس: ناهنجاری عنصر مس در نمونه‌های خرده‌سنگی بین ۲ تا ۱۶ گرم در تن و در گمانه‌های اکتشافی نیز بین ۲ تا ۲۴۰ گرم در تن متغیر است (شکل‌های ۸ تا ۱۲). بالاترین مقدار مس در گمانه اول در برش هیدروترمال مونومیکتیک قطعه غالب سفید رنگ با دگرسانی QSP اندازه‌گیری شده است.

عنصر مولیبدن: تغییرات عنصر مولیبدن در نمونه‌های خرده‌سنگی بین ۱ تا ۳۴ گرم در تن است. بیشترین میزان مولیبدن بر برش هیدروترمال پلی‌میکتیک زمینه غالب منطبق است که در مرکز منطقه دیده می‌شود و متحمل دگرسانی سیلیسی شدید + آرژلیک شده است. همچنین میزان عنصر مولیبدن در گمانه‌های اکتشافی بین کمتر از ۰/۵ تا ۴۹ گرم در تن متغیر است (شکل‌های ۸ تا ۱۲). بیشترین میزان این عنصر در برش هیدروترمال مونومیکتیک زمینه غالب سفید رنگ با دگرسانی CQSP دیده شده است.

عنصر آرسنیک: مقدار آرسنیک در نمونه‌های خرده‌سنگی بین

Geological log borehole No.BH1 in Simorgh prospecting area

Project name: Simorgh prospecting area **Location:** X: 712820, Y: 3432142 **Inclination:** -75 **Scale:** 1:2500 **Lagger:** Reza Borabadi
Bore hole number: BH1 **Elevation:** 986 **Orientation:** N 270 **Depth:** 127.5 **Date:** 2014

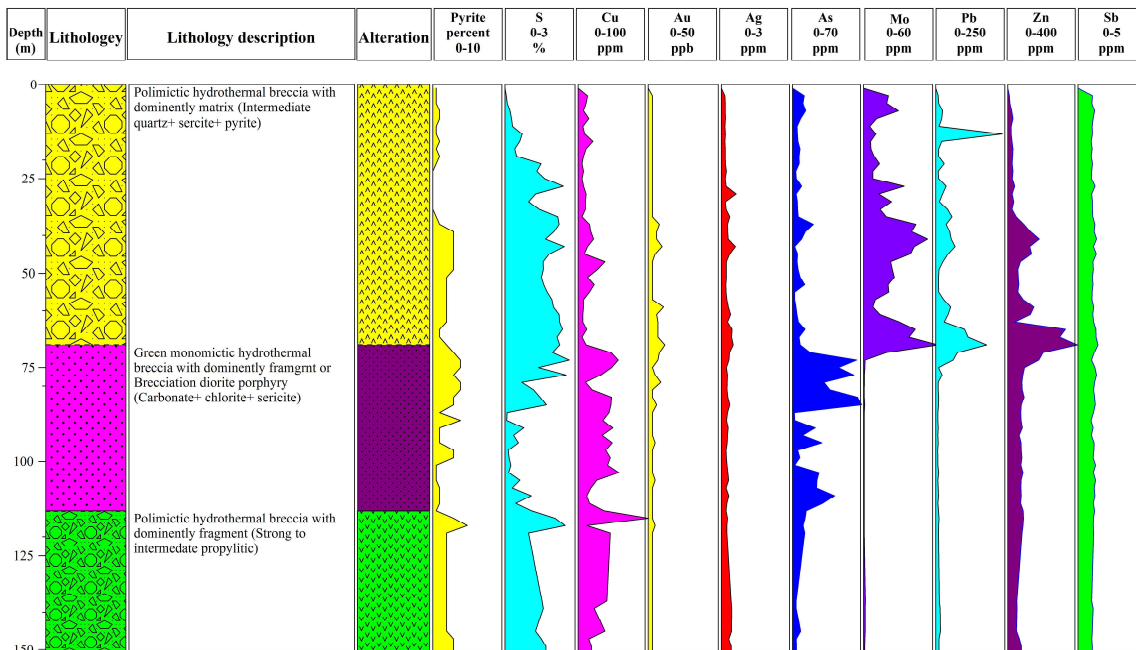


شکل ۸. زمین‌شناسی، دگرسانی و ژئوشیمی گمانه اول (BH1) در منطقه اکتشافی سیمرخ

Fig. 8. Geology, alteration, and geochemistry in the first borehole (BH1) in Simorgh prospect area

Geological log borehole No.BH2 in Simorgh prospecting area

Project name: Simorgh prospecting area **Location:** X: 713275, Y: 3432162 **Inclination:** -90 **Scale:** 1:2500 **Lagger:** Reza Borabadi
Bore hole unnumber: BH2 **Elevation:** 950 **Orientation:** N 0 **Depth:** 150.60 **Date:** 2014

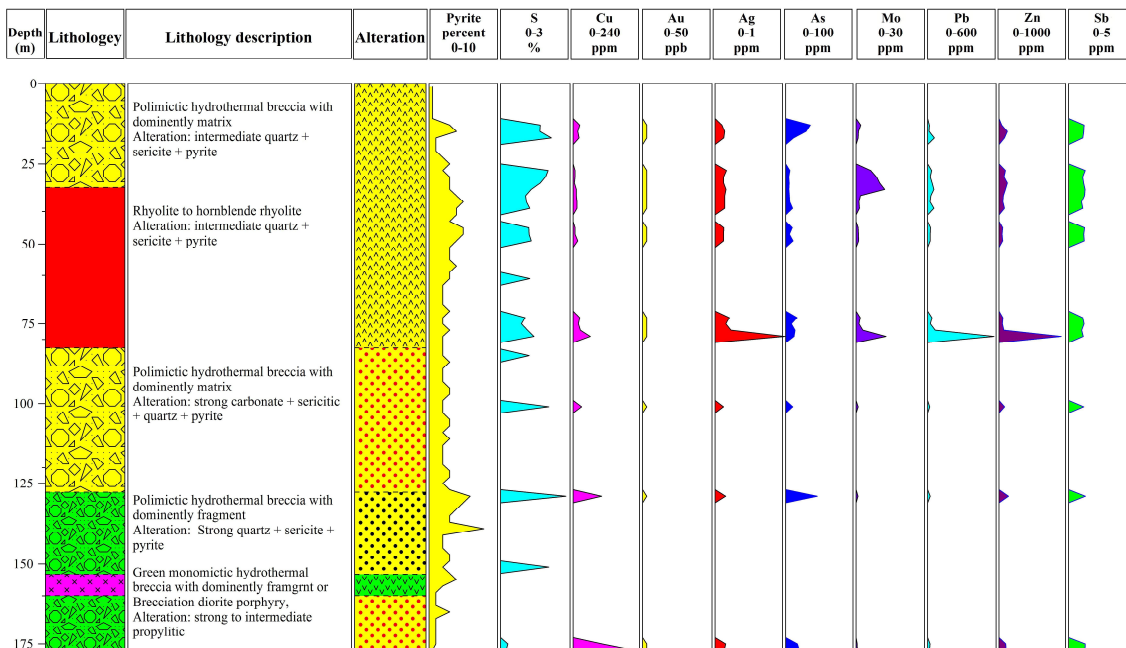


شکل ۹. زمین‌شناسی، دگرسانی و ژئوشیمی گمانه دوم (BH2) در منطقه اکتشافی سیمرغ

Fig. 9. Geology, alteration and geochemistry in the second borehole (BH2) in Simorgh prospect area

Geological log borehole No.BH3 in Simorgh prospecting area

Project name: Simorgh prospecting area **Location:** X: 712956, Y: 3432217 **Inclination:** -90 **Scale:** 1:500 **Lagger:** Reza Borabadi
Bore hole unnumber: BH3 **Elevation:** 959 **Orientation:** N 0 **Depth:** 177.8 **Date:** 2014

