

سنگ‌نگاری و سنگ‌شناسی توده پورفیری کانسار مس سونگون و دایک‌های پس از کانی‌سازی، با نگرشی بر اسکارن همراه (شمال ورزقان-آذربایجان شرقی)

سید غفور علوی، محمدرضا حسین‌زاده * و محسن مؤید
گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

معدن مس سونگون در استان آذربایجان شرقی و در شمال شهر ورزقان واقع شده است. قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه آهک‌های کرتاسه است. پس از جایگیری توده نفوذی پورفیری، چهار گروه دایک با ترکیب متفاوت در آن نفوذ کرده‌اند. ترکیب توده نفوذی کوارتز مونوزیت است. چهار پهنه دگرسانی پتاسیک، فلیک، پروپلیتیک و آرژیلیک در سونگون مشاهده می‌شود. بافت غالب توده نفوذی، پورفیری با خمیره ریزبلور و بافت‌های میکروولیتی و میکروولیتی پورفیری در دایک‌ها بافت غالب است. توده نفوذی سونگون تحت تأثیر تفریق، تبلور بخشی، هضم و آلیش متحول شده است. توده پورفیری سونگون و دایک‌های همراه متآلومینوس و از لحاظ سرشت ماگمایی کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا و شوشونیتی است. از نظر محیط زمین‌ساختی، نمونه‌های سونگون در موقعیت‌های همزمان با برخورد، پس از برخورد و کمرندهای آتشفشانی پهنه فرورانش قرار می‌گیرد. به علت همبری توده سونگون پورفیری با واحدهای آهکی و مارنی کرتاسه فوقانی، در شمال و شرق، اسکارن آهن-مس به وجود آمده است. اسکارن‌های این منطقه به دو دسته اندواسکارن (ENS) و اگزواسکارن (EXS) تقسیم می‌شود. اگزواسکارن در سونگون بر اساس مشاهدات صحرایی و کانی‌های موجود به سه پهنه پیروکسن‌اسکارن، گارنت‌اسکارن و اپیدوت‌اسکارن تقسیم می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بافت میکروولیتی، متآلومینوس، کالک‌آلکالن، زون دگرسانی، اسکارن، سونگون

مقدمه

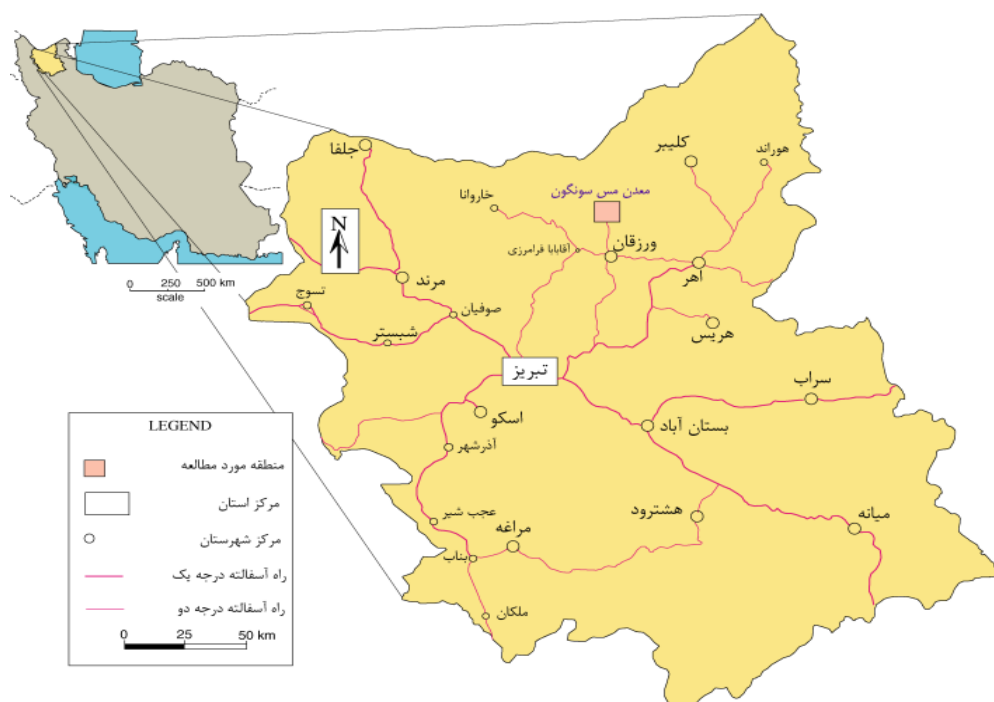
شرقی و $38^{\circ}42'$ شمالی قرار دارد. راه دسترسی به معدن از طریق جاده تبریز-ورزقان-سونگون و همچنین، از طریق تبریز-اهر-ورزقان-سونگون میسر است (شکل ۱). سابقه معدن‌کاری در سونگون به دو

معدن مس سونگون در استان آذربایجان شرقی و در فاصله ۱۳۰ کیلومتری شهر تبریز و ۳۰ کیلومتری شمال شهر ورزقان و با مختصات جغرافیایی $46^{\circ}43'$

Hezarkhani and William-Jones, 1997
(Jones, 1998).

با توجه به یافته‌های جدید از تنوعات سنگی در حفاری‌های جدید، در این پژوهش بررسی‌های سنگ‌نگاری و سنگ‌شناسی بر روی توده نفوذی، دایک‌های موجود و اسکارن‌زایی در حاشیه آن انجام شده است.

قرن پیش باز می‌گردد. آثار فعالیت‌های قدیمی به صورت استخراج زیرزمینی از مناطق پر عیار تا اوایل دهه پنجاه شمسی انجام می‌شده است. در سال ۱۳۵۶ وجود ذخایر مس پورفیری محرز شد. بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه‌های اکتشاف، دگرسانی‌های موجود و استخراج در این منطقه انجام شده است (Mehrpour, 1993; Calagari, 1997).



شکل ۱- موقعیت معدن مس سونگون در ایران و راه‌های دسترسی به معدن

(Hezarkhani and William-Jones, 1998).

فعالیت‌های ماگمایی پس از جایگیری توده کوارتزموونزیتی، به صورت تزریق سیستم دایک‌های متعدد درون توده بوده است. بررسی‌های جدید سنگ‌شناسی نشان می‌دهد که سه پالس اصلی نفوذ در منطقه رخ داده است. قدیمی‌ترین پالس نفوذی به توده کوارتزموونزیتی باردار سونگون متعلق است که حامل کانی‌سازی مس-مولیبدن پورفیری است و خود توسط دو توده تأخیری کوارتزدیوریت-گرانودیوریت و دیوریتی نابارور قطع شده است. همچنین، دایک‌های پس از

زمین‌شناسی منطقه

معدن سونگون با توجه به تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری ایران (Stocklin, 1968) در پهنه ایران مرکزی و بر اساس تقسیم‌بندی‌های دیگر در پهنه البرز-آذربایجان (Nabavi, 1976) و در پهنه اکتشافی ارسباران واقع شده است. قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه شامل: سکانسی به ضخامت ۵۰۰ متر از آهک‌های کرتاسه با میان‌لایه‌هایی از شیل و سکانس دیگری به ضخامت ۱۵۰۰ متر از گدازه‌های کالک‌آلکال و سنگ‌های توفی است که دایک‌های آندزیتی کالک‌آلکال در آنها نفوذ کرده‌اند.

(پهنه فیلیک) و خاکستری تیره با فلدسپارهای صورتی رنگ نئوفرمه (پهنه پتاسیک)، تغییر می‌کند. ضریب رنگینی آن در حد ۱۰ تا ۳۵ (لوکوکرات) است.

مشخصات میکروسکوپی توده سونگون پورفیری در پهنه‌های دگرسانی مختلف

کانی‌های اصلی توده سونگون پورفیری شامل: پلاژیوکلاز (۴۰ تا ۴۵ درصد)، پتاسیم‌فلدسپار (۳۰ تا ۳۵ درصد)، آمفیبول (۵ تا ۱۰ درصد)، بیوتیت (۵ تا ۱۰ درصد) و کوارتز (۵ تا ۱۰ درصد) است. در پهنه پروپلیتیک، پلاژیوکلاز به مجموعه سیرسیت، کلسیت و اپیدوت تجزیه شده (شکل ۲-۲) و در پهنه دگرسانی فیلیک به طور کامل به سیرسیت تجزیه شده، تنها شبحی از آن دیده می‌شود (شکل ۲-۲). در پهنه پتاسیک بلورهای پلاژیوکلاز سالم بوده و به ندرت به سیرسیت تجزیه شده‌اند و برخی از آنها با رو رشدی پتاسیم‌فلدسپار همراهی می‌شود. در این پهنه متاسوماتیزم شدید پتاسیم در سنگ صورت می‌گیرد و باعث می‌شود که بلورهای نئوفرمه فلدسپار پتاسیم به صورت فنوکریستال‌های با حواشی گرد شده و گاهی بی شکل در سنگ ظاهر شود که واجد آنکلوژیون‌های متعددی از کانی‌های دیگر به ویژه محصولات دگرسانی است (شکل ۲-۲). همچنین، در این پهنه دگرسانی، بیوتیت نئوفرمه تشکیل می‌شود که علاوه بر شکل ریز بلور به صورت رگچه‌ای نیز در سنگ دیده می‌شود (شکل ۲-۲).

