مجله زمین‌شناسی اقتصادی
جلد 9، شماره 1 (سال 1396)
صفحات 117 تا 139

Journal of Economic Geology
Vol. 9, No. 1 (2017)
ISSN 2008-7306

زمین‌شناسی، دگرسانی، کانه‌زایی، ژئوشیمی اکتشافی و پترولوژی توده‌های نفوذی در محدوده اکتشافی شاه سلطان‌علی (جنوب غربی بیرجند، استان خراسان جنوبی)

سمانه نادرمزرجی، محمدحسن کریم‌پور* و آزاده ملکزاده شفارودی

گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

دریافت مقاله: 1395/07/22، پذیرش: 1395/12/15

چکیده

منطقه اکتشافی شاه سلطان‌علی در شرق بلوک لوت و جنوب غربی بیرجند قرار دارد. در این منطقه طیف گسترده‌ای از واحدهای نیمه‌عمیق با ترکیب مونزونیت پورفیری، مونزودیوریت پورفیری و دیوریت پورفیری درون واحدهای آتشفشانی با ترکیب آندزیت- بازالت نفوذ کرده، و به تشکیل انواع دگرسانی‌های پروپلیتیک، کوارتز- سرسیت- پیریت، آرژیلیک، سیلیسی، سرسیتی و کربناته منجر شده است. طبق بررسی‌های ژئوشیمیایی، توده‌های درونی منطقه همه از نوع متا آلومینوس با ماهیت کالک‌آلکالن پتاسیم بالا تا شوشونیتی است و این توده‌ها در دسته مگنتیت نوع I طبقه‌بندی می‌شوند. غنی‌شدگی عناصر LREE نسبت به HREE همراه با آنومالی منفی Nb نشان‌دهنده تشکیل ماگما در زون فرورانش است. از نظر تکتنوماگمایی توده‌های بالا در محیط گرانیتوئیدهای کمان‌های آتشفشانی[1] قرار می‌گیرند. کانی‌سازی اصلی منطقه در واحدهای مونزونیت پورفیری و مونزودیوریت پورفیری با دگرسانی کوارتز- سرسیت- پیریت رخ‌داده است. این توده‌ها بالاترین تراکم رگه‌چه، بالاترین درصد اکسید آهن و بیشترین ناهنجاری ژئوشیمیایی عناصر را نشان می‌دهند. همچنین چهار نوع کانی‌سازی استوک‌ورک، رگه‌ای، افشان و برش گرمابی همراه این توده‌ها دیده می‌شود. در بررسی‌های ژئوشیمیایی خرده‌سنگی، دامنه تغییرات عناصری مثل مس از 30 تا 454 گرم در تن، روی 27 تا 279 گرم در تن، آنتیموان 0/9 تا 152 گرم در تن، طلا 5 تا 128 میلی‌گرم در تن متغیر است که این آنومالی‌ها بر دگرسانی کوارتز- سرسیت- پیریت با کانی‌سازی استوک‌ورک منطبق است. با توجه به تنوع واحدهای نیمه‌عمیق نوع I با ماهیت کالک‌آلکالن پتاسیم بالا تا شوشونیتی، گسترش و نوع آلتراسیون‌ها، کانی‌سازی استوک‌ورک و آنومالی عناصر، احتمالاً این منطقه مرتبط با سیستم‌های مس پورفیری است.

واژه‌های کلیدی: *دگرسانی، کانی‌سازی، گرانیتوئید I، مس پورفیری، شاه سلطان‌علی، بیرجند، بلوک لوت*

مقدمه

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 گسل نایبند و بلوک طبس و از جنوب توسط فرونشت جازموریان محدود شده است. بلوک لوت به واسطه داشتن موقعیت‌های زمین‌ساختی مختلف در زمان‌های گذشته و به‌دنبال آن وجود حجم بزرگ ماگماتیسم با ویژگی‌های متفاوت، دارای توانایی بسیار مناسب برای تشکیل انواع کانی‌سازی‌هاست. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، توده‌های نفوذی مرتبط با کانی‌سازی در بلوک لوت از پوسته‌های اقیانوسی متفاوتی سرچشمه گرفته است و در نسبت‌های مختلف با پوسته قاره‌ای آلایش داشته‌اند (Karimpour et al., 2012). در بازه زمانی 33 تا 42 میلیون سال قبل (ائوسن میانی تا اوایل الیگوسن) کانی‌سازی در این

1. Volcanic arc granitoids

*مسؤول مکاتبات: karimpur@um.ac.ir

DOI: 10.22067/econg.v9i1.61010

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). تاکنون کانی‌سازی‌های متعددی از مس، سرب، روی، آنتیموان، جیوه و ذخایر غیرفلزی در بلوک لوت کشف شده است، همچنین انواع کانسارهای پورفیری، رگه‌ای، IOCG، اپی‌ترمال، اسکارن، پلی‌متال و غیره نیز در آن مورد شناسایی قرار گرفته است. از جمله کانسارهای مرتبط با سیستم پورفیری و اپی‌ترمال می‌توان به کانسار ماهرآباد (Malekzadeh Shafaroudi et al., 2010) و خوپیک (Malekzadeh Shafaroudi et al., 2015)، در جنوب غربی بیرجند، کوه‌شاه در جنوب غرب بیرجند (Abdi and Karimpour, 2012)، ده‌سلم در جنوب غربی نهبندان (Arjmandzadeh et al., 2013)، گزو در جنوب‌شرقی طبس (Mahdavi et al., 2016)، خونیک در جنوب‌غرب بیرجند (Samiee et al., 2016) و کجه در شمال‌غرب فردوس (Najafi et al., 2014) اشاره کرد (شکل 1).

گستره شاه سلطان‌علی از نظر ساختاری جزئی از بخش شرقی بلوک لوت بوده و تحت تأثیر فرآیندهای زمین‌ساختی و ماگماتیسم این بلوک قرار داشته است. منطقه اکتشافی شاه سلطان‌علی در 50 کیلومتری جنوب شرقی شهرستان خوسف (85 کیلومتری جنوب غربی بیرجند) قرار دارد و در بخش شمال شرقی نقشه 1:100000 سرچاه شور (Vassigh and Soheili, 1975) با وسعتی بیش از 37 کیلومتر مربع در بین طول‌های جغرافیایی ″50 ′56 °58 تا ″00 ′00 °59 و عرض‌های جغرافیایی ″39 ′25 °32 تا ″1 ′30 °32 واقع شده است. در اطراف این محدوده اکتشافی، کانسارها و اندیس‌های معدنی مختلفی از جمله مس- طلا پورفیری ماهرآباد در 70 کیلومتری جنوب غربی بیرجند (Malekzadeh Shafaroudi et al., 2010)، مس- طلا پورفیری کوه‌شاه در 90 کیلومتری جنوب بیرجند (Abdi and Karimpour, 2013) و کانسار مس- طلا پورفیری خوپیک در 70 کیلومتری جنوب غربی بیرجند (Malekzadeh Shafaroudi et al., 2015) گزارش شده است (شکل 1). بدین جهت، اهمیت بررسی محدوده اکتشافی شاه سلطان‌علی دوچندان شده است. پیشینه بررسی‌های انجام‌شده در منطقه عبارتند از: تهیه نقشه زمین‌شناسی 1:100000 سرچاه شور (Vassigh and Soheili, 1975)، پی‌جویی اکتشافی در منطقه کوه‌شاه توسط شرکت مهندسین مشاور کان آذین (Kan Azin, 2008) و تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی- آلتراسیون در مقیاس 1:25000 در منطقه شیخ‌آباد توسط شرکت مهندسین مشاور زرناب اکتشاف است (Zarnab exploration consulting engineers, 2009). هدف از این پژوهش، تهیه نقشه زمین‌شناسی با تأکید بر تفکیک توده‌های نفوذی نابارور از بارور، تهیه نقشه آلتراسیون- کانی‌سازی و ژئوشیمیایی اکتشافی منطقه، پترولوژی توده‌های نیمه عمیق و در نهایت ارائه مدل احتمالی کانی‌سازی است.

روش مطالعه

1) تهیه و بررسی 170 عدد مقطع نازک جهت بررسی سنگ‌شناسی، دگرسانی، تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی و دگرسانی با مقیاس 1:20000.

2) تهیه و بررسی 10 عدد مقطع نازک صیقلی و 15 عدد بلوک صیقلی برای تهیه نقشه‌های کانی‌سازی با مقیاس 1:20000.

3) بررسی و تفسیر 15 عدد رسوبات رودخانه‌ای، برداشت‌شده توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

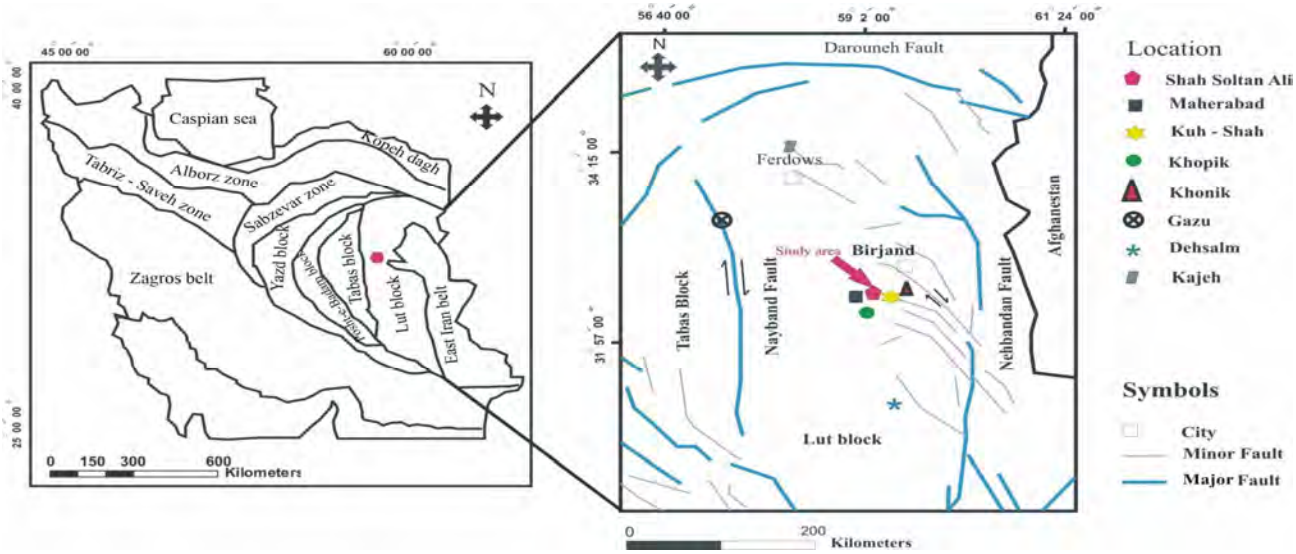
4) برداشت و تجزیه 25 نمونه خرده سنگی از مناطق دگرسانی همراه با کانی‌سازی و آنالیز به‌روش Aqua regia در شرکت زرآزما.

5) استفاده از نتایج آنالیز 4 نمونه به‌روش XRD از زون‌های دگرسانی آرژیلیک توسط شرکت مهندسین زرناب اکتشاف (1388).

6) آنالیز ژئوشیمیایی 2 نمونه برای عنصر طلا به‌روش Firre Assay از دو رگه‌چه کانی‌سازی و استفاده از نتایج آنالیز 3 نمونه مربوط عنصر طلا از نمونه‌های خرده‌سنگی که توسط شرکت زرناب اکتشاف برداشت شده است.

7) آنالیز 10 نمونه از توده‌های نیمه عمیق کمتر دگرسان‌شده برای تعیین درصد اکسیدهای اصلی به‌روش XRF در آزمایشگاه آمتیس شرق.

8) آنالیز شیمیایی عناصر فرعی و کمیاب خاکی برای 9 عدد از توده‌های نیمه عمیق، به‌روش محلول‌سازی ذوب قلیایی و استفاده از روش پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP- MS) در آزمایشگاه Acme کانادا.



شکل 1. موقعیت کانسارهای مس پورفیری و اپی‌ترمال‌های وابسته در بلوک لوت همراه با موقعیت محدوده اکتشافی شاه سلطان‌علی (Karimpour et al., 2011)

Fig. 1. Location of Cu porphyry and related epithermal deposits in Lut block. Location of Shah Soltan Ali area is shown. (Karimpour et al., 2011)

زمین‌شناسی

بر اساس نقشه زمین‌شناسی 1:100000 سرچاه شور (Vassigh and Soheili, 1975)، در منطقه مورد بررسی واحدهای آتشفشانی از قبیل، داسیت آندزیت آلتره‌شده (EOad)، پیروکسن آندزیت (ap) و پادگانه‌های آبرفتی قدیمی، جوان و دوره حاضر گزارش شده است؛ لکن در بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی چهار گروه واحد سنگی شامل واحدهای آتشفشانی و آذرآواری، توده‌های نیمه عمیق، توده‌های درونی، تراست‌های آبرفتی قدیمی و رسوبات رودخانه‌ای دوره حاضر در منطقه شناسایی شد.

