

زمین‌شناسی، کانی‌سازی، ژئوشیمی و پترولوژی توده‌های نفوذی در کانسار طلا- مس کوه زر، دامغان

پیام روحبخش^۱، محمدحسن کریم‌پور^{۲*} و آزاده ملکزاده شفارودی^۲

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

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

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۱۹، پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۱۱

چکیده

کانسار طلا- مس کوه زر در ۱۰۰ کیلومتری جنوب شرق شهرستان دامغان قرار دارد. این محدوده از لحاظ زمین‌شناختی، بخشی از کمربند آتشفشانی- نفوذی ترود- چاه شیرین محسوب می‌شود. زمین‌شناسی منطقه شامل سنگ‌های آذرآواری (توف بلورین) و آتشفشانی با ترکیب آندزیت و لایتیت بوده که زیر نفوذ توده‌های آذرین نیمه عمیق با بافت پورفیری و ترکیب مونزونیتی قرار گرفته‌اند. توده‌های مونزونیتی زیر نفوذ واحدهای نیمه عمیق جوان‌تر با ترکیب دیوریتی قرار گرفته‌اند. بافت اغلب توده‌های نفوذی، پورفیری و دارای کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز، پتاسیم فلدسپار، هورنبلند، بیوتیت و پیروکسن است. نفوذ پلوتون و استوک‌های مونزونیتی به شکل‌گیری دگرسانی‌های گسترده سرسیتیک، پروپلیتیک، کربناته و سیلیسی- تورمالینی در منطقه منجر شده است. این سنگ‌ها با کانی‌سازی پراکنده پیریت به میزان ۱ تا ۱۰ درصد همراه بوده و سولفیدها به اکسیدهای آهن ثانویه از جمله گوتیت، هماتیت و لیمونیت تبدیل شده‌اند. نمونه برداری ژئوشیمیایی به روش خرده‌سنگی، ناهنجاری بالای را از عناصر طلا (تا حداکثر ۵۹۸ ppb)، نقره (تا حداکثر ۳۷۴۷ ppb)، مس (تا حداکثر ۶۷۹ ppm)، سرب (تا حداکثر ۱۴۲۷ ppm) و روی (تا حداکثر ۱۰۱۳ ppm) نشان می‌دهد. بر اساس بررسی‌های ژئوشیمیایی، توده‌های نفوذی ماهیت کالک‌آلکانل پتاسیم بالا تا کمی شوشونیتی دارند و در محدوده متاآلومینوس تا کمی پرآلومینوس قرار می‌گیرند. غنی‌شدگی LREE در برابر HREEها و غنی‌شدگی عناصر LILE در برابر HFSE، تشکیل ماگما را در پهنه فرورانش تأیید می‌کند. ناهنجاری منفی Eu به علت وجود پلاژیوکلاز به عنوان کانی باقی‌مانده در سنگ منشأ ماگماست. احتمالاً ماگمای مادر در نتیجه ذوب بخشی آمفیولیت‌ها شکل گرفته است. حضور سنگ منشأ مونزونیت پورفیری، دگرسانی‌های سرسیتیک و پروپلیتیک، کانی‌سازی پیریت پراکنده و بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی طلا و مس در کانسار کوه زر، نشان‌دهنده احتمالی سیستم کانی‌سازی طلا- مس پورفیری در این ناحیه است.

واژه‌های کلیدی: توده نیمه عمیق، ژئوشیمی، طلا- مس پورفیری، کوه زر، ترود- چاه شیرین

مقدمه

طول شرقی و $24^{\circ} 35'$ تا $27^{\circ} 35'$ عرض شمالی و در برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان (Eshragi and Jalali, 2006) قرار دارد. محدوده مورد بررسی از لحاظ زمین‌شناختی بخشی از کمربند آتشفشانی- نفوذی ترود- چاه شیرین محسوب می‌شود و در

محدوده مورد بررسی کانسار طلا- مس کوه زر در فاصله حدود ۴۰۰ کیلومتری شرق تهران و ۱۰۰ کیلومتری جنوب شرق شهرستان دامغان، بین مختصات جغرافیایی $39^{\circ} 54'$ تا $40^{\circ} 54'$

پژوهش، برای نخستین بار بخش جنوب منطقه باغو با هدف تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی و با تأکید ویژه بر تفکیک توده‌های نفوذی، بررسی گسترش و پهنه‌بندی دگرسانی‌ها و تهیه نقشه دگرسانی، بررسی کانی‌سازی و تعیین ارتباط آن با توده‌های نفوذی و بررسی ژئوشیمی توده‌های نفوذی، مورد بررسی قرار گرفت.

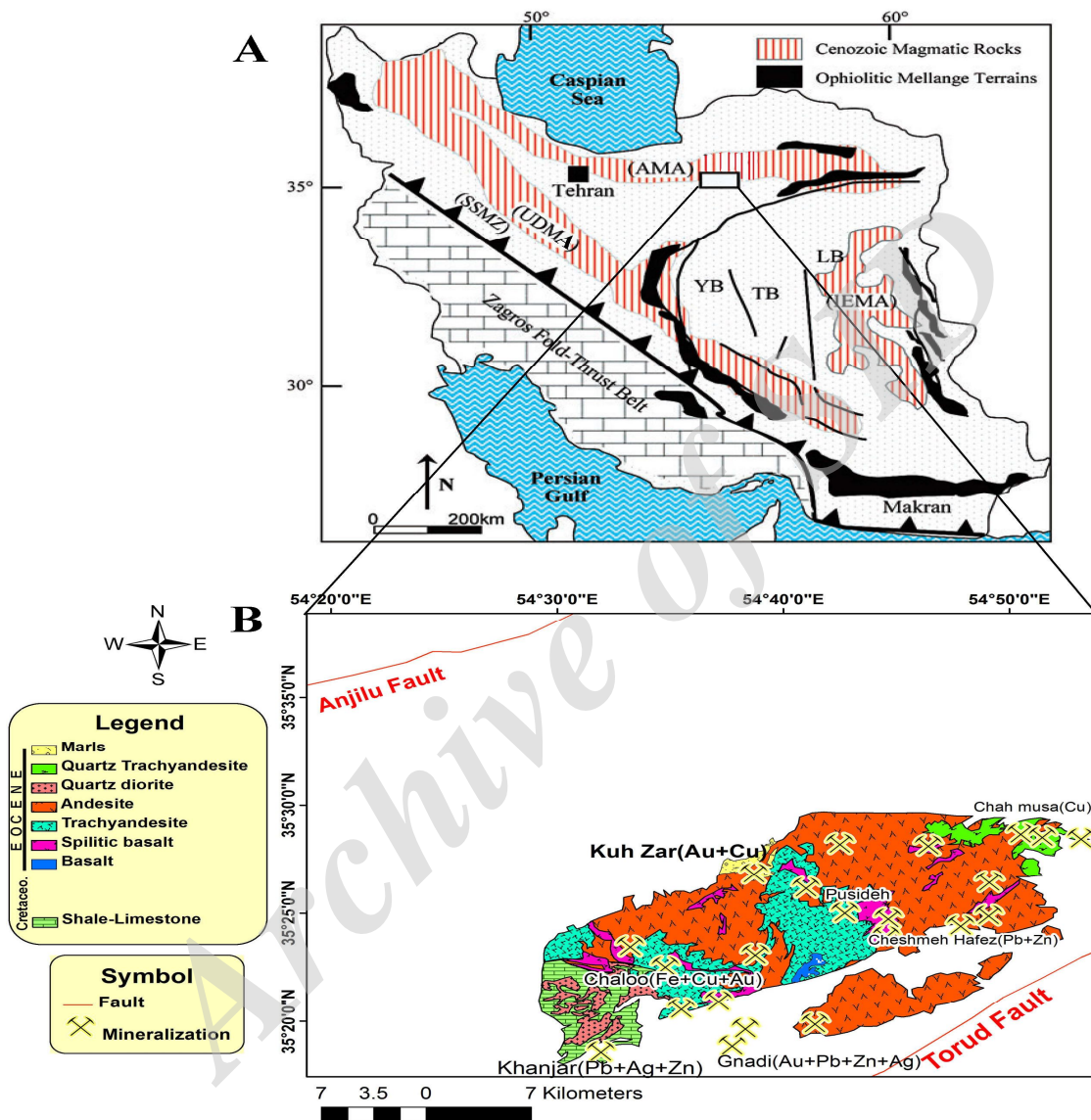
زمین‌شناسی منطقه

زمین‌شناسی منطقه بر اساس نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان (Eshragi and Jalali, 2006) مشتمل بر سنگ‌های داسیتی و داسیت آندزیتی دگرسان‌شده با روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق بوده است و در سایر نقاط محدوده رخنمون سنگ‌های تراکی‌آندزیتی و آندزیتی به سن ائوسن وجود دارد. در صورتی که بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری انجام شده در این پژوهش، بخش بزرگی از سنگ‌های تراکی‌آندزیتی و آندزیتی عنوان شده در نقشه، شامل سنگ‌های آذرآواری (توف بلورین) و به میزان کمتر گدازه‌هایی با ترکیب آندزیت، هورنبلند آندزیت، پیروکسن آندزیت، بیوتیت پیروکسن آندزیت، پیروکسن تراکی‌لازیت و هورنبلند لایت بوده که مورد نفوذ توده‌های آذرین نیمه عمیق با بافت پورفیری و ترکیب مونزونیتی قرار گرفته‌اند (شکل ۲). بر اساس روابط صحرائی سنگ‌های آذرآواری که بخش بزرگی از نیمه جنوبی منطقه را در بر گرفته‌اند، قدیمی‌ترین واحدهای موجود در این ناحیه هستند. توف بلورین در صحرا خاکستری‌رنگ و ریزدانه است و ساخت لایه‌بندی از خود نشان می‌دهد. واحدهای آتشفشانی نیز به‌طور عمده در قسمت جنوب تا جنوب‌شرق، بخش‌هایی از شمال‌شرق و شمال‌غرب محدوده رخنمون دارند (شکل ۲). سنگ‌های آتشفشانی در صحرا، رنگ خاکستری تیره دارد و کانی‌های پلاژیوکلاز و گاهی پیروکسن و هورنبلند در آنها دیده می‌شود.

واحد داسیتی و داسیت‌آندزیتی دگرسان‌شده در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان، در واقع توده‌های مونزونیت پورفیری با دگرسانی

مرکز این پهنه واقع شده است. مجموعه آتشفشانی نفوذی تروود-چاه شیرین بین دو گسل انجیلو در بالا و تروود در پایین واقع شده است (شکل ۱). روند عمومی این برون‌زدها شمال‌شرق- جنوب‌غرب است (Darvish Zadeh, 1992). این مجموعه با وسعت تقریباً حدود ۵۰۰۰ کیلومتر مربع شامل نوار باریک و طولی متشکل از مجموعه سنگ‌های نفوذی- آتشفشانی ائوسن با ترکیب غالب حدواسط (آندزیتی) است که تحت تأثیر تزریق توده‌های نفوذی الیگومیوسن با ترکیب گرانودیوریتی قرار گرفته است (Rashid Nejad Omran, 1993). نفوذ توده‌های نیمه عمیق با ترکیب اسیدی تا حدواسط به داخل توالی‌های آتشفشانی آندزیتی به شکل دایک و سیل، در برخی از قسمت‌های این کمربند، دگرسانی گرمایی همراه با کانی‌زایی‌های نوع رگه‌ای را موجب شده است (Liaghat et al., 2010; Mehrabi and Ghasemi Siani, 2008). به جز نشانه‌های معدنی طلا، مس، سرب و روی که در نقاط مختلف پهنه تروود- چاه شیرین وجود دارد و کانسار طلا- مس کوه زر که هدف این پژوهش است، می‌توان از کانسارهای خانجاری، چالو، گندی، چشمه حافظ و چاه موسی به‌عنوان مهمترین کانی‌سازی‌های فلزی در پهنه تروود- چاه شیرین نام برد. از بررسی‌های قبلی انجام شده در این منطقه، می‌توان به تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان (Eshragi and Jalali, 2006)، بررسی تحولات سنگ‌شناسی و ماگمایی و روابط آن با کانی‌سازی طلا در منطقه باغو (Rashid Nejad Omran, 1993)، بررسی کانی‌شناسی، دگرسانی و لیتوژئوشیمیایی طلای منطقه باغو (Ahmadi Shad, 1998)، بررسی ژئوشیمی و منشأ کانسار فیروزه باغو (Najjaran, 2000)، ژئوشیمی و منشأ کانسار طلای کوه زر دامغان (باغو) (Shakeri, A., 2000)، بررسی پترولوژی، ژئوشیمیایی و منشأ فیروزه باغو- دامغان (Liaghat et al., 2008) و در نهایت رخدادهای تورمالین در معدن طلا- مس کوه زر (باغو) جنوب استان سمنان (Khalili and Mackizadeh, 2012) اشاره کرد. همه پژوهش‌های یادشده به منطقه باغو معطوف بوده است؛ بنابراین در این

سرسیتیک است. این واحد با روند شمال غربی - جنوب شرقی در محدوده گسترده شده و پس از واحد توف بلورین، بیشترین گسترده‌گی را در بین واحدهای سنگی به خود اختصاص داده است (شکل ۲).