کانی‌های فرومنیزین از جمله: آمفیبول و بیوتیت در پهنه دگرسانی پروپلیتیک به مجموعه سیرسیت، کربنات، کلریت و اپیدوت دگرسان شده و در پهنه فیلیک به طور کامل توسط سیرسیت و کانی‌های تیره و اندکی کلریت و اپیدوت سودومورف شده‌اند. کانی‌های فرعی شامل: زیرکن، آپاتیت، اسفن و کانی‌های تیره (پیریت، کالکوپیریت،

کانی‌سازی که از توده‌های اخیر منشأ گرفته‌اند با راستای عمومی NW-SE و با شیبی به سمت SW و به ندرت با راستای N-S، توده اصلی حامل کانی‌سازی تیپ پورفیری را قطع کرده‌اند. این دایک‌ها بر اساس تقدم و تأخر به چهار نسل تقسیم می‌شوند: الف) دایک‌های نسل اول که از دو توده تأخیری کوارتز دیوریت تا گرانودیوریت و دیوریتی منشأ گرفته‌اند که خود این دسته دایک‌ها به سه زیر رده DK1a، DK1b و DK1c تقسیم شده‌اند؛ ب) دایک‌های نسل دوم (DK2) که دارای ترکیب گابرویدیوریتی بوده، خارج از معدن رو باز اصلی سونگون برونزد دارد؛ ج) دایک‌های نسل سوم (DK3) که دارای ترکیب دیوریتی است و د) دایک‌های نسل چهارم (DK4) که دارای ترکیب لاتیتی تا تراکی‌آندزیتی بوده و از گنبد چال‌داغی به سن پلیوسن منشأ گرفته است که از نظر زمانی با تزریق دایک‌های قبلی دارای اختلاف سنی قابل ملاحظه‌ای است و در این پژوهش حاضر بررسی نشده‌اند.

توده سونگون پورفیری در ضلع جنوب‌شرقی خود توسط گنبد ساب‌ولکانیک چال‌داغی قطع شده و آخرین تظاهرات ماگمایی در این محدوده مربوط به فوران‌های آتشفشانی از ضلع جنوب‌غربی توده سونگون پورفیری با ترکیب تراکی‌آندزیت بازالیتی است که به نام کالدرای داش‌دیبی معروف است و محصولات آذرآواری و روانه‌های آن توده پورفیری سونگون و دایک‌های تأخیری را پوشانده است.

سنگ‌شناسی

توده سونگون پورفیری (SP): رنگ این توده در نمونه دستی بر حسب نوع دگرسانی که متحمل شده است از خاکستری متمایل به سبز تا زیتونی (پهنه پروپلیتیک)، خاکستری روشن تا کرمی و سفید (پهنه آرژیلیک)، خاکستری روشن تا تیره

فیلیک ضعیف تا شدید و پروپیلیتیک ضعیف تا متوسط در تغییر است.

زیر گروه DK1b

زیر گروه DK1b در نمونه دستی به رنگ سبز تیره با فنوکریستال‌های سفید رنگ پلاژیوکلاز (۵۰ تا ۵۵ درصد) در خمیره‌ای تیره و متمایل به سبز لجنی قرار دارد. کانی‌های فرومنیزین موجود در آنها بلورهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار آمفیبول (۱۵ تا ۲۰ درصد) و بیوتیت (۵ تا ۱۰ درصد) است که به مجموعه اپیدوت، کلریت و کلسیت تجزیه شده‌اند. در انواع اخیر بلورهای بیوتیت کاملاً به کلریت، اپیدوت و کلسیت تجزیه شده‌اند. بافت آنها میکرولیتی پورفیریک تا پورفیریک با خمیره ریزبلور است و فاقد کانی‌سازی است (شکل ۲-G). این دسته، دایک‌های قدیمی DK1a را قطع می‌کند. دگرسانی آنها شامل: سریسیتیک ضعیف تا متوسط-پروپیلیتیک ضعیف تا متوسط است.

زیر گروه DK1c

در زیر گروه DK1c که از نظر رنگ و مشخصات ظاهری به انواع DK1b شباهت زیادی دارد، بلورهای پلاژیوکلاز (با فراوانی ۵۰ تا ۵۵ درصد) سالم‌تر بوده و در ضمن بلورهای آمفیبول (۱۵ تا ۲۰ درصد) و بیوتیت (۵ تا ۱۰ درصد) نیز به ندرت دگرسان شده (پروپیلیتیک ضعیف) و اغلب سالم است (شکل ۲-H). در دایک‌های عریض، بررسی‌ها نشان داده است که بخش مرکزی این دایک‌ها ویژگی انواع DK1c و حاشیه این دایک‌ها که دگرسانی بیشتری را متحمل شده‌اند، ویژگی گروه DK1b را نشان می‌دهد. بنابراین، منشأ این دسته دایک‌ها یکسان فرض شده است.

دایک‌های نسل دوم (DK2)

دایک‌های نسل دوم ترکیب گابرویدیوریتی داشته و بافت آنها افیتیکی تا گرانولار است و در داخل معدن رو باز رخنمون ندارد.

مگنتیت، بورنیت، مولیبدنیت، کالکوسیت و کوولیت) است که در پهنه‌های کانی‌سازی اکسید، سوپرژن و هیپوژن پاراژنز آنها متفاوت است.

پتروگرافی دایک‌های پس از کانی‌سازی

دایک‌های تأخیری در کانسار پورفیری سونگون به چهار دسته کلی و تحت عنوان DK1، DK2، DK3 و DK4 تقسیم می‌شود. از بین این چهار گروه اصلی، سه گروه DK1، DK3 و DK4 در محدوده معدن رو باز و گمانه‌های حفاری شده مشاهده شده‌اند اما رخنمونی از DK2 در داخل معدن مشاهده نمی‌شود. این دسته از دایک‌ها خارج از معدن رو باز مشاهده می‌شود (ضلع شمال شرقی توده).

زیر گروه (DK1)

قدیمی‌ترین دایک‌های تزریق شده به داخل توده سونگون پورفیری گروه DK1a است که دارای رنگ خاکستری متمایل به زرد تا سبز کمرنگ بوده و با کانی‌سازی پیریت به شکل افشان و رگچه‌ای و به شکل بلورهای شکل‌دار در نمونه‌های دستی مشخص می‌شود. Calagari (۱۹۹۷) معتقد است که این گروه از دایک‌ها همزمان با دگرسانی فیلیک تزریق شده‌اند ولی این دایک‌ها پهنه سوپرژن را قطع می‌کند، بنابراین دایک‌های پس از کانی‌سازی قلمداد می‌شود. بافت آنها پورفیریتیک با خمیره ریزبلور تا میکرولیتی پورفیریک بوده و با فنوکریست‌های پلاژیوکلاز (۴۰ تا ۴۵ درصد) و بلورهای شکل‌دار و نیمه شکل‌دار بیوتیت (۵ تا ۱۰ درصد) تجزیه شده به موسکویت و گاهی کربنات و کلریت مشخص می‌شود. کوارتزهای درشت‌بلور و با حواشی گرده شده (شکل ۲-F) در آنها به وفور مشاهده می‌شود. پلاژیوکلازهای میکرولیتی و کوارتز به همراه مقادیر جزئی پتاسیم‌فلدسپار خمیره ریزبلور سنگ را تشکیل می‌دهد و کانی‌های فرعی شامل زیرکن و آپاتیت است. دگرسانی آنها از

در شبکه‌ای از شکستگی‌ها و با سطوح ناهموار جایگزین شده‌اند. به عبارت دیگر در این ناحیه دایک‌ها و ساخت‌های نفوذی، مرزهای سطح ندارد؛ بلکه بیشتر به صورت سطوح منحنی و پیچیده‌اند (Hamedi, 2007).

روش انجام پژوهش

بررسی‌های صحرایی و نمونه‌برداری در چند مرحله و از پهنه‌ها و مناطق مختلف انجام شد. نمونه‌برداری سطحی از توده نفوذی و مطالعه و نمونه‌برداری از مغزه‌های حفاری این توده و نمونه‌برداری از دایک‌ها و مغزه‌های موجود طی سال ۱۳۸۹ انجام و پس از بررسی‌های کانی‌شناسی مقاطع نازک و صیقلی تهیه شده، تعداد ۳۶ عدد نمونه با روش تحلیل پلاسمای جفت شده القایی (ICP) در آزمایشگاه Amdel استرالیا (توسط شرکت کانساران بینالود) مورد تجزیه عناصر اصلی، فرعی و کمیاب قرار گرفت (جدول ۱).

نقشه زمین‌شناسی و مدل سه بعدی نفوذی ها و دایک‌ها

با استفاده از اطلاعات گمانه‌ای از قسمت شمال شرق توده (محل معدن)، نقشه زمین‌شناسی، نیمرخ زمین‌شناسی و مدل سه بعدی منطقه در شکل ۳ نشان داده شده است (Hamedi, 2007). بر اساس این مدل، قدیمی‌ترین پالس نفوذ، توده سونگون پورفیری بوده است که به درون نهشته‌های فلیش مانند-کربناته کرتاسه فوقانی در شرق و شمال تزریق شده و از سمت جنوب-جنوب غرب با نهشته‌های ولکانیک و ولکانو کلاستیک ائوسن همپری دارد. پس از

دایک‌های نسل سوم (DK3)

دایک‌های نسل سوم به رنگ سبز روشن تا خاکستری متمایل به سبز با فنوکریستال‌های آمفیبول (۲۰ تا ۲۵ درصد) و پلاژیوکلاز (۵۵ تا ۶۰ درصد) (شکل ۲-۱) مشخص می‌شود. ترکیب آنها دیوریتی و فاقد بیوتیت در ترکیب کانی‌شناسی خود است و در مغزه‌های حاصل از حفاری و در رخنمون‌های سطحی، دایک‌های نسل اول DK1a، DK1b و DK1c را قطع می‌کند. بافت آنها میکرولیتی پورفیریک تا پورفیریک با خمیره ریزبلور است (شکل ۲-۲). این دایک‌ها غیر هوازده بوده و کانی‌های فرعی شامل اسفن و آپاتیت است.