سنگ‌های آتشفشانی عموماً با بافت‌های پورفیری، آمیگدال و گلومروپورفیری شناخته می‌شوند (Shelly,1993; Mackenzie et al.,1984). در منطقه مورد بررسی واحدهای آتشفشانی با بافت پورفیری، ترکیب آندزیتی و بازالتی دارند. قدیمیترین واحد سنگی منطقه، واحد پیروکسن بازالت است. این واحد به‌صورت روانه‌های بازالتی در شمال و شمال‌شرقی منطقه رخنمون دارد (شکل 2). واحد بیوتیت هورنبلند پیروکسن آندزیت نیز غالباً در شمال منطقه و در مجاورت واحدهای پیروکسن بازالت و پیروکسن دیوریت پورفیری دیده می‌شود (شکل 2). براساس بررسی‌های انجام‌شده، هیچ‌گونه کانی‌سازی در واحدهای بالا رخ‌نداده است. برش‌های آتشفشانی رخنمون‌های بسیار کوچکی در مرکز و جنوب منطقه دارند (شکل 2). قطعات تشکیل‌دهنده این برش‌ها از پیروکسن آندزیت و پیروکسن هورنبلند تراکی آندزیت است که در زمینه‌ای از جنس آندزیت قرار گرفته‌اند، در بخش‌هایی زمینه برش‌ها به‌شدت سیلیسی‌شده و بدون کانی‌سازی است. مهمترین واحدهای سنگی منطقه شاه سلطان‌علی، توده‌های نیمه عمیق است، این توده‌ها در داخل واحدهای آتشفشانی نفوذ کرده و

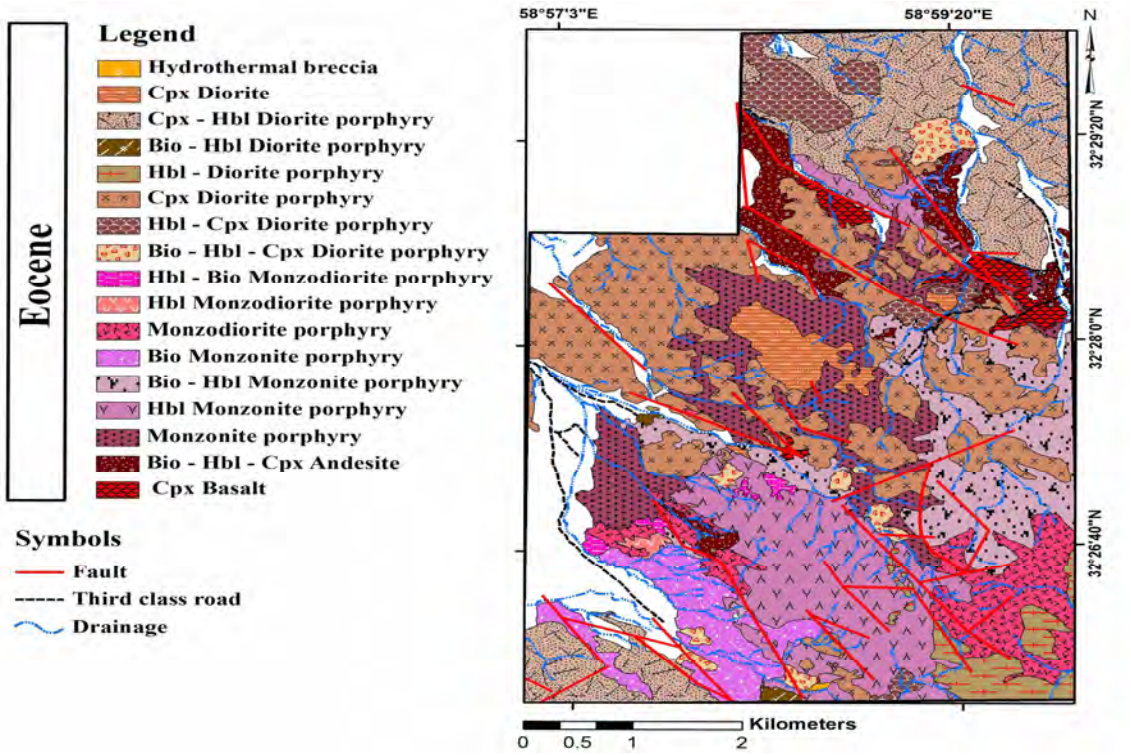
کانی‌سازی اصلی منطقه همراه با آنهاست. واحدهای نیمه عمیق در سه گروه کلی مونزونیت پورفیری، مونزودیوریت پورفیری و دیوریت پورفیری طبقه‌بندی می‌شود. هریک از واحدهای بالا بر اساس بررسی‌های میکروسکپی به چندین زیرواحد تقسیم می‌شوند که عبارتند از: مونزونیت پورفیری، بیوتیت هورنبلند مونزونیت پورفیری، هورنبلند مونزونیت پورفیری، بیوتیت مونزونیت پورفیری، مونزودیوریت پورفیری، هورنبلند مونزودیوریت پورفیری، هورنبلند بیوتیت مونزودیوریت پورفیری، دیوریت پورفیری، بیوتیت هورنبلند پیروکسن دیوریت پورفیری، پیروکسن دیوریت پورفیری، هورنبلند دیوریت پورفیری، بیوتیت هورنبلند دیوریت پورفیری و پیروکسن هورنبلند دیوریت پورفیری (شکل 2).

از جمله واحدهای مرتبط با کانی‌سازی، می‌توان به توده‌های مونزونیتی اشاره کرد. بود و یا نبود کانی‌های بیوتیت و هورنبلند سبب شده است که این توده‌ها خود به سه زیرواحد جداگانه تقسیم شوند. در مجموع توده‌های بالا در جنوب و مرکز منطقه گسترش داشته و مساحتی بیش از 15 کیلومتر مربع را اشغال کرده‌اند (شکل 2). در بررسی‌های صحرایی، رنگ این توده‌ها کرم متمایل به نارنجی است. رنگ نارنجی توده‌ها در اثر اکسیدشدن سولفیدها به‌دست آمده است. این توده‌ها بافت پورفیری دارد و درصد فنوکریست در آنها بین 12 تا 30 درصد متغیر است. در بررسی‌های صحرایی این واحد مشخص شد که کانی‌های روشن پلاژیوکلاز، ارتوکلاز و به‌ندرت کوارتز همراه با کانی‌های مافیک بیوتیت و هورنبلند در زمینه‌ای به نسبت ریزبلور از کانی‌های فلدسپاته قرار گرفته‌اند. توده‌های مونزونیت پورفیری دگرسانی کوارتز- سرسیت- پیریت را با شدت‌های مختلف نشان می‌دهند و در قسمت‌های جنوبی همراه با آنها دگرسانی کربناته نیز دیده می‌شود. در توده‌های مونزونیت پورفیری کانی‌سازی رگه‌چه‌ای تا رگه‌ای و کانی‌سازی به شکل افشان شناسایی شده است.

توده مونزودیوریت پورفیری خود به دو زیرواحد هورنبلند مونزودیوریت پورفیری و هورنبلند بیوتیت مونزودیوریت پورفیری تقسیم می‌شود که به جز واحد مونزودیوریت پورفیری با وسعت 7 کیلومتر مربع که در شرق گسترش دارد، سایر توده‌ها با مساحت 2 کیلومتر مربع رخنمون بسیار کوچکی در غرب منطقه دارند (شکل 2). توده مونزودیوریت پورفیری اصلی‌ترین و مهمترین واحد نیمه عمیق در منطقه اکتشافی شاه سلطان‌علی است. در این واحد علاوه بر کانی‌سازی رگه‌ای تا رگه‌چه‌ای کانی‌سازی به شکل استوک‌ورک نیز دیده می‌شود. در نمونه دستی، بافت این واحد پورفیری و رنگ آن در صحرا کرمی است. درصد فنوکریست در این توده بین 25 تا 35 متغیر بوده و پلاژیوکلاز اصلی‌ترین کانی این واحد است. دگرسانی کوارتز- سرسیت- پیریت به همراه دگرسانی شدید سیلیسی واحد مونزودیوریت پورفیری را تحت تأثیر قرار داده است و سیلیسی‌شدن هم به‌صورت فراگیر و هم به‌صورت انتخابی در سنگ دیده می‌شود، به‌طوری‌که پلاژیوکلازهای این واحد به‌شدت سیلیسی شده‌اند و در هنگام شکستن سنگ، گوشه‌های تیز با سطح شکست زبر و سخت ایجاد می‌شود.

توده‌های دیوریت پورفیری با وسعت تقریبی 13 کیلومتر مربع اغلب در شمال منطقه گسترش دارند (شکل 2). در صحرا رنگ این توده‌ها خاکستری تیره تا سبز تیره و درصد فنوکریست این واحد بین 20 تا 45 متغیر است. از جمله کانی‌های این توده می‌توان به پیروکسن، بیوتیت، هورنبلند و پلاژیوکلاز اشاره کرد، وجود همین کانی‌های مافیک سبب شده است که این واحد خود به شش زیرواحد بیوتیت هورنبلند پیروکسن دیوریت پورفیری، پیروکسن دیوریت پورفیری، هورنبلند دیوریت پورفیری، بیوتیت هورنبلند دیوریت پورفیری و پیروکسن هورنبلند دیوریت پورفیری تقسیم شود. بر اساس مشاهدات صحرایی، توده‌های بالا از نظر سنی جوانترین توده‌ها در منطقه هستند. این واحدها ارتباطی با کانی‌سازی نداشته‌اند و اغلب آلتراسیون پروپلیتیک را نشان می‌دهند.

تنها واحد درونی در منطقه، واحد پیروکسن دیوریت است. این توده با رنگ خاکستری متمایل به سبز در مرکز منطقه رخنمون دارد و آلتراسیون پروپلیتیک متوسط را نشان می‌دهد. همانند توده‌های نیمه عمیق دیوریتی این واحد نیز کانی‌سازی ندارد و جزو جوانترین توده‌ها محسوب می‌شود (شکل 2).



شکل2. نقشه زمین‌شناسی گستره شاه سلطان‌علی با مقیاس 1:20000

Fig. 2. Geological map of Shah Soltan Ali (Scale 1:20000)

دگرسانی

دگرسانی، تمام واحدهای سنگی منطقه را تحت تأثیر قرار داده است (شکل A-4). طبق مشاهدات صحرایی و بررسی‌های آزمایشگاهی 6 نوع دگرسانی مختلف در محدوده شاه سلطان‌علی شناسایی شده است، که عبارتند از: دگرسانی کوارتز- سرسیت- پیریت، پروپلیتیک، آرژیلیک، سیلیسی، سرسیتی و دگرسانی کربناته (شکل 3). در این بین دو دگرسانی کوارتز- سرسیت- پیریت و پروپلیتیک از گسترش بیشتری برخوردارند.

دگرسانی کوارتز- سرسیت- پیریت با وسعتی بیش از 17 کیلومتر مربع از مرکز تا جنوب منطقه گسترش داشته و واحدهای مونزونیت پورفیری و مونزودیوریت پورفیری، تحت تأثیر این دگرسانی قرار گرفته‌اند (شکل B-4). در صحرا به‌دلیل اکسیدشدن کانی‌های سولفیدی به‌خصوص پیریت و تشکیل ژاروسیت به همراه گوتیت، این دگرسانی به رنگ کرم متمایل به قهوه‌ای روشن دیده می‌شود. این دگرسانی خود به دو گروه اصلی آلتراسیون کوارتز- سرسیت- پیریت+ سیلیسی و آلتراسیون کوارتز- سرسیت- پیریت+ کربناته تقسیم می‌شود. فراوانترین کانی این دگرسانی، کانی کوارتز است که در قالب رگه‌چه‌های سیلیسی، به شکل پراکنده و هم به‌صورت سیلیسی کردن فلدسپات‌ها دیده می‌شود. البته سیلیسی‌شدن و فراوانی رگه‌چه‌های سیلیسی در شرق همراه با واحدهای مونزودیوریت پورفیری بوده (شکل B-4) و در غرب تا جنوب رگه‌چه‌های کربناته معمولی‌تر است. سرسیت نیز از تجزیه فلدسپات‌ها حاصل شده و فراوانی آن بین 1 تا 15 درصد متغیر است. از دیگر کانی‌های مهم این دگرسانی، کانی پیریت است که به دو شکل پراکنده و پرکننده رگه‌چه‌ها، با فراوانی بین 0/5 تا 4 درصد یافت می‌شود. این کانی در سطح به اکسیدهای آهن از قبیل گوتیت و ژاروسیت تبدیل شده است. در مرکز منطقه شاه سلطان‌علی که اکسیداسیون بیشتری حاکم است، به‌دلیل فراهم‌شدن شرایط اسیدی زون آرژیلیک ثانویه به‌صورت رخنمون‌های کوچک با دگرسانی کوارتز- سرسیت- پیریت

همراه است. قابل ذکر است که کانی‌سازی‌های مهم منطقه مرتبط با دگرسانی بالا بوده است؛ به‌طوری‌که در جنوب شرقی منطقه اغلب کانی‌سازی استوک‌ورک در واحد مونزودیوریت پورفیری با دگرسانی کوارتز- سرسیت- پیریت+ سیلیسی و در مرکز تا جنوب، کانی‌سازی رگه‌ای تا رگه‌چه‌ای در واحد مونزونیت پورفیری و مونزودیوریت پورفیری رخ‌داده است.

دگرسانی پروپلیتیک با وسعت 15کیلومتر مربع یکی از گسترده‌ترین دگرسانی‌ها در منطقه است که از شمال شروع شده است و تا مرکز ادامه دارد. این دگرسانی در شمال، محدوده واحدهای آندزیتی، بازالتی، توده‌های دیوریت پورفیری و دیوریت را تحت تأثیر قرار داده است.؛ در حالی‌که دگرسانی پروپلیتیک در مرکز اغلب بر واحدهای دیوریت پورفیری منطبق است (شکل 4- C). از نظر شدت، دگرسانی پروپلیتیک به سه گروه با شدت ضعیف، متوسط و شدید تقسیم می‌شود. رنگ آن در صحرا خاکستری متمایل به سبز تا سبز تیره بوده، آلتراسیون پروپلیتیک به‌صورت انتخابی و فراگیر واحدهای سنگی را تحت تأثیر قرار داده است. در این دگرسانی کانی‌های مافیک از جمله پیروکسن، هورنبلند و به‌ندرت بیوتیت بین 5 تا 20 درصد به کلریت ، 2 تا 10 درصد به کربنات و 2 تا 4 درصد به اپیدوت تبدیل شده است، همچنین پلاژیوکلازهای این مجموعه به میزان 0 تا 10 درصد به سرسیت و 0 تا 5 درصد به کربنات تجزیه شده‌اند. کلریت و کربنات از جمله کانی‌های ثانویه‌ای هستند که به‌صورت فراگیر در زمینه واحدهای بازالتی و در داخل حفرات سنگ دیده می‌شوند. در این دگرسانی کانی‌سازی خاصی صورت نگرفته است.

آلتراسیون آرژیلیک به دو زیر مجموعه آلتراسیون آرژیلیک+ آلونیت و آرژیلیک+ سیلیسی تقسیم می‌شود. این نوع آلتراسیون در مرکز منطقه شاه سلطان‌علی در مجاورت آلتراسیون کوارتز- سرسیت- پیریت رخنمون دارد (شکل 3) و اغلب بر واحدهای مونزونیت پورفیری منطبق است. در بررسی‌های صحرایی این زون همراه با کانی‌های زرد- سبز آلونیت دیده شده است و هیچ‌گونه کانی‌سازی ندارد. بر اساس آنالیز XRD، اصلی‌ترین کانی رسی این دگرسانی کانی کائولین است و کانی‌های ایلیت به همراه مونتموریونیت به‌عنوان فاز فرعی شناخته می‌شود.

بعد از دو آلتراسیون کوارتز- سرسیت- پیریت و پروپلیتیک، از نظر گسترش، آلتراسیون کربناته در مقام سوم قرار دارد و رخنمون‌های آن در شمال- مرکز و جنوب منطقه گسترده شده است (شکل 3). در مرکز منطقه واحد هورنبلند بیوتیت دیوریت پورفیری این نوع دگرسانی را نشان می‌دهد. در شمال و جنوب علاوه‌بر واحد بالا، واحد بیوتیت پیروکسن دیوریت پورفیری و هورنبلند مونزونیت پورفیری نیز منطبق بر آلتراسیون کربناته است (شکل 3). کربنات در این زون به دو صورت، در قالب رگه‌چه‌های کربناته و به‌صورت پراکنده در متن سنگ وجود دارد، البته رگه‌چه‌های کربناته در مرحله تأخیری نسبت به رگه‌چه‌های سیلیسی تشکیل شده‌اند. در داخل برخی از رگه‌چه‌ها، کانی دولومیت با حالت لوزوی شکل همراه با کلسیت و اکسید آهن دیده می‌شود. این زون دگرسانی نیز با کانی‌سازی به شکل رگه‌ای تا رگه‌چه‌ای سیلیسی در ارتباط است.