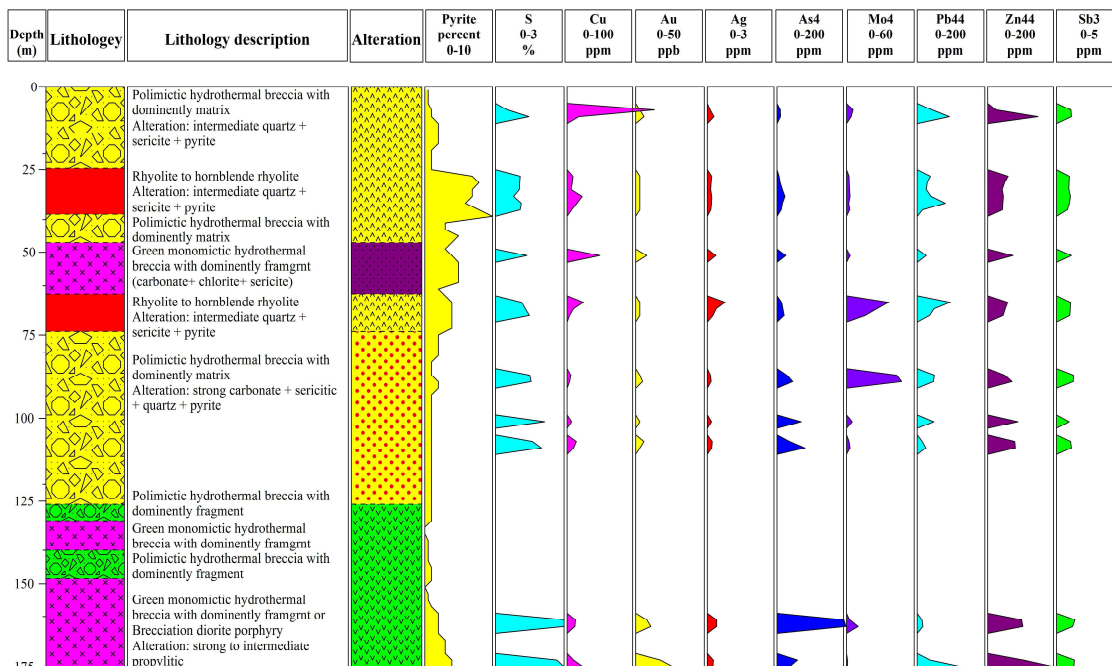


شکل ۱۰. زمین‌شناسی، دگرسانی و ژئوشیمی گمانه سوم (BH3) در منطقه اکتشافی سیمرغ

Fig. 10. Geology, alteration and geochemistry in the third borehole (BH3) in Simorgh prospect area

Geological log borehole No.BH4 in Simorgh prospecting area

Project name: Simorgh prospecting area Location: X: 713203, Y: 34322151 Inclination: -90 Scale: 1:3000 Lager: Reza Borabadi
 Bore hole number: BH4 Elevation: 949 Orientation: N 0 Depth: 177.80 Date: 2014

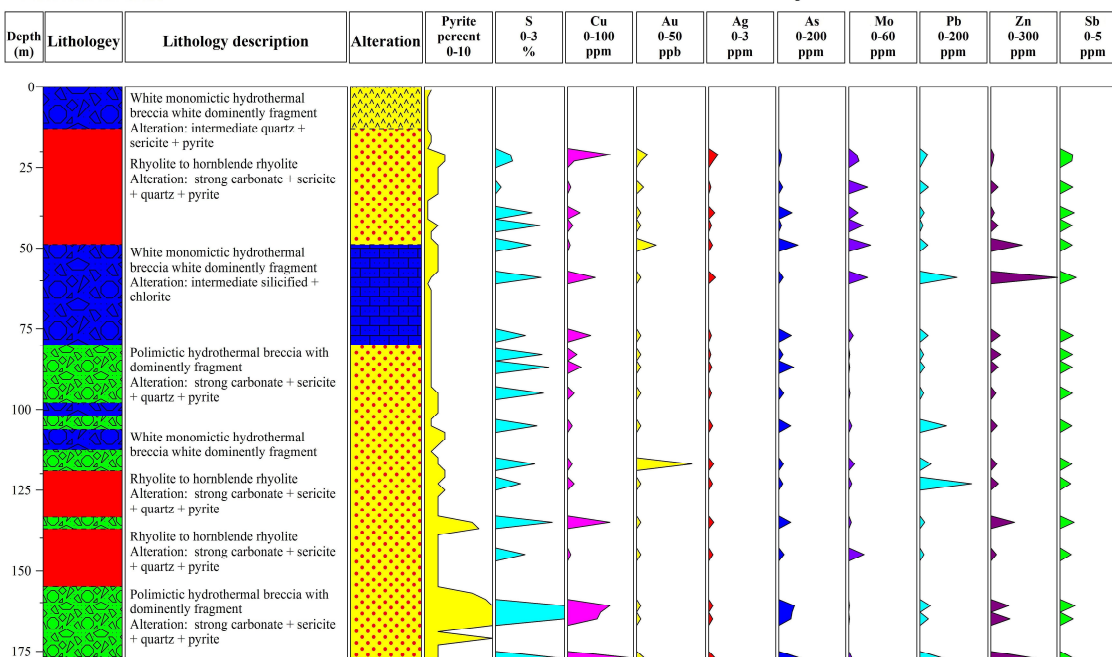


شکل ۱۱. زمین‌شناسی، دگرسانی و ژئوشیمی گمانه چهارم (BH4) در منطقه اکتشافی سیمرغ

Fig. 11. Geology, alteration and geochemistry in the fourth borehole (BH4) in Simorgh prospect area

Geological log borehole No.BH5 in Simorgh prospecting area

Project name: Simorgh prospecting area Location: X: 712841, Y: 3432246 Inclination: -90 Scale: 1:3000 Lager: Reza Borabadi
 Bore hole number: BH5 Elevation: 950 Orientation: N 0 Depth: 177.80 Date: 2014



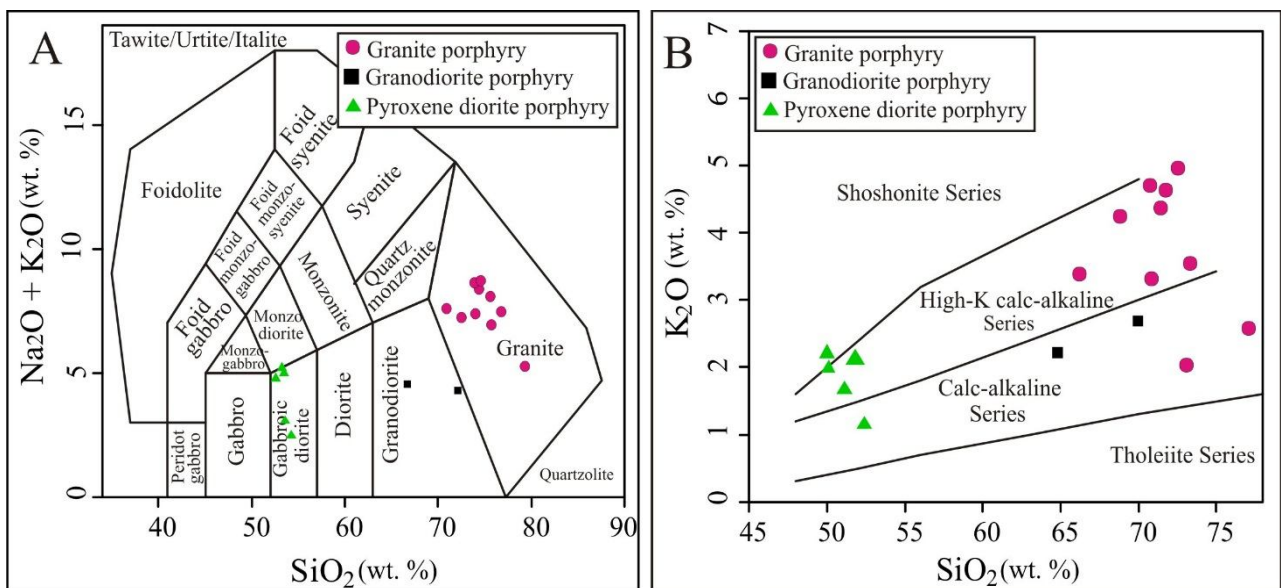
شکل ۱۲. زمین‌شناسی، دگرسانی و ژئوشیمی گمانه چهارم (BH5) در منطقه اکتشافی سیمرغ

Fig. 12. Geology, alteration and geochemistry in the fifth borehole (BH5) in Simorgh prospect area

شکل ۱۳-B ماهیت کالک آلکان تا کالک آلکان پتاسیم بالا را نشان می‌دهند (Peccerillo and Taylor, 1976). بر مبنای نمودار نسبت مولی $Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$ در برابر $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ (Maniar and Piccoli, 1989) توده‌های نفوذی بالا، محدوده متآلومینوس را نشان می‌دهند (شکل ۱۴-A).