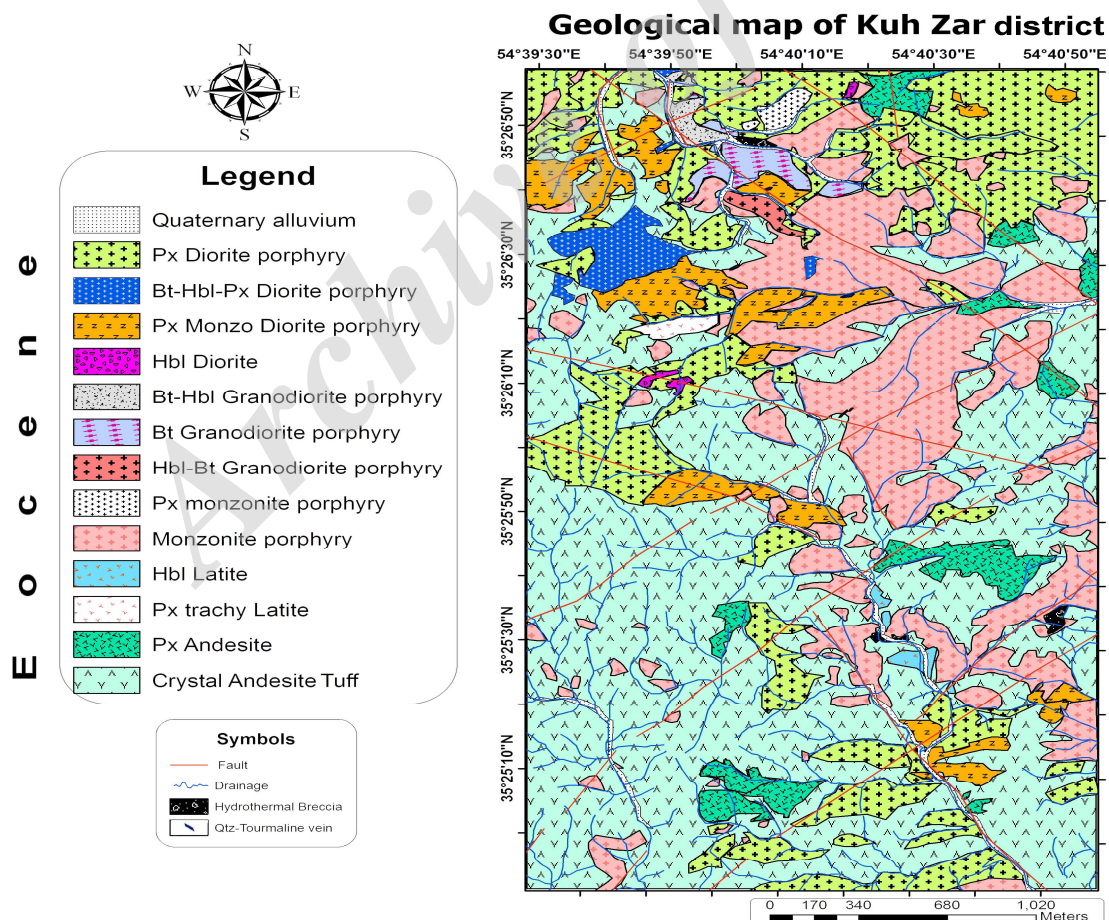


شکل ۱. A: پراکندگی سنگ‌های آذرین سنوزوئیک در ایران و موقعیت مکانی پهنه ترود- چاه شیرین در بخش شرقی کمربند ماگمایی البرز AMA. با تغییرات از علوی (Alavi, 1991) و فرهادی (Farhadi, 2007). کلمات اختصاری: AMA: کمربند ماگمایی البرز، UDMA: کمان ماگمایی ارومیه- دختر، IEMA: مجموعه ماگمایی شرق ایران، SSMZ: پهنه دگرگونی سندانج- سیرجان، YB: بلوک یزد، TB: بلوک طبس، LB: بلوک لوت و B: نقشه زمین‌شناسی ساده شده پهنه ترود- چاه شیرین و موقعیت کانی‌سازی‌های آن. برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان (Eshragi and Jalali, 2006)

Fig. 1. A: Distribution of Cenozoic igneous rocks in Iran and Torud-Chah Shirin zone in the eastern part of Alborz Magmatic belt (After Alavi, 1991; Farhadi, 1997) AMA: Alborz Magmatic Assemblage, UDMA:Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc, IEMA: Iran Eastern Magmatic Assemblage, SSMZ: Sanandaj-Sirjan Metamorphic Zone, YB: Yazd Block, TB: Tabas Block, LB: Lout Block, and B:Simplified Geological Map of Torud- Chah Shirin zone and location of its mineralizations (from scale: 1;100.000 geological map of Moalleman (Eshragi and Jalali, 2006))

درصد است. فنوکریست‌ها شامل ۱۵ تا ۲۰ درصد پلاژیوکلاز به اندازه ۰/۳ تا ۲ میلی‌متر، ۱۵ تا ۲۰ درصد آلکالی فلدسپات به اندازه ۰/۲ تا ۱ میلی‌متر و پیروکسن به میزان ۱ درصد و اندازه ۰/۲ میلی‌متر است. زمینه سنگ شامل کانی‌های فنوکریست، کانی‌های فرعی مانند زیرکن، کانی‌های دگرسان مثل سرسیت و ۵ تا ۷ درصد کانی اوپک است. توده‌های نفوذی نیمه عمیق مونزونیت پورفیری و پیروکسن مونزونیت پورفیری که منشأ اصلی دگرسانی و کانی‌سازی در منطقه هستند (Roohbakhsh et al., 2016)، به صورت پلوتون، استوک و دایک در سنگ‌های آذرآواری و آتشفشانی نفوذ کرده و به دگرسانی وسیع و کانی‌سازی انجامیده است.

رخمون واحد مونزونیت پورفیری در صحرا بر اثر دگرسانی سرسیتیک، به رنگ زرد نخودی است و ریخت‌شناسی خشن دارد. بافت این واحد پورفیری دارای ۳۵ تا ۴۰ درصد فنوکریست است. فنوکریست‌ها شامل ۱۵ تا ۲۰ درصد پلاژیوکلاز به اندازه ۰/۲ تا ۲ میلی‌متر و ۱۵ تا ۲۰ درصد فلدسپات پتاسیم به اندازه ۰/۲ تا ۰/۶ میلی‌متر است. زمینه سنگ شامل کانی‌های فنوکریست، کانی‌های دگرسان شامل کوارتز ثانویه و سرسیت (شکل ۳-۱)، کانی‌های فرعی مانند زیرکن و پیروکسن مونزونیت پورفیری به رنگ سفید مایل به زرد به صورت محدود در شمال محدوده رخمون دارد (شکل ۲). این واحد با بافت پورفیری دارای میزان فنوکریست ۳۵ تا ۴۰



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده کوه زر

Fig. 2. Geological map of Kuh Zar area

میکروسکوپی نیز گرانولار و شامل ۷۵ تا ۸۰ درصد پلاژیوکلاز به اندازه ۰/۳ تا ۰/۷ میلی‌متر و ۵ درصد هورنبلند به اندازه ۰/۳ میلی‌متر است.

پیروکسن مونزودیوریت پورفیری به رنگ تیره مایل به زرد در بخش‌هایی از مرکز و جنوب شرق محدوده رخنمون دارد (شکل ۲). کانی‌های پلاژیوکلاز و گاه پیروکسن در نمونه دستی آن قابل تشخیص هستند. بافت آن در مقاطع میکروسکوپی، پورفیری و فنو کریست آن ۲۵ تا ۳۰ درصد است. فنو کریست شامل پلاژیوکلاز به میزان ۱۵ تا ۲۰ درصد و اندازه ۰/۳ تا ۲ میلی‌متر، پتاسیم فلدسپات به میزان ۵ تا ۷ درصد و اندازه ۰/۳ تا ۰/۵ میلی‌متر، پیروکسن ۱ تا ۲ درصد و اندازه ۰/۳ تا ۰/۵ میلی‌متر است. زمینه شامل پلاژیوکلاز، پتاسیم فلدسپات و پیروکسن به همراه ۲ درصد کانی اوپک است.

بیوتیت هورنبلند پیروکسن دیوریت پورفیری به رنگ تیره مایل به سبز، فقط در قسمت شمال غربی محدوده رخنمون دارد (شکل ۲). بافت آن پورفیری و میزان فنو کریست آن ۴۰ تا ۴۵ درصد است. فنو کریست شامل ۱۵ تا ۲۰ درصد پلاژیوکلاز به اندازه ۰/۳ تا ۲ میلی‌متر، ۴ تا ۵ درصد بیوتیت به اندازه ۰/۴ میلی‌متر، ۵ تا ۷ درصد هورنبلند به اندازه ۰/۴ تا ۰/۸ میلی‌متر، ۷ تا ۱۰ درصد پیروکسن به اندازه ۰/۳ تا ۱ میلی‌متر است. زمینه شامل کانی‌های فنو کریست، کانی فرعی زیرکن، کانی‌های دگرسان کلریت و کربنات و ۲ درصد کانی اوپک است.

پیروکسن دیوریت پورفیری با رنگ تیره متمایل به سبز در دو ناحیه شمال غرب و شمال شرق محدوده رخنمون دارد (شکل ۲). کانی پلاژیوکلاز در نمونه دستی این واحد قابل تشخیص است. بافت آن پورفیری و دارای ۱۵ تا ۲۰ درصد فنو کریست بوده و فنو کریست‌ها شامل پلاژیوکلاز به میزان ۱۵ درصد و اندازه ۰/۵ تا ۳ میلی‌متر و پیروکسن به میزان ۱ تا ۲ درصد و اندازه ۰/۵ میلی‌متر است (شکل ۳-C). زمینه شامل کانی‌های فنو کریست و ۱ درصد کانی اوپک است.

روش مطالعه

برای شناسایی دقیق‌تر و جداسازی بیشتر واحدهای آذرین در

هورنبلند بیوتیت گرانودیوریت پورفیری به رنگ روشن مایل به سبز و به صورت استوک در شمال محدوده رخنمون اندکی دارد (شکل ۲). بافت آن پورفیری با میزان ۵۰ تا ۵۵ درصد فنو کریست است و فنو کریست‌ها شامل ۱۵ تا ۲۰ درصد کوارتز به اندازه ۰/۳ تا ۰/۴ میلی‌متر، ۲۰ تا ۲۵ درصد پلاژیوکلاز به اندازه ۰/۵ تا ۴ میلی‌متر، ۵ تا ۷ درصد بیوتیت به اندازه ۰/۲ تا ۰/۳ میلی‌متر و ۲ درصد هورنبلند به اندازه ۰/۳ تا ۰/۷ میلی‌متر است. زمینه سنگ شامل کوارتز، پلاژیوکلاز و به میزان کمتر بیوتیت، کانی‌های فرعی مانند زیرکن و ۱ تا ۲ درصد کانی اوپک (پیریت) هستند.

بیوتیت گرانودیوریت پورفیری به رنگ روشن مایل به زرد فقط در بخش شمالی محدوده رخنمون دارد (شکل ۲). بافت آن پورفیری و میزان فنو کریست آن ۵۰ تا ۵۵ درصد بوده و مشتمل بر ۱۵ تا ۲۰ درصد کوارتز به اندازه ۰/۳ میلی‌متر، ۲۰ تا ۲۵ درصد پلاژیوکلاز به اندازه ۰/۵ تا ۳ میلی‌متر، ۵ تا ۷ درصد بیوتیت به اندازه ۰/۲ تا ۰/۳ میلی‌متر است (شکل ۳-B). زمینه سنگ شامل کانی‌های یادشده، کانی فرعی زیرکن و ۱ درصد کانی اوپک است.

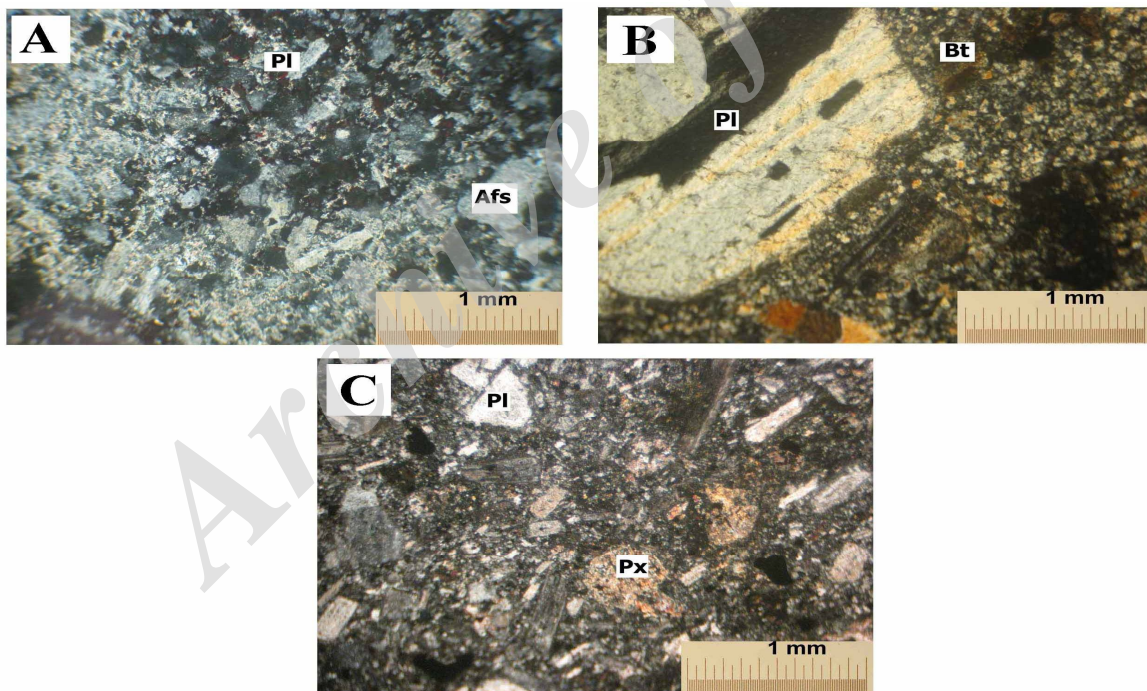
بیوتیت هورنبلند گرانودیوریت پورفیری رنگ روشن مایل به سبز و به صورت استوک در شمال غرب محدوده رخنمون دارد (شکل ۲). بافت آن پورفیری با میزان فنو کریست ۵۰ تا ۵۵ درصد است. فنو کریست شامل ۱۵ تا ۲۰ درصد کوارتز به اندازه ۰/۳ تا ۰/۴ میلی‌متر، ۲۰ تا ۲۵ درصد پلاژیوکلاز به اندازه ۰/۵ تا ۴ میلی‌متر، ۲ درصد بیوتیت به اندازه ۰/۲ تا ۰/۳ میلی‌متر و ۵ تا ۷ درصد هورنبلند به اندازه ۰/۳ تا ۰/۷ میلی‌متر است.