آلتراسیون سیلیسی با رخنمون بسیار کوچک (200 متر مربع) در واحد بیوتیت مونزونیت پورفیری دیده می‌شود.

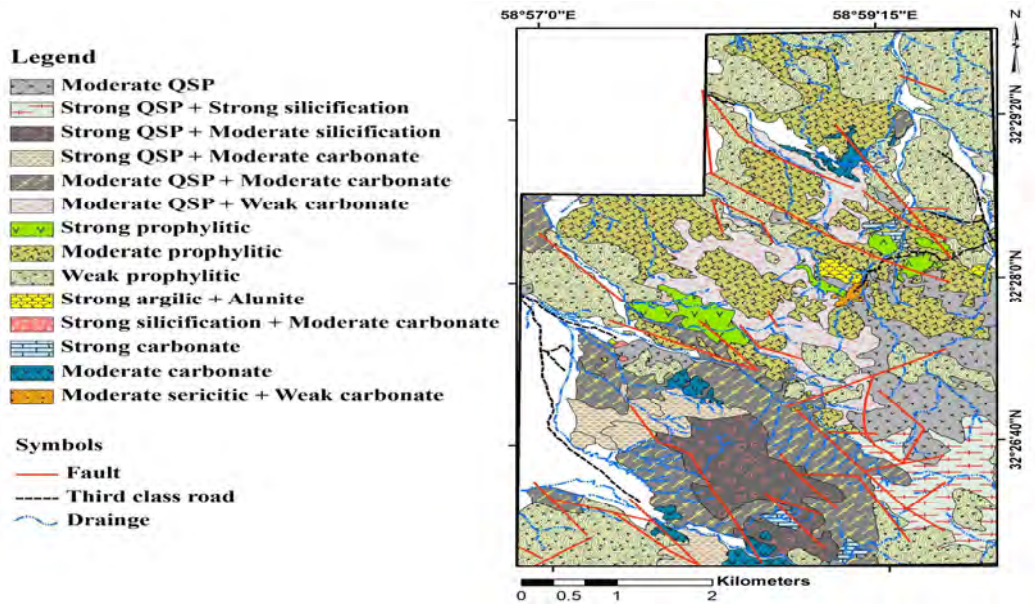
کانی‌سازی

در منطقه شاه سلطان‌علی انواع کانی‌سازی به شکل‌های استوک‌ورک، رگه‌ای تا رگه‌چه‌ای، پراکنده و برش گرمابی در زون دگرسانی کوارتز- سرسیت- پیریت دیده می‌شود. در سطح به‌دلیل شدت اکسیداسیون، به‌ندرت سولفیدهای اولیه باقی مانده است و اغلب اکسیدهای آهن مانند گوتیت، ژاروسیت و لیمونیت در زون‌های کانی‌سازی دیده می‌شود.

کانی‌سازی استوک‌ورک

مهمترین کانی‌سازی در منطقه، کانی‌سازی استوک‌ورک است. این کانی‌سازی در زون دگرسانی کوارتز- سرسیت- پیریت+ سیلیسی (جنوب شرقی منطقه) رخ‌داده و بر واحد مونزودیوریت پورفیری منطبق است. به‌دلیل اهمیت زون کانی‌سازی

استوک‌ورک و وجود ارتباط بین توزیع تراکم رگه‌چه و آنومالی عناصر (Irianto and Clark, 1995; Gustafson and Hunt, 1975)، نقشه تراکم رگه‌چه در منطقه اکتشافی شاه سلطان‌علی تهیه شده است (شکل 5). چنان‌که از شکل 5 دریافت می‌شود، بالاترین تراکم رگه‌چه در جنوب شرقی منطقه نشان داده شده است. در این زون رگه‌چه‌های کوارتز– سولفیدی با تراکم حدود 50 عدد در متر مربع، در سطح به وضوح دیده می‌شود که براساس روابط پاراژنتیکی و کانی‌شناسی 3 نوع رگه‌چه در این زون کانی‌سازی از یکدیگر تفکیک شده است. این رگه‌چه ها عبارتند از: 1) پیریت+ کالکوپیریت اکسید شده، 2) کوارتز+ پیریت± کالکوپیریت و 3) کوارتز± پیریت (شکل4-D). در زون استوک‌ورک فراوانی و ضخامت رگه‌چه‌های نوع 1 و 2 از ضخامت رگه‌چه‌های 3 بیشتر است. قدیمیترین رگه‌چه‌ها مربوط به نوع 1 با ضخامت بین 10 میلی‌متر تا 30 سانتی‌متر است، این رگه‌چه‌ها حدود 15 عدد در متر مربع تراکم دارد و به‌دلیل اکسیدشدن سولفیدهای اولیه، در بررسی‌های صحرایی به رنگ قهوه‌ای تیره دیده می‌شوند. در بررسی‌های میکروسکپی، اصلی‌ترین کانی سولفیدی رگه‌چه‌ها، پیریت است و فراوانی پیریت‌های سالم در این رگه‌چه‌ها حدود 2 درصد است که اغلب به‌صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه شکل‌دار دیده می‌شود. کمتر از 0/5 درصد کانی کالکوپیریت نیز در این رگه‌چه‌ها شناسایی شده است. رگه‌چه‌های پیریت+ کالکوپیریت اکسیدشده توسط رگه‌چه‌های نوع 2 و 3 قطع شده‌اند (شکل 4- D)، رگه‌چه‌های نوع 2 ضخامتی بین 50 میلی‌متر تا 30 سانتی‌متر دارند. این رگه‌چه‌ها غالباً هم‌زمان با رگه‌چه‌های نوع 3 تشکیل شده و تراکم آنها حدود 20 عدد در متر مربع است. رگه‌چه‌های نوع 2 دارای بافت نواری است؛ به‌طوری‌که نوارهای کوارتز فقط بر اساس تغییر رنگ از سفید تا خاکستری از یکدیگر تفکیک می‌شود. بیش از 90 درصد رگه‌چه‌ها از کوارتزهای بسیار ریز بلور و 1 درصد از پیریت و به‌ندرت کالکوپیریت تشکیل شده است، این رگه‌چه‌ها برخلاف رگه‌چه‌های نوع 1 از روندهای مشخصی پیروی می‌کنند و ساختارهای منظمی را تشکیل داده‌اند. طبق بررسی‌های انجام‌شده؛ تنها رگه‌چه‌های نوع 2 از روند گسل‌های اصلی منطقه پیروی کرده‌اند. رگه‌چه‌های نوع 3 بسیار ظریف بوده و ضخامت آنها بین 0/5 میلی‌متر تا 3 میلی‌متر متغیر است، این رگه‌چه‌ها از رگه‌چه‌های نوع 2 منشعب شده‌اند و از نظر کانی‌شناسی مشابه نوع 2 هستند؛ لکن در آنها کانی کالکوپیریت شناسایی نشده است.



شکل 3. نقشه دگرسانی گستره شاه سلطان‌علی با مقیاس 1:20000

Fig. 3. Alteration map of Shah Soltan Ali (Scale 1:20000)

کانی‌سازی رگه‌ای تا رگه‌چه‌ای

کانی‌سازی رگه‌ای تا رگه‌چه‌ای به میزبانی توده‌های مونزونیت پورفیری و مونزودیوریت پورفیری در مرکز تا جنوب منطقه اکتشافی شاه سلطان‌علی دیده می‌شود (شکل 5). امتداد اصلی رگه‌های کانی‌سازی شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و شمال‌شرقی– جنوب‌غربی است. این رگه‌ها شیب 75 درجه تا 90 درجه به سمت شمال‌شرقی را نشان می‌دهند. عرض رگه‌ها بین چند سانتی‌متر تا 2/5 متر و طول آنها بین 10 متر تا 1 کیلومتر متغیر است. رگه‌های کانی‌سازی از کوارتزهای ریزبلور به همراه سولفیدهای اکسیدشده به گوتیت تشکیل شده‌اند (شکل F-4) که بافت کانی‌سازی رگه‌ها به‌صورت پرکننده فضاهای خالی، جعبه‌ای، کلوفرم و پراکنده است. گوتیت فراوانترین کانی اکسیدی درون رگه‌هاست. درصد این کانی در رگه‌ها بین 30 تا 60 متغیر است. بررسی‌های میکروسکپی نشان می‌دهد که سولفیدهای اولیه هم‌زمان با کوارتزهای ریزبلور تشکیل شده و به‌ندرت قالب‌هایی از سولفید باقی‌مانده است. به‌دلیل فرآیندهای اکسیداسیونی تمامی این سولفیدها به کانی گوتیت تبدیل شده‌اند. به جهت فراوانی گوتیت، این رگه‌ها در تصاویر ماهواره‌ای و بررسی‌های صحرایی به رنگ قهوه‌ای تیره دیده می‌شوند. قابل ذکر است که در مرحله تأخیری، رگه‌های کانی‌سازی توسط رگه‌های کربناته قطع شده‌اند.

کانی‌سازی پراکنده

کانی‌سازی سولفید پراکنده در واحدهای نیمه عمیق مونزونیتی و مونزودیوریتی تشخیص داده شده است. این توده‌ها دگرسانی کوارتز– سرسیت– پیریت را با شدت‌های مختلف نشان می‌دهند. مهمترین کانی سولفیدی اولیه، در این زون کانی‌سازی پیریت است. فراوانی این کانی بین 0/1 تا 2 درصد و اندازه آن بین 0/2 تا 1 میلی‌متر متغیر است. این کانی در بخش‌های جنوبی منطقه به‌دلیل شدت اکسیداسیون تمامی به گوتیت تبدیل شده است (شکل E-4)؛ در حالی‌که در مرکز منطقه اکتشافی شاه سلطان‌علی میزان تبدیل به گوتیت بین 50 تا 90 درصد متغیر است. علاوه‌بر پیریت کانی کالکوپیریت با فراوانی کمتر از 0/5درصد به‌صورت ریزبلور در واحد مونزودیوریت پورفیری (جنوب شرقی منطقه) شناسایی شده است. از جمله کانی‌های ثانویه که به‌صورت پراکنده در سطح (جنوب‌شرقی منطقه) دیده می‌شوند، می‌توان به مالاکیت و کریزوکولا اشاره کرد، این کانی‌ها در طی فرآیندهای ثانویه از اکسیدشدن سولفیدهای اولیه مانند کالکوپیریت تشکیل شده‌اند.

برش هیدروترمالی

رخنمون بسیار کوچکی از کانی‌سازی برش هیدروترمالی در مرکز منطقه دیده می‌شود. در این برش قطعات و زمینه سنگ به‌شدت سیلیسی شده است. بالاترین میزان پیریت به‌صورت افشان در واحد برش هیدروترمالی با فراوانی 4 درصد و اندازه بین 0/2 تا 0/5 شناسایی شده است. این پیریت‌ها اغلب بی‌شکل بوده و به گوتیت تبدیل نشده‌اند.

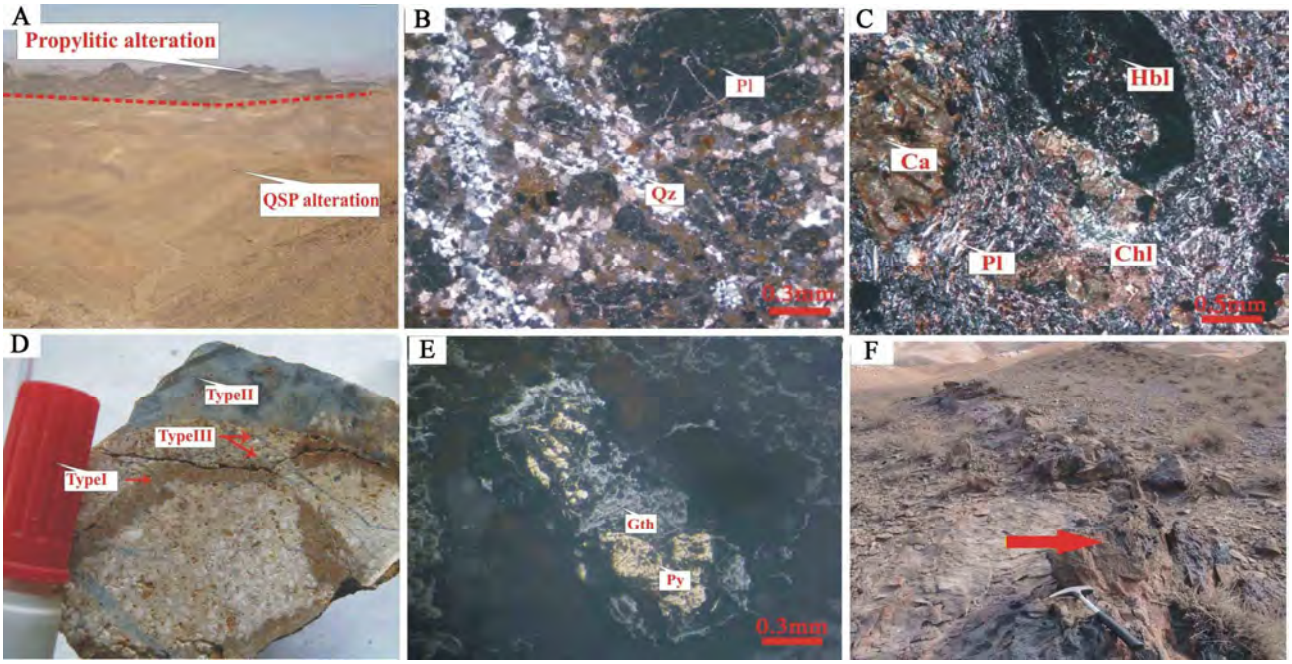
ژئوشیمی اکتشافی

در بررسی‌های مقدماتی، استفاده از روش مطالعه هاله‌های ثانویه به‌خصوص بررسی رسوبات رودخانه‌ای بسیار حائز اهمیت است (Hassani Pak, 2010)، بدین‌جهت از نتایج داده‌های سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در برگه 1:100000 سرچاه شور استفاده شده است (Geochemical report of SAR-E-CHAH-E-SHUR, 2003). در پروژه اکتشافات ژئوشیمیایی برگه سرچاه شور 574 نمونه رسوبات رودخانه‌ای برداشت شد که از این تعداد، 15 نمونه در محدوده شاه سلطان‌علی قرار دارد. عنصر مس با مقدار 254 ppm بالاترین ناهنجاری را در آب‌راهه جنوبی منطقه نشان می‌دهد (شکل A-6). این آب‌راهه از واحد بیوتیت مونزونیت پورفیری عبور کرده و آلتراسیون آن کوارتز ـ سرسیت ـ پیریت متوسط + کربناته در نظر گرفته شده است. دو ناهنجاری قابل توجه دیگر این عنصر در غرب منطقه در دو آب‌راهه اصلی با مقدار مس 224 تا 227 گرم در تن دیده می‌شود که این آب‌راهه اغلب از واحدهای پیروکسن دیوریت پورفیری عبور کرده است. با توجه به این‌که در مشاهدات صحرایی و آنالیزهای انجام‌شده، این واحد ارتباطی

به کانی‌سازی ندارد، وجود این ناهنجاری مربوط به توده‌های نیمه عمیق است که در منطقه اکتشافی ماهرآباد (غرب منطقه شاه سلطان‌علی) رخنمون داشته و با سیستم‌های مس پورفیری مرتبط بوده است. بیشترین میزان عنصر سرب با مقدار ppm 30 نیز در آب‌راهه‌های جنوب منطقه دیده می‌شود. بالاترین ناهنجاری عنصر روی ppm 425 در رسوبات آب‌راهه‌ای جنوب غربی منطقه شناسایی شده است (شکل B-6)، این آب‌راهه در پادگان‌های آبرفتی جریان داشته؛ اما از واحدهای بیوتیت مونزونیت پورفیری–مونزونیت پورفیری و هورنبلند بیوتیت مونزودیوریت پورفیری عبور کرده است در این بخش اغلب آلتراسیون کوارتز ـ سرسیت ـ پیریت + کربناته رخنمون دارد و به‌طور کلی عنصر روی همبستگی کاملی با عنصر مس دارد، و سایر عناصر ناهنجاری قابل توجهی را نشان نمی‌دهند.