دایک‌های نسل چهارم (DK4)

دایک‌های نسل چهارم آپوفیزهای منشعب از توده داسیتی چال‌داغی است که در ضلع جنوب و جنوب غربی معدن رو باز به داخل سونگون پورفیری تزریق شده‌اند. با توجه به فاصله زمانی رخداد این دایک‌ها با نفوذ توده پورفیری و دایک‌های نسل اول تا سوم، در بررسی‌های ژئوشیمیایی و پترولوژی، این دایک‌ها مورد توجه قرار نگرفته‌اند. این دایک‌ها آفانیتمیک و غیر دگرسان بوده و سوزن‌های ریزی از آمفیبول و بیوتیت داشته و رنگ آنها خاکستری روشن است. اکثر دایک‌ها در طول خود تغییر روند می‌دهند و ضخامت آنها نیز تغییر می‌کند. بنابراین، الگوی دایک‌ها در روی نقشه بیشتر به صورت زیگزاگی دیده می‌شود و نیز در بعضی جاها دایک‌ها به یکدیگر متصل شده و جهت‌گیری‌های مختلفی را از خود نشان می‌دهد.

دایک‌ها در حالت کلی، به معنای واقعی ورقه‌ای و مسطح نیست؛ زیرا تفاوت میدان تنش غیرهمگن ناحیه‌ای و میدان تنش هیدروستاتیک ماگمایی، سبب ایجاد شکستگی‌های نامنظم شده و دایک‌ها

بازالتی، لاتیتی، فعالیت ماگمایی در این محدوده خاتمه یافته است.

رده‌بندی شیمیایی

در رده‌بندی شیمیایی در نمودار Zr/TiO_2-SiO_2 (Winchester and Floyd, 1977)، نمونه‌ها در محدوده کوارتز مونزودیوریت، گرانودیوریت و تونالیت قرار می‌گیرد (شکل ۴).

کانی‌سازی پورفیری، در منطقه دو توده و دایک‌های نسل اول (1a، 1b و 1c) و از سمت جنوب‌غرب به درون توده پورفیری سونگون تزریق شده و دایک‌های منشعب از این توده پورفیری را با شیبی به سمت جنوب‌غرب قطع کرده‌اند. سپس دایک‌های نسل سوم تزریق شده و در ادامه، با تزریق گنبد ساب‌ولکانیک چال‌داغی در پلیوسن (داش‌دیبی) و فعالیت آتشفشانی تراکی‌آندزیت



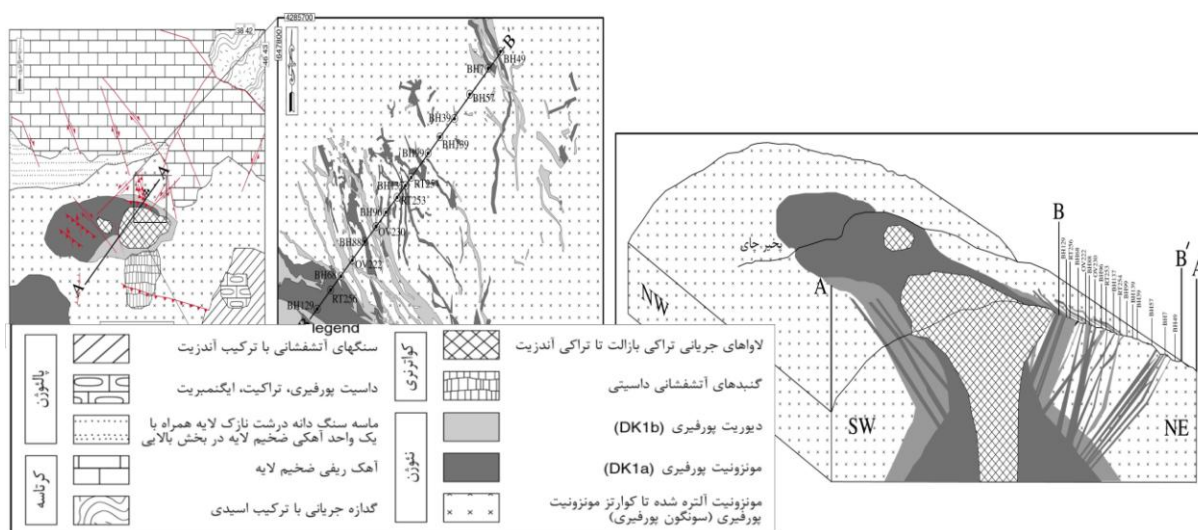
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی از: (A) بیوتیت نئوforme در پهنه پتاسیک؛ (B) ارتوز نئوforme در پهنه پتاسیک؛ (C) دگرسانی پلاژیوکلاز و تبدیل آن به سریسیت در پهنه فلیک؛ (D) دگرسانی فنوکریستال‌های پلاژیوکلاز، کلریت، کلسیت و کوارتز در پهنه پروپلیتیک؛ (E) تجزیه کانی‌های فرومنیزین به سریسیت در (Dk1a؛ F) کوارتزهای گرد شده در (Dk1a؛ G) پلاژیوکلاز زونه، آمفیبول و بیوتیت در (Dk1b؛ H) بلورهای پلاژیوکلاز، آمفیبول و بیوتیت در (Dk1c؛ I) فنوکریستال‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز در (Dk3؛ J) بافت پورفیریک در (Dk3 (علایم کانی‌ها بر اساس Evans و Whitney (۲۰۱۰).