توده‌های مونزونیتی در منطقه خود زیر نفوذ واحدهای نیمه عمیق جوان‌تر با ترکیب دیوریتی قرار گرفته اند (شکل ۲).

هورنبلند دیوریت به رنگ خاکستری تیره مایل به سبز است و در نمونه دستی آن درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و گاهی هورنبلند قابل تشخیص هستند. بافت این واحد گرانولار است. این واحد به صورت محدود در بخش‌هایی از شمال و غرب محدوده رخنمون دارد (شکل ۲). بافت این واحد در مقاطع

این نمونه‌ها همچنین برای آنالیز عناصر کمیاب و نادر خاکی به آزمایشگاه Acme کشور کانادا ارسال شد و به روش ICP-MS و ذوب قلیایی مورد تجزیه قرار گرفت. نتایج تجزیه با نرم‌افزار GCDkit پردازش و از نمودارهای لازم پترولوژیکی برای تعبیر و تفسیر استفاده شد. طی پیمایش‌های صحرائی با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی ۱۳۷ نمونه خرده‌سنگی از کل محدوده کوه زر برداشت و تجزیه به روش ICP-MS با حلال تیزاب سلطانی برای ۳۷ عنصر در آزمایشگاه Acme کشور کانادا انجام شد و سرانجام نقشه‌های ژئوشیمی سنگی با مقیاس ۱:۱۵۰۰۰ در محدوده‌ای به وسعت ۸ کیلومتر مربع برای محدوده کوه زر تهیه شد.

محدوده کوه زر، در مجموع بیش از ۲۰۰ نمونه سطحی با در نظر گرفتن تصاویر ماهواره‌ای پردازش شده و مؤلفه‌های مختلف در صحرا از قبیل تغییرات بافتی، درصد، نوع و اندازه فنوکریست و در صورت پورفیری بودن بافت و تغییرات دگرسانی برداشت شدند. پس از تهیه و بررسی ۱۳۲ مقطع نازک، نقشه زمین‌شناسی و دگرسانی در مقیاس ۱:۱۵۰۰۰ در محدوده‌ای به وسعت ۸ کیلومتر مربع تهیه شد. ۱۵ مقطع نازک صیقلی تهیه و برداشت و نقشه کانی‌سازی در مقیاس ۱:۱۵۰۰۰ در محدوده‌ای به وسعت ۸ کیلومتر مربع تهیه شد. پس از بررسی‌های سنگ‌نگاری ۱۰ نمونه از توده‌های آذرین نفوذی با کمترین میزان دگرسانی انتخاب شد و در شرکت تجزیه‌کنندگان کانسارهای بلورین آمتیس شرق توسط دستگاه XRF مورد آنالیز اکسیدهای اصلی قرار گرفت.



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی توده‌های نفوذی محدوده کوه زر، دامغان در XPL. A: حضور پلاژیوکلازها و فلدسپات‌های آلكالی در سنگ مونزونیت پورفیری، B: بلورهای بیوتیت و پلاژیوکلاز به‌همراه کوارتزهای ریزبلور زمینه در بیوتیت گرانودیوریت پورفیری و C: فنوکریست‌های شامل پلاژیوکلاز و پیروکسن در سنگ پیروکسن دیوریت پورفیری. Pl: پلاژیوکلاز، Afs: آلكالی فلدسپات، Bt: بیوتیت، Px: پیروکسن. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

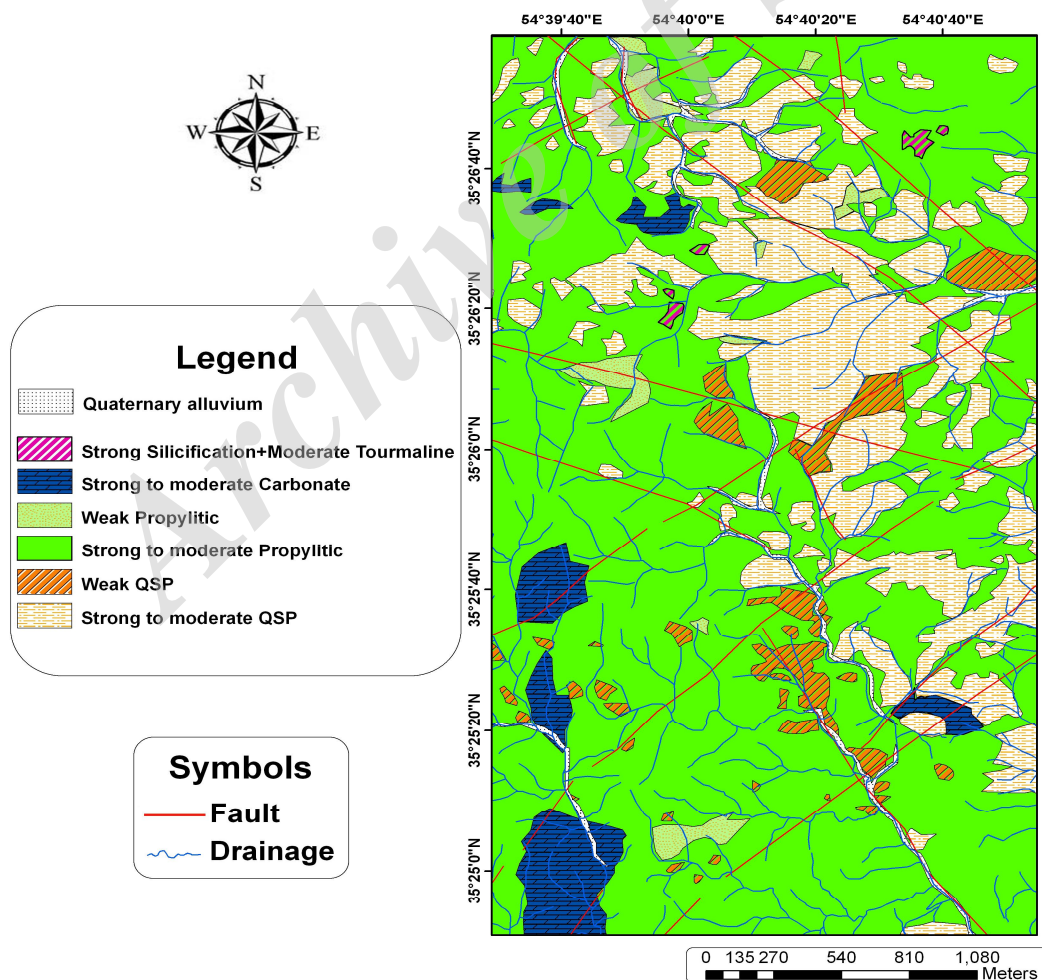
Fig. 3. Photomicrographs of the intrusive rocks in the Kuh Zar district, Damghan, in XPL. A: Plagioclase and alkali feldspar in monzonite porphyry, B: Biotite and plagioclase crystals with microcrystalline quartz in biotite granodiorite porphyry, and C: plagioclase and pyroxene phenocrysts in pyroxene diorite porphyry. Pl: Plagioclase, Afs: Alkali feldspar, Bt: Biotite, Px: Pyroxene. Abbreviations after Whitney and Evans (2010)

دگرسانی

بر اساس بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی، توده‌های نفوذی نیمه عمیق تحت تأثیر محلول‌های کانه‌دار قرار گرفته و دگرسان شده‌اند (شکل ۴). دگرسانی‌های موجود در محدوده کوه زر را می‌توان به چهار دسته اصلی تقسیم کرد: دگرسانی سرسیتیک که به زیر پهنه‌های سرسیتیک شدید تا متوسط و سرسیتیک ضعیف تقسیم می‌شود؛ دگرسانی پروپلیتیک شامل پروپلیتیک شدید تا متوسط و پروپلیتیک ضعیف؛ دگرسانی کربناته شدید تا متوسط و در نهایت دگرسانی سیلیسی شدید + تورمالینی متوسط. دگرسانی سرسیتیک شدید تا متوسط با گسترش شمال غرب به

جنوب شرق محدوده، توده‌های بیوتیت گرانودیوریت پورفیری، هورنبلند بیوتیت گرانودیوریت پورفیری، پیروکسن مونزونیت پورفیری، مونزونیت پورفیری، پیروکسن مونزودیوریت پورفیری و واحد پیروکسن آندزیت را تحت تأثیر خود قرار داده است. ویژگی این پهنه، وجود کوارتز به صورت پراکنده و رگه‌چهای، تبدیل پلاژیوکلاز و آلکالی فلدسپات به میزان ۱۵ تا ۷۰ درصد به سرسیت، حضور ۳ تا ۴ درصد قالب پیریت (پیریت کاملاً اکسید شده) و گاه حضور اکسید آهن به صورت رگه‌چهای و به میزان ۵ تا ۷ درصد است (شکل ۵-۸).

Alteration Map of Kuh Zar district



شکل ۴. نقشه دگرسانی محدوده کوه زر

Fig. 4. Alteration map of Kuh Zar area

پهنه، دگرسانی ۵ تا ۶۰ درصد پلاژیوکلازها به کربنات و ۱۰ تا ۳۰ درصد به سرسیت تبدیل شده‌اند (شکل ۵-۵). اکسید آهن این دگرسانی حدود ۱ تا ۶ درصد است. دگرسانی سیلیسی شدید + تورمالینی متوسط به‌طور بسیار محدود در بخش شمال‌غرب و شمال‌شرق محدوده و همراه با واحد سنگی مونزونیت پورفیری دیده می‌شود. ویژگی بارز این دگرسانی حضور رگه‌چه‌های تورمالین-اکسید آهن، وجود کوارتزهای ریزبلور ثانویه به میزان ۷۰ تا ۸۵ درصد زمینه سنگ و ۱۰ درصد تورمالین پراکنده در سنگ است (شکل ۵-۵).

کانی‌سازی

کانی‌سازی در محدوده کوه زر با گسترش شمال‌غربی-جنوب‌شرقی، به حالت دانه پراکنده در متن سنگ‌های مونزونیت پورفیری با دگرسانی سرسیتیک رخ داده است. پیریت اولیه اکسیده شده است و اکسیدهای آهن ثانویه از جمله گوتیت، هماتیت و لیمونیت در سطح زمین دیده می‌شود. شدت اکسیداسیون منطقه زیاد بوده است. آثار کانی‌سازی مس به‌صورت رگه‌چه فیروزه به میزان ۲ تا ۵ درصد در واحد پیروکسن مونزودیوریت پورفیری شمال منطقه دیده می‌شود (شکل ۶) بدین منظور، در نقشه کانی‌سازی، توزیع اکسید آهن در سطح زمین که میزان آن در پهنه‌های دگرسان بین ۱ تا ۱۰ درصد متغیر است، به‌عنوان معرف، برای پی‌جویی کانی‌سازی سولفیدی آورده شده است. بیشترین میزان توزیع اکسید آهن، مربوط به نیمه شمالی منطقه است (شکل ۶). روابط صحرائی و بررسی‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که پیریت در پهنه سرسیتیک کمی بعد و هم‌زمان با کوارتز تشکیل شده است. دیگر پهنه‌های دگرسانی بدون کانی‌سازی دانه پراکنده هستند. در مرکز محدوده رگه‌چه‌های اکسید آهن ثانویه با پهنه دگرسانی سرسیتیک شدید تا متوسط همراه هستند.