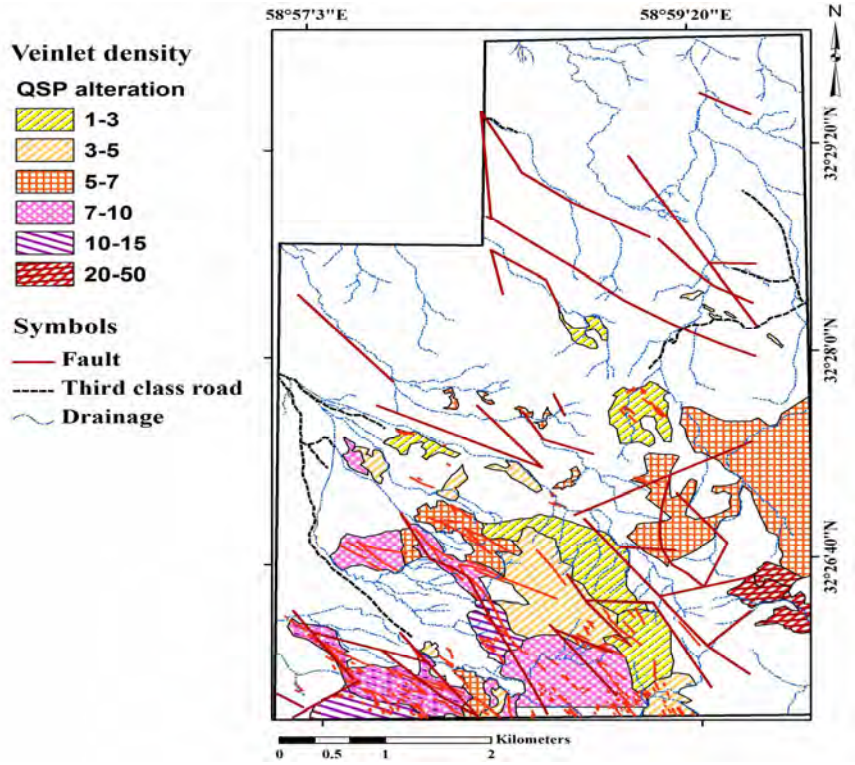
به‌منظور بررسی ژئوشیمی عناصر بر مبنای داده‌های سنگی سعی شده است که نمونه‌ها از زون‌های کانی‌سازی و مناطقی با بیشترین تراکم رگه‌چه و درصد اکسید آهن انتخاب شود. بر این اساس، بی‌هنجاری عناصر در محدوده اکتشافی شاه سلطان‌علی بدین شرح است (جدول 1).

عنصر مس: ناهنجاری عنصر مس بین 30 تا 454 گرم در تن (جدول 1) متغیر بوده که بیشترین میزان عنصر مس مربوط به زون کانی‌سازی استوک‌ورک در جنوب شرقی منطقه است (شکل A-7)، در این بخش انواع رگه‌چه‌های سیلیسی و اکسید آهنی همراه با کانی‌های فلزی اولیه کالکوپیریت و پیریت و کانی‌های ثانویه گوتیت، مالاکیت و کریزوکولا در سطح دیده می‌شود. این کانی‌سازی در واحد مونزودیوریت پورفیری با آلتراسیون کوارتز ـ سرسیت ـ پیریت+ سیلیسی رخ‌داده است (شکل A-7).



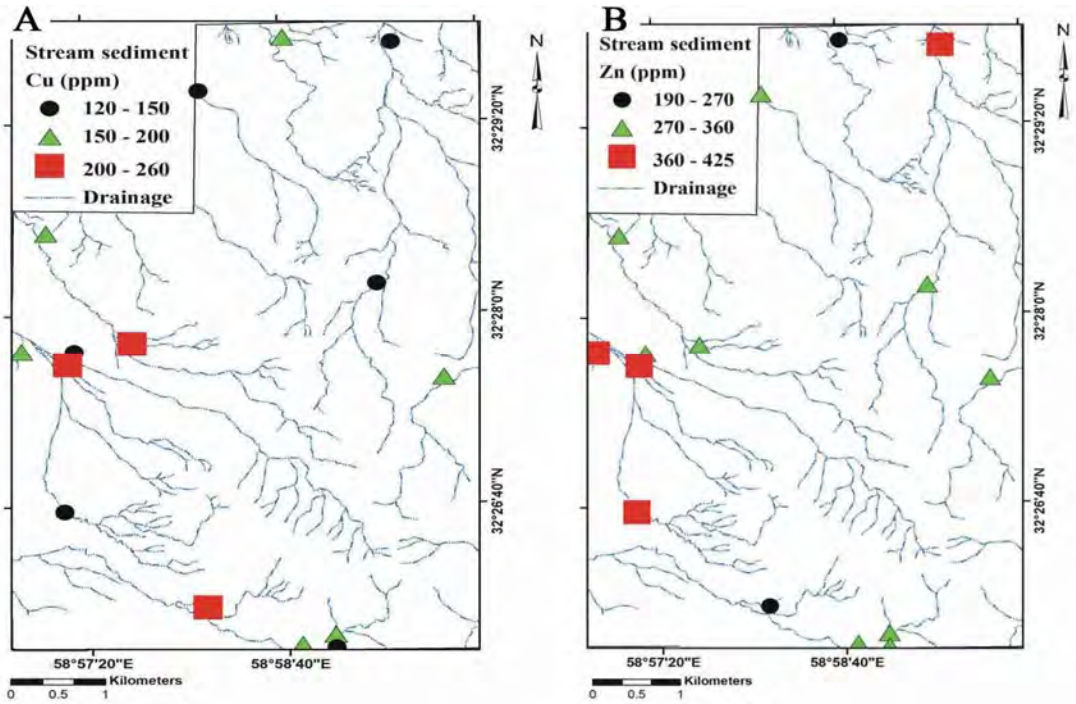
شکل 4. A: نمایی از آلتراسیون گسترده در منطقه شاه سلطان‌علی، B: آلتراسیون کوارتز- سرسیت– پیریت+ سیلیسی در واحد مونزودیوریت پورفیری، C: دگرسانی پروپلیتیک در واحد هورنبلند دیوریت پورفیری، D: انواع رگه‌چه‌ها در زون کانی‌سازی استوک‌ورک در واحد مونزودیوریت پورفیری، E: تبدیل پیریت به گوتیت در کانی‌سازی افشان و F: نمایی از رگه سیلیسی+ سولفید گوتیتی‌شده. (Ca= کلسیت، Pl= پلاژیوکلاز، Chl= کلریت، Hbl= هورنبلند، Gth= گوتیت، Py= پیریت، Qz= کوارتز) (Whitney and Evans, 2010).

Fig. 4. A: Development alteration in Shah Soltan Ali area, B: QSP alteration in monzodiorite porphyry, C: Propylitic alteration in hornblende diorite porphyry, D: Veinlet types in stockwork mineralization zone (monzodiorite porphyry), E: Replacement of pyrite by goethite in disseminated mineralization, and F: Silicification + goethite vein. (Ca=Calcite, Pl= Plagioclase, Chl= Cholorite, Hbl= Hornblende, Gth= Goethite, Py= Pyrite, Qz= Ouartz) (Whitney and Evans, 2010).



شکل 5. نقشه تراکم رگه‌چه در گسترده شاه سلطان‌علی با مقیاس 1:20000

Fig. 5. Veinlet density map of Shah Soltan Ali (Scale 1:20000)



شکل 6. A: مقادیر عنصر مس در رسوبات آب‌راهه‌ای محدوده اکتشافی شاه سلطان‌علی و B: مقادیر عناصر روی در نمونه‌های رسوبات آب‌راهه‌ای محدوده اکتشافی شاه سلطان‌علی (Geological survey of Iran, 2003)

Fig. 6. A: Valuse of Cu element in stream sediment samples of Shah Soltan Ali area, and B: Valuse of Zn element in stream sediment samples of Shah Soltan Ali area (Geological survey of Iran, 2003)

عنصر روی: تغییرات عنصر روی در منطقه شاه سلطان‌علی بین 27 تا 279 گرم در تن است (جدول 1). این عنصر نیز همانند عنصر مس بالاترین ناهنجاری را در زون استوک‌ورک (جنوب شرقی منطقه) دارد (شکل 7-B). علاوه بر آن عنصر روی ناهنجاری قابل توجهی با مقدار 256 گرم در تن در جنوب‌غربی منطقه و در واحد بیوتیت مونزونیت پورفیری با آلتراسیون کوارتز ـ سرسیت ـ پیریت متوسط+ کربناته نشان می‌دهد (شکل 7-B). در این بخش رگه‌چه‌ها و رگه‌های سیلیسی+ گوتیتی به وفور دیده می‌شوند که وجود گوتیت در منطقه نشان‌دهنده توانایی بالای کانی‌های سولفیدی در منطقه است.

عنصر سرب: در آنالیزهای انجام‌شده، مقدار این عنصر ناهنجاری نه چندان قابل توجه 11گرم در تن تا 70 گرم در تن دارد (جدول 1).

عنصر آنتیموان: مقدار آنتیموان در منطقه شاه سلطان‌علی اغلب کمتر از 3 گرم در تن بوده است؛ ولی در نتایج به‌دست آمده مشخص شد که در زون استوک‌ورک این عنصر ناهنجاری 152 گرم در تن را نشان می‌دهد (جدول 1) و این خود توانایی بالای این زون کانی‌سازی را بیان می‌کند (شکل 7- C).

عنصر طلا: مقدار ناهنجاری این عنصر در نمونه‌های خرده سنگی بین 5 ppb تا 110 ppb متغیر است (جدول 1). بالاترین ناهنجاری این عنصر در مرکز منطقه و در واحد بیوتیت هورنبلند مونزونیت پورفیری با آلتراسیون آرژیلیک پیشرفته دیده می‌شود. به‌دلیل این‌که بالاترین آنومالی عنصر آنتیموان در زون کانی‌سازی استوک‌ورک نمود پیدا کرده بود و این عنصر اغلب همراه با عنصر طلا یافت می‌شود، بنابراین برای تعیین آنومالی عنصر طلا در زون کانی‌سازی استوک‌ورک به تفکیک از دو رگه‌چه اصلی آن نمونه‌برداری شد و نتایج آنالیز نشان داد که رگه‌چه‌های نوع 1 (پیریت+ کالکوپیریت اکسیدشده) دارای بالاترین مقدار طلا (128 ppb) هستند (جدول 2)، و رگه‌چه نوع 2 (کوارتز+ پیریت± کالکوپیریت) نیز از ناهنجاری قابل توجه 107 ppb برخوردار هستند (شکل 7-D).

جدول 1. آنالیز ژئوشیمیایی از نمونه‌های خرده سنگی منطقه شاه سلطان‌علی

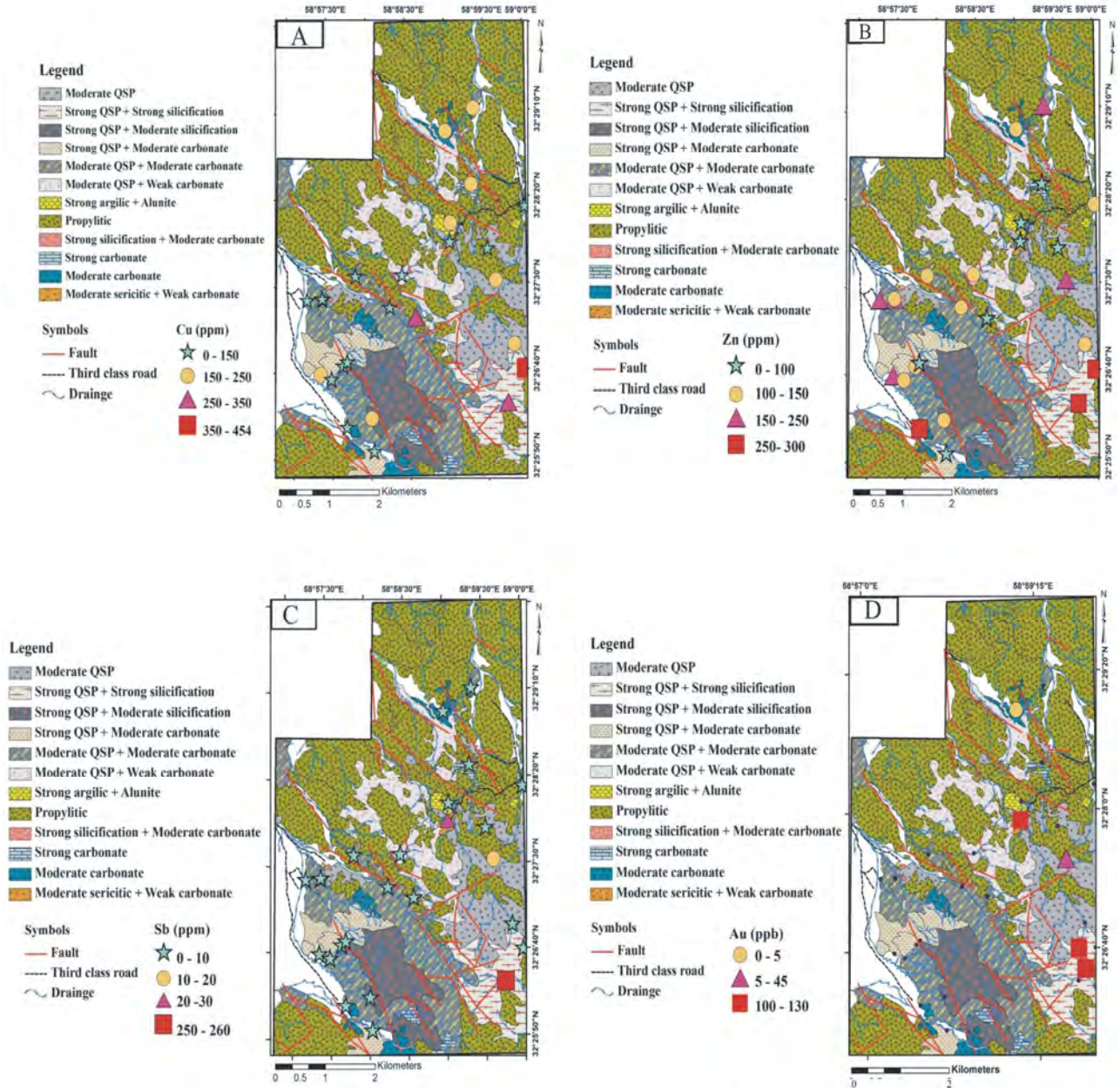
Table 1. Geochemical analyses of lithogeochemical samples in Shah Soltan Ali area