جدول ۱- نتایج تحلیل نمونه‌های توده نفوذی و دایک‌های معدن مس سونگون

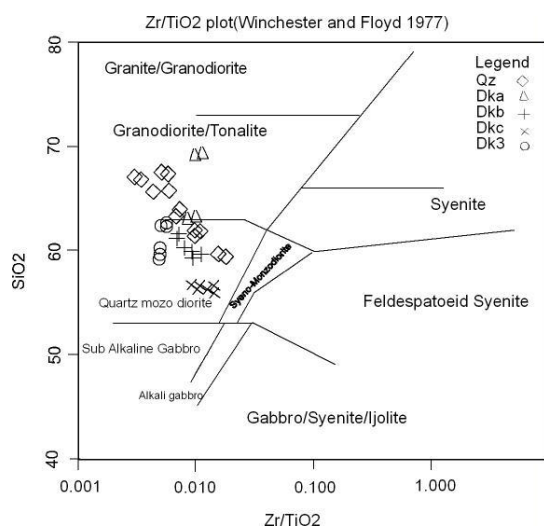
Sample	Qzp1	Qzp2	Qzp3	Qzp4	Qzp5	Qzp6	Qz1	Qz2	Qz3	Qz4	Qz5	Qz6	Dk3	Dk3	Dk3	Dk3	Dk3	Dk3
SiO ₂	65.88	67.15	67.08	59.71	59.62	66.03	67.01	66.98	63.31	63.34	62.41	62.36	62.54	62.51	59.55	59.57	62.91	62.95
Al ₂ O ₃	15.17	14.48	14.51	14.01	14.02	15.18	14.72	14.74	13.42	13.41	14.86	14.91	15.18	15.21	14.61	14.58	14.88	14.86
CaO	2.43	0.32	0.31	6.02	5.96	2.48	0.48	0.49	3.08	3.06	0.48	0.47	2.91	2.94	5.58	5.56	4.02	4.01
Fe ₂ O ₃	2.8	2.41	2.36	3.38	3.32	2.72	3.58	3.61	2.71	2.78	6.08	6.02	2.51	2.48	4.51	4.48	2.12	2.08
FeO	1.68	1.88	1.85	2.05	2.06	2.08	2.61	2.58	2.42	2.86	0.95	0.94	1.28	1.31	1.51	1.48	1.21	1.18
K ₂ O	5.06	9.41	9.13	6.38	6.32	5.01	6.32	6.28	7.68	7.71	6.31	6.28	7.32	7.38	3.21	3.18	2.41	2.38
MgO	1.51	1.58	1.55	2.32	2.34	1.58	2.68	2.65	2.08	2.12	2.88	2.91	2.58	2.64	3.81	3.78	2.61	2.65
MnO	0.02	0.01	0.01	0.06	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.12	0.1	0.06	0.05
Na ₂ O	4.2	0.71	0.68	2.62	2.58	4.06	0.35	0.36	0.62	0.65	0.19	0.18	3.41	3.38	5.41	5.38	5.77	5.78
P ₂ O ₅	0.27	0.23	0.25	0.41	0.42	0.21	0.32	0.33	0.31	0.33	0.3	0.31	0.31	0.32	0.32	0.34	0.31	0.31
SO ₃	1.26	2.71	2.68	0.57	0.58	1.38	3.38	3.41	3.08	3.31	5.38	5.41	1.71	1.78	0.14	0.13	0.74	0.71
TiO ₂	0.41	0.42	0.41	0.58	0.55	0.38	0.51	0.51	0.48	0.51	0.52	0.51	0.58	0.59	0.57	0.58	0.51	0.53
LOI	0.32	0.01	0.02	2.98	2.81	0.32	0.01	0.02	2.58	2.31	0.01	0.02	0.51	0.48	1.68	1.65	3.13	3.21
Ag	0.25	0.89	0.92	0.26	0.27	0.28	0.56	0.61	0.96	0.98	0.18	0.19	0.25	0.23	0.22	0.21	0.13	0.11
Ba	1870	1671	1681	1117	1127	1886	1281	1282	1427	1431	1502	1517	1128	1119	877	881	698	691
Ce	51.8	122	124	69.2	70.1	52.6	70.6	70.8	28.9	29.1	31.7	32.2	41.6	41.3	51.7	51.4	106	103.8
Co	8.3	2.3	2.5	11.2	11.4	8.8	7.1	7.3	9.4	9.6	29.4	29.7	5.3	5.4	10.7	10.8	5.1	5.3
Cr	38	35	37	61	64	41	61	63	52	54	79	81	52	53	88	91	54	57
Cs	1.3	1.6	1.8	1.1	1.3	1.2	3.3	3.4	3.7	3.5	0.9	1.1	0.5	0.6	0.2	0.3	0.8	0.8
Cu	578.6	11120	11210	197.6	200.5	580.9	6033	6037	5596	5592	1580	1591	470	477	39.6	38.8	89.1	87.4
Dy	1.56	1.06	1.07	1.94	1.96	1.57	1.43	1.45	1.36	1.34	0.96	0.94	1.66	1.64	1.53	1.57	1.88	1.91
Er	0.87	0.48	0.46	1.03	1.06	0.88	0.66	0.67	0.77	0.78	0.48	0.44	0.85	0.83	0.81	0.79	1.01	1.03
Eu	1.06	1.04	1.07	1.36	1.35	1.07	1.12	1.08	0.66	0.69	0.64	0.71	0.74	0.75	0.86	0.83	1.21	1.26
Ga	15	14	17	16	16	17	15.8	16.1	15.3	15.4	15.8	15.9	15.7	15.8	14.5	14.9	16.7	16.9
Gd	2.36	2.14	2.17	3.26	3.25	2.41	2.66	2.64	1.95	1.93	1.42	1.46	2.35	2.37	2.32	2.34	3.32	3.29
Hf	1.38	0.99	1.02	2.96	2.98	1.41	0.46	0.47	0.94	0.96	1.17	1.18	1.32	1.34	1.17	1.19	1.01	1.03
Ho	0.35	0.22	0.23	0.41	0.38	0.37	0.27	0.29	0.29	0.31	0.18	0.17	0.33	0.35	0.3	0.32	0.37	0.36
La	27.8	132	134	36.7	37.1	28.1	39.6	39.5	15.1	15.7	16.7	16.9	20.1	20.3	27.7	27.9	67.8	67.7
Lu	0.65	0.29	0.31	0.22	0.24	0.66	0.11	0.13	0.12	0.12	0.1	0.11	0.16	0.14	0.11	0.09	0.15	0.13
Mo	1.9	12.8	13.1	2.6	2.9	2.2	253	256	23.7	24.1	2.9	3.2	1.2	1.4	2.1	2.3	1.2	1.1
Nb	18.2	5.7	5.8	20.8	21.1	18.6	6.9	6.7	8.9	9.1	7.4	7.7	18.4	18.2	20.5	20.7	11.9	12.1
Nd	21.6	26.9	26.6	29.1	29.4	21.8	27.7	27.9	13.5	13.3	13.6	13.9	18.8	18.9	20.7	20.5	34.8	34.6
Ni	25	24	25	47	45	27	37	36	35	33	53	55	41	44	51	53	38	36
Pb	21.4	15.3	15.7	30.9	31.1	21.7	5.7	5.9	42.1	42.9	4.3	4.7	18.1	18.3	11.4	11.6	16.7	16.4
Pr	6.01	9.51	9.57	8.05	8.01	6.07	7.88	7.91	3.46	3.49	3.66	3.69	4.81	4.81	5.89	5.93	10.71	10.78
Rb	104	122	121	87	88	107	122	124	105	107	43	45	67.8	68.1	18.9	18.2	46	47
Sm	3.05	2.94	2.97	4.27	4.29	3.03	3.67	3.65	2.27	2.21	1.88	1.91	2.85	2.87	2.98	3.01	4.32	4.28
Sn	1.9	4.7	4.8	1.4	1.3	1.7	3.2	3.3	3.7	3.9	4.1	4.6	4.6	4.4	1.2	1.1	0.9	0.7
Sr	929	308	310	768	762	931	156	159	248	251	88	89	288	291	354	355	707	709
Ta	2.24	1.15	1.17	1.87	1.89	2.27	0.76	0.77	1.18	1.16	1.27	1.28	1.93	1.94	1.29	1.31	0.94	0.95
Tb	0.33	0.27	0.29	0.44	0.42	0.35	0.34	0.36	0.25	0.27	0.21	0.22	0.34	0.35	0.32	0.3	0.43	0.45
Th	15.8	12.8	12.7	13.7	13.9	16.1	13.7	13.9	15.1	15.3	11.1	11.3	13.2	13.3	14.2	14	28.9	28.7
Tl	1.2	1.9	1.9	1.7	1.6	1.3	1.8	1.5	2	1.9	1.2	1.3	1.2	1.3	0.7	0.8	0.6	0.7
U	4.53	5.31	5.33	5.66	5.57	4.56	3.06	3.09	7.52	7.48	8.24	8.26	4.36	4.34	8.08	8.05	9.36	9.41
V	59	58	61	81	83	61	16	72	67	69	79	82	84	85	89	90	63	66
W	2.3	5.4	5.5	4.2	4.4	2.2	4.4	4.6	12.8	12.9	21.7	21.4	3.6	3.5	1.7	1.8	7.2	7.8
Y	11.4	5.27	5.31	11.3	11.5	11.6	6.61	6.63	7.94	7.98	4.04	4.1	7.99	8.01	6.96	6.99	10.51	10.48
Yb	0.85	0.42	0.44	0.86	0.88	0.87	0.51	0.53	0.64	0.66	0.41	0.44	0.73	0.74	0.69	0.71	0.9	0.93
Zn	21.8	22.6	23.1	44.8	44.3	22.2	11.9	11.7	72.7	72.9	7.8	7.9	27.9	27.7	47.5	47.6	42.9	43.1
Zr	18	23	25	98	99	21	17	18	32	33	41	43	34	35	31	33	32	36
Sc	6	4	5	8	9	7	6	7	7	6	4	5	6	7	6	5	4	6
Bi	1	0.7	0.6	0.4	0.5	1.2	0.8	0.8	0.8	0.6	0.9	0.9	1.1	1	60.2	61.8	1.2	1.3

ادامه جدول ۱ - ...