ژئوشیمی توده‌های نفوذی

اکسیدهای اصلی: از مجموع ۱۱۲ نمونه سنگی برداشت شده، تعداد ۱۷ نمونه از توده‌های نیمه‌عمیق منطقه سیمرغ با کمترین دگرسانی برای آنالیز اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و نادر خاکی انتخاب شد. توده‌های نیمه‌عمیق منطقه سیمرغ در نمودار شکل ۱۳-A در محدوده گرانیت، گرانودیوریت و دیوریت قرار می‌گیرند (Middlemost, 1985). این توده‌ها در نمودار



شکل ۱۳. A: نمودار طبقه‌بندی سنگ‌های آذرین درونی بر اساس نسبت $K_2O + Na_2O$ در مقابل SiO_2 (Middlemost, 1985) و B: نسبت K_2O به SiO_2 در توده‌های نفوذی منطقه سیمرغ (Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 13. A: Diagram of classification of intrusive igneous rocks based on the $Na_2O + K_2O$ ratio vs. SiO_2 (Middlemost, 1985), and B: The ratio of SiO_2 to K_2O in the intrusive units of the Simorgh area (Peccerillo and Taylor, 1976)

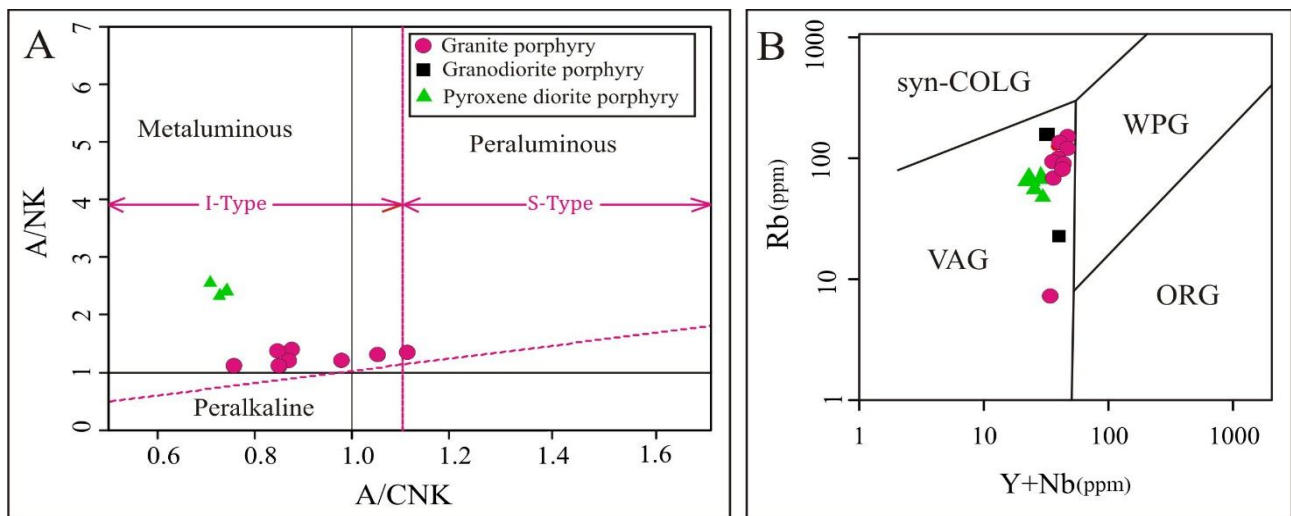
خاکی بهنجارشده نسبت به ترکیب کندریت (Boynton, 1984)، غنی‌شدگی قابل توجهی از عناصر LREE نسبت به HREE دیده می‌شود (شکل ۱۵-A). این روند غنی‌شدگی شاخص مذاب‌های تشکیل شده در زون‌های فرورانش است (Helvacı et al., 2009; Asiabanha et al., 2012). توده‌های پیروکسن دیوریت پورفیری نسبت به دایک‌های گرانیت پورفیری و گرانودیوریت پورفیری الگوی عناصر نادر خاکی، غنی‌شدگی کمتری از LREE را نشان می‌دهد. روند موازی در الگوی عناصر نادر خاکی توده‌های نفوذی منطقه

چنان‌که در نمودار چپل و وایت (Chappell and White, 2001) مشاهده می‌شود، توده‌های نیمه‌عمیق سیمرغ در محدوده گرانیتوئیدهای نوع I قرار می‌گیرند (شکل ۱۴-A). توده‌های نفوذی سیمرغ در نمودار جایگاه زمین‌ساختی (Pearce et al., 1984) در محدوده گرانیتوئیدهای کمان آتشفشانی واقع می‌شوند (شکل ۱۴-B).

عناصر فرعی و خاکی نادر: برای بررسی عناصر فرعی و نادر خاکی، نمودار عنکبوتی توده‌های نفوذی منطقه سیمرغ نسبت به کندریت و گوشته اولیه ترسیم شده است. در نمودار عناصر نادر

2004). در نمودارهای ترسیم‌شده آنومالی منفی واضح و روشنی از عناصر Ti, Nb, P دیده می‌شود که آنومالی منفی Ti منعکس‌کننده حضور Ti در ساختمان کانی‌هایی مانند تیتانومگنیتیت و ایلمنیت است. کانی‌های تیتاندار اگر در ماگمای مادر در محل مخزن باقی‌مانده باشند، آنومالی منفی از Ti را ایجاد می‌کنند. در ماگماتیسیم‌های مرتبط با زون‌های فرورانش فوگاسیته بالای اکسیژن، باعث تهی‌شدگی Ti می‌شود. در زون‌های فرورانش، هنگامی که فوگاسیته اکسیژن بالا باشد، دمای زیادی لازم است تا فازهای حاوی Ti وارد فاز مذاب مشتق‌شده از سنگ‌های منطقه فرورانش شود (Edward et al., 1994). به همین دلیل این آنومالی در مناطق فرورانش ایجاد می‌شود.

بیانگر تشابه فرایندهای ماگمایی در حین تشکیل بوده است (شکل ۱۵-A). در نمودار نرمالیزه‌شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)، غنی‌شدگی در عناصر LILE مانند Cs, Rb, K و Sr نسبت به HFSE (Ti, Nb, P) در تمام نمونه‌ها دیده می‌شود (شکل ۱۵-B). این غنی‌شدگی از عناصر LILE نسبت به HFSE می‌تواند مرتبط با مناطق فرورانش باشد؛ چون عناصر LILE قابلیت انحلال بیشتری در سیالات دارند. بنابراین در هنگام فرورانش سیالات آزادشده از لیتوسفر فرورونده، باعث غنی‌شدگی در عناصر LILE می‌شود (Wilson, 1989; Rollinson, 1993; Gill, 2010). همچنین درجه پایین ذوب‌بخشی، غنی‌شدگی از عناصر LILE را نسبت به HFSE ایجاد می‌کند (Srivastava and Singh, 2004).



شکل ۱۴. A: نمودار $Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O)$ در مقابل $Al_2O_3 / (CaO + K_2O + Na_2O)$ (Maniar and Piccoli, 1989). خط $A/CNK = 1.1$ جدا می‌کند I (A/CNK < 1.1) و S (A/CNK > 1.1) را از یکدیگر جدا می‌کند (Chappell and White, 2001) و B: نمایش توده‌های نفوذی سیمرغ در نمودار جایگاه زمین‌ساختی، (Pearce et al., 1984)

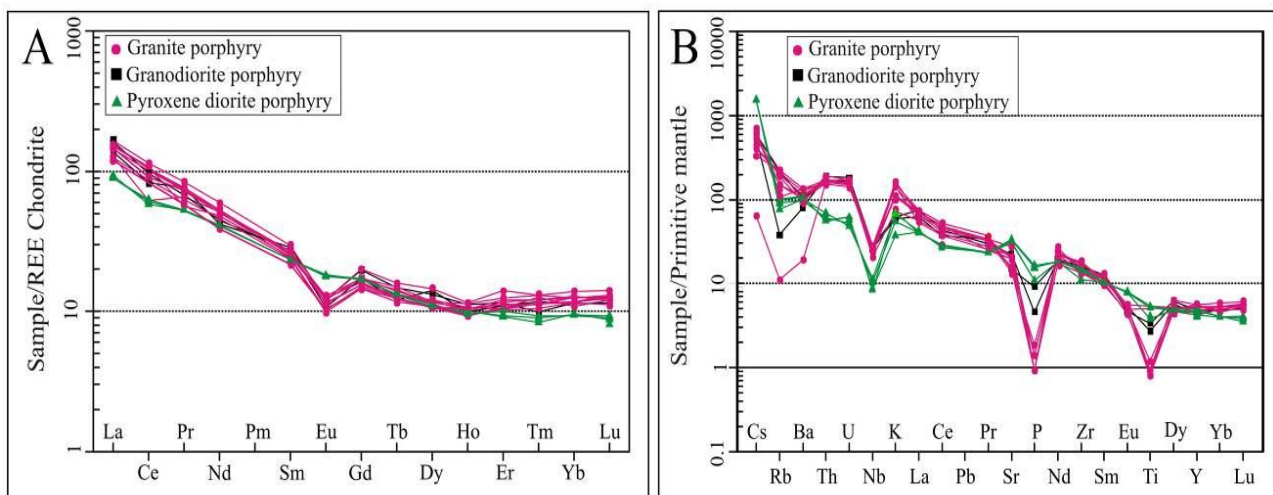
Fig. 14. A: Diagram of $Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O)$ vs. $Al_2O_3 / (CaO + K_2O + Na_2O)$ (Maniar and Piccoli, 1989). Line $A/CNK = 1.1$ separates I type ($A/CNK < 1.1$) and S type ($A/CNK > 1.1$) (Chappell and White, 2001), and B: The display of the Simorgh intrusive units in the tectonic setting diagram (Pearce et al., 1984)

2003). مقادیر منفی Nb همچنین می‌تواند ناشی از رخداد تهی‌شدگی قبلی در سنگ مخزن گوشته باشد (Gust et al., 1997; Walker et al., 2001). مقادیر بالای Sr و مقادیر پایین Ta, Nb و Ti ممکن است مربوط به حضور هورنبلند،

در نمودار نرمالیزه‌شده نسبت به گوشته اولیه آنومالی منفی از Nb مشاهده می‌شود (شکل ۱۵-B). این آنومالی شاخص مناطق فرورانش بوده و نشان‌دهنده نقش پوسته قاره‌ای در فرایندهای ماگمایی است (Saunders et al., 1992; Nagudi et al., 2004).