Sample	x	y	Alteration	Cu ppm	Zn ppm	Pb ppm	Sb ppm	As ppm	Au ppb
CN-3	32º 26' 38"	58º 57' 22"	QSP + Carbonate	73	108	15	1.1	54.1	-
CN-6	32º 27' 22"	58º 57' 12"	QSP + Carbonate	47	118	16	1.19	51.7	-
CN-11	32º 27' 22"	58º 57' 24"	QSP + Carbonate	44	120	17	1.03	32.6	-
CN-21	32º 25' 54"	58º 58' 02"	QSP	60	50	13	0.99	31.9	-
CN-22	32º 26' 54"	58º 59' 51"	QSP	72	70	10	1.11	31	-
CN-33	32º 26' 08"	58º 57' 41"	Carbonate	31	256	29	1.18	113	-
CN-35	32º 26' 13"	58º 58' 00"	QSP + Carbonate	70	84	16	0.97	7.2	-
CN-43	32º 27' 17"	58º 58' 15"	QSP + Carbonate	41	84	16	1.08	39.1	50
CN-44	32º 27' 54"	58º 59' 02"	Sericitic + Carbonate	31	27	70	20.5	278	110
CN-48	32º 27' 10"	58º 58' 35"	QSP + Carbonate	197	30	30	1.25	75.4	-
CN-50	32º 27' 31"	58º 59' 37"	QSP	95	135	30	3.34	47	-
CN-54	32º 27' 35"	58º 58' 25"	QSP + Carbonate	56	72	17	1.19	13	-
CN-58	32º 27' 35"	58º 57' 49"	QSP + Carbonate	33	85	15	1	8.1	-
CN-60	32º 28' 58"	58º 59' 00"	Carbonate	70	66	20	1.1	15	5
CN-66	32º 26' 36"	58º 57' 30"	QSP + Carbonate	60	81	14	0.91	26.7	-
CN-69	32º 26' 43"	58º 57' 39"	QSP + Carbonate	33	78	13	1.05	28.7	-
CN-71	32º 26' 45"	58º 57' 42"	QSP + Carbonate	30	58	12	0.93	18.7	-
CN-87	32º 27' 22"	58º 57' 23"	QSP + Carbonate	39	73	13	0.95	12.3	-
CN-112	32º 28' 27"	58º 59' 19"	Carbonate	110	53	11	0.87	16	-
CN-124	32º 28' 04"	58º 59' 03"	Argilic + Alunite	82	42	31	1.24	63.9	-
CN-144	32º 29' 11"	58º 59' 21"	QSP + Carbonate	121	121	17	1.26	203.8	-
CN-161	32º 28' 14"	58º 59' 31"	QSP	42	57	11	1.02	27.4	-
CN-164	32º 26' 20"	58º 59' 57"	QSP	56	93	62	1.26	16.3	-
CN-166	32º 26' 33"	58º 59' 45"	QSP + Silicification	304	271	69	152.2	93.6	-
CN-168	32º 25' 56"	58º 59' 59"	QSP + Silicification	454	279	13	1.84	35.8	-

جدول 2. نتایج آنالیز Firre Assay برای عنصر طلا در رگه‌چه‌های زون کانی‌سازی استوک‌ورک در منطقه شاه سلطان‌علی

Table 2. Firre Assay analyses of Au elements from stockwork mineralization in Shah Soltan Ali area

Veinlete Sample	x	y	Type	Au(ppb)
Type I	32º 26' 39"	58º 59' 47'	Py + Cpy Oxide	**128**
Type II	32º 26' 40'	58º 59' 46"	Qt + Py ± Cpy	**107**

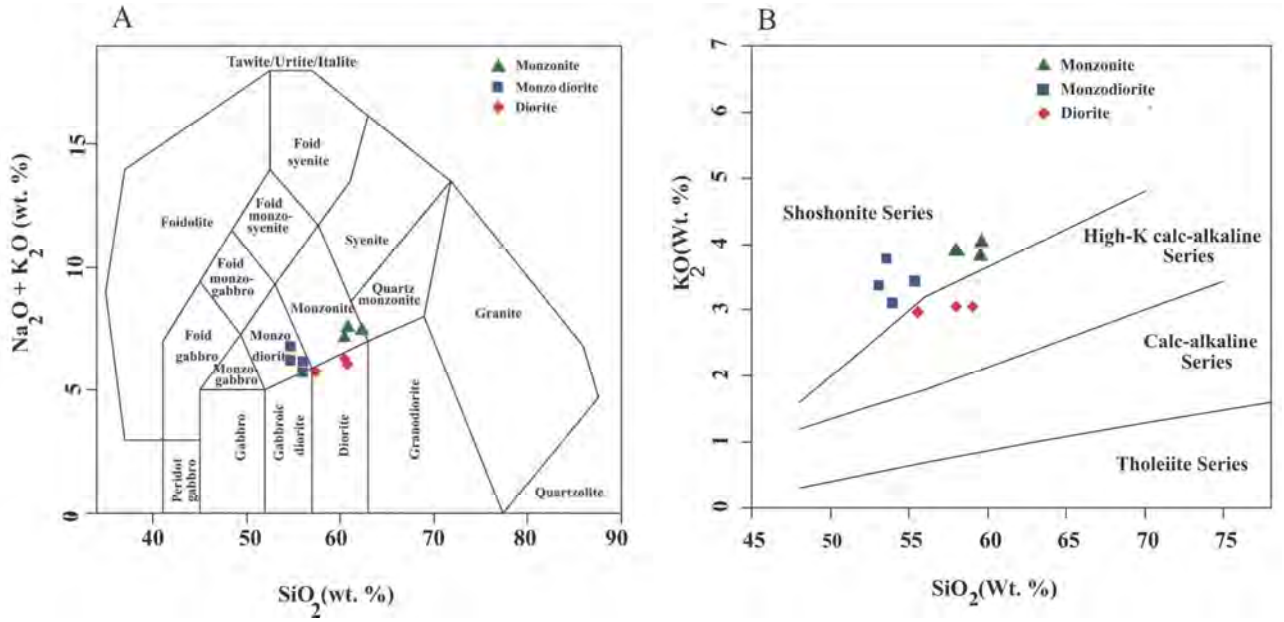


شکل 7. A: پراکندگی عنصر مس، B: پراکندگی عنصر روی، C: پراکندگی عنصر آنتیموان و D: پراکندگی عنصر طلا در نمونه‌های خرده سنگی برداشت شده از محدوده اکتشافی شاه سلطان‌علی بر روی نقشه آلتراسیون

Fig. 7. A: Dispersion of Cu element, B: Dispersion of Zn element, C: Dispersion of Sb element, and D: Dispersion of Au element in litogeochemical samples of Shah Soltan Ali area on alteration map

ژئوشیمی توده‌های نفوذی

از مجموع 170 نمونه سنگی برداشت‌شده، تعداد 10 نمونه از توده‌های نیمه عمیق حدواسط منطقه با کمترین دگرسانی برای آنالیز اکسیدهای اصلی، عناصر کمیاب خاکی و جزئی انتخاب شد که نتایج تجزیه این توده‌ها در جدول 3 آمده است. در نمودار SiO_2 در برابر مجموع آلکالی $Na_2O + K_2O$ (Middlemost, 1985)، نتایج آنالیز نشان می‌دهد که تمام واحدهای سنگی در سه گروه مونزونیت، مونزودیوریت و دیوریت قرار گرفته‌اند (شکل 8-A). این نتایج با بررسی‌های صحرایی هماهنگی و انطباق کامل دارد. مقدار K_2O توده‌های دیوریتی از 3 تا 3/09 درصد وزنی و نسبت K_2O/Na_2O آنها از 1/01 تا 1/11 درصد وزنی متغیر است. در حالی‌که مقدار K_2O توده‌های مونزونیتی و مونزودیوریتی از 3/09 تا 4 درصد وزنی و نسبت K_2O/Na_2O آنها بین 1/11 تا 1/31 درصد وزنی است. به همین دلیل در نمودار SiO_2 در برابر K_2O (Peccerillo and Taylor, 1976)، توده‌های دیوریتی در محدوده کالک‌آلکالن پتاسیم بالا و توده‌های مونزونیتی و مونزودیوریتی در محدوده شوشونیتی قرار گرفته‌اند (شکل 8-B). بر مبنای نمودار نسبت مولی $Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$ در برابر $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ (Shand, 1947)، توده‌های نفوذی بالا محدوده متا آلومینوس را نشان می‌دهند (شکل 9- A). برای تعیین مرز جداکننده گرانیتوئیدها دسته I از دسته S از نمودار CaO در برابر Fe_2O_3 (Chappell and White, 2001)، استفاده شده است، چنان‌که در این نمودار دیده می‌شود، تمام نمونه‌های سنگی در منطقه مورد بررسی، در محدوده گرانیت‌های نوع I واقع شده‌اند (شکل 9- B).

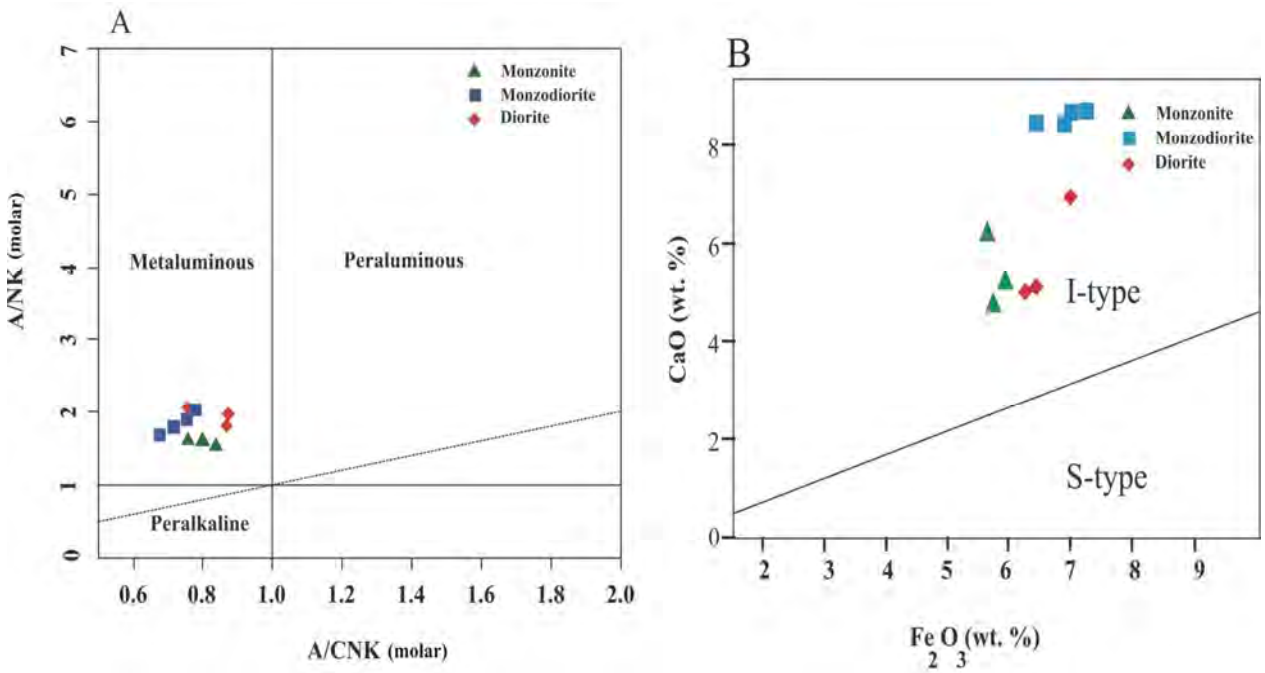


شکل 8. A: طبقه‌بندی ژئوشمیایی توده‌های نفوذی منطقه شاه سلطان‌علی بر طبق نمودار Na_2O+K_2O در برابر SiO_2 (Middlemost, 1985) و B: تغییرات ژئوشیمیایی نمونه‌های آنالیز شده از منطقه شاه سلطان‌علی بر اساس نمودار K_2O در برابر SiO_2 (Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 8. A: Geochemical classification of Shah Soltan Ali intrusive rocks, according to $Na_2O + K_2O$ vs. SiO_2 diagram (Middlemost, 1985), and B: Geochemical variations in samples analyzed of Shah Soltan Ali area, based on K_2O vs. Si_2O diagram (Peccerillo and Taylor, 1976)

عناصر فرعی و خاکی نادر: بررسی‌های ژئوشیمیایی عناصر کمیاب اطلاعاتی در مورد فرآیندهایی که در پوسته و گوشته زمین رخ می‌دهند، در اختیار ما قرار می‌دهد. در این زمینه به‌ویژه آنهایی که تعادل کانی/مذاب را شامل می‌شوند، می‌توانند نقش زیادی در فهم این فرآیندها داشته باشند. برای بررسی عناصر فرعی و نادر خاکی، نمودار عنکبوتی توده‌های نفوذی منطقه