Sample	Dkc	Dkc	Dkc	Dkc	Dkc	Dkc	Dka	Dka	Dka	Dka	Dka	Dka	Dkb	Dkb	Dkb	Dkb	Dkb	Dkb
SiO ₂	62.88	62.81	62.81	56.45	56.81	56.88	62.89	62.77	62.91	62.98	69.18	69.24	62.1	61.98	60.08	59.98	60.71	60.08
Al ₂ O ₃	15.01	14.89	14.81	16.31	15.13	15.21	15.01	14.96	14.86	14.93	15.58	15.55	15.06	15.01	16.12	16.18	14.58	14.51
CaO	3.44	3.41	2.26	6.12	6.01	5.98	3.44	3.47	2.26	2.29	0.36	0.39	4.12	4.08	4.61	4.69	5.14	5.21
Fe ₂ O ₃	3.81	3.78	3.81	6.07	6.12	6.08	3.82	3.78	3.81	3.91	3.65	3.48	4.26	4.29	5.51	5.58	3.41	3.38
FeO	2.61	2.58	1.81	3.14	2.71	2.68	2.53	2.49	1.83	1.89	2.56	2.49	2.61	2.58	2.61	2.72	2.08	2.12
K ₂ O	3.31	3.28	4.48	1.93	2.03	2.01	3.38	3.29	4.48	4.51	2.96	2.98	2.71	2.68	2.38	2.44	3.11	3.24
MgO	2.13	2.24	2.48	3.68	4.81	4.79	2.13	2.17	2.61	2.58	1.56	1.52	2.38	2.42	3.08	3.17	2.18	2.27
MnO	0.07	0.08	0.03	0.1	0.12	0.12	0.07	0.06	0.02	0.04	0.05	0.04	0.08	0.07	0.11	0.09	0.07	0.06
Na ₂ O	4.21	4.18	4.1	4.1	4.05	4.08	4.18	4.12	4.06	4.02	3.41	3.49	4.12	4.08	4.49	4.51	4.77	4.73
P ₂ O ₅	0.26	0.28	0.29	0.41	0.33	0.34	0.24	0.23	0.26	0.31	0.24	0.26	0.29	0.31	0.31	0.32	0.27	0.29
SO ₃	0.19	0.15	2.98	0.51	0.35	0.37	0.17	0.14	2.91	2.54	1.27	1.31	0.05	0.03	0.14	0.16	0.78	0.72
TiO ₂	0.49	0.51	0.53	0.68	0.69	0.62	0.48	0.51	0.52	0.56	0.43	0.38	0.53	0.51	0.61	0.59	0.49	0.46
LOI	3.81	3.68	1.06	2.12	2.38	2.18	3.81	2.98	1.06	0.98	1.01	0.96	3.68	3.06	2.18	1.98	3.81	3.23
Ag	0.1	0.11	0.28	0.08	0.12	0.11	0.11	0.13	0.28	0.31	0.07	0.08	0.1	0.12	0.13	0.14	0.1	0.11
Ba	1032	1038	1245	586	677	672	1028	1036	1241	1248	471	468	854	856	724	726	857	859
Ce	54.8	53.9	71.8	61.6	51.7	51.4	53.2	53.7	71.8	71.2	68.2	68.4	62.4	62.6	45.8	45.5	70.8	71.1
Co	10.9	11.1	14.8	19.1	23.2	23.6	10.6	10.9	14.6	14.3	8.6	8.9	12.8	12.9	16.2	16.5	9.1	9.3
Cr	27	28	41	34	122	121	26	27	41	43	24	23	41	40	27	28	31	33
Cs	1.2	1.3	2.2	0.5	0.6	0.7	1.3	1.2	2.1	2.2	3.7	3.9	1.7	1.6	0.6	0.7	1.1	1.3
Cu	83.3	84.6	943	57	101	107	81.7	83	951	942	3906	38.8	151	153	144	143	127	128
Dy	1.86	1.88	1.96	3.12	3.11	3.14	1.86	1.85	1.92	1.91	2.03	2.01	2.38	2.41	2.46	2.43	2.27	2.29
Er	1.12	1.08	1.01	1.77	1.71	1.73	1.09	1.12	1.01	1.03	1.12	1.14	1.36	1.38	1.39	1.41	1.22	1.23
Eu	0.93	0.97	1.47	1.31	1.26	1.28	0.94	0.96	1.44	1.47	1.03	1.07	1.22	1.24	1.07	1.08	1.11	1.09
Ga	15.6	15.3	16.7	18.2	17.3	17.4	15.3	15.5	16.7	16.4	16.1	16.3	16.4	16.7	17.5	17.3	16.6	16.3
Gd	2.58	2.56	3.15	4.11	3.81	3.87	2.61	2.63	3.14	3.16	3.08	3.11	3.26	3.28	3.12	3.09	3.09	3.13
Hf	1.38	1.39	1.12	2.14	2.17	2.15	1.37	1.39	1.12	1.11	1.36	1.34	1.31	1.33	1.92	1.95	1.46	1.49
Ho	0.41	0.39	0.37	0.64	0.67	0.66	0.41	0.43	0.35	0.37	0.41	0.43	0.53	0.52	0.52	0.51	0.46	0.48
La	29.8	30.1	40.3	34.7	28.3	28.6	29.8	30.1	40.3	40.5	39.6	39.8	37.1	37	24.9	24.7	42.3	42.5
Lu	0.18	0.16	0.38	0.27	0.28	0.29	0.18	0.16	0.38	0.41	0.17	0.18	0.21	0.23	0.21	0.22	0.18	0.16
Mo	3.3	3.6	3.7	2.2	1.7	1.6	3.3	3.5	3.5	3.6	2.3	2.5	1.2	1.4	2.8	2.9	4.2	4.3
Nb	10.8	10.9	13.7	11.6	12.3	12.4	10.8	10.9	13.7	13.5	6.7	6.6	12.4	12.2	11.6	11.7	11.2	11.4
Nd	19.8	19.9	29.3	27.3	23.2	23.6	19.7	19.9	29.3	29.5	26.6	26.8	24.8	24.9	19.8	20.1	26.6	26.8
Ni	21	23	31	31	42	69	21	22	31	32	22	24	27	25	22	23	24	25
Pb	19.7	19.3	14.3	11.9	7.2	7.6	19.9	19.7	14.3	14.6	41.1	40.9	17.3	17.4	14.1	14.3	9.6	9.7
Pr	5.81	5.77	8.31	7.21	6.06	6.12	5.71	5.73	8.05	8.07	7.53	7.55	6.92	6.96	5.19	5.15	7.61	7.63
Rb	67.3	67.5	99.3	37.8	39.4	40.1	67.5	67.6	99.3	99.4	122.1	122.3	56.7	56.5	37.1	37.2	65.5	65.2
Sm	3.08	3.05	4.21	4.34	4.01	4.06	3.08	3.09	4.18	4.21	4.03	4.05	3.78	3.81	3.31	3.34	3.76	3.74
Sn	0.7	0.9	1.6	0.9	0.9	1.1	0.9	0.7	1.4	1.6	0.8	0.9	1.1	0.9	1	0.9	0.8	0.9
Sr	605	604	698	867	771	781	607	604	691	694	188	191	845	847	805	807	667	664
Ta	1.36	1.37	1.18	0.85	0.8	0.82	1.36	1.38	1.18	1.16	0.68	0.71	0.98	0.99	0.91	0.93	0.98	0.99
Tb	0.39	0.37	0.41	0.56	0.57	0.59	0.39	0.37	0.41	0.44	0.41	0.43	0.46	0.44	0.43	0.47	0.43	0.45
Th	11.9	11.1	21.9	6.8	7.1	7.2	11.7	11.9	21.7	21.9	17.7	17.9	14.1	13.9	6.5	6.6	19.2	19.4
Tl	0.9	1.1	0.8	0.4	0.5	0.4	1.1	1.2	1.7	1.8	1.4	1.3	0.8	0.7	0.5	0.6	0.7	0.6
U	5.51	5.58	11.71	2.44	2.61	2.66	5.61	5.58	11.61	11.58	6.82	6.84	5.09	5.07	3.21	5.24	4.96	4.95
V	77	74	65	122	132	136	77	78	66	67	59	58	81	82	112	111	61	59
W	3.4	3.3	3.8	1	1.2	1.1	3.1	3.3	3.6	3.8	1.4	1.7	2.2	1.9	1.2	1.3	13.2	13.4
Y	10.52	10.53	9.58	16.6	17.2	17.3	10.4	10.6	9.5	9.6	10.1	10.3	13.4	13.2	13.1	12.9	12.5	12.3
Yb	1.09	1.11	0.96	1.76	1.66	1.69	1.12	1.13	0.94	0.96	1.01	1.03	1.32	1.31	1.31	1.33	1.14	1.12
Zn	54.1	54.9	32.8	89.3	80.5	81.2	54.6	54.3	32.8	32.6	158.1	158.3	52.6	52.8	70.9	70.7	43.1	43.3
Zr	43	44	39	69	78	81	43	42	34	36	42	44	38	36	58	60	39	37
Sc	7	6	5	13	14	13	6	7	7	6	5	5	8	9	8	7	6	7
Bi	0.2	0.3	4.1	0.01	0.13	0.12	0.21	0.23	4.1	4.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.1	0.3	0.2



شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی، دایک‌ها و مدل سه بعدی از نفوذی‌های منطقه سونگون (Hamed, 2007)



شکل ۴- موقعیت نمونه‌ها در نمودار (Winchester and Floyd, 1977).

ژئوشیمی

درصد SiO_2 توده نفوذی و دایک‌های مرتبط با آن بین ۵۶ تا ۶۹/۲۴ درصد متغیر و میانگین آن ۶۲/۶۲ درصد است. مجموع آلهالی‌ها به ترتیب از ۶/۳۰ تا ۱۰/۷۶ درصد در نوسان است که میانگین آن ۷/۸۹ درصد است. درصد آلومین توده نفوذی سونگون بین ۱۳/۴۱ تا ۱۶/۳۰ درصد است که با میانگین ۱۴/۹ درصد مشخص می‌شود. این توده و دایک‌های همراه بیشتر ویژگی‌های متاآلومینوس از خود نشان می‌دهد و تعداد اندکی از نمونه‌ها در

محدوده پراآلومینوس قرار می‌گیرد (شکل ۹). میزان TiO_2 بین ۰/۳۸ درصد تا ۰/۶۹ درصد در تغییر بوده و میانگین آن ۰/۵۲ درصد است.

ژئوشیمی عناصر اصلی

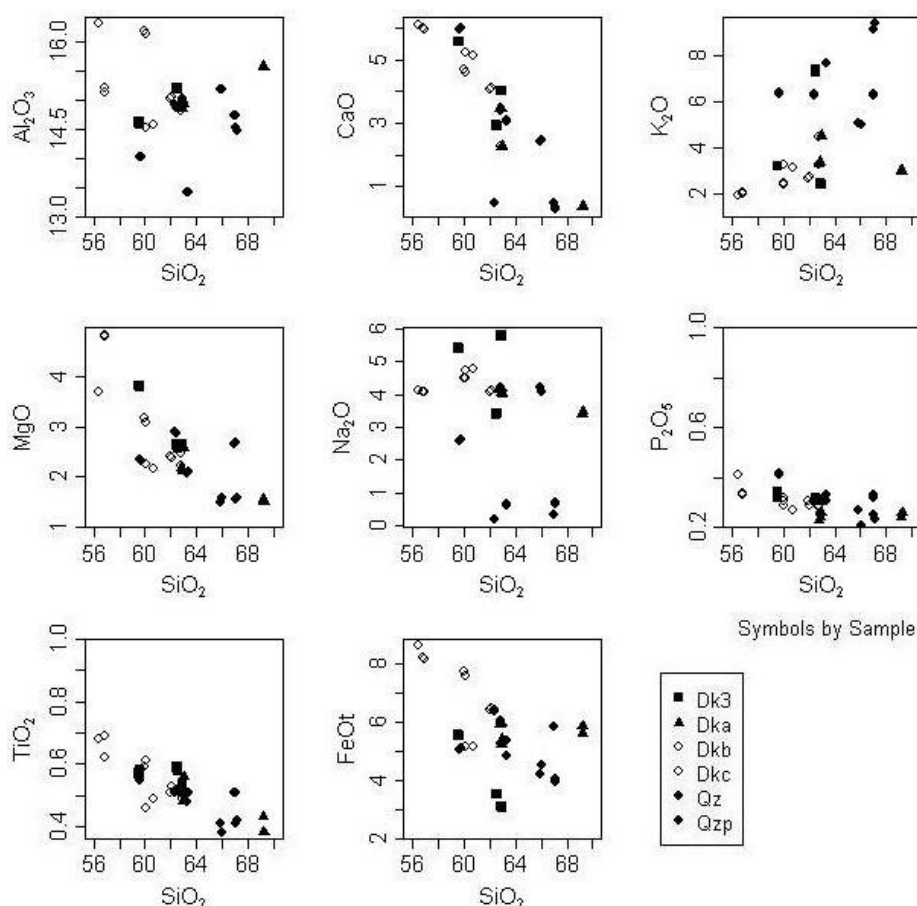
یکی از مفیدترین راه‌ها برای تفسیر پتروژنتیک توده‌های نفوذی، بهره‌گیری از داده‌های ژئوشیمیایی و بررسی تغییرات و نسبت‌های عناصر اصلی و کمیاب در این توده‌هاست (Tabatabaieianesh et al., 2011). برای مطالعه