(Peters et al., 2008). مقدار Eu/Eu^* در واحدهای نیمه عمیق منطقه سیمرخ بین ۰/۴۹ تا ۰/۹۱ متغیر است و بنابراین عنصر Eu آنومالی منفی را نشان می‌دهد (شکل ۱۵-A) که می‌تواند شاهدهی بر حضور جزئی پلاژیوکلاز در منشأ باشد (Tepper et al., 1993).

اکسیدهای آهن-تیتان مانند روتیل و ایلمنیت و نبود پلاژیوکلاز قابل توجه در منشأ باشد (Martin, 1999). نسبت $(La/Yb)_N$ در توده‌های نیمه عمیق منطقه بین ۹/۳ تا ۱۴/۵ متغیر است. این مقادیر کم در تمامی نمونه‌ها به همراه الگوی عناصر REE ناشی از کم‌بودن گارنت در خاستگاه است



شکل ۱۵. A: نمودار نرمالیزه شده عناصر نادر خاکی نسبت به کندریت برای توده‌های نیمه عمیق سیمرخ (Boynton, 1984) و B: نمودار فراوانی عناصر جزئی و کمیاب نرمالیزه شده نسبت به گوشته اولیه برای توده‌های نیمه عمیق سیمرخ (Sun and McDonough, 1989)

Fig. 15. A: Chondrite normalized REE patterns for Simorgh sub-volcanic rocks (Boynton, 1984), and B: Primitive mantle normalized trace element pattern for Simorgh sub-volcanic rocks (Sun and McDonough, 1989)

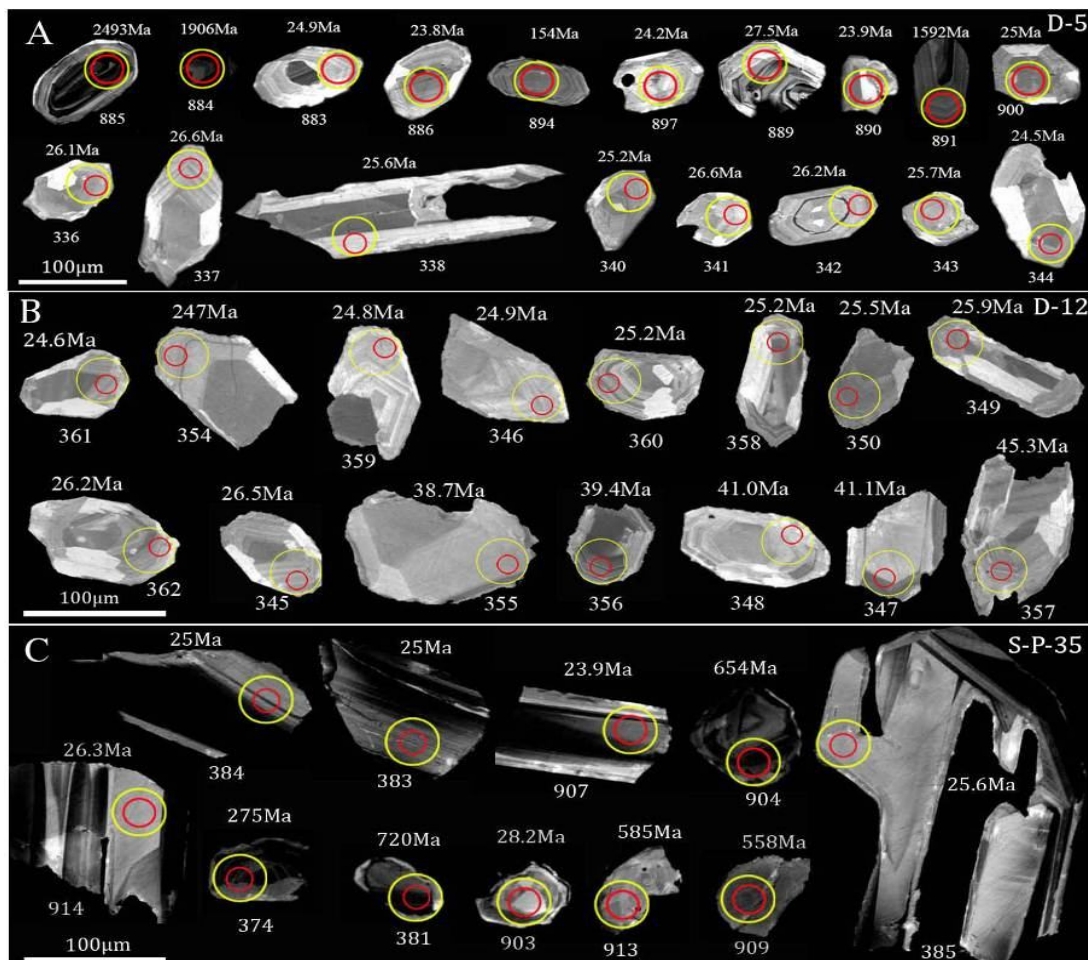
سن سنجی انجام شد (۲۹ نقطه بر روی زیرکن‌های نمونه D-5، ۱۵ نقطه بر روی زیرکن‌های نمونه D-12 و ۲۸ نقطه بر روی زیرکن‌های نمونه S-P-35). نتایج سن سنجی U-Pb زیرکن در جدول ۲ آمده است. تصاویر کاتدولومینسانس این زیرکن‌ها در شکل ۱۶-A، B و C و نمودارهای Tera-Wasserburg concordia برای هر نمونه در شکل ۱۷-A، B و C نشان داده شده است. برای انجام آنالیز سن سنجی، از هر نمونه بین ۲۰ تا ۶۰ زیرکن با ویژگی‌هایی مثل شکل دار بودن، نبود شکستگی و اینکلوزن و نداشتن هسته وراثتی انتخاب شد. تعیین منشأ دانه‌های زیرکن از لحاظ آذرین، دگرگونی یا هیدروترمال و مشخص کردن ساختارها و منطقه بندی در دانه‌های زیرکن که با تصویرهای کاتدولومینسانس فراهم می‌شود، به تفسیر بهتر داده‌های به دست آمده از سن سنجی U-Pb بر روی زیرکن‌ها

سن سنجی به روش U-Pb بر روی زیرکن

پس از انجام بررسی‌های دقیق پتروگرافی، سه نمونه از توده‌های نیمه عمیق دارای کانی‌سازی پیریت، شامل دو دایک گرانیت پورفیری (نمونه‌های D-5 و D-12) و یک نمونه پیروکسن دیوریت پورفیری (نمونه S-P-35) برای تعیین سن U-Pb بر روی کانی زیرکن انتخاب شدند. سن سنجی U-Pb با استفاده از دستگاه Laser-Ablation quadruple ICP-MS انجام شد. بخشی از بهترین زیرکن‌های جدا شده بر روی یک پلاک اپاکسی به قطر یک اینچ چیده و صیقل داده شد. برای بلورهای زیرکن بزرگ که رشد یکنواخت و زونینگ یکسان داشتند، از قطر پرتو ۲۹ میکرون و برای بلورهای زیرکن کوچک‌تر از قطر پرتو ۱۹ میکرون استفاده شد. بسامد این دستگاه ۱۰ هرتز است. در مجموع بر روی زیرکن‌های این سه سنگ، ۷۲ نقطه آنالیز

(شکل ۱۷- C) را نشان می‌دهد. این توده‌های با سن الیگوسن بالایی (چاتین) در واحدهای آتشفشانی ائوسن نفوذ کرده‌اند. نسبت Th/U در زیرکن، وسیله‌ای مناسب برای تعیین پتروژنز است. نسبت Th/U در زیرکن‌های موروثی این توده‌ها بین ۰/۳۹ تا ۱/۹۱ با میانگین ۰/۹۳ متغیر است (جدول ۲). نسبت بالای Th/U در بیشتر زیرکن‌ها نشان‌دهنده منشأ ماگمایی آنهاست (Belousova et al., 2002).