نسبت به گوشته اولیه و کندریت ترسیم‌شده است (شکل A-10 و B). در نمودار نرمالیزه‌شده، نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)، غنی‌شدگی در عناصر LILE مانند Cs- K- Rb و Sr نسبت به HFSE (Nb - Ti و Zr) در تمام نمونه‌ها دیده می‌شود. این غنی‌شدگی از عناصر LILE نسبت به HFSE می‌تواند مرتبط با مناطق فرورانش باشد؛ چون عناصر LILE قابلیت انحلال بیشتری در سیالات دارد و در هنگام فرورانش سیالات آزادشده از لیتوسفر فرورونده باعث غنی‌شدگی در عناصر LILE می‌شود (Rollinson, 1993; Wilson, 1989; Gill, 2010)، همچنین درجه پایین ذوب‌بخشی، غنی‌شدگی از عناصر LILE را نسبت به HFSE ایجاد می‌کند (Srivastava and Singh, 2004). در نمودارهای ترسیم‌شده، آنومالی منفی واضح و روشنی از عناصر Nb - Ti و Zr دیده می‌شود که آنومالی منفی Ti منعکس‌کننده حضور Ti در ساختمان کانی‌هایی مانند تیتانومنیتیت و ایلمنیت است. اگر کانی‌های تیتان‌دار در ماگمای مادر در محل مخزن باقی‌مانده باشند، آنومالی منفی از Ti را ایجاد می‌کنند و این بدین دلیل است که در ماگماتیسم‌های مرتبط با فرورانش فوگاسیته بالای O_2 در زون فرورانش، باعث تهی‌شدگی Ti می‌شود. هنگامی که فوگاسیته اکسیژن بالا باشد، دمای زیادی لازم است تا فازهای حاوی Ti در مذاب‌های مشتق‌شده از منطقه فرورانش تخلیه شود (Edward et al.,1994)، به همین دلیل، این آنومالی در مناطق فرورانش ایجاد می‌شود. در نمودار نرمالیزه‌شده نسبت به گوشته اولیه آنومالی منفی از Nb دیده شده (شکل A-10)، این آنومالی شاخص مناطق فرورانش بوده و نشان‌دهنده نقش پوسته قاره‌ای در فرآیندهای ماگمایی است (Saunders et al., 1992; Nagudi et al., 2003). همچنین مقادیر منفی Nb 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 Ti و Nb ,Ta ممکن است مربوط به حضور هورنبلند، اکسیدهای آهن- تیتان مانند روتیل و ایلمنیت و نبود پلاژیوکلاز قابل توجه در منشأ باشد (Martin, 1999).



شکل 9. A: نمودار A/NK در برابر A/CNK از سنگ‌های نفوذی منطقه شاه سلطان‌علی (Shand, 1947) و B: نمودار CaO در برابر Fe_2O_3 برای سنگ‌های نفوذی منطقه شاه سلطان‌علی. خط تیره جدا کننده محدوده I-type از S-type است (Chappell and White, 2001)

Fig. 9. A: $Al_2O_3/Na_2O + K_2O$ (molar) vs. $Al_2O_3/(CaO + K_2O + Na_2O)$ (molar) diagram of Shah Soltan Ali intrusive rocks (Shand, 1947), and B: CaO vs. Fe_2O_3 diagram for Shah Soltan Ali intrusive rocks. The dash line divides the I-type field from the S-type field (Chappell and White, 2001)

جدول 3. تجزیه شیمیایی عناصر اصلی (بر حسب %)، جزئی و نادر خاکی (برحسب گرم در تن) توده‌های نفوذی منطقه شاه سلطان‌علی

Table 3. Major (wt. %) and trace elements (ppm) analysis of Shah Soltan Ali intrusive rocks

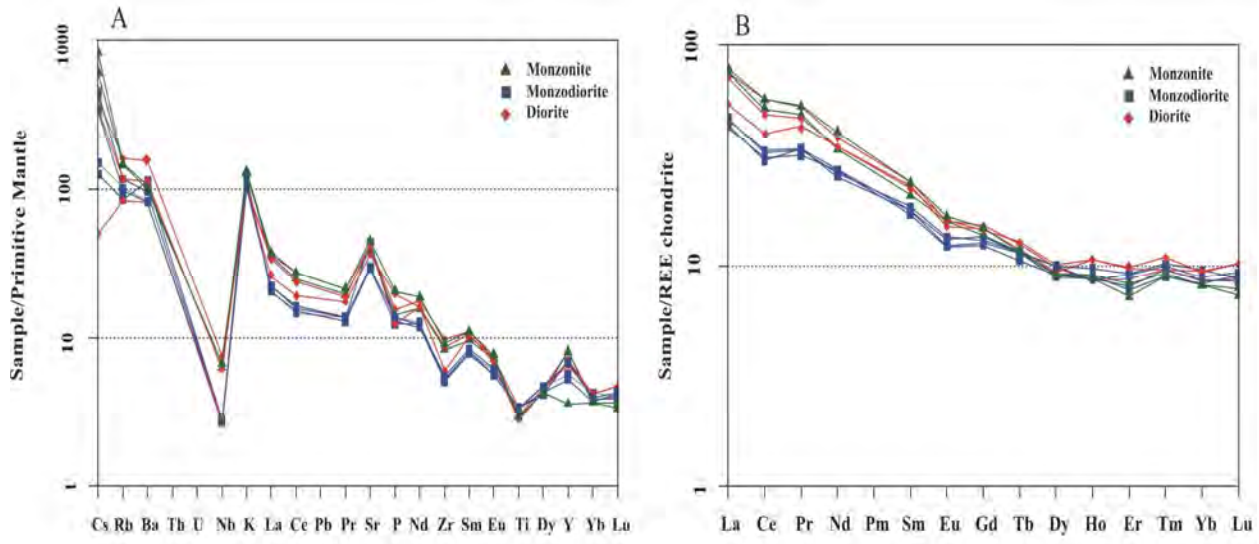
Sample	N18	N19	N24	N46	N47	N98	N102	N122	N128	N138
X Y	32°29'14' 58°59'23"	32°29'14" 58°59'24"	32°25'48" 58°58'10"	32°27'38" 58°58'54"	32°27'07" 58°58'38"	32°28'11" 58°59'50"	32°28'03" 58°59'35"	32°28'07" 58°59'18"	32°27'46" 58°58'54"	32°28'48" 58°59'17"
Rock type	3	1	3	2	1	1	1	3	1	3
SiO_2	58.92	59.79	58.22	59.6	57.88	53.62	54.05	55.47	53.12	55.42
TiO_2	0.6	0.64	0.63	0.52	0.65	0.73	0.72	0.73	0.74	0.73
Al_2O_3	15.66	16.25	15.23	15.2	15.52	15.04	15.29	15.53	14.56	15.49
TFeO	6.38	5.7	6.04	5.6	6.23	8.38	8.37	8.5	8.33	7.51
MnO	0.11	0.11	0.1	0.12	0.1	0.13	0.12	0.13	0.17	0.13
MgO	3.99	1.21	2.99	2.1	3.82	5.86	5.35	5.62	7.08	4.69
CaO	5.5	6.48	5.49	4.7	5.35	7.29	6.79	7	6.65	6.97
Na_2O	2.92	3.35	3.09	3.4	3.04	2.86	2.49	2.65	2.63	2.7
K_2O	3.09	4	3.86	3.8	3.09	3.77	3.09	3.42	3.35	3
P_2O_5	0.27	0.45	0.31	0.3	0.34	0.27	0.3	0.3	0.28	0.43
L.O.I	2.35	2.01	3.8	4.2	2.87	2.32	2.1	1.47	2.83	2.61
Total	99.79	99.9	99.76	99.54	98.89	100.26	98.67	100.42	99.74	99.68
Ba	792	696	749	-	1086	792	573	585	679	571
Cs	2.9	4.9	6.6	-	3.2	1	2.7	1.2	3.6	0.4
Hf	2.6	2.7	2.5	-	3.1	1.5	1.8	2	1.8	2.2
Nb	4.4	4.8	4.5	-	5..4	2	1.9	1.9	2	2
Rb	74.5	92.3	94.1	-	102.2	54.2	62.1	64.9	74.6	53.3
Sr	887.2	959.6	840.6	-	894.4	627.7	628.7	640.1	949.1	774.9
Ta	0.3	0.3	0.4	-	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Zr	98.1	102.6	94.2	-	109.6	57.3	61.9	59.7	59.4	68.1
Y	32	16	37	-	37	24	31	26	32	30
La	23.6	26.1	24.9	-	25.1	14.1	15.5	14.5	15.3	18
Ce	62.4	49.5	44.7	-	49.2	26.9	28.1	26	29	34.6
Pr	5.23	5.96	5.43	-	5.9	3.55	3.78	3.83	3.8	4.85
Nd	22	25.6	21.3	-	24	17	16.5	17.3	16	21.9
Sm	4.7	4.85	4.27	-	4.88	3.51	3.76	3.61	3.61	4.54
Eu	1.17	1.3	1.24	-	1.23	0.95	1.05	1.02	0.96	1.26
Gd	4.11	4.14	3.84	-	4.26	3.45	3.61	3.76	3.52	4.06
Tb	0.56	0.55	0.55	-	0.59	0.5	0.55	0.54	0.54	0.61
Dy	3.23	3.14	3.17	-	3.39	3.16	3.47	3.45	3.06	3.5
Ho	0.75	0.62	0.64	-	0.6	0.63	0.61	0.69	0.62	0.75
Er	2.22	1.64	1.89	-	1.98	1.75	2.05	2.08	1.84	2.24
Tm	0.29	0.27	0.28	-	0.29	0.27	0.3	0.31	0.29	0.33
Yb	2.09	1.81	1.82	-	1.89	1.84	1.96	2.12	1.91	2.08
Lu	0.35	0.27	0.25	-	0.3	0.31	0.32	0.3	0.29	0.35
Ratios										
Eu/Eu*	0.81	0.89	0.94	-	0.82	0.87	0.83	0.85	0.82	0.90
La/Yb	7.61	9.72	9.22	-	8.95	5.17	5.33	4.61	5.40	5.83
N										

1- Cpx diorite porphyry 2- Monzonite porphyry 3- Hbl – Cpx diorite porphyry

در نمودار عناصر نادر خاکی هنجارشده نسبت به ترکیب کندریت (Boynton, 1984)، غنی‌شدگی قابل توجهی از عناصر LREE نسبت به HREE دیده می‌شود (شکل 10- B). این روند غنی‌شدگی نیز شاخص مذاب‌های تشکیل‌شده در پهنه فرورانش است Asiabanha et al., 2012; Helvacı et al., (2009). در توده‌های مونزودیوریت پورفیری نسبت به سایر توده‌ها الگوی عناصر نادر خاکی، کمی کاهش در غنی‌شدگی از LREE را نشان می‌دهد. روند موازی در الگوی عناصر نادر خاکی توده‌های نفوذی منطقه بیانگر تشابه فرآیندهای ماگمایی در حین تشکیل است (شکل 10- B) و الگوی مسطح HREE به همراه آنومالی مثبت Y و Lu می‌تواند بیانگر وجود مقدار جزئی گارنت در منشأ باشد (Kampunzu et al., 2003).

نسبت $(La/Yb)_N$ در توده‌های نفوذی منطقه بین 4/6 تا 9/7 متغیر بوده (جدول 3) و این مقدار کم در تمامی نمونه‌ها همراه با الگوی عناصر REE ناشی از کم‌بودن گارنت در خاستگاه است (Peters et al., 2008). نسبت $(Ce/Yb)_N$ نیز نشان‌دهنده عمق و میزان ذوب سنگ مادر است. این نسبت در نمونه‌های منطقه مورد بررسی بین 3/17 تا 7 متغیر است. مقدار کم این نسبت در نمونه‌های مورد بررسی گویای آن است که ماگما از قسمت‌های بالایی گوشته سرچشمه گرفته است. این قسمت از میزان پایداری گارنت دور بوده و خود نشان‌دهنده آن است که ماگما از اعماق زیاد منشأ نگرفته است (Cotton et al., 1995).

مقدار Eu/Eu^* در واحدهای نیمه عمیق منطقه شاه سلطان‌علی بین 0/82 تا 0/94 متغیر است و عنصر Eu آنومالی منفی جزئی را نشان می‌دهد (شکل 10- B) که این می‌تواند شاهدی بر حضور جزئی پلاژیوکلاز در منشأ باشد (Tepper et al., 1993).



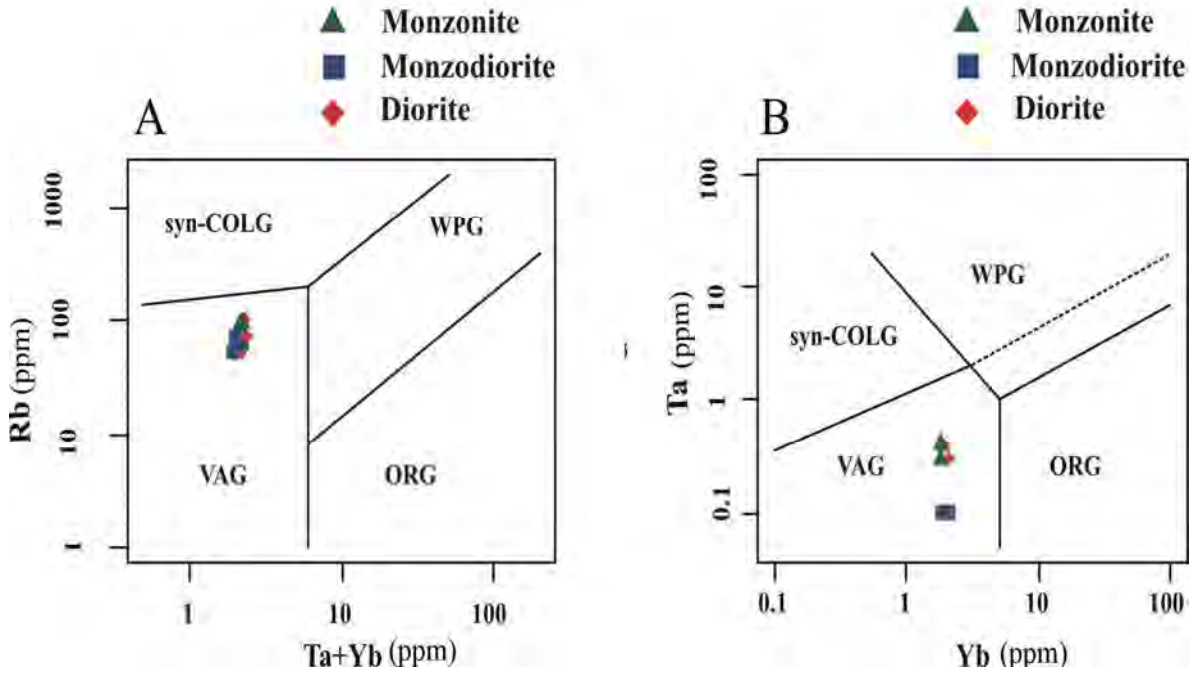
شکل 10. A: نمودار فراوانی عناصر جزئی و کمیاب نرمالیزه‌شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) و B: نمودار نرمالیزه‌شده عناصر نادر خاکی نسبت به کندریت برای توده‌های نفوذی منطقه شاه سلطان‌علی (Boynton, 1984)