حاصل از مذاب‌های تفریق یافته ویژگی حد واسط تا اسیدی داشته باشد. FeO_t تقریباً روند نزولی نشان می‌دهد که نشانگر مشارکت آن در مراحل اولیه تفریق در ساختمان آمفیبول و در مراحل بعدی در ساختمان بیوتیت است. همچنین، روند نزولی TiO_2 و FeO_t را می‌توان به تبلور کانی‌های اسفن و تیتان نسبت داد (Ebrahimiyan and Torabi, 2011). روند تقریباً ثابت Al_2O_3 بیانگر تفریق بخشی پلاژیوکلاز و فلدسپارتاسیم است. Na_2O روند خاصی را نشان نمی‌دهد و K_2O نیز روند صعودی تا پراکنده دارد که طی پدیده دگرسانی گرمابی و متاسوماتیسم پتاسیم یا شستشوی آن، مقادیر عناصر آلکالین دستخوش تغییر زیادی شده است.

تغییرات اکسیدهای عناصر اصلی نفوذی‌های سونگون از نمودارهای اکسید-اکسید (Harker, 1909) استفاده شده است (شکل ۵).

در نمودار هارکر با افزایش میزان SiO_2 مقادیر CaO ، MgO و TiO_2 روند نزولی نشان می‌دهد. این فرآیند در ارتباط با تشکیل تیتانومگنتیت، آمفیبول و پلاژیوکلاز در مراحل اولیه تفریق ماگما و جدایش آنها از مذاب سیلیکاتی است.

روند نزولی CaO شاید ناشی از وفور پلاژیوکلاز، پیروکسن و آمفیبول کلسیک در ترم‌های کمتر تفریق یافته منطقه است (Honarmand et al., 2010). این فرآیند، تحولات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی در توده نفوذی ایجاد کرده و سبب می‌شود که سنگ‌های

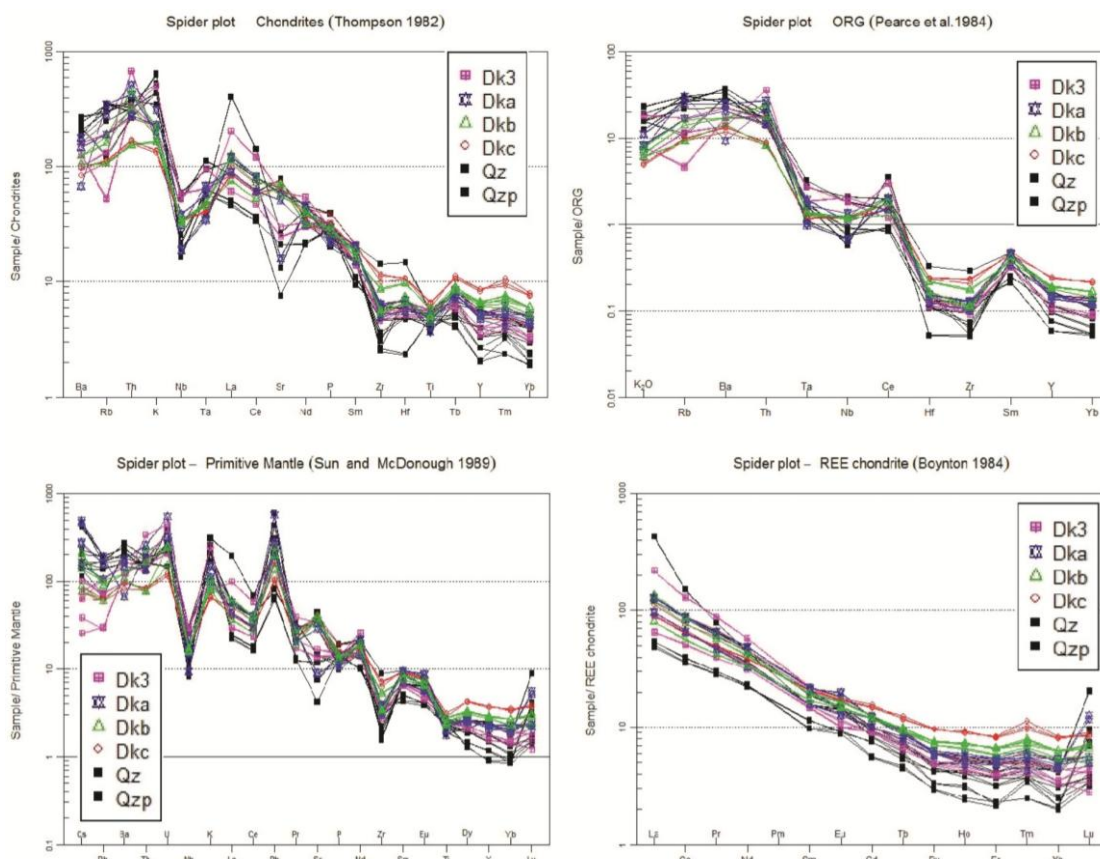


شکل ۵- نمودارهای اکسید-اکسید هارکر برای توده نفوذی و دایک‌های سونگون

ژئوشیمی عناصر کمیاب

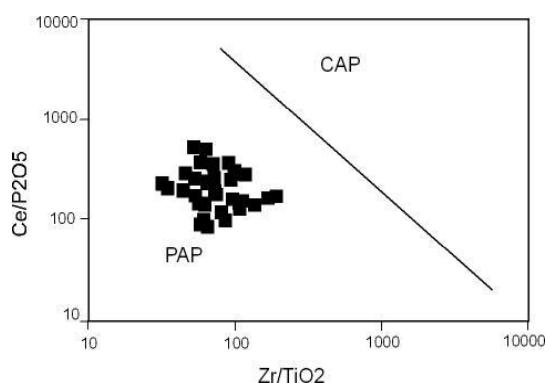
در نمودارهای عنکبوتی (شکل ۶) عناصر کمیاب نسبت به کندریت و گوشته اولیه بهنجار شده‌اند. بر اساس این نمودارها عناصری مانند: K, Ce, Ba, Rb و Th آنومالی مثبت نشان می‌دهد که بیانگر فرآیند تفریق در توده نفوذی منطقه است. عناصری مانند: Zr, Yb, Y, Tm, Ta, Sr, Nb, Hf آنومالی منفی از خود نشان می‌دهد. آنومالی منفی Yb و Y نشانگر تبلور بخشی و جدایش کانی‌های آهن و منیزیم‌دار در مراحل اولیه تفریق است. آنومالی منفی Nb و Ta نشانگر دخالت سیالات فرورانشی در تولید ماگما یا آلودگی با مواد پوسته‌ای است. اما عناصری مانند: K, Ba, Rb به علت

تحرك‌پذیری بالا به راحتی توانسته‌اند وارد مذاب شود. بنابراین، مقدار آنها در مذاب اولیه بالا بوده و در حین تفریق مذاب اولیه مقادیر آنها در فازهای نهایی افزایش یافته است. همچنین، در نمودار عنکبوتی رسم شده برای عناصر کمیاب که نسبت به پلاژیوگرنایت شکاف میان اقیانوسی (ORG) بهنجار شده‌اند، مشاهده می‌شود که این توده شباهت زیادی با گرانیتوئیدهای وابسته به قوس‌های آتشفشانی داشته و آنومالی‌های مثبتی از K_2O , Ba, Rb و Th و آنومالی‌های منفی از Ta, Hf, Yb و Zr نشان می‌دهد که نشانگر جایگیری توده در پوسته قاره‌ای با ضخامت نسبتاً زیاد و تأثیر ذوب بخشی و آلیش پوسته‌ای است.