کمک می‌کند (Katongo et al., 2004). در این سه سنگ زیرکن‌های بیگانه نیز وجود دارند که سن‌های متفاوتی را از خود نشان می‌دهند. در جدول ۲، این زیرکن‌ها با علامت ستاره مشخص شده‌اند. نتایج آنالیز سن‌سنجی مربوط به نمونه دایک گرانیت پورفیری (D-5) سن $25/94 \pm 0/76$ میلیون سال (شکل ۱۷-A)، نمونه دایک گرانیت پورفیری (D-12) سن $25/37 \pm 0/56$ میلیون سال (شکل ۱۷-B) و نمونه پیروکسن دیوریت پورفیری (S-P-35) سن $24/85 \pm 0/51$ میلیون سال



شکل ۱۶. تصویر کاتدولومینسانس برخی از زیرکن‌های انتخاب‌شده برای آنالیز U-Pb و Lu-Hf در توده‌های نیمه‌عمیق محدوده سیمرغ. دایره‌های قرمز، محل آنالیز U-Pb و دایره‌های زرد، محل آنالیز Lu-Hf را نشان می‌دهند. A: دایک گرانیت پورفیری (نمونه D-5)، B: دایک گرانیت پورفیری (نمونه D-12) و C: پیروکسن دیوریت پورفیری (نمونه S-P-33)

Fig. 16. Cathodoluminescence images of some of the selected zircons for analysis of U-Pb and Lu-Hf in sub-volcanic rocks in the Simorgh area. Red circles show the location of the U-Pb analysis and yellow circles show the location of the Lu-Hf analysis. A: Granite porphyry dike (sample D-5), B: Granite porphyry dike (sample D-12), and C: Pyroxene diorite porphyry (sample S-P-35)

جدول ۲. نتایج سن‌سنجی زیرکن به‌روش U-Pb در توده‌های نفوذی منطقه سیمرغ

Table 2. The results of zircon U-Pb dating in the intrusive units of Simorgh area

No. spot	U (ppm)	Th /U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	± (%)	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	± (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	± (%)	^{207}Pb corrected $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	± (Ma)
D-5										
886	141	1.2	0.0610	9.9	265.28	8.35	24	1	23.8	0.8
890	122	1.4	0.0487	11.2	268.94	8.34	24	1	23.9	0.8
897	100	1.4	0.0496	12.3	264.84	8.65	24	1	24.2	0.8
883	133	1.1	0.0697	10.4	250.50	7.77	26	1	24.9	0.8
900	93	1.5	0.0473	19.9	257.00	10.83	25	1	25.0	1.1
889	488	0.49	0.0494	4.5	232.82	3.80	28	0	27.5	0.5
892*	308	0.79	0.0444	5.4	184.97	3.38	35	1	34.8	0.6
887*	164	0.59	0.0580	6.8	159.45	3.54	40	1	39.7	0.9
888*	228	0.74	0.0440	6.5	159.86	3.53	40	1	40.2	0.9
895*	339	0.79	0.0451	5.1	145.56	2.29	44	1	44.1	0.7
893*	102	1.1	0.0528	7.7	142.28	3.75	45	1	44.8	1.2
894*	354	0.21	0.0568	2.2	40.97	0.53	155	2	154	2
891*	92	1.04	0.0970	0.9	3.57	0.03	1592	14	1592	13
884*	202	0.2	0.1161	0.7	2.91	0.02	1906	16	1906	16
885*	379	0.61	0.1635	0.5	2.12	0.02	2493	21	2493	23
366	128	1.2	0.0593	19.2	251.29	14.39	26	1	25.2	1.5
365	320	0.39	0.0572	10.1	235.86	7.48	27	1	26.9	0.9
364*	271	0.44	0.0640	8.1	163.05	4.72	39	1	38.6	1.1
367*	240	0.85	0.0465	7.3	165.22	3.58	39	1	38.9	0.9
363*	215	0.69	0.0943	13.6	122.91	5.88	52	2	49.1	2.5
344	114	0.85	0.0432	28.8	263.02	12.76	24	1	24.5	1.3
340	184	1.2	0.0512	13.3	253.49	9.58	25	1	25.2	1.0
338	102	0.82	0.0698	25.5	243.72	17.79	26	2	25.6	2.0
343	167	1.18	0.0534	13.7	247.94	9.38	26	1	25.7	1.0
336	163	1.24	0.0480	25.0	245.82	13.76	26	1	26.1	1.5
342	169	1.27	0.0581	12.5	241.77	8.27	27	1	26.2	0.9
341	81	1.17	0.0685	21.9	235.41	12.23	27	1	26.6	1.5
337	146	1.91	0.0446	15.0	241.60	9.01	27	1	26.6	1.0
339*	363	0.7	0.0473	15.6	177.53	6.13	36	1	36.2	1.3
D-12										
361	217	1.05	0.0499	11.1	260.90	9.04	25	1	24.6	0.9
354	105	1.00	0.0504	26.0	258.99	11.64	25	1	24.7	1.2
359	112	0.95	0.0464	19.2	259.89	10.62	25	1	24.8	1.0
346	143	1.59	0.0579	14.8	254.43	8.84	25	1	24.9	0.9
360	203	1.47	0.0570	10.9	252.26	8.61	26	1	25.2	0.9
358	426	1.25	0.0452	7.1	255.18	5.71	25	1	25.2	0.6
350	141	1.31	0.0493	13.9	251.11	9.72	26	1	25.5	1.0
349	139	1.87	0.0850	12.1	235.88	10.15	27	1	25.9	1.2
362	202	1.49	0.0485	11.6	245.41	7.58	26	1	26.2	0.8
345	134	0.84	0.0417	17.6	242.49	10.05	27	1	26.5	1.1
355*	136	0.86	0.0524	10.3	164.95	4.90	39	1	38.7	1.2
356*	681	0.82	0.0492	4.0	162.79	2.39	39	1	39.4	0.6
348*	227	0.51	0.0544	8.9	155.28	4.27	41	1	41.0	1.2
347*	605	0.66	0.0458	4.9	156.39	2.56	41	1	41.1	0.7
357*	283	0.7	0.0480	6.0	141.46	2.98	45	1	45.3	1.0
S-P-35										
907	174	1.59	0.0356	10.4	269.41	7.12	24	1	23.9	0.6
916	80	0.58	0.0562	15.8	263.48	10.44	24	1	24.1	1.0
910	220	0.8	0.0500	9.8	258.81	6.43	25	1	24.8	0.6

* Xenocryst zircon

ادامه جدول ۲. نتایج سن‌سنجی زیرکن به‌روش U-Pb در توده‌های نفوذی منطقه سیم‌رغ

Table 2 (Continued). The results of zircon U-Pb dating in the intrusive units of Simorgh area

No. spot	U (ppm)	Th /U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	\pm (%)	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	\pm (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	\pm (%)	^{207}Pb corrected $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	\pm (Ma)
S-P-35										
911	76	0.91	0.0349	21.3	258.67	9.48	25	1	24.9	1.0
914	90	0.58	0.0502	19.7	243.25	10.41	26	1	26.3	1.2
903	355	0.65	0.0498	6.0	226.94	4.72	28	1	28.2	0.6
901*	659	0.71	0.0499	4.6	208.54	3.91	31	1	30.7	0.6
908*	150	1.01	0.0508	7.3	167.44	4.18	38	1	38.2	1.0
915*	168	0.68	0.0458	7.1	158.86	4.29	40	1	40.5	1.1
906*	119	0.75	0.0472	8.3	153.34	4.06	42	1	41.9	1.1
912*	305	0.66	0.0546	5.2	149.49	2.83	43	1	42.6	0.8
905*	482	0.72	0.0476	7.9	119.60	5.22	54	2	53.6	2.3
909*	130	1.33	0.0586	2.1	11.06	0.12	558	6	558	6
913*	48	1.1	0.0594	2.5	10.53	0.14	585	8	585	8
904*	382	0.15	0.0616	0.9	9.36	0.08	654	6	654	5
378	80	0.88	0.0629	21.1	260.88	13.50	25	1	24.2	1.3
377	358	0.83	0.0438	7.9	265.94	7.28	24	1	24.2	0.7
384	231	0.84	0.0594	11.2	253.11	8.45	25	1	25.0	0.9
383	486	1.18	0.0469	8.6	256.99	7.38	25	1	25.0	0.7
385	131	0.63	0.0459	17.7	251.66	10.81	26	1	25.6	1.1
375	66	1	0.0367	37.1	242.67	13.73	27	2	26.5	1.6
373*	558	0.54	0.0439	5.3	206.98	3.96	31	1	31.1	0.6
382*	911	0.84	0.0510	3.5	177.10	2.54	36	1	36.1	0.5
380*	249	0.75	0.0982	6.3	151.75	4.29	42	1	39.6	1.2
376*	138	0.32	0.0505	9.8	145.65	4.46	44	1	43.9	1.4
368*	1770	0.4	0.0565	4.6	113.55	6.05	57	3	55.9	3.0
374*	450	0.63	0.0511	2.9	22.95	0.29	275	3	275	3
381*	521	0.45	0.0906	1.5	8.19	0.13	743	11	720	11