کانی‌سازی کوارتز + سولفید رگه‌چه‌ای نیز با امتداد شمال‌غرب-جنوب‌شرق به ضخامت یک سانتی‌متر در پهنه دگرسانی پروپلیتیک شدید تا متوسط واقع در جنوب محدوده دیده

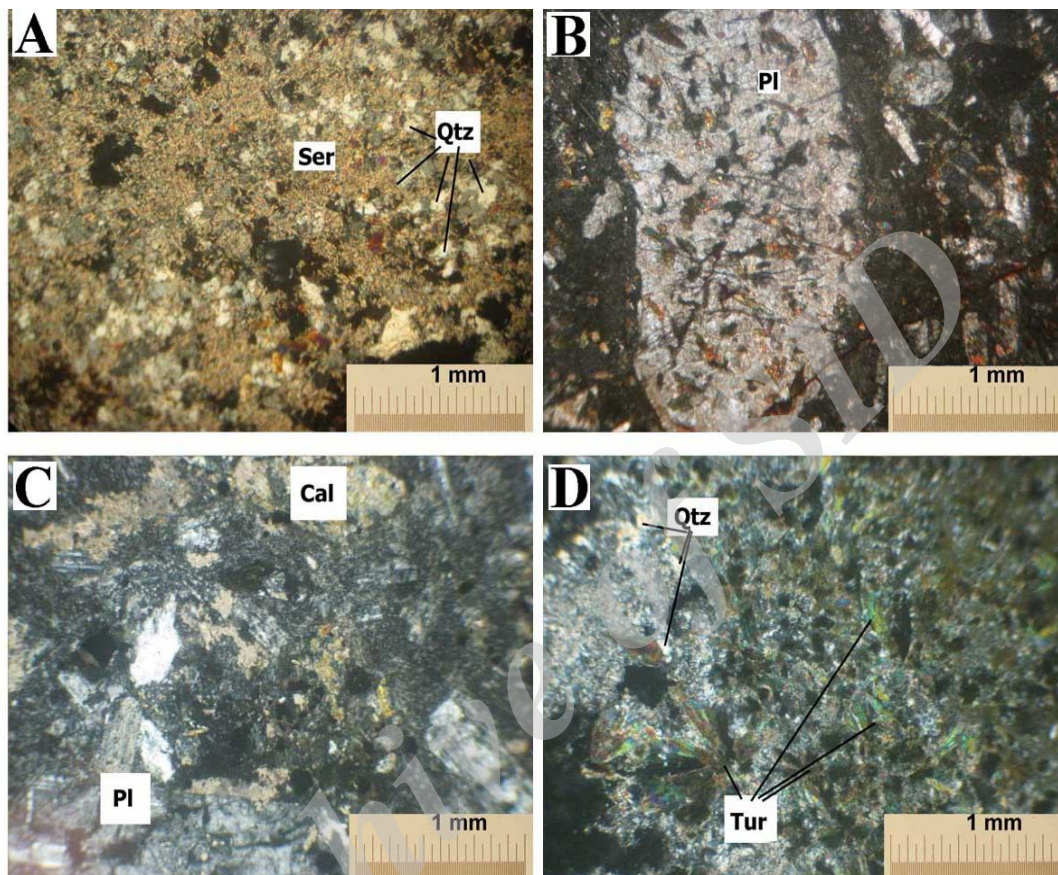
دگرسانی سرسیتیک ضعیف با گسترش کم، در بخش‌های مرکزی محدوده و در واحدهای مونزونیت پورفیری و پیروکسن مونزودیوریت پورفیری دیده می‌شود. تفاوت این دگرسانی با دگرسانی سرسیتیک شدید تا متوسط در تبدیل پلاژیوکلاز و آلکالی فلدسپات به میزان کمتر از ۱۵ درصد به سرسیت است. دگرسانی پروپلیتیک شدید تا متوسط بیشترین گسترش را نسبت به دیگر پهنه‌های دگرسانی در منطقه داشته و در تمامی منطقه گسترده است. این پهنه دگرسانی همراه با واحدهای سنگی پیروکسن دیوریت پورفیری، بیوتیت هورنبلند پیروکسن دیوریت پورفیری، پیروکسن مونزودیوریت پورفیری، هورنبلند لایت، پیروکسن تراکی لایت، پیروکسن آندزیت و توف بلورین دیده می‌شود. ویژگی بارز این دگرسانی تبدیل ۵ تا ۷۰ درصد پلاژیوکلازها به کربنات، ۵ تا ۳۰ درصد به اپیدوت، ۵ تا ۲۵ درصد به کلریت، تبدیل ۲۰ تا ۸۰ درصد هورنبلندها به کلریت، ۱۰ تا ۷۰ درصد به کربنات و تبدیل ۵ تا ۷۰ درصد کلینوپيروكسن‌ها به کلریت و کربنات و حضور حدود ۱ تا ۵ درصد اکسید آهن است (شکل ۵-۵).

دگرسانی پروپلیتیک ضعیف با وسعت کم در بخش‌های جنوب‌غرب، غرب و شمال‌غرب محدوده وجود دارد. این دگرسانی همراه با واحدهای سنگی بیوتیت هورنبلند گرانودیوریت پورفیری، هورنبلند دیوریت، پیروکسن دیوریت پورفیری، بیوتیت هورنبلند پیروکسن دیوریت پورفیری و پیروکسن آندزیت دیده می‌شود. این دگرسانی با تبدیل ۱ تا ۵ درصد پلاژیوکلازها به کربنات و کلریت و تبدیل ۱ تا ۵۰ درصد کلینوپيروكسن‌ها به کلریت و کربنات و در نهایت تبدیل ۴۰ تا ۹۰ درصد هورنبلندها به کلریت شناسایی می‌شود. محتوای اکسید آهن دگرسانی پروپلیتیک ضعیف حدود ۱ تا ۵ درصد است.

دگرسانی کربناته شدید تا متوسط با گسترش محدود در قسمت جنوب‌غرب و جنوب‌شرق محدوده، واحد توف بلورین را تحت تأثیر قرار داده است و در بخش شمال‌شرق محدوده در واحد سنگی پیروکسن دیوریت پورفیری دیده می‌شود. در این

هماتیت، لیمونیت و فیروزه مهمترین کانی‌های پهنه اکسیدان در کل این ناحیه هستند.

می‌شود. بخش بیشتر کانی‌سازی سولفیدی در این منطقه دستخوش اکسایش شده است. کانی‌هایی مانند گوتیت،



شکل ۵. دگرسانی در توده‌های نفوذی محدوده کوه زر، دامغان در XPL. A: دگرسانی سرسیتیک شدید با حضور کوارتز پراکنده و سرسیتی شدن گسترده سنگ، B: دگرسانی پروپلیتیک شدید تا متوسط با دگرسانی پلاژیوکلاز به اپیدوت، C: دگرسانی کربناته، جانشینی پلاژیوکلاز توسط کانی-های کربناته و D: نمایی از پهنه سیلیسی-تورمالینی در مقطع نازک. Qtz: کوارتز، Ser: سرسیت، Pl: پلاژیوکلاز، Cal: کلسیت، Tur: تورمالین. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

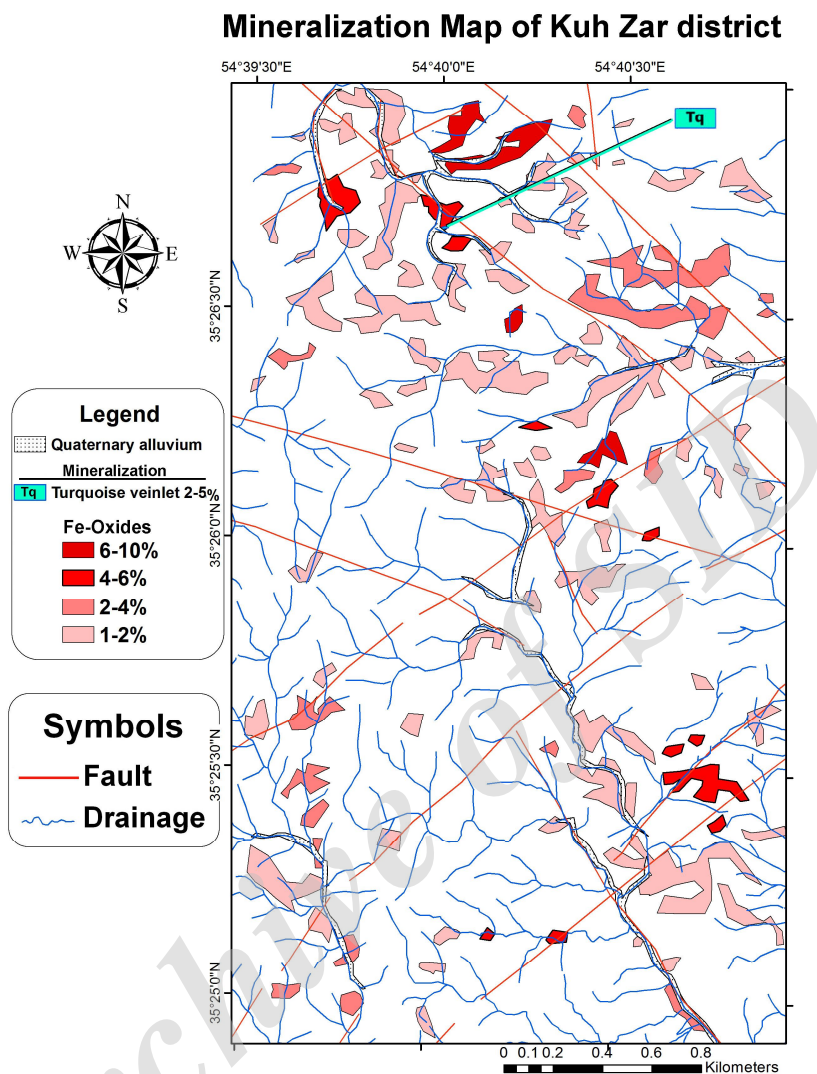
Fig. 5. Alteration in the Kuh Zar intrusive rocks, Damghan, in XPL. A: Strong QSP alteration with disseminated quartz and widespread sericitization in the rock, B: Strong to moderate propylitic alteration with alteration of plagioclase to epidote, C: Carbonate alteration, replacement of plagioclase by carbonate minerals, and D: A view of silicification-tourmalinization zone in thin section. Qtz: Quartz, Ser: Sericite, Pl: Plagioclase, Cal: Calcite, Tur: Tourmaline. Abbreviations after Whitney and Evans (2010)

خارج می‌شود و به شکل غیرعادی در می‌آید (Adams, 1985)

محاسبات آماری عناصر طلا، نقره، مس، سرب و روی به دست آمده از نتایج تجزیه ۱۳۷ نمونه خردسنگی در جدول ۱ آمده است.

ژئوشیمی اکتشافی

هدف ژئوشیمی اکتشافی، دستیابی به تمرکز غیرعادی عناصری است که به کانی‌سازی وابسته‌اند. توزیع آماری عناصر اصلی در طبیعت عادی است، در شرایطی که سنگ‌ها تحت تأثیر دگرسانی و کانی‌سازی قرار بگیرند، این توزیع از حالت عادی



شکل ۶. نقشه کانی‌سازی محدوده کوه زر

Fig. 6. Mineralization map of Kuh Zar area

جدول ۱. محاسبات آماری عناصر حاصل از نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی در محدوده کوه زر

Table 1. Statistical computations of elements derived from lithochemical samples in the Kuh Zar area

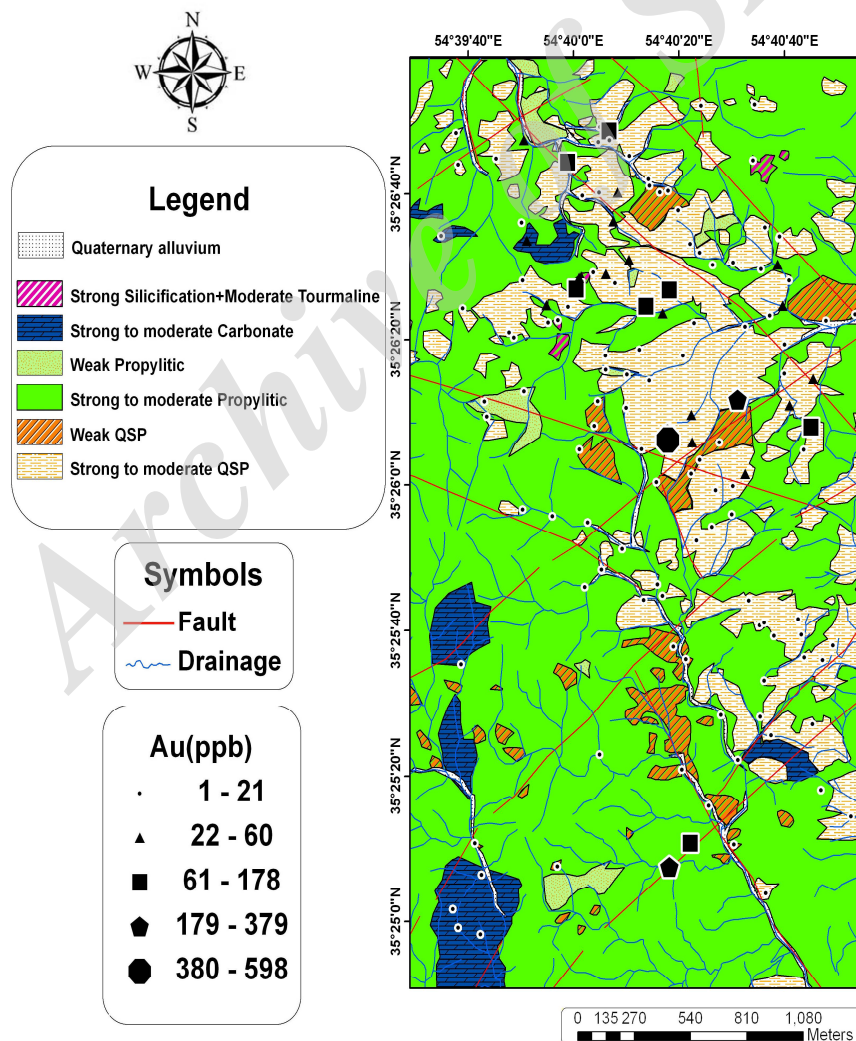
Element	Max	Min	Mean	Median	Mode	Standard Deviation
Au(ppb)	598	1	25.23	8.8	24.4	66.33
Ag(ppb)	3747	19	344.20	155	48	512.26
Cu(ppm)	679	7	72.59	57	44.09	70.71
Pb(ppm)	1427	4	98.57	45	64	189.91
Zn(ppm)	1013	5	94.08	53	33	137.77

میزان دیوریت پورفیری و دگرسانی پروپلیتیک شدید تا متوسط مرتبط است (شکل ۷).

نقره: میزان نقره از ۱۹ تا ۳۷۴۷ میلی گرم در تن متغیر است. بیشترین میزان (۳۷۴۷ ppb) مربوط به نمونه‌ای در مرکز محدوده است. این نمونه در سنگ میزبان پیروکسن مونزودیوریت پورفیری با دگرسانی سرسیتیک شدید تا متوسط دیده می‌شود. پس از آن نمونه، نمونه‌ای دیگر به میزان ۳۲۸۳ ppb حائز بیشترین میزان نقره است. این نمونه با پیروکسن دیوریت‌های پورفیری جنوب منطقه با دگرسانی پروپلیتیک شدید تا متوسط مرتبط است.

بر اساس اکتشافات ژئوشیمیایی با روش خرده‌سنگی نتایج زیر به دست آمد:

طلا: میزان طلا از ۱ تا ۵۹۸ میلی گرم در تن متغیر است. بیشترین میزان طلا (۵۹۸ ppb) مربوط به مرکز محدوده است و با دگرسانی سرسیتیک شدید تا متوسط در سنگ مونزونیت پورفیری دیده می‌شود. پس از آن نمونه واقع در جنوب محدوده به میزان ۳۷۹ ppb دارای بیشترین میزان طلاست. این نمونه با کانی‌سازی سولفیدی همراه با رگه‌چه‌های کوارتز با امتداد شمال غرب - جنوب شرق به ضخامت یک سانتی متر در سنگ



شکل ۷. نقشه ژئوشیمی خرده‌سنگی - دگرسانی عنصر طلا در محدوده کوه زر

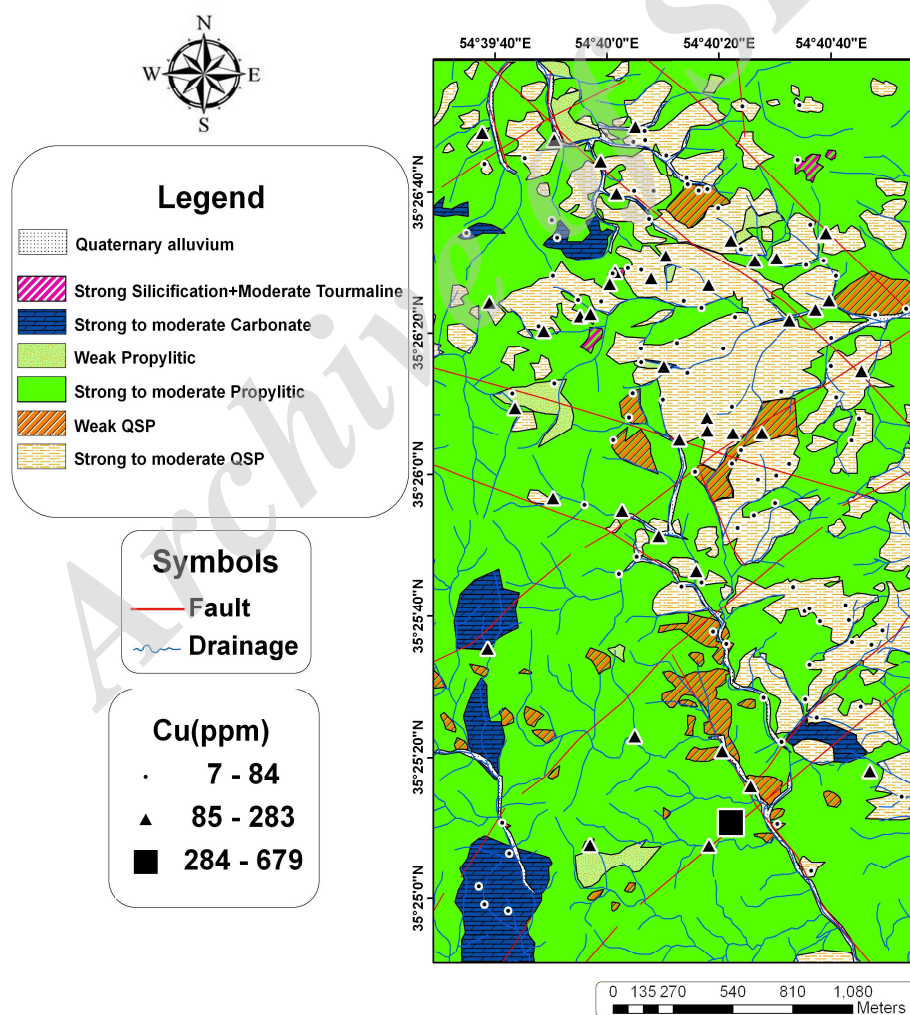
Fig. 7. Lithochemo-geochemical alteration map of gold element in the Kuh Zar area

از این ناحیه، نمونه‌ای به میزان ۱۲۴۰ گرم در تن دارای بیشترین میزان سرب است. این نمونه در مونزونیت پورفیری‌های جنوب محدود با دگرسانی سرسیتیک ضعیف دیده می‌شود.

روی: میزان روی در محدوده از ۵ تا ۱۰۱۳ گرم در تن متغیر است. بیشترین میزان (۱۰۱۳ ppm) مربوط به نمونه برداشت شده از شمال غرب محدود است. در این نقطه رگه‌چه‌های کوارتز در واحد پیروکسن مونزودیوریت پورفیری با دگرسانی سرسیتیک دیده می‌شود. مقادیر بی‌هنجاری دیگر مربوط به جنوب و شمال محدود است.

مس: میزان مس از ۷ تا ۶۷۹ گرم در تن متغیر است. بیشترین بی‌هنجاری مربوط به نمونه‌ای در جنوب محدود بوده که این نمونه دارای بیشترین میزان نقره است. پس از آن بیشترین میزان مس (۲۸۳ ppm) در پیروکسن مونزودیوریت پورفیری‌های منتهالیه جنوب شرقی محدود دیده می‌شود. دگرسانی در این ناحیه از نوع سرسیتیک شدید تا متوسط است (شکل ۸).

سرب: دامنه تغییرات میزان سرب از ۴ تا ۱۴۲۷ گرم در تن بوده و بیشترین مقادیر مربوط به نمونه برداشت شده از بخش شمال غربی محدود است. این نمونه با دگرسانی سیلیسی شدید-تورمالینی متوسط در سنگ مونزونیت پورفیری مرتبط است. پس



شکل ۸. نقشه ژئوشیمی خرده‌سنگی- دگرسانی عنصر مس در محدوده کوه زر

Fig. 8. Lithochemo-geochemical alteration map of copper element in the Kuh Zar area

نمودارهای همبستگی

برای تعیین روابط همبستگی عناصر از روش رگرسیون خطی استفاده شده است. در این راستا با توجه به نوع توزیع عناصر،

نمودار پراکنش ترسیم شده است. ضریب همبستگی عناصر در جدول ۲ آمده است. نتایج حاصل از این بررسی‌ها به شرح زیر است.

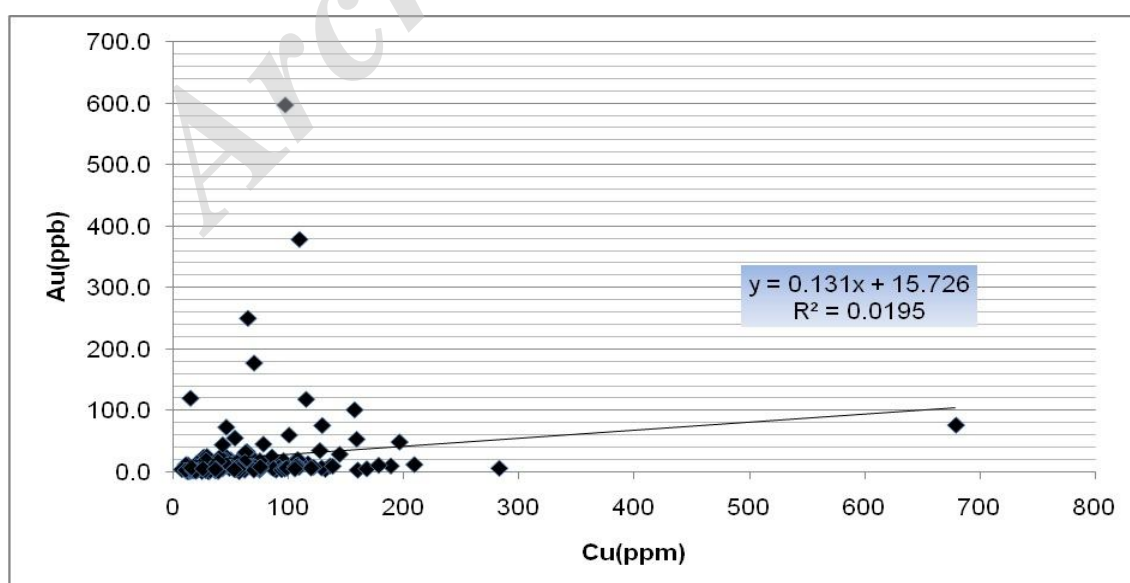
جدول ۲. روابط همبستگی عناصر حاصل از نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی در محدوده کوه زر

Table 2. Correlations of elements derived from lithochemical samples in the Kuh Zar area

Pair of element	R	Pair of element	R	Pair of element	R	Pair of element	R
Au-Cu	0.13	Au-As	0.03	Cu-Pb	0.14	Cu-Sb	0.71
Au-Ag	0.04	Au-Sb	0.08	Cu-Zn	0.4	Cu-Hg	0.24
Au-Pb	0.03	Au-Hg	0.07	Cu-Mo	0.07		
Au-Zn	0.02	Cu-Ag	0.37	Cu-As	0.44		

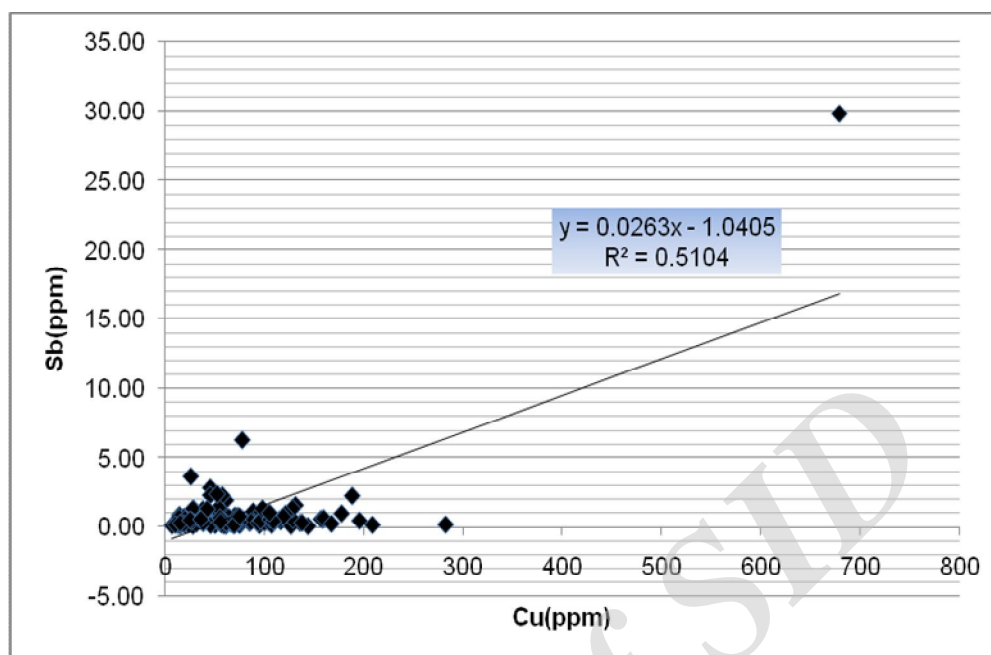
همبستگی مثبت وجود دارد. بیشترین ضریب همبستگی عنصر مس نیز با عنصر آنتیموان (۰/۷۱) است (شکل ۱۰). بدین ترتیب، به نظر می‌رسد به کارگیری عنصر آنتیموان بتواند به‌عنوان ردیاب مس در محدوده کوه زر مفید باشد.

با توجه به جدول ۲، عنصر طلا با عنصر مس همبستگی مثبت نشان می‌دهد (شکل ۹). ضریب همبستگی عنصر طلا با عناصر نقره، آرسنیک، آنتیموان و جیوه پایین است؛ بنابراین عناصر یادشده نمی‌توانند به‌عنوان ردیاب طلا در این منطقه به کار گرفته شوند. بین عنصر مس و عناصر آنتیموان، آرسنیک، روی و نقره



شکل ۹. نمودار همبستگی عناصر طلا و مس در نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی محدوده کوه زر

Fig. 9. Correlation diagram of gold and copper elements in the Kuh Zar lithochemical samples



شکل ۱۰. نمودار همبستگی عناصر مس و آنتیموان در نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی محدوده کوه زر

Fig. 10. Correlation diagram of copper and antimony elements in the Kuh Zar lithochemical samples

مونزونیت، کوارتز مونزونیت، مونزودیوریت، دیوریت، سینیت و گرانیت قرار می‌گیرند (شکل ۱۱- A). مقایسه نام‌های به‌دست آمده از این رده‌بندی با نام‌های به‌دست آمده از بررسی‌های سنگ‌شناسی، مقداری تفاوت نشان می‌دهد. این تفاوت به دلیل اندکی دگرسانی و وجود کوارتز ثانویه است. مقدار K_2O این توده‌ها از ۲/۵۸ تا ۵/۸۸ متغیر بوده است و در نمودار مقدار سیلیس در مقابل اکسید پتاسیم (Peccerillo and Taylor, 1976) در محدوده کالک‌آلکالن پتاسیم بالا تا کمی شوشونیتی قرار گرفته‌اند (شکل ۱۱- B).