Fig. 10. A: Primitive mantle normalized trace element pattern for Shah Soltan Ali intrusive rocks (Sun and McDonough, 1989), and B: Chondrite normalized REE patterns for Shah Soltan Ali intrusive rocks (Boynton, 1984)

بحث و نتیجه‌گیری

موقعیت زمین‌ساختی و منشأ توده‌های نفوذی

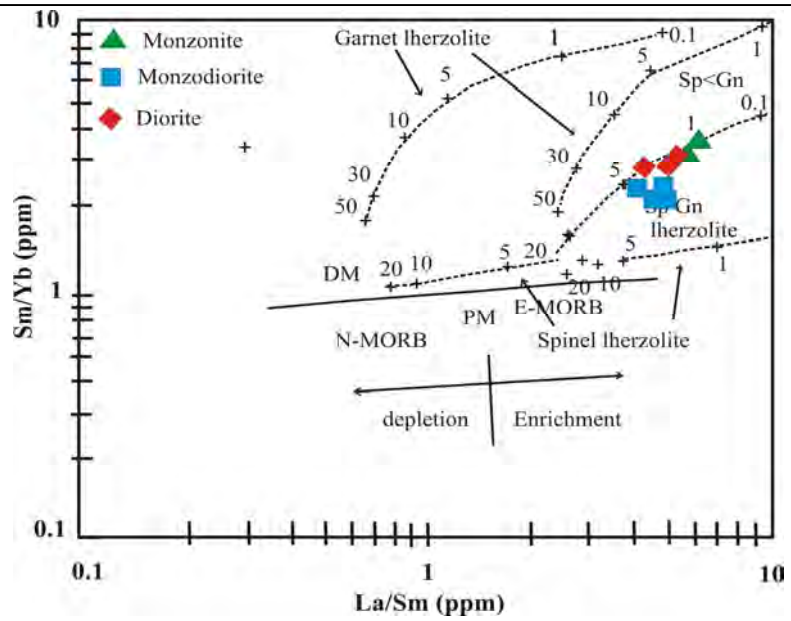
چنان‌که قبلاً گفته شد، ویژگی‌های عناصر فرعی و نادر خاکی در منطقه شاه سلطان‌علی مشابه ماگماهای پهنه‌های فرورانش است. همچنین بر اساس مقدار عناصر Rb, Nb, Y, Yb و Ta در نمودارهای پیرس و همکاران (Pearce et al., 1984)، موقعیت زمین‌ساختی توده‌های منطقه شاه سلطان‌علی، کمربند آتشفشانی پهنه فرورانش (VAG) است (شکل A-11 و B).



شکل 11. نمودار تکتنوماگمایی توده‌های نفوذی منطقه شاه سلطان‌علی A: نمودار Rb در مقابل Ta+ Yb و B: نمودار Ta در برابر Yb (Pearce et al., 1984). WPG: گرانیت‌های درون صفحه‌ای، VAG: گرانیت‌های قوس آتشفشانی، ORG: گرانیت‌های پشته‌های اقیانوسی، syn-COLG: گرانیت‌های هم‌زمان با برخورد

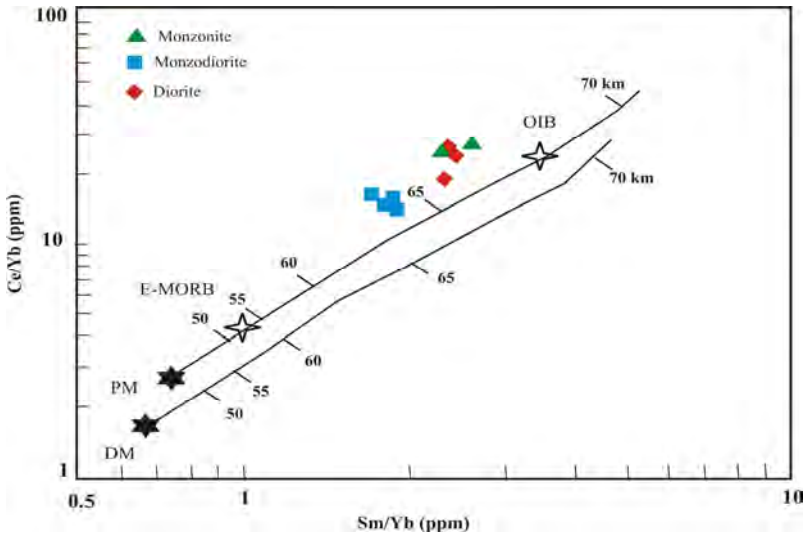
Fig. 11: Tectonomagmatic discrimination diagrams for Shah Soltan Ali intrusive rocks (Pearce et al., 1984). A: Rb vs. (Ta+ Yb), and B: Ta vs. (Yb). WPG: within-plate granitoids; VAG: volcanic arc granitoids; ORG: ocean ridge granitoids; syn-COLG: syncollisional granitoids

برای بررسی نوع کانی باقی‌مانده در منشأ و درجه ذوب‌بخشی می‌توان از عناصر نادر خاکی استفاده کرد. در این بین عنصر Yb به‌شدت در گارنت نسبت به کلینوپیروکسن و یا اسپینل سازگار و عنصر La به‌شدت ناسازگار است (Aldanmaz et al., 2000). از سوی دیگر، نسبت Sm/Yb به ترکیب کانی‌شناسی ناحیه منشأ وابسته بوده است. بنابراین، برای پی‌بردن به ترکیب کانی‌شناسی ناحیه منشأ و درجه ذوب‌بخشی از نمودار Sm/Yb در مقابل La/Sm استفاده شده است (Shaw, 1970; Aldanmaz et al., 2000) (شکل 12). چنان‌که در شکل 12 دیده می‌شود، نمونه‌های مربوط به توده‌های مونزونیتی و مونزودیوریتی اغلب نزدیک خط گارنت اسپینل لرزولیت قرار گرفته‌اند؛ در حالی‌که توده‌های مونزودیوریتی بین خط اسپینل لرزولیت و گارنت اسپینل لرزولیت واقع شده‌اند. این مسأله نشان می‌دهد که خاستگاه تمام توده‌ها گارنت اسپینل لرزولیت با مقدار اسپینل بیشتر از گارنت بوده است. همچنین درجه ذوب‌بخشی توده‌های بالا، طبق نمودار Sm/Yb در مقابل La/Sm بین 1% تا 5% متغیر است (شکل 12). به دلیل آن‌که درجه ذوب‌بخشی توده‌های مونزونیتی (حدود 5) از سایر توده‌ها بیشتر بوده است، در نمودار نرمالیزه‌شده عناصر نادر خاکی نسبت به کندریت غنی‌شدگی از عناصر LREE نسبت به HREE کمتر دیده می‌شود. وجود مقدار اندکی گارنت به‌عنوان کانی باقی‌مانده در خاستگاه این توده‌ها همچنین توسط نسبت پایین $(La/Yb)_N$ (4/6 تا 9/7) و نسبت کم $(Ce/Yb)_N$ (3/17 تا 7) در ماگما توجیه‌پذیر است. در نمودار Ce/Yb در مقابل Sm/Yb (Wang et al., 2002)، عمق تشکیل و جدایش ماگما از گوشته برای توده‌های مونزودیوریتی کمتر از 65 کیلومتر و برای توده‌های دیوریتی و مونزونیتی کمی بیش از 65 کیلومتر است (شکل 13).



شکل 12. نمودار Sm/Yb در مقابل La/Sm برای توده‌های نفوذی منطقه شاه سلطان‌علی (Shaw, 1970). روند گوشته‌ای[1] در این شکل (خط ضخیم) توسط ترکیب گوشته تهی‌شده نوع مورب (Mckenzi and O'Nions, 1991) (DM) و گوشته اولیه (Sun and Mc Donough, 1989) (PM) مشخص می‌شود. منحنی‌های ذوب‌بخشی برای منشأ گوشته‌ای اسپینل لرزولیت ($Ol_{53}+Opx_{27}+Cpx_{17}+Sp_{11}$) و گارنت لرزولیت ($Ol_{60}+Opx_{20}+Cpx_{10}+gt_{10}$) با ترکیبات گوشته تهی‌شده نوع مورب و گوشته اولیه (Aldanmaz et al., 2000). خطوط و اعداد روی منحنی‌های ذوب نشان‌دهنده درجه ذوب‌بخشی برای یک منشأ گوشته‌ای است.

Fig. 12. Sm/Yb vs. La/Sm diagram for Shah Soltan Ali intrusive rocks (Shaw, 1970). Mantle array (heavy line) defined by depleted MORB (DM) (Mckenzi and O'Nions, 1991) and primitive mantle (PM) (Sun and Mc Donough, 1989). Melting curves for spinel lherzolite ($Ol_{53}+Opx_{27}+Cpx_{17}+Sp_{11}$) and garnet lherzolite ($Ol_{60}+Opx_{20}+Cpx_{10}+gt_{10}$) with both DM and PM compositions are after Aldanmaz et al., 2000. Numbers along these lines represent the degree of the partial melting.



شکل 13. نمودار Ce/Yb در مقابل Sm/Yb برای توده‌های نفوذی منطقه شاه سلطان‌علی (Wang et al., 2002). PM: گوشته اولیه، DM: گوشته تهی‌شده، OIB: بازالت‌های جزایر اقیانوسی، E-MORB: پشته‌های میان اقیانوسی غنی‌شده

Fig. 13. Ce/Yb vs. Sm/Yb diagram for Shah Soltan Ali intrusive rocks (Wang et al., 2002). PM: primitive mantle; DM: depleted MORB; OIB: ocean island basalt, E-MORB: enriched MORB.

1. Mantle array

مدل کانی‌سازی

کانسارهای مس پورفیری دارای ذخیره بالا، عیار پایین، غیر همزاد و درون‌زاد هستند. این کانسارها از نظر موقعیت زمین‌ساختی، در کمربندهای زمین‌ساختی زون فروانش حاشیه قاره‌ها و جزایر قوسی تشکیل می‌شوند (محیط‌های مرتبط با زون‌های فرورانش) (Sillitoe, 2010). سنگ‌های همراه با این کانسارها، نفوذی‌های نیمه عمیق با ماهیت اغلب کالک‌آلکالن متوسط است؛ اما ممکن است در محدوده‌های شوشونیتی و آلکالن نیز قرار گیرند. از نظر اندیس آلومینیوم نیز این توده‌ها متاآلومینوس هستند (Seedorff et al., 2005). در کانسارهای مس پورفیری گروه ماگمای گرانیتوئیدی، دسته مگنتیت است، این ماگما از اعماق زیاد (جبه بالایی و پوسته پایینی) سرچشمه گرفته و حاوی مقدار زیادی گوگرد و فلز بوده است. در این کانسارها، گوگرد موجود در ماگمای دسته مگنتیتی ضمن تفریق ماگما به درون فاز آب‌دار حاصل از تفریق واردشده است و انواع سولفیدها را تشکیل خواهد داد. در سیستم‌های مس پورفیری، استوک‌های نفوذی ترکیب دیوریت، مونزونیت (مونزوگرانیت) و به‌ندرت سینیت دارند (Enns et al., 1995)، این سیستم‌ها با دگرسانی‌های وسیعی همراه هستند و انواع آلتراسیون پتاسیک، کوارتز ـ سرسیت ـ پیریت، آرژیلیک، پروپلیتیک در آنها دیده می‌شود (جدول 4).

کانی‌سازی این سیستم به شکل‌های پراکنده، استوک‌ورک و برش گرمابی است. در بخش‌های مختلف آن انواع رگه‌چه‌های کوارتز، پتاسیم فلدسپات، آلبیت و مگنتیت یافت می‌شود. قابل ذکر است که میزان سولفید در این کانسارها بین 3% تا 10% متغیر بوده و پیریت مهمترین سولفید این سیستم‌هاست. زون‌بندی کانی‌سازی نشان می‌دهد که در مرکز این سیستم‌ها آنومالی از عناصر Cu±Au ±MO و به سمت حواشی آنومالی از عناصر Pb±Zn±Ag تشکیل می‌شود. عیار متوسط مس در سیستم‌های پورفیری 0/5 %، و عیار متوسط طلا کمتر از 0/1 گرم در تن است (جدول 4).

جدول 4. مقایسه کانسارهای مس پورفیری نوع مونزونیتی با منطقه اکتشافی شاه سلطان‌علی (Sillitoe, 2010; Seedorff et al., 2005; Enns et al., 1995).

Table 4. Comparison of Cu porphyry (Monzonitic type) with Shah Soltan Ali prospect area (Sillitoe, 2010; Seedorff et al., 2005; Enns et al., 1995).

Specifications	Cu porphyry	Shah Soltan Ali prospect area
Tectonic setting	Subduction zones	**Subduction zone**
Magmatic series	Calc- alkaline to shoshonite series	**Calc - alkaline to shoshonitic series**
Granitoide series	I type	**I type**
Rock type	Monzonite to Diorite	**Monzonite porphyry, Monzodiorite porphyry, Diorite porphyry**
Alteration zones	Potassic, QSP, Argillic, Propylitic and litocap alterations.	**QSP, Propylitic, Argillic, Silicified, Sericitic and carbonate zones**
Mineralization	Disseminated, Stockwork, Hydrothermal breccias	**Disseminated, Stockwork, Hydrothermal breccias, Vein**
Sulfides (%)	3 – 10	**1 - 4**
Cu(%)	0.5 - 1.5	**0.003 - 0.04**
Au (ppm)	<0.1	**0.005- 0.128**

در مقام مقایسه، همان‌طور که از الگوی عناصر فرعی و نادر خاکی در منطقه شاه سلطان‌علی بر می‌آید، این منطقه الگویی مشابه ماگماهای پهنه‌های فرورانش را نشان می‌دهد و موقعیت زمین‌ساختی توده‌های نفوذی این منطقه در محدوده کمربند

آتشفشانی پهنه فرورانش (VAG) است. این توده‌ها همچنین ماهیت کالک‌آلکالن نرمال تا شوشونیتی دارد و در دسته گرانیتوئیدهای اکسیدان (دسته I) جای می‌گیرند (جدول 4). خاستگاه ماگمای مولد این توده‌ها، گارنت اسپینل لرزولیت با مقدار کم گارنت بوده است که این ماگما از عمق بین 64 تا 68 کیلومتری سرچشمه گرفته است. در منطقه اکتشافی شاه سلطان‌علی، توده‌های نفوذی ترکیب مونزونیت پورفیری، مونزودیوریت پورفیری و دیوریت پورفیری دارند و بر اساس اندیس آلومینیوم تمامی توده‌ها متاآلومینوس هستند. دگرسانی وسیعی تمام واحدهای نفوذی و آتشفشانی منطقه را تحت تأثیر قرار داده است، به‌طوری‌که انواع آلتراسیون‌های کوارتز- سرسیت- پیریت، پروپلیتیک، سرسیت، کربناته، آرژیلیک و سیلیسی در واحدهای سنگی دیده می‌شود. کانی‌سازی در این منطقه به شکل‌های استوک‌ورک، رگه‌ای، افشان و برش گرمابی است که در این بین کانی‌سازی استوک‌ورک همراه با دگرسانی کوارتز- سرسیت- پیریت از اهمیت دوچندان برخوردار است. در منطقه اکتشافی شاه سلطان‌علی، کانی‌سازی در مرکز تا جنوب منطقه به‌صورت دانه پراکنده و در جنوب‌شرقی منطقه به‌صورت استوک‌ورک است، در این زون کانی‌سازی انواع رگه‌چه‌های پیریت + کالکوپیریت اکسید شده و کوارتز + پیریت ± کالکوپیریت دیده می‌شود. درصد سولفید در منطقه اکتشافی شاه سلطان‌علی تا حدود 4% می‌رسد، این مقدار کمی پایین‌تر از مقدار سولفید در سیستم‌های مس پورفیری است.