* Xenocryst zircon

برای آنالیز ایزوتوپی Lu-Hf نیز مورد استفاده قرار گرفت. در

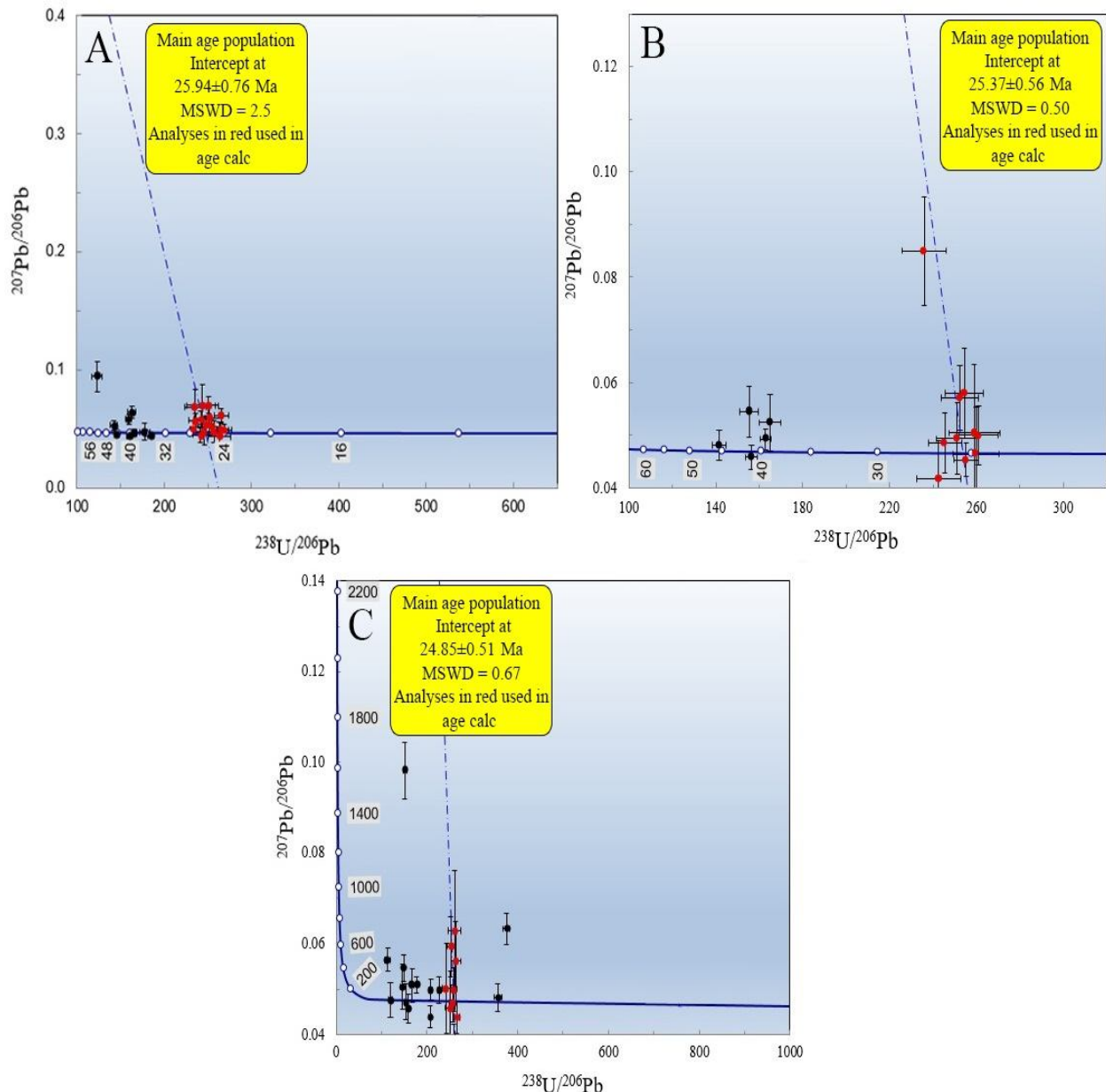
این توده‌های نیمه‌عمیق از مجموع زیرکن‌های آنالیز شده در

ایزوتوپ‌های Lu-Hf

سه نمونه‌ای که برای تعیین سن به‌روش U-Pb انتخاب شده بود،

اساس مقادیر مثبت پایین $\varepsilon\text{Hf}(t)$ اکثر نمونه‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که منشأ این توده‌ها گوشته است که مقدار کمی با پوسته آغستگی پیدا کرده است (شکل ۱۸).

مرحله سن‌سنجی، ۳۳ نقطه از زیرکن‌های موروثی برای بررسی ایزوتوپی Lu-Hf مورد آنالیز قرار گرفت (جدول ۳). بر این اساس، نسبت $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t)$ بین ۰/۲۸۲۶۷۱ تا ۰/۲۸۲۹۲۵ و میزان $\varepsilon\text{Hf}(t)$ نیز بین ۲/۹۸- تا ۵/۹۹ متغیر است (جدول ۳). بر



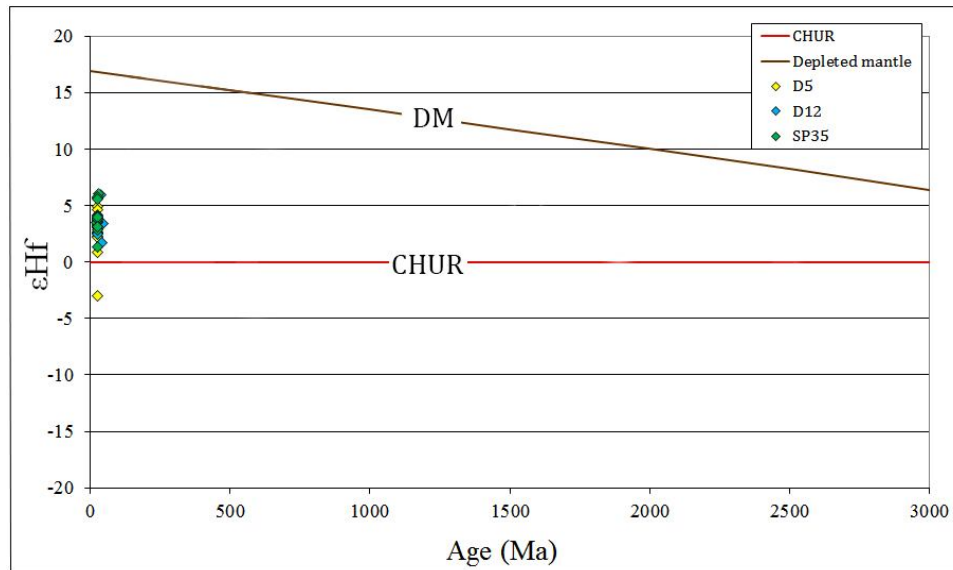
شکل ۱۷. نمودارهای Tera-Wasserburg concordia برای سه توده نفوذی منطقه سیمرغ. A: دایک گرانیت پورفیری (نمونه D-5)، B: دایک گرانیت پورفیری (نمونه D-12) و C: پیروکسن دیوریت پورفیری (نمونه S-P-35)

Fig. 17. U-Pb Tera-Wasserburg Concordia diagrams of the three intrusive rocks from the Simorgh area. A: Granite porphyry dike (sample D-5), B: Granite porphyry dike (sample D-12), and C: Pyroxene diorite porphyry (sample S-P-35)

جدول ۳. نتایج آنالیز ایزوتوپی Lu-Hf توده‌های نفوذی منطقه سیمرغ

Table 3. The results of Lu-Hf isotope analysis for the intrusions of the Simorgh area