توده‌های نفوذی منطقه بر اساس Al_2O_3/Na_2O+K_2O به $Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O$ (Shand, 1943) پیشتر در محدوده متاآلومینوس تا کمی پرآلومینوس واقع شده‌اند (شکل ۱۱- C). قرار گرفتن نمونه‌های محدوده کوه زر در همان نمودار بالا با اقتباس از چپل و وایت (Chappell and White, 1974) که مرز گرانیتوئیدهای I و S را جدا می‌کند، نشان می‌دهد اغلب نمونه‌های سنگی محدوده کوه زر در محدوده گرانیتوئیدهای I قرار می‌گیرند (شکل ۱۱- C).

ژئوشیمی توده‌های نفوذی

اکسیدهای اصلی

از مجموع ۲۰۰ نمونه سنگی برداشت شده از توده‌های اسیدی و حدواسط، بررسی‌های پتروگرافی انجام شد و با توجه به شواهد و روابط صحرائی ده نمونه از واحدهای پیروکسن دیوریت پورفیری، بیوتیت هورنبلند پیروکسن دیوریت پورفیری، پیروکسن مونزودیوریت پورفیری، هورنبلند دیوریت و بیوتیت گرانودیوریت پورفیری با کمترین میزان دگرسانی برای آنالیز اکسیدهای اصلی انتخاب و توسط دستگاه XRF آنالیز شد. پس از بررسی نتایج آنالیز اکسیدهای اصلی، این نمونه‌ها برای آنالیز عناصر کمیاب و نادر خاکی مورد تجزیه قرار گرفت، نتایج آنالیز در جدول ۳ آمده است.

مقدار Si_2O در توده‌های نفوذی محدوده مورد بررسی از ۵۲/۲۷ تا ۷۰/۱ در تغییر است. برای نام‌گذاری سنگ‌ها بر اساس اکسیدهای اصلی از نمودار سنگ‌های پلوتونیک Na_2O+K_2O در مقابل Si_2O (Middlemost, 1994) استفاده شد. بر اساس این رده‌بندی، توده‌های نفوذی محدوده کوه زر در محدوده

جدول ۳. نتایج ژئوشیمیایی اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و نادر خاکی توده‌های نفوذی در محدوده کوه زر. مقادیر اکسیدهای اصلی بر حسب درصد وزنی و عناصر فرعی و نادر خاکی بر حسب ppm است

Table 3. Major and trace elements geochemical results for the intrusive rocks in the Kuh Zar area. Values for major oxides is based on weight percentage and values for trace and rare earth elements are based on ppm.

Sample No	Kp1	Kp52	Kp85	Kp103	Kp67	Kp41	G44	G6	G22	G8
x {	54°39' 39"	54°40' 12"	54°40' 2"	54°40' 34"	54°40' 35"	54°39' 57"	54°39' 38"	54°39' 23"	54°39' 34"	54°39' 10"
y {	35°26' 53"	35°26' 29"	35°25' 54"	35°25' 09"	35°26' 24"	35°26' 15"	35°27' 15"	35°27' 31"	35°27' 33"	35°27' 34"
SiO ₂	57.82	59.48	52.27	60.28	60.63	57.77	57.71	68.15	70.1	68.92
TiO ₂	0.8	0.92	0.88	0.94	0.81	0.78	0.8	0.51	0.51	0.52
Al ₂ O ₃	14.22	14.26	13.03	13.68	14.04	13.33	13.66	13.88	12.45	12.87
FeO _t	7.62	7.15	9.84	7.36	6.89	8.82	8.22	4.03	3.56	3.77
MnO	0.14	0.13	0.22	0.11	0.09	0.2	0.14	0.05	0.09	0.05
MgO	5.14	4.16	7.21	2.93	5.05	6.06	4.87	2.19	1.66	2.08
CaO	6.49	5.17	4.72	2.07	1.84	5.68	7.38	1.3	1.13	2.21
Na ₂ O	3.23	3.48	3.63	3.3	3.82	2.32	2.83	3.6	3.34	3.84
K ₂ O	3.23	3.01	3.4	5.88	3.63	3	2.58	4.04	5.79	4.02
P ₂ O ₅	7.62	0.41	0.27	0.23	0.21	8.82	0.27	0.19	0.19	0.2
L.O.I	0.83	1.58	4.3	3.01	2.74	1.58	1.3	1.89	0.9	1.32
Total	106.31	98.17	95.47	96.78	97.01	106.78	98.46	97.94	98.82	98.48
Ba	576	578	786	780	553	532	490	439	825	510
Rb	67.7	57.6	71.6	141.9	94.4	62.8	52	117.1	124.4	101.2
Sr	797.4	869.8	766.2	374.5	681.4	676.4	760.8	389.2	565.4	553.3
Zr	112.4	133.7	83.7	243.3	151.1	102	106	135.1	136.2	126.4
Nb	6	8.9	4.5	13.1	7.5	5.1	5.5	12	7.5	11.6
Ga	16.7	17.1	16.4	17.1	17.3	16.8	16.6	15.7	11.4	14.6
La	22.3	27.1	19.5	36.2	23.1	27.7	21.1	27.9	19.4	26.1
Ce	45.4	52.4	39.1	74.1	46.8	62.4	44.1	49.8	40.7	48
Pr	5.49	6.33	4.88	8.57	5.67	7.81	5.41	5.19	4.75	4.83
Nd	22.1	25.2	19.9	32.2	31.2	33.6	22.2	17.2	18.5	17.2
Sm	4.48	4.65	4.22	6.29	4.57	8.38	4.43	3.08	3.14	2.81
Eu	1.24	1.29	1.21	1.29	1.13	2.31	1.28	0.8	0.61	0.8
Gd	4.04	3.97	3.87	5.86	4.36	9.25	4.16	2.54	2.79	2.67
Tb	0.59	0.54	0.56	0.84	0.63	1.46	0.59	0.35	0.41	0.37
Dy	3.53	3.2	3.34	5.05	3.83	8.64	3.57	2.19	2.8	2.43

ادامه جدول ۳. نتایج ژئوشیمیایی اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و نادر خاکی توده‌های نفوذی در محدوده کوه زر. مقادیر اکسیدهای اصلی بر حسب درصد وزنی و عناصر فرعی و نادر خاکی بر حسب ppm است

Table 3 (continued). Major and trace elements geochemical results for the intrusive rocks in the Kuh Zar area. Values for major oxides is based on weight percentage and values for trace and rare earth elements are based on ppm.

Sample No	Kp1	Kp52	Kp85	Kp103	Kp67	Kp41	G44	G6	G22	G8
x	54°39' 39"	54°40' 12"	54°40' 2"	54°40' 34"	54°40' 35"	54°39' 57"	54°39' 38"	54°39' 23"	54°39' 34"	54°39' 10"
y	35°26' 53"	35°26' 29"	35°25' 54"	35°25' 09"	35°26' 24"	35°26' 15"	35°27' 15"	35°27' 31"	35°27' 33"	35°27' 34"
Ho	0.63	0.58	0.61	0.96	0.71	1.46	0.65	0.38	0.5	0.43
Er	1.9	1.64	1.81	2.72	2.04	3.73	1.91	1.23	1.53	1.37
Tm	0.27	0.25	0.27	0.41	0.32	0.5	0.28	0.18	0.25	0.19
Yb	1.83	1.68	1.6	2.72	2.07	2.96	1.91	1.3	1.69	1.43
Lu	0.29	0.24	0.26	0.43	0.33	0.41	0.29	0.2	0.25	0.2
Y	18.8	17	17.7	27.2	20.9	41.2	19.7	12.6	14.5	13.2
Eu/Eu*	0.89	0.92	0.92	0.65	0.77	0.8	0.91	0.87	0.63	0.89
(La/Yb)N	8.22	10.88	8.22	8.97	7.52	6.31	7.45	14.47	7.74	12.31
(Ce/Yb)N	6.42	8.07	6.32	7.05	5.85	5.45	5.97	6.23	9.91	8.68

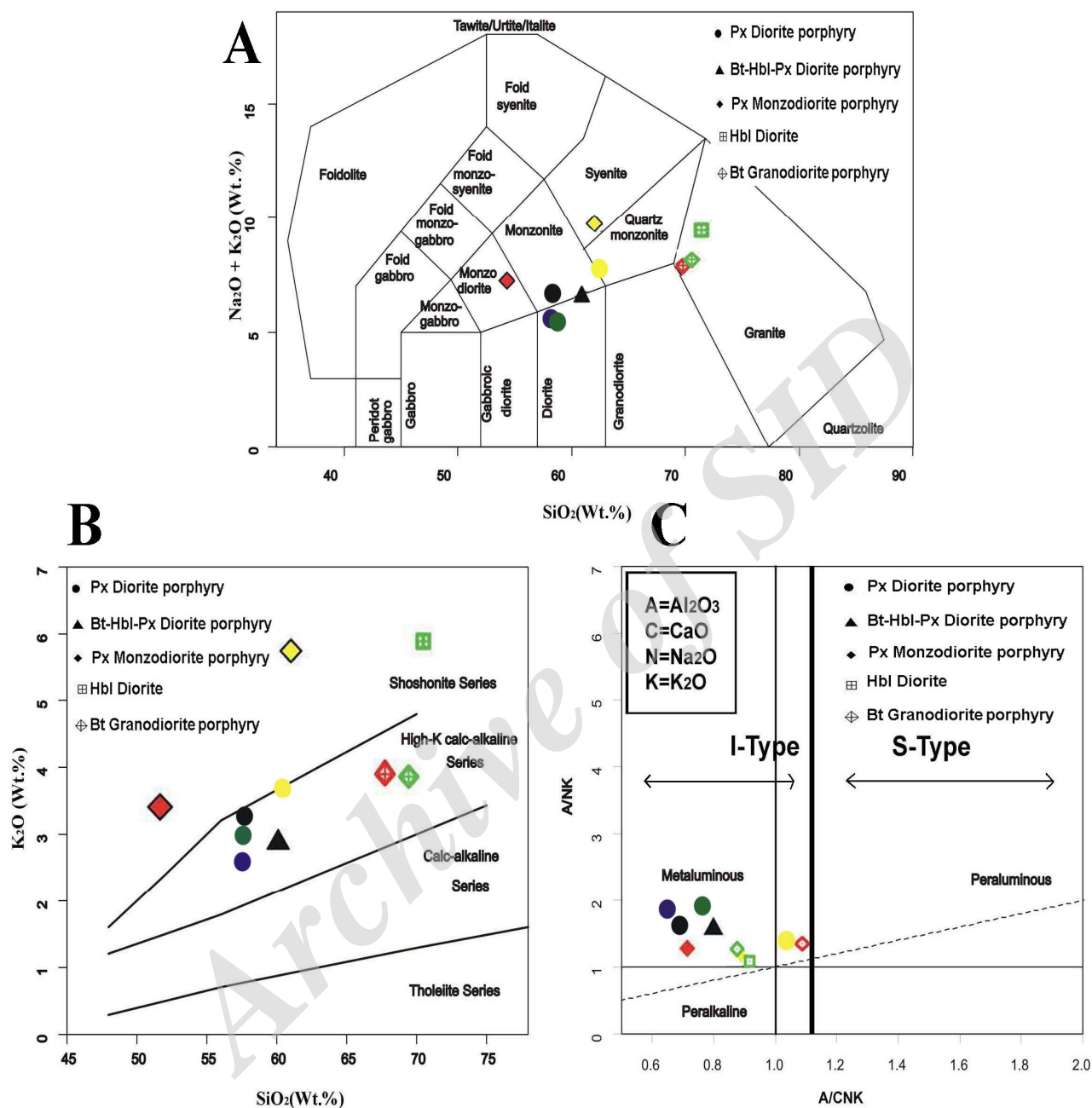
عناصر فرعی و نادر خاکی

نمودار عنکبوتی عناصر فرعی و برخی عناصر کمیاب که به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) بهنجار شده‌اند در شکل ۱۲ نشان داده شده است. تهی‌شدگی مشخصی در عناصر با شدت میدان زیاد نظیر Nb، Ti و P دیده می‌شود و در مقابل غنی‌شدگی در عناصر لیتوفیل بزرگ یون مثل Cs، K، Rb، Sr و Th دیده می‌شود. غنی‌شدگی در LILE و عناصر نادر خاکی سبک و تهی‌شدگی در HFSE از نشانه‌های ماگمای مرتبط با پهنه فرورانش است (Gill, 1981; Pearce, 1993; Rollinson, 1983).

کاهیدگی در Nb از ویژگی‌های ماگماهای مشتق شده از پوسته اقیانوسی در پهنه فرورانش است (Wilson, 1989). میزان پایین Nb، Ti و Ta می‌تواند نتیجه وجود پلاژیوکلاز و اکسیدهای Fe-Ti یا کانی‌های Nb-Ti در باقی‌مانده ماگمای مادر در محل مخزن باشد (Pearce and Parkinson, 1993).

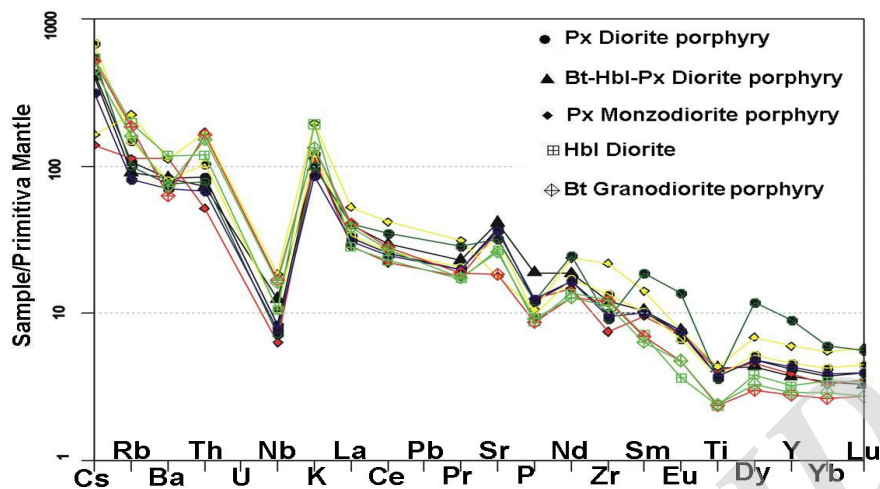
Reagan and Gill, 1989; Martin, 1999). میزان کم Nb

به فرآیندهای تهی‌شدگی در گوشته هم نسبت داده شده است (Gust et al., 1977; Woodhead et al., 1993). به اعتقاد ادواردز و همکاران (Edwards et al., 1994)، علت تهی‌شدگی Ti در ماگماتیسم، مرتبط با فرورانش و فوگاسیته اکسیژن است. وقتی فوگاسیته اکسیژن بالا باشد، دمای زیادتری لازم است تا فازهای حاوی Ti به مذاب‌های مشتق شده از منطقه فرورانش وارد شود. بنابراین Ti وارد نشده است و این عنصر بی‌هنجاری منفی نشان می‌دهد. همچنین بی‌هنجاری منفی Ti می‌تواند منعکس‌کننده نقش اکسیدهای Fe-Ti باشد (Rollinson, 1993). به نظر می‌رسد بالای بودن فوگاسیته اکسیژن، عامل تهی‌شدگی Ti در ماگماتیسم منطقه کوه زر باشد. تهی‌شدگی فسفر مربوط به تفریق آپاتیت از ماگماست (Pearce and Parkinson, 1993). کاهیدگی در باریم نشانه حضور پتاسیم فلدسپار در خاستگاه است.



شکل ۱۱. A: نام‌گذاری توده‌های نفوذی محدوده کوه زر در نمودار تفکیک SiO_2 در مقابل Na_2O+K_2O (Middlemost, 1994)، B: نمودار تغییرات K_2O در برابر SiO_2 برای تفکیک دسته‌های تولییتی، کالک‌آلکان، کالک‌آلکان با پتاسیم بالا و شوشونیتی توده‌های نفوذی محدوده کوه زر (Peccerillo and Taylor, 1976) و C: شاخص اشباع آلومینیوم در توده‌های نفوذی محدوده کوه زر با استفاده از نمودار Al_2O_3/Na_2O+K_2O به $Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O$ (Shand, 1943)، خط چین در بخش $A/CNK = 1/1$ جداکننده گرانیتوئیدهای نوع I از نوع S است. محدوده‌ها از چپ و وایت (Chappell and White, 1974)

Fig. 11. A: Classification of the Kuh Zar intrusive rocks in SiO_2 vs. Na_2O+K_2O diagram (Middlemost, 1994), B: Variation diagram of K_2O vs. SiO_2 to existence of Tholeiitic, Calc-alkaline, High K-calc-alkaline and Shoshonite series of the Kuh Zar intrusive rocks (Peccerillo and Taylor, 1976), and C: Aluminum saturation index of the Kuh Zar intrusive rocks in Al_2O_3/Na_2O+K_2O vs. $Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O$ diagram (Shand, 1943), the dashed line ($A/CNK = 1.1$) divides the I-type granitoid field from the S-type granitoid field of Chappell and White (1974).

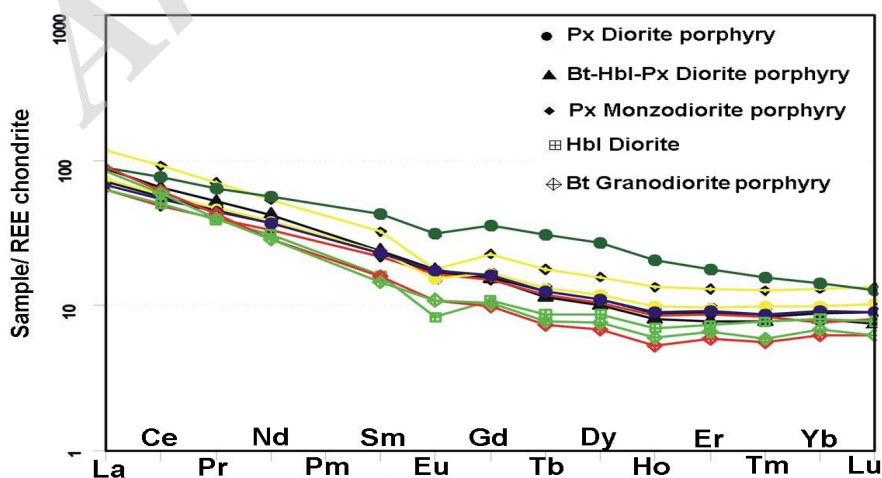


شکل ۱۲. نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب توده‌های نفوذی محدوده کوه زر، بهنجارشده با گوشته اولیه از سان و مکدونالد (Sun and McDonough, 1989)

Fig. 12. Trace element spider diagram of the intrusive rocks in the Kuh Zar area, (normalization values are from Sun and McDonough, 1989)

نداشته است. این الگوی عناصر نادر خاکی ویژه ماگماهای تشکیل شده در پهنه فرورانش و در کمان‌های آتشفشانی کالک‌آلکالن حاشیه فعال قاره است (Gill, 1981; Pearce, 1983; Wilson, 1989; Walker et al., 2001). بی‌هنجاری منفی Eu (Eu/Eu^* برابر با ۰/۸ تا ۰/۹۲) به دلیل حضور پلاژیوکلاز در سنگ منشأ ماگماست.

الگوی عناصر نادر خاکی که به کندریت نرمالایز شده‌اند (Boynton, 1984)، غنی‌شدگی نسبی از LREEها نسبت به الگوی عناصر نادر خاکی متوسط و سنگین نشان می‌دهد (شکل ۱۳). غنی‌شدگی ملایم در LREEها با مقدار اندک $(La/Yb)_N$ نمونه‌ها (برابر با ۶/۳۱ تا ۱۴/۴۷) مورد تأیید است (جدول ۳) و نشان‌دهنده این است که گارنت در منطقه ذوب‌بخشی حضور



شکل ۱۳. نمودار عنکبوتی عناصر نادر خاکی توده‌های نفوذی محدوده کوه زر، بهنجارشده با کندریت از بوینتون (Boynton, 1984)

Fig. 13. REE spider diagram of the intrusive rocks in the Kuh Zar area (normalization values are from Boynton, 1984)

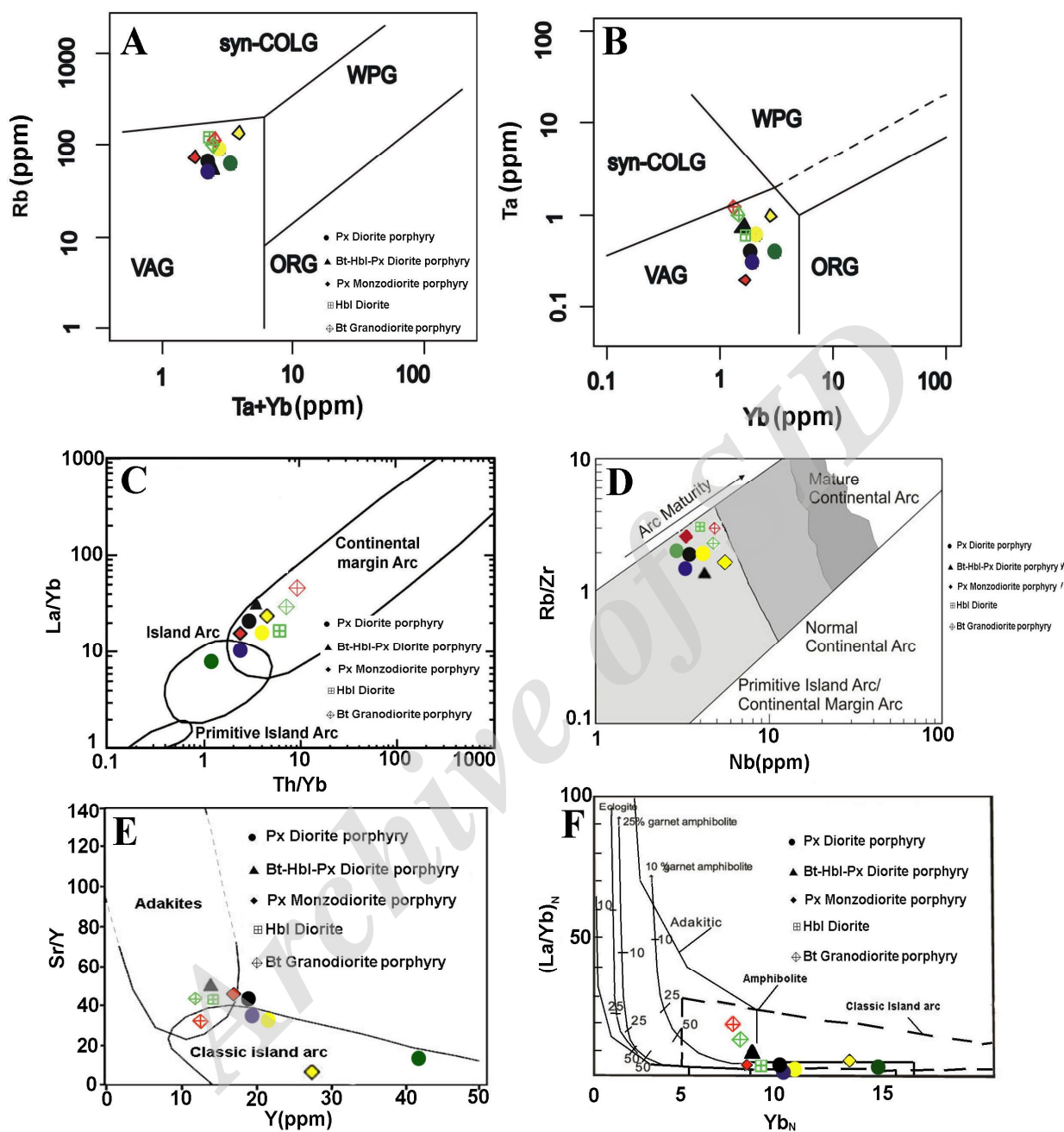
بحث و نتیجه گیری**خاستگاه و موقعیت زمین‌ساخت توده‌های نفوذی کانسار****کوه زر**

عناصر نادر خاکی کمتر از عناصر دیگر در معرض هوازدگی و فرآیندهای هیدروترمالی قرار می‌گیرند. بنابراین، الگوی فراوانی آنها می‌تواند نشانه‌هایی از خاستگاه سنگ‌ها را اثبات کند (Rollinson, 1993). بر اساس میزان عناصر فرعی Y ، Ta ، Yb ، Nb ، Rb ، $Pearce et al., 1984$)، موقعیت زمین‌ساختی تشکیل توده‌های نفوذی محدوده کوه زر، کمرندهای آتشفشانی پهنه فرورانش حاشیه قاره (VAG) است (شکل ۱۴- B و A). توده‌های نفوذی محدوده‌های کوه زر بر اساس نسبت La/Yb در مقابل Th/Yb (Condie, 1989) نیز در موقعیت زمین‌ساختی کمان حاشیه قاره جای می‌گیرند (شکل ۱۴-C). براون و همکاران (Brown et al., 1984) دریافتند که با افزایش بلوغ، گرانیتوئیدهای کمان آتشفشانی از عناصر Rb ، U ، Th ، Hf ، Nb ، Ta و Y غنی و از عناصر P ، Zr ، Ti ، Sr و Ba تهی می‌شوند. همچنین نشان دادند که نمودار دو متغیره نسبت Rb/Zr در مقابل Nb همبستگی مثبت نشان می‌دهد که در آن مقادیر با افزایش بلوغ کمان افزایش می‌یابند. شکل ۱۴-D، نمودار Rb/Zr در مقابل Nb را برای توده‌های نفوذی محدوده مورد بررسی نشان می‌دهد. چنان‌که نشان داده شده است، نمونه‌های مورد بررسی در محدوده جزایر کمان حاشیه قاره قرار گرفته‌اند. از نسبت عناصر کمیاب Zr/Y می‌توان برای تشخیص محیط‌های زمین‌ساختی مختلف استفاده کرد (Pearce and Norry, 1979). در واقع مقادیر Zr/Y بیشتر از ۳، مربوط به کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای و مقادیر کمتر از ۳ مربوط به کمان‌های آتشفشانی اقیانوسی هستند. در توده‌های نفوذی محدوده کوه زر این نسبت بین ۳ تا ۱۰ بوده که نشان‌دهنده شباهت محیط تشکیل نمونه‌ها به کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای است.

نسبت $(Ce/Yb)_N$ نیز بیانگر عمق و میزان ذوب ماگمای مادر است (Cotton et al., 1995). مقدار کم این نسبت نشان

می‌دهد که ماگما از قسمت‌های بالایی گوشته (عمق کم) یا نسبت ذوب زیاد ریشه گرفته است. در مقابل، ماگمایی با نسبت بالای $(Ce/Yb)_N$ نشان‌دهنده این است که ماگما از عمق زیاد (گستره پایداری گارنت) و نسبت ذوب کم (فشار زیاد) ریشه گرفته است (Cotton et al., 1995). چنان‌که در جدول ۳ دیده می‌شود، این نسبت در توده‌های نفوذی منطقه پایین بوده (۵/۴ تا ۹/۹) و بنابراین خاستگاه ماگمای مولد توده‌های نفوذی منطقه از بخش‌های بالایی گوشته با میزان ذوب بالا بوده است و نشان‌دهنده تشکیل نشدن ماگما در عمق پایداری گارنت است. با توجه به موازی بودن روندهای وابسته به توده‌های نفوذی منطقه، می‌توان به هم خاستگاه بودن آنها پی برد.

مقدار نسبت Sr/Y توده‌ها زیر ۶۰ بوده و همچنین میزان Y بین ۱۷ تا ۴۱ گرم در تن است. بر اساس نمودار Sr/Y در مقابل Y (Defant and Drummond, 1990)، ماگمای این توده‌های نفوذی بیشتر در محیط ماگمایی با ماهیت کالک‌آلکان (معمولی قرار می‌گیرند (شکل ۱۴-E). نمودار $(La/Yb)_N$ در مقابل Yb_N (Martin, 1995) نیز نشان می‌دهد توده‌ها ماهیت ماگمای کالک‌آلکان معمولی را دارد و ماهیت آداکیتی ندارد. بر اساس این نمودار، توده‌های نفوذی منطقه می‌تواند از ذوب بخشی آمفیولیت تشکیل شده باشد (شکل ۱۴-F). از لحاظ موقعیت زمین‌ساختی، کانی‌سازی در منطقه کوه زر در جایگاه زمین‌ساختی مناسب (پهنه ترو-د-چاه شیرین) و در بخش شرقی کمرند ماگمایی البرز شکل گرفته است. به عقیده حسن‌زاده (Hassanzadeh, 2001)، کمرندهای ماگمایی البرز و ارومیه-دختر، هر دو بخش‌های جدا شده از کمان ماگمایی واحد نئوتتیس هستند. مجموعه ماگمایی البرز به فرورانش لیتوسفر اقیانوسی تتیس به زیر خردقاره ایران مرکزی و به‌دنبال برخورد قاره‌ای عربستان و خردقاره ایران در کرتاسه پسین-سنوزوئیک پیشین نسبت داده می‌شود (Berberian and Berberian, 1981; Berberian et al., 1982; Alavi, 1994; Golonka, 2004). در واقع کمرند ماگمایی البرز در یک حوضه کششی پشت‌کمانی ناشی از فرورانش عمیق صفحه عربستان به زیر صفحه ایران مرکزی تشکیل شده است.



شکل ۱۴. A و B: گرانیتوئیدهای محدوده کوه زر متعلق به منطقه کمان آتشفشانی است. برگرفته از پیرس و همکاران (Pearce et al., 1984). VAG: volcanic arc granitoid, WPG: within plate granitoid, ORG: orogeny, syn-COLG: syn collision, C: La/Yb vs. Th/Yb diagram (Condie, 1989), D: Rb/Zr vs. Nb diagram (Brown et al., 1984) for discrimination of different tectonic environments and location of Kuh Zar area samples, E: Plot of Kuh Zar intrusive rocks on Sr/Y vs. Y diagram (Defant and Drummond, 1990), and F: Plot of Kuh Zar intrusive rocks on $(La/Yb)_N$ vs. Yb_N diagram (Martin, 1995)

مختلف و موقعیت نمونه‌های محدوده کوه زر، E: موقعیت توده‌های نفوذی محدوده کوه زر در نمودار Sr/Y در مقابل Y (Defant and Drummond, 1990) و F: موقعیت توده‌های نفوذی محدوده کوه زر در نمودار $(La/Yb)_N$ در مقابل Yb_N (Martin, 1995)

مدل کانی‌سازی در کانسار کوه زر

سیستم‌های مس پورفیری در بالای پهنه فرورانش و در حاشیه صفحات همگرا تشکیل می‌شوند. نفوذی‌های پورفیری در کانسارهای مس پورفیری دارای ترکیب دیوریت و کوارتز دیوریت، گرانودیوریت تا کوارتز مونزونیت (مونزوگرنایت)، دیوریت آلکالن، مونزونیت و به‌ندرت سینیت هستند. الگوی پهنه‌بندی دگرسانی - کانی‌سازی کانسارهای مس پورفیری از پایین به بالا شامل سدیک - کلسیک، پتاسیک، کلریت - سرسیت، سرسیت و آزیلیک پیشرفته است. دگرسانی کلریتی و پروپلیتیک به ترتیب در سطوح کم عمق و عمیق‌تر توسعه می‌یابند (Sillitoe, 2010).

سیستم کانی‌سازی در کانسار طلا - مس کوه زر با توجه به موارد یادشده در بالا از جمله موقعیت زمین‌ساختی مناسب و تشکیل ماگما در پهنه فرورانش، کانی‌سازی دانه پراکنده پیریت در متن سنگ‌های مونزونیت پورفیری به‌عنوان سنگ منشأ کانی‌سازی، دگرسانی گسترده سرسیتیک در این توده‌های نیمه عمیق، حضور فیروزه به‌عنوان مهمترین کانی‌سازی مس در پهنه اکسیدان (وجود معدن فیروزه باغو در شمال محدوده اکتشافی) و بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی عنصر طلا به میزان حداکثر ۵۹۸ میلی‌گرم در تن و عنصر مس به میزان حداکثر ۶۷۹ گرم در تن در منطقه مورد بررسی مرتبط با توده‌های نفوذی، به نظر می‌رسد احتمالاً از نوع طلا - مس پورفیری باشد. از آنجا که توده‌های

نیمه‌عمیق با ترکیب دیوریتی به‌صورت استوک و دایک در توده‌های مونزونیتی نفوذ کرده‌اند، از لحاظ سنی جوان‌تر بوده و بدون کانی‌سازی هستند.

به عقیده سلیتو (Sillitoe, 2008) و سلیتو و هدنکوئیست (Sillitoe and Hedenquist 2003)، کانسارهای اپی‌ترمال سولفید بالا می‌توانند در بالای سیستم‌های پورفیری تشکیل شوند. حضور کانسارهای اپی‌ترمال کمر بند ترود - چاه شیرین نظیر کانسارهای گندی، چشمه حافظ، چاه موسی، و همچنین وسعت و تنوع دگرسانی‌ها در کل این کمر بند می‌تواند نشان‌دهنده یک سیستم پورفیری در اعماق این منطقه باشد؛ لذا با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان کانسارهای اپی‌ترمال کمر بند ترود - چاه شیرین را با دیدگاه ذخایر اپی‌ترمال مرتبط با سیستم‌های پورفیری بازنگری کرد و از نظر ذخایر طلا - مس پورفیری در عمق نیز مورد کاوش مجدد قرار داد.

قدردانی

این پروژه با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۲۷۱۲۶/۳ در تاریخ ۹۲/۰۲/۲۰ انجام شده است. از شرکت تجزیه‌گندگان کانسارهای بلورین آمیتیس شرق برای انجام تجزیه XRF و شرکت طلای ایران برای فراهم کردن شرایط کمپ و اسکان قدردانی می‌شود.

References

- Adams, S.S., 1985. Using Geological Information to Develop Exploration Strategies For Epithermal Deposits. *Reviews in Economic Geology*, 2(1): 273-298.
- Ahmadi Shad, A., 1998. Mineralogy, Alteration and lithochemical study in gold of the Baghu area (Kuh Zar, Damghan). M.Sc. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 201 pp. (in Persian with English abstract)
- Alavi, M., 1991. Tectonic map of the Middle East, scale 1:5,000,000. Geological Survey of Iran.
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic

- belt of Iran: new data and Interpretations. *Tectonophysics*, 22(1): 211-238.
- Berberian, F. and Berberian, M., 1981. Tectono-plutonic episodes in Iran. In: F.M. Delany and H.K. Gupta (Editors), *Zagros Hindukosh. Himalaya Geodynamic Evolution*. American Geophysical Union, Washington DC, pp. 5-32.
- Berberian, F., Muir, I.D., Pankhurst, R.J. and Berberian, M., 1982. Late Cretaceous and early Miocene Andean type plutonic activity in northern Makran and central Iran. *Journal of the Geological Society*, 139(5): 605-614.
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the rare

- earth elements: meteorite studies. In: P. Henderson (Editor), *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 63–114.
- Brown, G.C., Thorpe, R.S. and Webb, P.C., 1984. The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources. *Journal of Geological Society*, 141(3): 413–426.
- Chappell, B.W. and White, A.J.R., 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8(2): 173–174.
- Condie, K.C., 1989. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary, identification and significance. *Lithos*, 23(1-2): 1–18.
- 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.
- Darvish Zadeh, A., 1992. *Geology of Iran*. Amir Kabir, Tehran, 901 pp. (in Persian)
- 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.
- Edwards, C., Menzeies, M. and Thirwell, M., 1994. Evidence from muriah, Indonesia, for interplay of supra subduction zone and inter place processes in the genesis of potassic alkaline magmas. *Journal of Petrology*, 32(3): 555–592.
- Eshragi, S.A. and Jalali, A., 2006. Geological map of Moallem, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Farhadi, R., 2007. Exploration of potash rock in the Pol salt dome, Zagros belt. 25th Symposium of Geosciences, Geological Survey & Mineral Explorations of Iran, Tehran, Iran. (in Persian with English abstract).
- Gill, J. B., 1981. *Orogenic andesites and plate tectonics*. Springer, Berlin, 390 pp.
- Golonka, J., 2004. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic. *Tectonophysics*, 381(1-4): 235–273.
- Gust, D.A., Arculus, R.A. and Kersting, A.B., 1977. Aspects of magma sources and processes in the Honshu arc. *The Canadian Mineralogist*, 35(2): 347–365.
- Hassanzadeh, J., 2001. Exhumation of the west-central Alborz Mountains, Iran, Caspian subsidence, and collision-related tectonics. *Geology*, 29(6): 559–562.
- Khalili, K. and Mackizadeh, M.A., 2012. The occurrence of tourmaline in Kuh Zar (Baghoo) Au-Cu mine, south of Semnan province. *Petrology*, 3(9): 57–70
- Liaghat, S., sheykhi, V. and Najjaran, M., 2008. Petrology, gheochemistry and genesis of Baghu turquoise, Damghan. *Journal of Science, University of Tehran*, 34(2): 133–142. (in Persian with English abstract)
- Martin, H., 1995. The Archean grey gneisses and the genesis of the continental crust. In: K.C. Condie (Editor), *The Archean crustal evolution*. Elsevier, Amsterdam, pp. 205-259.
- Martin, H., 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411–429.
- Mehrabi, B. and Ghasemi Siani, M., 2010. Mineralogy and economic geology of Cheshmeh Hafez polymetallic deposit, Semnan province, Iran. *Journal of Economic Geology*, 2(1): 1–20. (in Persian with English abstract)
- Middlemost, E.A.K., 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Sciences Reviews*, 37(3–4): 215–224.
- Najjaran, M., 2000. Geochemistry and genesis of Baghu turquoise deposit (Damghan). M.Sc. Thesis, Shiraz Unuversity, Shiraz, Iran, 150 pp. (in Persian with English abstract)
- 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, Nantwich, pp. 230–249.
- Pearce, J.A., Haris, 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.
- Pearce, J.A. and Norry, M.J., 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variation in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69(1): 33–47.
- Pearce, J.A. and Parkinson, I.J., 1993. Trace element models for mantle melting: application

- to volcanic arc petrogenesis. In: H.M. Prichard (Editor), *Magmatic Processes in Plate Tectonics*. Geological Society, London, pp. 373–403
- 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.
- Rashid Nejad Omran, N., 1993. Petrography and magmatic changes study and Relationship with Au mineralization in Baghu area, (S-SE of Damghan). M.Sc. Thesis, Tarbiat Moallem Unuversity, Tehran, Iran, 256 pp. (in Persian with English abstract)
- Reagan, M.K. and Gill, J.B., 1989. Coexisting calc-alkaline 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.
- Rollinson, H.R., 1993. *Using Geochemical Data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Science and Technical, Routledge, 352 pp.
- Roohbakhsh, P., Karimpour, M.H. and Malekzadeh Shafaroudi. A., 2016. Comparison of remote sensing processing and field study for mineralogy of alteration zones in Kuh Zar Au- Cu deposit, Damghan. 8th Symposium of Iranian Society of Economic Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran. (in Persian with English abstract)
- Shakeri, A., 2000. Geochemistry and genesis of Kuh Zar Au deposit (Baghu). M.Sc. Thesis, Shiraz Unuversity, Shiraz, Iran, 295 pp. (in Persian with English abstract)
- Shand, S.J., 1943. *Eruptive Rocks. Their Genesis, Composition, Classification, and Their Relation to Ore-Deposits with a Chapter on Meteorite*. Thomas Murby, London, 488 pp.
- Sillitoe, R.H., 2008. Major gold deposits and belts of the North and South American Cordillera: Distribution, tectonomagmatic settings, and metallogenic considerations. *Economic Geology*, 103(4): 663–687.
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41.
- Sillitoe, R.H. and Hedenquist, J.W., 2003. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 10(1): 315–343.
- 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.
- Walker, J.A., Patino, L.C., Carr, M.J. and Feigenson, M.D., 2001. Slab control over HFSE depletions in Central 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*. Chapman and Hall, London, 446 pp.
- Woodhead, J., Eggins, S. and Gamble, J., 1993. High field strength and transition element systematic in island arc and back-arc basin basalts: evidence for multi-phase melt extraction and a depleted mantle wedge. *Earth and Planetary Science Letters*, 114(4): 491–504.