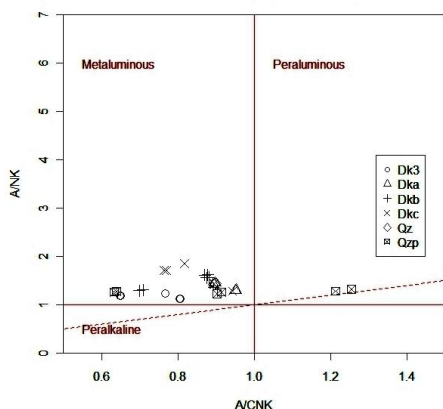


شکل ۶ - نمودارهای عنکبوتی عناصر کمیاب توده نفوذی و دایک‌های سونگون

توده نفوذی سونگون پورفیری و دایک‌های پس از کانی‌سازی از دیاگرام‌های خاص این سنگ‌ها استفاده شده است. برای تفکیک قوس‌های ماگمایی حاشیه فعال قاره‌ای و قوس‌های ماگمایی پس از برخورد، از نمودار Zr/TiO_2 - Ce/P_2O_5 (Muller and Geroes, 1997) استفاده شد که در این نمودار نمونه‌های سونگون در گستره پس برخوردی (PAP) قرار گرفته‌اند (شکل ۸). در نمودار A/CNK - A/NK (Shand, 1943) بیشتر نمونه‌های سونگون دارای ویژگی متآلومینوس و تعداد دو نمونه ویژگی پرآلومینوس نشان می‌دهد. این نمونه‌ها دگرسانی آرژیلیک و فلیک بیشتری نسبت به بقیه متحمل شده‌اند که این ویژگی باعث خروج کلسیم از محیط و افزایش نسبت A/CNK شده است (شکل ۹).

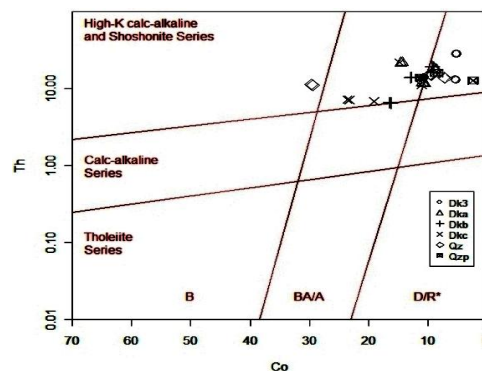


شکل ۸- نمودارهای Zr/TiO_2 - Ce/P_2O_5 برای تعیین موقعیت زمین‌ساختی نمونه‌های سونگون (CAP: قوس حواشی فعال قاره‌ای، PAP: قوس پس از برخورد).



محیط زمین‌ساختی و سنگ‌زایی توده‌های نفوذی

به دلیل وجود دگرسانی گسترده در توده نفوذی سونگون پورفیری و دایک‌های زیرگروه Dk_{1a} برای تعیین سری ماگمایی توده نفوذی و دایک‌های سونگون از نمودارهای مربوط به عناصر غیر متحرک استفاده شد. در نمودار Co - Th (Hastie *et al.*, 2007) که از عناصر نامتحرک استفاده شده است (شکل ۷) تمامی نمونه‌ها در گستره کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا و شوشونیتی قرار گرفته‌اند. با توجه به این نمودار می‌توان گفت که ماگمای مولد سنگ‌های توده نفوذی و دایک‌های سونگون دارای سرشت کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا و شوشونیتی بوده‌اند. با توجه به ماهیت کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا و شوشونیتی



شکل ۷- نمودار Co - Th برای تعیین سری ماگمایی نمونه‌های سونگون (Hastie *et al.*, 2007)

شکل ۹- نمودار A/CNK - A/NK برای تمایز توده‌های گرانیتوئیدی پرآلومینوس از متآلومینوس (Shand, 1943)

اسکارن سونگون

اسکارن سونگون را می‌توان نوعی اسکارن پورفیری در نظر گرفت. زیرا آثار دگرسانی پورفیری را می‌توان در توده آذرین و اطراف آن مشاهده کرد. در شمال و شرق توده سونگون پورفیری به علت همبندی این توده با واحدهای آهکی و مارنی کرتاسه فوقانی اسکارن به وجود آمده است. محلول‌های گرمابی اسیدی محتوی فلزات سنگین و یون‌های دیگر که از فاز ماگمایی سونگون پورفیری اشتقاق یافته است، در مجاورت با سنگ‌های کربناته خنثی شده و در نتیجه تبادل یونی و واکنش‌های انجام شده از سویی موجب پیدایش کانی‌های اپیدوت، گارنت، وزوویانیت و منیتیت شده و از سوی دیگر موجب تمرکز کانی‌های سولفیدی مانند: پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت شده است. آزوریت، مالاکیت و کالکانتیت از کانی‌های ثانویه‌اند. دما و فشار ناشی از مجاورت با توده نفوذی، سنگ‌های آهکی را نیز دگرگون و مرمری نموده است. از کانی‌های سولفیدی موجود در رخساره اسکارنی در گذشته به طور در خور توجهی بهره‌برداری شده است (Helmi, 2008). بر اساس مشاهدات صحرایی و بررسی‌های میکروسکوپی، اسکارن‌های این منطقه به دو دسته اندواسکارن (ENS) و اگزواسکارن (EXS) تقسیم می‌شود.

اندواسکارن: اندواسکارن در توده سونگون در دو بخش دیده می‌شود: الف) حاشیه توده سونگون پورفیری، ب) در اطراف دایک‌های نفوذی. به طور کلی، اندواسکارن در سونگون گسترده نیست و بافت و کانی‌شناسی تا حدودی حفظ شده است. در بخش اندواسکارن در حاشیه توده کانی‌های گارنت، اپیدوت، کوارتز، کلریت و کلسیت مشاهده می‌شود (شکل ۱۰-۱A). کانی‌شناسی اندواسکارن

در دایک‌های تزریقی شامل: اپیدوت، کلریت، کوارتز و کلسیت است (شکل ۱۰-۱B).

اگزواسکارن: اگزواسکارن در سونگون بر اساس مشاهدات صحرایی و کانی‌های موجود به سه پهنه پیروکسن‌اسکارن، گارنت‌اسکارن و اپیدوت‌اسکارن تقسیم می‌شود.

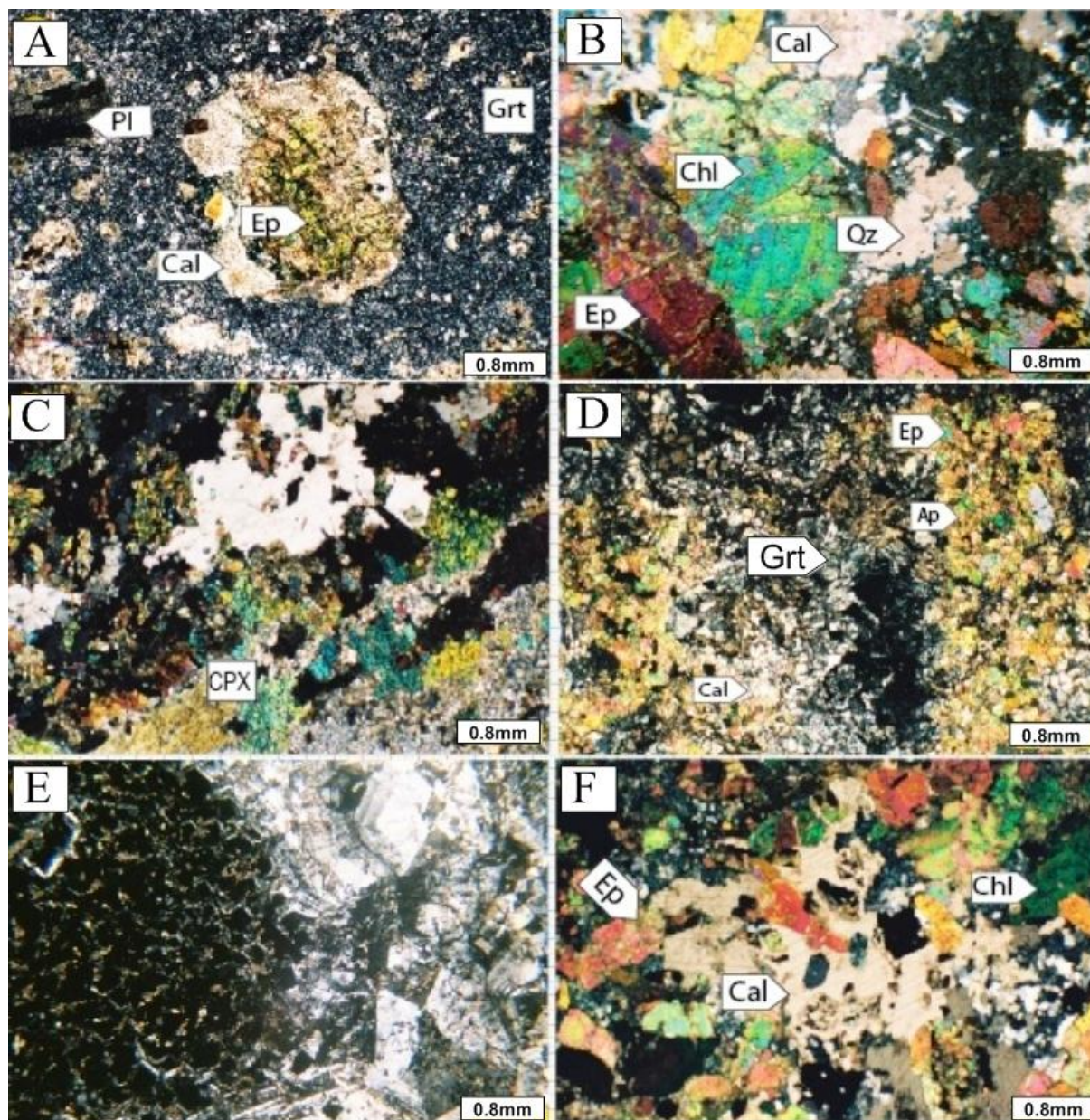
پیروکسن‌اسکارن: مقدار پیروکسن در نزدیکی توده نفوذی افزایش یافته و پهنه پیروکسن‌اسکارن تشکیل شده است. در برخی نمونه‌ها پیروکسن دگرسان شده (شکل ۱۰-۱B و C) و توسط اپیدوت، کلسیت، پیریت و مگنتیت جانشین شده و فقط بقایای پیروکسن باقی‌مانده است. کانه‌های فلزی در این پهنه به صورت پُر کننده فضاهای خالی دیده می‌شود که نشان‌دهنده جوان‌تر بودن کانه‌های فلزی است.