Analysis No.	Age (Ma)	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1 se	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(i)$	$\epsilon\text{Hf}(t)$	$T_{(DM)}$ (Ga)	$T_{(DM)c}$ (Ga)
D-5									
883	26	0.0019	0.070	0.282847	0.000024	0.282846	3.20	0.57	0.87
884	1906	0.0007	0.031	0.281628	0.000011	0.281602	2.42	2.18	2.38
885	2493	0.0010	0.038	0.281228	0.000011	0.281181	1.59	2.73	2.88
886	24	0.0026	0.109	0.282896	0.000009	0.282895	4.89	0.51	0.77
891	1592	0.0011	0.044	0.281960	0.000008	0.281927	6.19	1.76	1.89
894	155	0.0015	0.065	0.282638	0.000011	0.282633	-1.37	0.85	1.26
897	24	0.0027	0.113	0.282888	0.000015	0.282887	4.61	0.52	0.79
900	25	0.0021	0.087	0.282842	0.000016	0.282841	3.01	0.58	0.88
336	26	0.0017	0.068	0.282830	0.000010	0.282829	2.61	0.59	0.91
337	27	0.0024	0.080	0.282820	0.000010	0.282819	2.26	0.62	0.93
338	26	0.0032	0.103	0.282673	0.000021	0.282671	2.96	0.84	1.25
340	25	0.0028	0.111	0.282861	0.000008	0.282860	3.67	0.56	0.84
341	27	0.0027	0.118	0.282860	0.000015	0.282859	3.68	0.56	0.84
342	27	0.0037	0.125	0.282832	0.000015	0.282830	2.66	0.62	0.91
343	26	0.0031	0.123	0.282850	0.000012	0.282848	3.29	0.58	0.87
344	24	0.0027	0.112	0.282782	0.000008	0.282781	0.86	0.68	1.02
365	27	0.0017	0.064	0.282915	0.000010	0.282914	5.64	0.47	0.72
366	26	0.0025	0.097	0.282820	0.000011	0.282819	2.23	0.62	0.93
D-12									
345	27	0.0024	0.101	0.282867	0.000010	0.282866	3.92	0.55	0.83
346	25	0.0026	0.093	0.282847	0.000014	0.282846	3.18	0.58	0.87
347	41	0.0025	0.099	0.282798	0.000009	0.282796	1.78	0.65	0.97
348	41	0.0009	0.034	0.282977	0.000009	0.282976	8.16	0.38	0.58
349	27	0.0019	0.076	0.282829	0.000010	0.282828	2.60	0.59	0.91
350	26	0.0025	0.098	0.282874	0.000012	0.282873	4.14	0.54	0.82
354	25	0.0009	0.038	0.282826	0.000010	0.282826	2.46	0.58	0.92
355	39	0.0008	0.032	0.282917	0.000008	0.282916	5.99	0.46	0.71
356	39	0.0020	0.071	0.283036	0.000010	0.283035	10.18	0.30	0.45
357	45	0.0016	0.063	0.282842	0.000008	0.282841	3.46	0.57	0.87
358	25	0.0025	0.106	0.282859	0.000011	0.282858	3.60	0.56	0.85
359	25	0.0021	0.087	0.282846	0.000008	0.282845	3.14	0.57	0.88
360	26	0.0017	0.069	0.282872	0.000008	0.282871	4.08	0.53	0.82
361	25	0.0029	0.114	0.282857	0.000019	0.282856	3.52	0.57	0.85
362	26	0.0017	0.067	0.282866	0.000010	0.282865	3.89	0.54	0.83
S-P-35									
903	28	0.0020	0.056	0.282925	0.000022	0.282924	6.01	0.46	0.70
904	654	0.0010	0.031	0.282707	0.000025	0.282694	12.19	0.75	0.81
907	24	0.0025	0.080	0.282858	0.000012	0.282857	3.54	0.56	0.85
909	558	<0.0001	0.001	0.282410	0.000011	0.282410	-0.09	1.12	1.49
913	585	0.0013	0.039	0.282328	0.000016	0.282313	-2.89	1.27	1.68
914	26	0.0017	0.065	0.282794	0.000010	0.282793	1.35	0.64	0.99
374	275	0.0019	0.070	0.282631	0.000012	0.282621	0.90	0.87	1.21
375	27	0.0022	0.069	0.282838	0.000012	0.282837	2.89	0.59	0.89
377	24	0.0019	0.067	0.282865	0.000010	0.282864	3.81	0.54	0.83
378	25	0.0018	0.069	0.282869	0.000010	0.282868	3.96	0.54	0.83
381	720	0.0015	0.049	0.281906	0.000015	0.281884	-14.46	1.85	2.51
383	25	0.0088	0.363	0.282924	0.000010	0.282920	5.79	0.57	0.71
384	25	0.0056	0.201	0.282915	0.000011	0.282912	5.54	0.53	0.73
385	26	0.0041	0.151	0.282845	0.000009	0.282843	3.09	0.61	0.88



شکل ۱۸. نسبت ϵ_{Hf} در مقابل سن U-Pb برای سه توده نفوذی منطقه سیمرغ

Fig. 18. Plot of ϵ_{Hf} vs. U-Pb ages for zircons from the three intrusive rocks in the Simorgh area

نتیجه‌گیری

توده‌های نیمه‌عمیق موجود در منطقه اکتشافی سیمرغ شامل دیوریت پورفیری، پیروکسن دیوریت پورفیری، گرانودیوریت پورفیری و گرانیت پورفیری هستند. بررسی‌های ژئوشیمیایی اکسیدهای اصلی نشان می‌دهد که توده‌هایی از نوع متآلومینوس تا پرآلومینوس با ماهیت کالک‌آلکالن تا کالک‌آلکالن پتاسیم بالا هستند. این توده‌ها از گرانیتوئیدهای نوع I و S هستند. غنی‌شدگی عناصر LREE نسبت به HREE همراه با آنومالی منفی Eu، تشکیل ماگما در زون فرورانس را نشان می‌دهد. توده‌های نیمه‌عمیق سیمرغ از نظر تکتونوماگمایی در محیط گرانیتوئیدهای کمان‌های آتشفشانی قرار می‌گیرند.

دگرسانی وسیعی تمام واحدهای نفوذی و آتشفشانی منطقه را تحت تأثیر قرار داده است، به طوری که انواع دگرسانی‌های پروپلیتیک، آرژلیک، سیلیسی، کوارتز + سریسیت + پیریت و کربنات + کوارتز + سریسیت + پیریت در منطقه قابل مشاهده است. میزان کانی‌سازی در منطقه سیمرغ، برش‌های هیدروترمال (در مرکز منطقه) و دایک‌های گرانیت و گرانودیوریت پورفیری (با امتداد شمال شرقی - جنوب غربی) هستند که در این میان

کانی‌سازی در برش‌های هیدروترمال همراه با دگرسانی‌های QSP و CQSP از اهمیت بیشتری برخوردار است. کانی‌سازی در این منطقه به شکل‌های رگچه‌ای، پراکنده و برش گرمابی قابل مشاهده است. کانی‌سازی پیریت تنها کانی‌سازی پراکنده در توده‌های نفوذی، برش‌های هیدروترمال و ریولیت‌ها و هورنبلند ریولیت‌های منطقه است. در ریولیت و هورنبلند ریولیت‌ها انواع رگچه‌های کوارتز، کوارتز - پیریت، کوارتز - کربنات، کوارتز - کربنات - پیریت، گالن - کوارتز - پیریت - کالکوپیریت، کوارتز - کالکوپیریت - پیریت، کوارتز - کربنات، کربنات - کوارتز - کربنات - پیریت، کربنات - کوارتز - کربنات - کلریت - پیریت، کربنات - کلریت - پیریت وجود دارد. در بررسی‌های ژئوشیمیایی سطحی و زیر سطحی، میزان عنصر مس از ۲ تا ۲۴۰ گرم در تن، مولیبدن ۰/۵ تا ۴۹ گرم در تن، روی ۹ تا ۹۳۵ گرم در تن، سرب ۷ تا ۵۸۲ گرم در تن، آرسنیک ۲ تا ۲۰۷ گرم در تن و طلا ۱ تا ۹۳ میلی گرم در تن متغیر است.

در منطقه سیمرغ، سن سنجی U-Pb بر روی کانی زیرکن در

با توجه به فروانش بین بلوک لوت و افغان و ماگماتیسیم گسترده در بلوک لوت، همراه با شناسایی انواع کانسارهای مرتبط با سیستم‌های مس پورفیری از قبیل، ماهرآباد، کوه‌شاه، خویک، چاه شلجمی و ده‌سلم در اطراف محدوده اکتشافی سیمرخ، انتظار می‌رود که منطقه مورد بررسی بخشی از کمربند مس پورفیری در شرق ایران باشد. بر اساس شواهد بالا توده‌های این منطقه مرتبط با سیستم‌های پورفیری است و برش‌های هیدروترمال، میزبان اصلی کانی‌سازی در این سیستم است. این سیستم تا عمق ۱۸۰ متری به‌جز پیریت، کانی‌سازی با ارزش دیگری ندارد.

قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۳/۲۷۷۱۲ مورخ ۹۲/۰۲/۲۰ انجام شده است.

توده‌های نیمه عمیق هم‌زمان با کانی‌سازی انجام شد. سن دایک‌های گرانیت پورفیری $25/37 \pm 0/56$ تا $25/94 \pm 0/76$ میلیون سال و سن توده پیروکسن دیوریت پورفیری $24/85 \pm 0/51$ میلیون سال به‌دست آمد. در منطقه سیمرخ، توده‌های دیوریت پورفیری بدون کانی‌سازی هستند و توسط دایک‌های گرانیت پورفیری و پیروکسن دیوریت پورفیری قطع می‌شوند؛ بنابراین قدیمی‌ترین توده‌های نیمه‌عمیق منطقه هستند. بر این اساس در منطقه سیمرخ، حداقل دو مرحله نفوذ توده‌های نیمه‌عمیق را شاهد هستیم. مرحله قبل از کانی‌سازی که شامل نفوذ دیوریت پورفیری با سن قبل از الیگوسن بالایی است. مرحله هم‌زمان با کانی‌سازی که شامل نفوذ دایک‌های گرانیت پورفیری و توده پیروکسن دیوریت پورفیری است و دارای سن الیگوسن بالایی (چاتین) است. بر اساس مقادیر مثبت پایین $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$ زیرکن‌های این توده‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که منشأ این توده‌ها گوشته است که مقدار کمی با پوسته آغشتگی پیدا کرده است.

References

- Abdi, M. and Karimpour, M.H., 2012. Geology, alteration, mineralization, petrogenesis, geochronology, geochemistry and airborne geophysics of Kuh Shah prospecting area, SW Birjand. *Journal of Economic Geology*, 4(1): 77–107. (in Persian with English abstract)
- Abdi, M. and Karimpour, M.H., 2013. Petrochemical Characteristics and Timing of Middle Eocene Granitic Magmatism in Kooh-Shah, Lut Block, Eastern Iran. *Acta Geological Sinica*, 87(4): 1032–1044.
- Alavi, M., 1991. Tectonic map of the Middle East, Scale 1:2900000. Geological Survey of Iran.
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., Medina, J. and Homam, S.M., 2011. Sr-Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut Block, Eastern Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 283–296.
- Arjmandzadeh, R. and Santos, J.F., 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(1): 123–140.
- Asiabandha, 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.
- Babakhani, A.R., Kholghi, M.H., Zadekabar, H., Chandchi, M., Afsharian Zadeh, A., Jalilian, M., Etemadi, N. and Manouchehri, M., 1988. Geological map of Nakhilab (Ab-e-Sard), Scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.
- Belousova, E.A., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y. and Fisher, N.I., 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602–622.
- Boynton, W.V., 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: P.

- Henderson (Editor), Rare earth element geochemistry. Elsevier, Amsterdam, pp. 63–114.
- Chappell, B. and White, A., 2001. Two contrasting granite types: 25 years later. *Australian Journal Earth Sciences*, 48(4): 489–499.
- Edward, C.M.H., Menzies, M.A., Thirlwall, M.F., Morrid, J.D., Leeman, W.P. and Harmon, R.S., 1994. The transition to potassic alkaline volcanism in island arcs: the Ringgite-Beser Complex, East Java. *Journal of Petrology*, 35(6): 1557–1595.
- Gill, R., 2010. *Igneous rocks and processes*. Wiley-Blackwell, New Jersey, 428 pp.
- Griffis, R., Meixner, H., Johns, G., Abedian, N., Behruzi, A., Hossienkhan Nazer, N., Hamzeh Pour, B., Shahriari, S., Sahandi, M.R., Mohajjel, M., Bernerian, M., Soheili, M., Hosseini, Z., Afsharian Zadeh, M. and Chaichi, Z., 1992. Geological map of Dehsalm (Chah Vak), Scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.
- Gust, D.A., Arculus, R.A. and Kersting, A.B., 1997. Aspects of magma sources and processes in the Honshu arc. *The Canadian Mineralogist*, 35(2): 347–365.
- Helvacı, C., Ersoy, E.Y., Sözbilir, H., Erkül, F., Sümer, Ö. and Uzel, B., 2009. Geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of Miocene volcanic rocks from the Karaburun Peninsula: Implications for amphibolebearing lithospheric mantle source, Western Anatolia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 185(3): 181–202.
- Hosseinkhani, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Santos, J.F., 2017. U-Pb geochronology and petrogenesis of intrusive rocks: Constraints on the mode of genesis and timing of Cu mineralization in SWSK area, Lut Block. *Journal of Geochemical Exploration*, 177(1): 11–27.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh shafaroudi, A., Farmer, G.L. and Stern, C.R., 2012. Petrogenesis of Granitoids, U-Pb zircon geochronology, Sr-Nd Petrogenesis of granitoids, U-Pb zircon geochronology, Sr-Nd isotopic characteristics, and important occurrence of Tertiary mineralization within the Lut block, eastern Iran. *Journal of Economic Geology*, 4(1): 1–28. (in Persian with English abstract)
- Karimpour, M.H., Stern, C.R., Farmer, G.L., Saadat, S. and Malekzadeh shafaroudi, A., 2011. Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block, Eastern Iran. *Geopersia*, 1(1): 19–36.
- Katongo, C., Koller, F., Klötzli, U., Koeberl, Ch., Tembo, F. and Waele, B., 2004. Petrography, geochemistry, and geochronology of granitoid rocks in the Neoprotozoic- Paleozoic Lufilian-Zambezi belt, Zambia: Implications for tectonic setting and regional correlation. *Journal of African Earth Sciences*, 40(5): 219–244.
- Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M.H., 2011. Zircon U-Pb dating of Maherabad porphyry copper-gold prospect area: evidence for a late Eocene porphyry-related metallogenic epoch in east of Iran. *Journal of Economic Geology*, 3(1): 41–60. (in Persian with English abstract)
- Malekzadeh shafaroudi, A., Karimpour, M.H. and Mazaheri, S.A., 2010. Rb-Sr and Sm-Nd isotopic compositions and petrogenesis of ore-related intrusive rocks of gold-rich porphyry copper Maherabad prospect area (North of Hanich), east of Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 18(2): 15–32. (in Persian with English abstract)
- Malekzadeh shafaroudi, A., Karimpour, M.H. and Stern, C.R., 2015. The Khopik porphyry copper prospect, Lut Block, Eastern Iran. *Geology, alteration and mineralization, fluid inclusion, and oxygen isotope studies*. *Ore Geology Reviews*, 65(2): 522–544.
- Maniar, P.D. and Piccoli, P.M., 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643.
- Martin, H., 1999. The adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411–429.
- Middlemost, E.A.K., 1985. *Magmas and Magmatic Rocks*. Longman, London, 266 pp.
- Miri Beydokhti, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F. and Klötzli, U., 2015. U-Pb zircon geochronology, Sr-Nd geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of Mahoor granitoid rocks (Lut Block, Eastern Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 111(1): 192–205.

- Nagudi, N., Koberl, Ch. and Kurat, G., 2003. Petrography and Geochemistry of the sigo granite, Uganda and implications for origin. *Journal of African Earth Sciences*, 36(1): 1–14.
- 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.
- Peccerillo, A. and Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81.
- Peters, T.J., Menzies, M., Thirlwall, M. and Kyle, P., 2008. Zuni-Bandera volcanism, Rio Grande, USA-melt formation in garnet- and spinel facies mantle straddling the asthenosphere-lithosphere boundary. *Lithos*, 102(1–2): 295–315.
- Rollinson, H., 1993. *Using geochemical data: evolution, presentation, interpretation*. Longman Scientific and Technical, London, 248 pp.
- Saunders, A.D., Storey, M., Kent, R.W. and Norry, M.J., 1992. Consequences of plume-lithosphere interactions. In: B.C. Storey, T. Alabaster and R.J. Pankhurst (Editors), *Magmatism and the Causes of Continental Break-up*. Geological Society of London, London, pp. 41–60.
- Srivastava, R.K. and Singh, R.K., 2004. Trace element geochemistry and genesis of Precambrian sub alkaline mafic dykes from the central Indian craton: evidence for mantle metasomatism. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(3): 373–389.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics 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, London, pp. 313–345.
- 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.
- Walker, J.A., Patino, L.C., Carr, M.J. and Feigenson, M.D., 2001. Slab control over HFSE depletions in Nicaragua. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(4): 533–543.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1):185–187.
- Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis A Global Tectonic Approach*. Harper Collins Academic, London, 466 pp.