کاهش در مقدار سولفید ناشی از اکسیداسیون شدید کانی‌های سولفیدی در سطح است؛ به‌طوری‌که به‌دلیل شدت اکسیداسیون، مقدار اکسید آهن در بخش‌های جنوبی منطقه به حدود 14 درصد می‌رسد. عیار عنصر مس در منطقه اکتشافی شاه سلطان‌علی بین 30 تا 454 گرم در تن متغیر بوده که این آنومالی کمتر، ناشی از برداشت نمونه از افق‌های بالایی و نبود گمانه‌های حفاری است، همچنین به‌دلیل شدت اکسیداسیون، قابلیت تحرک عنصر مس و میل ترکیبی آهن با اکسیژن این عنصر با افزایش فوگاسیته اکسیژن، از افق‌های بالایی شسته‌شده و در بخش‌های عمیق ترته نشین شده است. مقدار عنصر طلا در زون کانی‌سازی استوک‌ورک حدود 0/128 گرم در تن است. بر اساس شواهد بالا، این منطقه مرتبط با سیستم‌های مس پورفیری است. با توجه به فرورانش بین بلوک لوت و افغان و ماگماتیسم گسترده در این بلوک، همراه با شناسایی انواع کانسارهای مرتبط با سیستم‌های مس پورفیری از قبیل، ماهرآباد، کوه‌شاه و خوپیک در اطراف محدوده اکتشافی شاه سلطان‌علی، انتظار می‌رود که منطقه مورد بررسی بخشی از کمربند مس پورفیری در شرق ایران باشد.

قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح پژوهشی شماره 3/36776 مورخ 93/12/14 انجام شده 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.

Aldanmaz, E., Pearce, J.A., Thirlwall, M.F. and Mitchell, J.G., 2000. Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 102(1): 67–95.

Arjmandzadeh, R., Santos, J.F. and Ribeiro, S., 2013. Sr–Nd isotope geochemistry and tectonomagmatic setting of the Dehsalm Cu–Mo porphyry mineralizing intrusives from Lut

Block, eastern Iran. International Journal of Earth Science, 103(1): 123-140.

Asiabanha, A., Bardintzeff, J.M., Kananian, A. and Rahimi, G., 2012. Post-Eocene volcanics of the Abazar district, Qazvin, Iran: Mineralogical and geochemical evidence for a complex magmatic evolution. Journal of Asian Earth Sciences, 45(2012): 79–94.

Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements; meteorite studies. In: P. Henderson (Editor), The rare earth element geochemistry. Elsevier, Amsterdam, pp. 115-1522.

Chappell, B.W. and White, A.J.R., 2001. Two contrasting granite types, 25years later. Australian Journal of Earth Sdiences, 48(4): 489-500.

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.

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.

Enns, S.G., Thompson, J.F.H., Stanley, C.R. and Lang, J.R., 1995. The Galore Creek porphyry copper-gold deposits, northwestern British Columbia. Metallurgy and Petroleum, 46: 630−644.

Geochemical report of SAR-E-CHAH-E-SHUR, 2003. Geology and alteration maps of SAR-E-CHAH-E-SHUR scale: 100000, (Birjand area, West Iran). Geological Survey of Iran, Tehran, Report 1, 52 pp.

Gill, R., 2010. Igneous rocks and processes. Wiley-Blackwell, New Jersey, 428 pp.

Gustafson, L.B.G. and Hunt, J.P., 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. Economic Geology, 70(5): 857-912.

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: 347-365.

Hassani Pak, A.A., 2010. Principles of Geochemical Exploration. University of Tehran, Tehran, 615 pp.

Helvacı, C., Ersoy, E.Y., Sözbilir, H., Erkül, F., Sümer, Ö. and Uzel, B. 2009. Geochemistry and 40Ar/39Ar 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.

Irianto, B. and Clark, G.H., 1995. The Batu Hijau porphyry copper-gold deposit, Sumbawa Island, Indonesia. In: J.L. Mauk and S. George (Editors), PACRIM'95 Congress. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, pp. 299–304.

Kampunzu, A.B., Tombale, A.R., Zhai, M., Bagai, Z., Majaule, T. and Modisi, M.P., 2003. Major and trace element geochemistry of plutonic rocks from Francistown, NEBotswana: evidence for a Neoarchaean continental active margin in the Zimbabwe craton. Lithos, 71(2-4): 431-460.

Kan Azin, 2008. Exploration, Microthermometry and designing and interpretation of bore holes in Shah Soltan Ali (Birjand area, West Iran). Geological Survey of Iran, Tehran, Report 1, 120 pp.

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.

MacKenzie, W.S., Donaldson, C.H. and Guilford, C., 1984. Atlas of igneus rocks and their textures. Halsted Press, London, pp. 146.

Mahdavi, A., Karimpour, M.H., Mao, M., Haidarian Shahri, M.R., Malekzadeh shafaroudi, A. and Li, H., 2016. Zircon U–Pb geochronology, Hf isotopes and geochemistry of intrusive rocks in the Gazu copper deposit, Iran: Petrogenesis and geological implications. Ore Geology Reviews, 72(1): 818–837.

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(2015): 522 – 544.

Martin, H., 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. Lithos, 46(3): 411- 429.

McKenzi, D. and O'Nions, R.K., 1991. Partial melt distribution from inversion of rare earth element concentrators. Journal of Petrology, 32(5): 1021-1091.

Middlemost, E.A.K., 1985. Magmas and magmatic rocks rocks: An introduction to igneous petrology. Longman Group, United Kingdom, 390 pp.

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.

Najafi, A., Karimpour, M.H., Ghaderi, M., Stern, C.R. and Farmer, G.L., 2014. U-Pb zircon geochronology, Rb-Sr and Sm-Nd isotope geochemistry, and petrogenesis of granitiod rocks at Kaje prospecting area, northwest Ferdows: Evidence for upper Cretaceous magmatism in Lut block. Journal of Economic Geology, 6(1): 107-135. (in Persian with English abstract)

Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for thetectonic 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.

Samiee, S., Karimpour, M.H., Ghaderi, M., Haidarian Shahri, M.R., Kloetzli, O. and Santos, J.F., 2016. Petrogenesis of subvolcanic rocks from the Khunik prospecting area, south of Birjand, Iran: Geochemical, Sr–Nd isotopic and U–Pb zircon constraints. Journal of Asian Earth Sciences, 115: 170–182.

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 London Special Publication, London, pp. 41–60.

Seedorff, E., Dilles, J.H., Proffett, J.M., Jr., Einaudi, M.T., Zurcher, L., Stavast, W.J.A., Johnson, D.A. and Barton, M.D., 2005. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. Economic Geology, 29: 251-298.

Shand, S.J., 1947. Eruptive rocks; Their genesis, composition, classification and their relation to ore-deposits. Hafner Publishing Company, New York, 448 pp.

Shaw, D.M., 1970. Trace element fractionation during anataxis. Geochimica et Cosmochimica Acta, 34(2): 237-243.

Shelly, D., 1993. Igneous and Metamorphic Rocks Under the Microscope: Classification, Textures, Microstructures and Mineral Preferred Orientation. Springer, London, 445 pp.

Sillitoe, R., 2010. Porphyry Copper Systems. Economic Geology, 105(1): 3–41.

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 Asia 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-alkalinegranitoids by

melting of mafic lower crust with variable water fugacity. Contributions to Mineralogy and Petrology, 113(3): 333-351.

Vassigh, M. and Soheili, H., 1975. Geological map of Sar- E– Chah- E – Shur, Scale 1:100000. Geological Survey of Iran.

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: 533-543.

Wang, K., Plank, T., Walker, J.D. and Smith, E.I., 2002. A mantle melting profile across the Basin and Range, SW USA. Journal of Geophysical Research, 107: 5–21.

Wilson, M., 1989. Igneous petrogenesis. Uniwin Hyman, London, 466 pp.

Whitney, D. and Evans, B., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American mineralogist, 95(1): 185-187.

Zarnab exploration consulting engineers company, 2009. Report of Geology and alteration maps of Sheykh Abad scale: 125000, (Birjand area, West Iran). Iranian mines and mining industrls development and renovation organization, Thehran, Report 1, 76 pp.

Journal of Economic Geology
Vol. 9, No. 1 (2017)
ISSN 2008-7306

مجله زمین‌شناسی اقتصادی
جلد 9، شماره 1 (سال 1396)
صفحات 11 و 12

Geology, Alteration, Mineralization, Geochemistry and Petrology of intrusive units in the Shah Soltan Ali prospect area (Southwest of Birjand, South Khorasan province)

Samaneh Nadermezerji, Mohammad Hassan Karimpour* and Azadeh Malekzadeh Shafaroudi

Research Center for Ore Deposit of Eastern Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Submitted: Oct. 13, 2016
Accepted: Mar. 5, 2017

Keywords: *Alteration, Mineralization, I-type granitoid, Cu porphyry, Shah Soltan Ali, Birjand, Lut Block.*

Introduction

The Shah Soltan Ali area is located 85 km southwest of Birjand in the South Khorasan province. This area is part of the Tertiary volcanic-plutonic rocks in the east of the Lut block. The Lut block is bounded to the east by the Nehbandan and associated faults, to the north by the Doruneh and related faults (Sabzevar zone), to the south by the Makran arc and Bazman volcanic complex and to the west by the Nayband Fault. The Lut block is the main metallogenic province in the east of Iran (Karimpour et al., 2012), that comprises of numerous porphyry Cu and Cu–Au deposits, low and high sulfidation epithermal Au deposits, iron oxide deposits, base-metal deposits and Cu–Pb–Zn vein-type deposits. The geology of Shah Soltan Ali area is dominated by volcanic rocks, comprised of andesite and basalt, which are intruded by subvolanic units such as monzonite porphyry, monzodiorite porphyry and diorite porphyry.

Materials and methods

1. 170 thin sections of the rock samples as well as 25 polished and thin polished sections were prepared for petrography, alteration and mineralization.
2. Twenty five samples were analyzed for Cu, Pb, Zn, Sb, Mo and As elements by the Aqua regia method in the Zarazama laboratory in Tehran, Iran.
3. Nine samples were analyzed for trace elements [including rare earth elements (REEs)]. As a result of these analyses, trace elements and REE were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) in the ACME Analytical Laboratories (Vancouver) Ltd., Canada.
4. Ten samples were analyzed for major elements by wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry in the East Amethyst laboratory in Mashhad, Iran.
5. Five samples were analyzed for Firre Assay analysis in the Zarazma Laboratory in Tehran, Iran.
6. The results of XRD analysis were used for 4 samples.

Discussion and results

Petrographic studies indicate that subvolcanic rocks consist of diorite porphyry, monzonite porphyry and monzodiorite porphyry. Based on field and lab work several alteration zones such as: quartz–sericite–pyrite (QSP), propylitic, argillic, silicified, sericitic and carbonate were identified. Geochemical studies show that intrusive units are metaluminous, high calcalkalic to shoshonitic. These rocks belong to the I-type granitoid (Chappell and White, 2001), and they have formed in a volcanic arc granitoids (VAG) tectonic setting (Pearce et al., 1984). Mantle-normalized, trace-element spider diagrams display enrichment in large ion lithophile elements, such as Rb, Sr, K, and Cs, and depletion in high field strength elements, e.g., Nb, Ti, Zr. Enrichment of LREE versus HREE and enrichment of LILE and depletion in HFSE indicate magma formed in the subduction zone. Negative Nb and Ti anomalies are recognized as a fingerprint of a subduction process (Nagudi et al., 2003). All of the intrusive

*Corresponding authors Email: karimpur@um.ac.ir
DOI: 10.22067/econg.v9i1.61010

rocks have a weak negative Eu anomaly (Eu/Eu*=0.82–0.94) (Tepper et al., 1993), and a low ratio of $(La/Yb)_N$. The magmatic source of intrusive rocks had been generated from 1% to 5% of partial melting of garnet-spinel lherzolite (Aldanmaz et al., 2000). In the south area, four types of mineralization such as: veinlet to vein, disseminated, hydrothermal breccia and stockwork occur from which stockwork is the most important type of mineralization. The veinlets that were found within the stockwork zone are:1) pyrite + chalcopyrite, 2) quartz + pyrite ± chalcopyrite, 3) quartz ± pyrite. Compositional variations of elements within the Shah Soltan Ali area are as follows: Cu = 30-454 (ppm), Zn = 27-279 (ppm), Pb = 11- 70 (ppm), Sb = 0.9-152 (ppm), Au= 5-128 (ppb), As = 7-203 (ppm). There is a high concentration of Cu – Zn – Au and Sb that is associated with the high density of veinlets in the quartz-sericite-pyrite zone in the southeast of Shah Soltan Ali area. Based on the obtained data, the Shah Soltan Ali area is a part of the porphyry Cu-Au deposit.

References

Aldanmaz, E., Pearce, J.A., Thirlwall, M.F. and Mitchell, J.G., 2000. Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 102(1): 67–95.

Chappell, B.W. and White, A.J.R., 2001. Two contrasting granite types, 25years later. Australian Journal of Earth Sdiences, 48(4): 489-500.

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)

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 thetectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25(4): 956-983.

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-alkalinegranitoids by melting of mafic lower crust with variable water fugacity. Contributions to Mineralogy and Petrology, 113(3): 333-351.

.