گارنت‌اسکارن: این پهنه با پهنه پیروکسن اسکارن به صورت لایه‌ای دیده می‌شود که شاید در نتیجه تأثیر ساخت توده و حالت لایه‌ای لایه‌های کربناتی است. گارنت در این پهنه به صورت نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار و تا اندازه‌های چند سانتی‌متر نیز دیده می‌شود. در برخی از نمونه‌ها زونینگ داشته و توسط کانی‌هایی مانند: اپیدوت، کلسیت، کوارتز، کلریت و اسکاپولیت جانشین شده است (شکل ۱۰-۱D). گارنت در این پهنه بیشتر ایزوتروپ است ولی در قسمت‌هایی به طور نامنظم حالت انیزوتروپ هم مشاهده می‌شود (شکل ۱۰-۱E).

اپیدوت‌اسکارن: این پهنه بر روی پهنه‌های قدیمی‌تر پیروکسن و گارنت قرار گرفته است. کلریت در این پهنه به مقدار کم حضور داشته و جانشین اپیدوت و اکتینولیت شده است (شکل ۱۰-۱D). کلسیت به صورت پُر کننده فضاهای خالی (شکل ۱۰-۱F) و اسکاپولیت به صورت محلی

دارد. گاهی اپیدوت به صورت لایه‌ای روی گارنت رشد کرده و جانشین آن شده است.

جانشین اپیدوت شده است. اسفنه‌های شکل‌دار به همراه دیگر کانی‌های دگرسانی در این پهنه حضور



شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپی از: (A) گارنت-اپیدوت-پلاژیوکلاز با بافت پورفیری (اندواسکارن؛ B) پاراژنز اپیدوت-کلریت-کلسیت-کوارتز؛ (C) پیروکسن‌های دگرسان شده در پیروکسن اسکارن؛ (D) گارنت-اپیدوت-کلسیت-آپاتیت؛ (E) گارنت ایزوتروپ و انیزوتروپ؛ (F) کلسیت-اپیدوت-کلریت. (علایم کانی‌ها بر اساس Whitney و Evans (۲۰۱۰)).

نتیجه‌گیری

ترکیب سنگ‌شناسی توده نفوذی سونگون از گرانومونونیت تا مونزودیوریت متغیر است و SP

نامیده می‌شود. چهار پهنه دگرسانی: پتاسیک، فلیک، پروپلیتیک و آرژیلیک در سونگون و چهار دسته دایک تأخیری: Dk_1 , Dk_2 , Dk_3 و Dk_4 در

جایگیری توده در پوسته قاره‌ای با ضخامت نسبتاً زیاد و تأثیر ذوب بخشی و آرایش پوسته‌ای است. از نظر محیط زمین‌ساختی، نمونه‌های سونگون در گستره پس برخوردی (PAP) قرار گرفته‌اند. به علت همبندی توده سونگون پورفیری و دایک‌های آن با واحدهای آهکی و مارنی کرتاسه فوقانی اسکارن سونگون به وجود آمده است. اسکارن‌های این منطقه به دو دسته اندواسکارن و اگزواسکارن تقسیم می‌شود. اندواسکارن در حاشیه توده سونگون پورفیری و اگزواسکارن در داخل سنگ‌های آهکی و مارنی حاشیه توده سونگون پورفیری ایجاد شده است. اگزواسکارن در سونگون به سه پهنه: پیروکسن‌اسکارن، گارنت‌اسکارن و اپیدوت‌اسکارن تقسیم می‌شود.

سیاسگزاری

نگارندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه تبریز به خاطر حمایت‌های مالی این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

سونگون وجود دارد. دایک‌های نسل اول ترکیبی در حد مونزونیت تا دیوریت پورفیری داشته و به سه دسته تقسیم می‌شود. دایک‌های نسل دوم ترکیب گابرو دیوریتی و بافتی گرانولار دارد و دایک‌های نسل سوم ترکیب دیوریتی با بافت میکرولیتی تا پورفیریک و دایک‌های نسل چهارم از آپوفیزهای توده داسیتی حاشیه سونگون با بافت آفانیتیک است. توده نفوذی و دایک‌ها سرشت کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا و شوشونیتی دارد. بررسی نمودارهای هارکر عناصر اصلی توده پورفیری سونگون و دایک‌های پس از کانی‌سازی و ملاحظه تقدم و تأخر نفوذ آنها بیانگر تفریق ماگمایی در یک آشیانه و متعاقب آن ایجاد منطقه‌بندی ترکیبی در ماگما است. بررسی الگوی عناصر نادر خاکی سنگ‌ها تأییدی بر منشأ واحد آنها دارد. عناصری مانند: Rb, La, K, Ce, Ba, Th آنومالی مثبت نشان می‌دهد که بیانگر فرآیند تفریق در توده نفوذی منطقه است و آنومالی‌های منفی از Zr, Yb, Y, Ta, Hf نشان‌دهنده

منابع

- Calagari, A. A. (1997) Geochemical, stable isotope, nobel gas, and fluid inclusion studies of mineralization and alteration at Sungun porphyry copper deposit. East Azarbaïdjan, Iran: implication for genesis. PhD thesis, Manchester University, Manchester, UK.
- Ebrahimiyan, Z and Torabi, Gh. (2011) Petrology of Mesr granitoid complex (NE of Isfahan province). Petrology 2(6): 1-16 (in Persian).
- Hamed, E. (2007) The structural studies of Sungun porphyry copper deposit focusing on the mechanism of dike emplacement. MSc thesis, Faculty of Natural sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran (in Persian).
- Harker, A. (1909) The natural history of igneous rocks. Macmillan, New York.
- Hastie, A. R., Kerr, A. C., Pearce, J. A. and Mitchell, S. F. (2007) Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram. Journal of Petrology 48: 2341-2357.
- Helmi, F. (2008) Skarns and skarn deposits (with special emphasize to Iran skarns). Amir Kabir Publication, Tehran (in Persian).
- Hezarkhani, A. and William-Jones, A. E. (1998) Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit, Iran: evidence from fluid inclusions and stable isotopes. Economic Geology 93: 651-670.

- Hezarkhani, A. (1997) Physicochemical controls on altaretion and copper mineralization in the sungun porphyry copper deposit, Iran. PhD thesis, McGill University, McGill, Canada.
- Honarmand, M. Moayyed, M. Jahangiri, A and Ahmadian, J. (2010) The study of geochemical characteristics of Natanz plutonic complex, North of Isfahan. *Petrology* 1(3): 65-88 (in Persian).
- Mehrpour, M. (1993) Contributions to the geology, geochemistry, ore genesis and fluid inclusion investigations on sungun Cu-Mo porphyry deposit, northwest of Iran. PhD thesis, University of Hamburg, Hamburg, Germany.
- Muller, D. and Geroes D. I. (1997) Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization. Springer-Verlag, Berlin.
- Nabavi, M. (1976) Introduction on geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).
- Shand, S. J. (1943) Eruptive Rocks: Their genesis, composition and their relation to ore-deposits with a chapter on meteorite. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Stocklin, J. (1968) Structural history and tectonics of Iran, a review. *AAPG Bulletin* 52(7): 1229-1258.
- Tabatabaieianesh, S. M. Mirlohi, A. and Movahedi, M. (2011) Petrology and mineral chemistry of Ochestan granitoids (south of Mahallat, Markazi province). *Petrology* 2(7): 51-76 (in Persian).
- Whitney, D. L. and Evans, B. W. (2010) Abbreviations for names of Rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95: 158-187.
- Winchester, J. A. and Floyd, P. A. (1977) Geochemical discriminatin of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 16: 325-343.

Petrography and petrology of the Sungun porphyry copper deposit and post mineralization dykes with a view to Skarn mineralization (north of Varzeghan, East Azarbaijan)

Seyed Ghafour Alavi, Mohammad Reza Hosseinzadeh * and Mohsen Moayyed

Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

The Sungun porphyry copper mine is located in the north of Varzeghan, Eastern-Azarbaijan province. The oldest rocks in the study area are limestone with the Cretaceous in age. Following the emplacement of intrusive porphyry body, four groups of dyke with various compositions have been intruded into the intrusive body. The intrusive is quartz-monzonitic in composition. There are four alteration zones including potassic, phyllic, propylitic and argillic in the Sungun porphyry body. The common texture in these rocks is porphyritic with cryptocrystalline matrix, and in dykes, microlitic and microlitic porphyry. The Sungun porphyry body evolved due to magmatic differentiation, fractional crystallization, assimilation and crustal contamination. The Sungun intrusive and associated dykes are meta-aluminous and belong to high-K calc-alkaline to shoshonitic magma series. In terms of tectonic setting, the Sungun body lies in syn- to post-collision volcanic arc. In the contact of the Sungun porphyry and the upper Cretaceous limestones and marls, the Cu-Fe skarn developed in the north and the east. These skarns are divided into the endoskarn and exoskarn. Based on field geology and mineralogical studies, the exoskarn in Sungun is divided into pyroxene, garnet and epidote zones.

Key words: Microlitic texture, Meta-aluminous, Calc-alkaline, Alteration zone, Skarn, Sungun

* g-hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir