

## مطالعات سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی توده‌های نفوذی جنوب معین آباد (شرق ایران، زیرکوه قاین)

مریم سادات مظهری<sup>۱\*</sup>، سید احمد مظاهری<sup>۱</sup>، سعید سعادت<sup>۲</sup>، سید مسعود همام<sup>۱</sup>

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- گروه زمین‌شناسی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

(دریافت مقاله: ۹۵/۱۲/۲، نسخه نهایی: ۹۶/۴/۲۰)

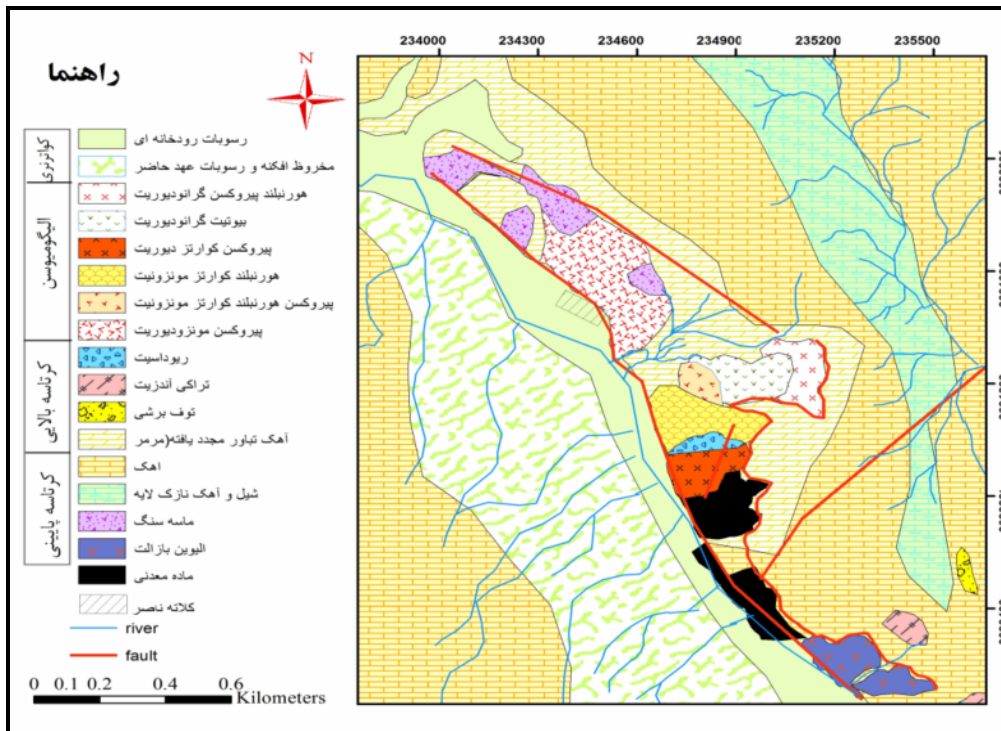
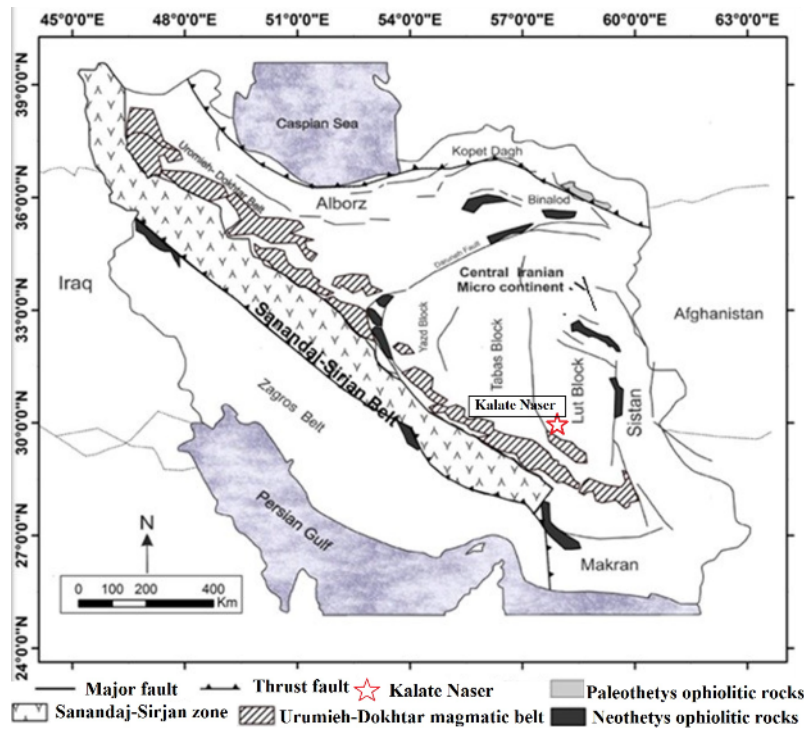
**چکیده:** منطقه مورد بررسی در کمربند آتشفشانی- نفوذی ترشیری پهنه لوت واقع است. تزریق توده‌های نفوذی ترشیری در سنگ آهک‌های کرتاسه باعث تشکیل اسکارن در این منطقه شده است. نفوذ این سنگ‌ها باعث تغییرات بافتی و کانی‌شناسی در محل همبری با سنگ‌های مجاور شده و در برخی موارد واحد آهکی در نزدیکی توده نفوذی تبدیل به مرمر و یا اسکارن شده است. کانه‌زایی آهن به صورت عدسی‌شکل بیشتر در مرز توده‌های نفوذی و واحد آهکی صورت گرفته است. بررسی‌های سنگ‌شناختی نشان می‌دهند که طیف ترکیبی این توده‌ها از کوارتز دیوریت، مونزودیوریت، کوارتز مونزونیت تا گرانودیوریت در تغییر است. این گرانیتوئیدها دارای ماهیت شبه‌قلیایی و متآلومین بوده و بر اساس ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های زمین‌شیمیایی، متعلق به سری مگنتیت (نوع I) هستند. غنی‌شدگی عناصر خاکی نادر سبک (LREE)، فقر عناصر خاکی نادر سنگین (HREE) و ناهنجاری منفی جزئی Eu از ویژگی‌های آنها بوده و بیانگر فعالیت ماگمایی متآلومین نوع I کمان‌های آتشفشانی کرانه قاره‌هاست. مقایسه نمودارهای مختلف زمین‌شیمیایی نشان دهنده همخوانی سنگ‌های گرانیتوئیدی جنوب معین آباد با نفوذی‌های وابسته به اسکارن‌های آهن است.

**واژه‌های کلیدی:** توده‌های نفوذی؛ لوت؛ کانه‌زایی آهن؛ اسکارن.

### مقدمه

لوت را پوشش می‌دهد [۲]. پهنه لوت به واسطه‌ی داشتن موقعیت‌های زمین‌ساختی مختلف در زمان‌های گذشته و در پی آن وجود حجم بالای فعالیت ماگمایی با ویژگی‌های زمین‌شیمیایی متفاوت، دارای پتانسیل مناسبی برای کانی‌سازی‌های مختلف فلزی و غیرفلزی است. [۳-۷] برخی از پژوهشگران فعالیت ماگمایی و تشکیل کانسارهای شرق ایران را وابسته به فرورانش می‌دانند [۸-۱۲]، برخی دیگر نیز موضوع فرورانش را مردود دانسته و فعالیت ماگمایی و تشکیل کانی‌سازی‌ها را به وجود شرایط کششی نسبت داده‌اند [۳، ۱۳، ۱۴]. هدف از این پژوهش بررسی سنگ‌شناختی و زمین‌شیمی توده‌های نفوذی- نیمه نفوذی جنوب معین آباد و مقایسه آن‌ها با ترکیب میانگین توده‌های نفوذی همراه با اسکارن‌های آهن است.

منطقه مورد بررسی در استان خراسان جنوبی و در حدود ۱۷۰ کیلومتری جنوب شرق قاین، در شمال غرب برگه ۱:۲۵۰،۰۰۰ شاهرخت و ۱:۱۰۰،۰۰۰ آهنگران در موقعیت جغرافیایی  $33^{\circ} 18' 59.29''$  تا  $33^{\circ} 19' 42.33''$  عرض شمالی و  $8^{\circ} 55.7''$  تا  $60^{\circ} 9' 35.7''$  طول شرقی واقع است. این منطقه در رده‌بندی زمین‌شناسی و ساختاری ایران [۱] در بخش شمال شرقی پهنه لوت جای می‌گیرد (شکل ۱ الف). یکی از ویژگی‌های بی‌مانند پهنه لوت فعالیت‌های ماگمایی آن است که از ژوراسیک آغاز شده و در ترشیاری به اوج خود رسیده است، به طوری که سنگ‌های آتشفشانی- نفوذی ترشیاری، به ویژه ائوسن، با ضخامت حدود ۲۰۰۰ متر، بیش از نیمی از پهنه



شکل ۱ الف) نقشه تقسیمات ساختاری ایران [۱۵] که موقعیت منطقه مورد بررسی با علامت ستاره برآن مشخص شده است و (ب) نقشه زمین شناسی منطقه مورد بررسی.

**روش بررسی**

این پژوهش بر پایه بررسی های صحرایی، مقاطع نازک، صیقلی، نازک- صیقلی و تجزیه شیمیایی به روش طیفسنجی فلورانس پرتو X (XRF) و ICP-MS انجام شده است. در این راستا

تعداد ۲۰۰ مقطع نازک و نازک- صیقلی تهیه شده از سنگ های منطقه، مورد بررسی میکروسکوپی قرار گرفتند. سپس تعداد ۱۰ نمونه از سنگ های نفوذی که دارای کمترین دگرسانی هستند انتخاب و پس از خردایش (رساندن اندازه

نشده عهد حاضر، دیگر بخش‌های منطقه را در اشغال خود دارند و رخنمون آنها بیشتر در قسمت‌های جنوب غربی منطقه دیده می‌شود.

ویژگی‌های سنگ‌شناسی سنگ‌های نفوذی منطقه به شرح زیر است:

**پیروکسن مونزودئوریت:** رخنمون این واحد در بخش شمال غربی محدوده معدنی است. بافت کلی سنگ، نیمه خود ریخت دانه‌ای تا بی شکل دانه‌ای است. بخش عمده سنگ را بلورهای پلاژیوکلاز با ۵۵ درصد حجمی تشکیل می‌دهد. با توجه به بررسی‌های میکروسکوپی ترکیب پلاژیوکلازها متوسط (آندزین) تعیین شدند. از دیگر کانی‌های تشکیل دهنده سنگ، می‌توان به فلدسپارهای قلیایی (حدود ۲۰ درصد) و کانی‌های تیره رنگ فرومنیزین پیروکسن (حدود ۱۲ درصد) اشاره کرد (شکل ۲ الف).

**پیروکسن هورنبلند کوارتز مونزونیت:** رخنمون این واحد در بخش‌های مرکزی محدوده معدنی است. این سنگ در مقطع نازک، دارای بافت دانه‌ای، میانه دانه‌ای، میرمکیت و گرانوفیری است. کانی‌های اصلی سنگ عبارتند از: پتاسیم فلدسپار که به شکل‌های خودریخت و نیمه خودریخت با ماکل کارلسباد دیده می‌شود. پتاسیم فلدسپارها بیشتر پرتیتی هستند و ۳۰ تا ۵۰ درصد سنگ را تشکیل می‌دهد. پلاژیوکلاز به شکل‌های خودریخت و نیمه خودریخت و از نوع الیگوکلاز دیده می‌شود. پلاژیوکلازها ۲۵ تا ۴۵ درصد سنگ را تشکیل می‌دهند. پیروکسن‌های این سنگ از نوع کلینوپیروکسن (حدود ۹ درصد) و بیشترین زاویه خاموشی ۴۵ درجه است. در این بلورها، ادخال‌هایی از کانی‌های کدر از جمله مگنتیت دیده می‌شود. آمفیبول‌های این سنگ از نوع هورنبلند (۷ تا ۸ درصد) است و به شکل‌های ساب نیمه خودریخت تا بی شکل دیده می‌شوند (شکل ۲ ب).

**هورنبلند کوارتز مونزونیت:** این واحد نیز در بخش مرکزی منطقه قرار گرفته است. بافت این سنگ دانه‌ای است. کانی‌های تشکیل دهنده آن شامل ۲۵ تا ۳۰ درصد پلاژیوکلاز با ترکیب آندزین-الیگوکلاز، پتاسیم فلدسپار حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد و کوارتز حدود ۱۲ درصد هستند. آمفیبول و بیوتیت از جمله کانی‌های مافیک این سنگ هستند که کانی آمفیبول (حدود ۷ درصد) بیشتر از نوع هورنبلند بوده و در برخی موارد این کانی به کلریت و اکسیدهای آهن تبدیل شده است. مقدار کانی بیوتیت در این سنگ بسیار کم است (شکل ۲ پ).

**پیروکسن کوارتز دیوریت:** این واحد سنگی در بخش‌های مرکزی رخنمون دارد. بافت این سنگ دانه‌ای و میان دانه‌ای

نمونه‌ها به ۱ تا ۲ سانتی‌متر) و آسیاب کردن (رساندن اندازه نمونه‌ها به ۲۰۰ مش) در آزمایشگاه MS Analytical کانادا به روش XRF و ICP-MS تجزیه شدند. در آزمایشگاه نمونه‌ها به روش ذوب قلیایی آماده و سپس برای عناصر اصلی، عناصر فرعی و عناصر خاکی نادر (REE) تجزیه شدند.

### زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی

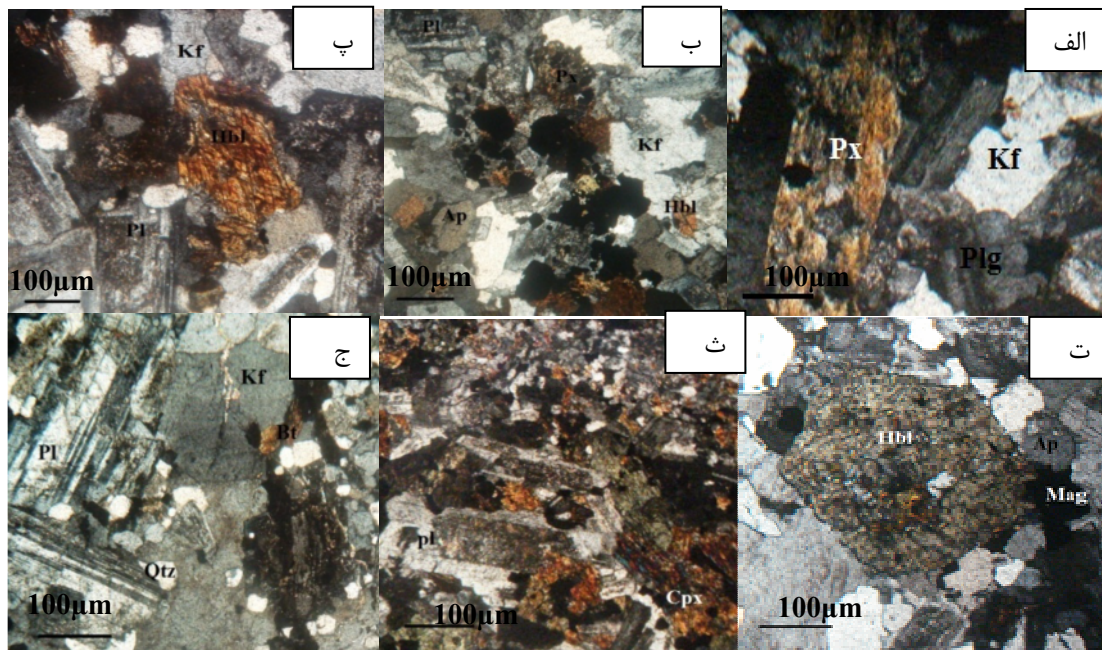
واحدهای سنگی منطقه شامل سنگ‌های رسوبی، سنگ‌های ماگمایی و آذرآواری و سنگ‌های آذرین عمیق و نیمه عمیق هستند (شکل ۱ ب). ماسه سنگ و شیل‌های وابسته به کرتاسه پیشین از قدیمی‌ترین واحدهای رخنمون یافته در منطقه هستند. این واحدها در شمال و شمال غرب محدوده معدنی رخنمون دارند و در زیر آهک‌ها قرار گرفته‌اند. شیل و ماسه سنگ بصورت لایه‌های متناوب به رنگ‌های خاکستری روشن تا تیره، با جورشدگی نسبتاً خوب و پستی بلندی ملایم رخنمون دارند. واحدهای آهکی گسترش بالایی در کل منطقه دارند. سنگ‌آهک‌های کرم رنگ توده‌ای بیشتر در بخش‌های شرقی منطقه اکتشافی رخنمون گسترده دارد و بلندترین ارتفاعات منطقه را تشکیل می‌دهند. این واحدها در بخش‌های مرکزی محدوده معدنی به صورت مجموعه‌ای از واحدهای آهکی نازک لایه و شیل دیده می‌شوند. آهک‌های این واحد فسیل‌دار هستند و با رنگ زرد تا نارنجی رخنمون دارند و ارتفاعات متوسط منطقه را تشکیل می‌دهند و در نهایت به سمت غرب، آهک‌های بلورین قرمز و سفید رنگ که گاه می‌توان از آن بعنوان مرمر یاد کرد را شاهد هستیم. رخداد کانه‌زایی آهن اغلب در نزدیکی این واحد دیده می‌شود [۱۶]. توده‌های نفوذی اسیدی تا حد واسط با طیف ترکیبی از کوارتز دیوریت، مونزودئوریت، کوارتز مونزونیت تا گرانودیوریت در مرکز محدوده معدنی رخنمون دارند. نفوذ این سنگ‌ها باعث تغییرات بافتی و کانی‌شناسی در محل همبری با سنگ‌های مجاور شده و در برخی موارد واحد آهکی در نزدیکی توده نفوذی تبدیل به مرمر و یا اسکارن شده است. از دیگر واحدهای سنگی موجود در منطقه می‌توان به سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه پسین با ترکیب حدواسط اشاره کرد که بیشتر در جنوب منطقه رخنمون دارند و به شدت دگرسان شده‌اند. بر پایه بررسی‌های میکروسکوپی انجام شده واحدهای آتشفشانی ترکیب تراکی آندزیت و ریوداسیت دارند. بروزدهایی از سنگ‌های مافیک وابسته به سری‌های افیولیتی از مجموعه پهنه فلیش‌های شرق ایران نیز در جنوب منطقه دیده می‌شود. واحدهای مافیکی منطقه دارای ترکیب الیوین بازالت هستند. رسوبات سخت

درصد) در فضای بین پلاژیوکلازها به صورت بی شکل دیده می شود. آمفیبولها در اندازه های مختلف به صورت کشیده و حتی شکل دار به رنگ قهوه ای و قهوه ای - سبز نیز در مقاطع مختلف به چشم می خورد. آمفیبول های سبز از خانواده هورنبلندهای آهن دار و آنهایی که قهوه ای هستند از خانواده تیتان-آهن دار هستند [۱۷]. پیروکسن به مقدار کمتر از آمفیبول (حدود ۵ درصد) در مقاطع دیده می شود (شکل ۲ ج). نفوذ سنگ های عمیق تا نیمه عمیق ترشیری در سنگ آهک های کرتاسه باعث تشکیل اسکارن در این منطقه شده است. نفوذ این سنگ ها باعث تغییرات بافتی و کانی شناسی در محل همبری با سنگ های مجاور شده و در برخی موارد واحد آهکی در نزدیکی توده نفوذی تبدیل به مرمر و یا اسکارن شده است. کانه زایی آهن به صورت عدسی شکل بیشتر در مرز توده های نفوذی و واحد آهکی صورت گرفته است. بررسی ۴۰ مقطع صیقلی و نازک صیقلی نشان داده است که مهمترین کانه تشکیل شده در پهنه اسکارنی مگنتیت بوده که در مرحله پسرونده اسکارن تشکیل شده است. کانه سازی در این مرحله با تشکیل کانی های آبدار با دمای پایین مثل اپیدوت و کلریت همراه است. پیریت و کالکوپیریت با فراوانی کمتر از یک درصد از کانی های سولفیدی کانسار هستند که پس از تشکیل مگنتیت به وجود آمده اند.

است. کانی های اصلی سنگ شامل پلاژیوکلاز ۴۵ تا ۵۰ درصد، پیروکسن ۱۰ تا ۱۲ درصد، هورنبلند کمتر از ۲ درصد هستند. پلاژیوکلازها دارای زاویه خاموشی ۲۶-۳۰ درجه از نوع آندزین-لابرادوریت داری ماکل های آلبیتی هستند و میانگین اندازه آنها ۷۰۰-۸۰۰ میکرون است (شکل ۲ ت).

**بیوتیت گرانودیوریت:** این واحد در بخش مرکزی منطقه قرار دارد. این سنگ در مقطع نازک، دارای بافت دانه ای، میرمکیتی و گرانوفیری است. کانی های اصلی سنگ پلاژیوکلاز با ۴۵ درصد حجمی، کوارتز با ۲۰ درصد حجمی، پتاسیم فلدسپار حدود ۱۵ درصد و بیوتیت خودریخت تا بی شکل با بیشینه فراوانی ۱۰ درصد هستند. سایر کانی های مافیک شامل هورنبلند و پیروکسن هستند که در مجموع ۱۰ درصد سنگ را تشکیل می دهند. این بلورها دارای شکل بلورین نیمه خود ریخت هستند و بیشتر به کلریت و کلسیت تجزیه شده اند (شکل ۲ ث).

**هورنبلند پیروکسن گرانودیوریت:** رخنمون این واحد نیز در بخش مرکزی منطقه دیده می شود و در مقطع نازک، دارای بافت دانه ای، میرمکیتی و گرانوفیری است. این سنگ دارای پلاژیوکلاز، پتاسیم فلدسپار، کوارتز، آمفیبول پیروکسن هستند. پلاژیوکلازها با ۴۰ درصد حجمی به صورت درشت بلورهای شکل دار با ترکیب شیمیایی آندزین تا الیگوکلاز هستند. کوارتز (حدود ۲۰ درصد) نیز به همراه پتاسیم فلدسپار (حدود ۲۰



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپی از توده های نفوذی منطقه الف) پیروکسن مونزودیوریت، ب) پیروکسن هورنبلند کوارتز مونزونیت، پ) هورنبلند کوارتز مونزونیت، ت) پیروکسن کوارتز دیوریت، ث) بیوتیت گرانودیوریت، ج) هورنبلند پیروکسن گرانودیوریت، نور XPL. (علائم اختصاری برگرفته از مرجع [۱۸]).

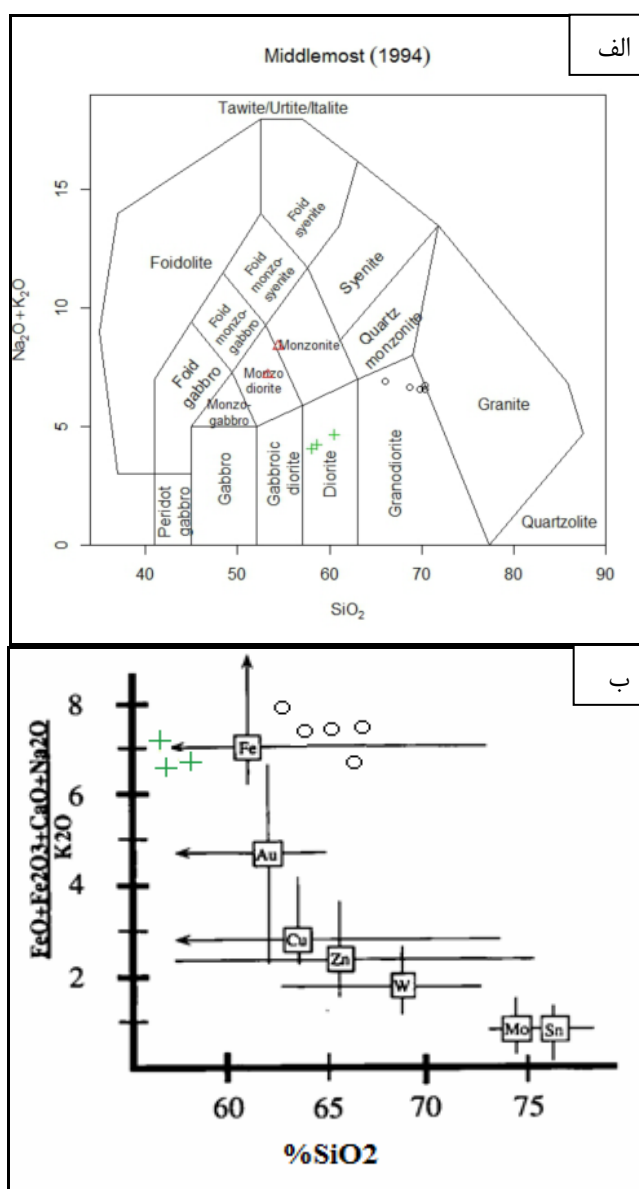
زمین‌شیمی

نتایج تجزیه عناصر اصلی، کمیاب و خاکی نادر توده‌های نفوذی منطقه در جدول ۱ آورده شده است. مقدار سیلیس توده‌های نفوذی جنوب معین آباد بین ۵۲٫۷۹ تا ۶۱٫۶۹ درصد متغیر

است. این سنگ‌ها با توجه به نمودار  $Na_2O + K_2O$  نسبت به  $SiO_2$  [۱۹] در گستره‌های دیوریت، مونزودیوریت و گرانودیوریت قرار می‌گیرند که با نتایج بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی همخوانی دارد (شکل ۳ الف).

جدول ۱ نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی و کمیاب توده‌های نفوذی جنوب معین آباد و مقایسه با میانگین این عناصر در کانسارهای اسکارن آهن [۱۹]، M12، M71، M56، M49، M62: گرانودیوریت، M102، M46، M34: دیوریت، M98: مونزونیت، M130: مونزودیوریت.

نمونه	M12	M34	M56	M62	M49	M130	M46	M98	M71	M102	Fe SkarsMean
SiO <sub>2</sub>	۶۸٫۶۴	۵۵٫۷۳	۶۴٫۷	۶۳٫۷۵	۶۷٫۱۲	۵۷٫۲۹	۵۲٫۷۹	۵۹٫۳۲	۶۹٫۶۱	۵۳٫۵۱	۵۹٫۳
TiO <sub>2</sub>	۰٫۳۴	۰٫۷	۰٫۳۵	۰٫۵۱	۰٫۴۳	۰٫۶۸	۰٫۷۸	۰٫۶۶	۰٫۴۲	۰٫۸	۰٫۸
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۴٫۴۲	۱۷٫۹	۱۳٫۸۸	۱۵٫۹۴	۱۴٫۷۲	۱۸٫۵۹	۱۶٫۲	۱۶٫۳	۱۳٫۵۴	۱۴٫۱۵	۱۶٫۸
FeO <sub>t</sub>	۳٫۰۰	۶٫۰۱	۲٫۹۴	۳٫۹۱	۳٫۶۴	۵٫۷۸	۷٫۱۰	۵٫۵۶	۳٫۲۳	۷٫۴۹	۲٫۸
MnO	۰٫۰۷	۰٫۱۱	۰٫۰۸	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۱	۰٫۲۶	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰٫۱
MgO	۱٫۱۴	۲٫۷۵	۱٫۰۷	۱٫۳۸	۱٫۲۹	۲٫۴۹	۴٫۴۳	۲٫۹۲	۱٫۶۸	۴٫۶۴	۳
CaO	۳٫۱۸	۸٫۱	۳٫۱۷	۳٫۷۸	۳٫۳۹	۷٫۸۷	۹٫۳	۷٫۹۸	۳٫۲۶	۷٫۲۱	۷٫۲
Na <sub>2</sub> O	۳٫۵	۳٫۳۶	۳٫۴۳	۳٫۸۸	۳٫۴۷	۳٫۵۵	۳٫۵۹	۳٫۶۳	۴٫۲	۴٫۶۸	۴
K <sub>2</sub> O	۲٫۹۲	۰٫۵۲	۲٫۶۵	۲٫۷۸	۳٫۰۴	۰٫۵۷	۳٫۵۳	۰٫۹۲	۲٫۴۷	۳٫۵۹	۲٫۱
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰٫۰۷	۰٫۱۱	۰٫۰۸	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۱	۰٫۲۶	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰٫۳
LOI	۰٫۸۱	۱٫۸۲	۱	۱٫۲۵	۱٫۰۱	۱٫۵۸	۱٫۱	۱٫۷۵	۰٫۹۲	۱٫۱۸	
Total	۹۱٫۵۸	۹۷٫۸۷	۹۳٫۷۶	۹۷٫۸۶	۹۸٫۷۷	۹۹٫۳۲	۱۰۰٫۳۵	۹۸٫۴۵	۹۲٫۶۴	۹۶٫۷۵	
A/Nk	۱٫۶۱	۲٫۹۳	۱٫۶۳	۱٫۶۹	۱٫۶۳	۲٫۸۷	۱٫۶۶	۲٫۳۳	۱٫۴۱	۱٫۳۰	
A/CNK	۰٫۹۸	۰٫۸۵	۰٫۹۷	۰٫۹۸	۰٫۹۷	۰٫۸۹	۰٫۶۰	۰٫۷۵	۰٫۸۲	۰٫۶۱	
Ba	۳۸۹٫۴	۶۲	۳۸۰٫۶	۴۷۴٫۶	۵۶۷٫۸	۴۳٫۱	۶۰۶٫۷	۳۲	۴۰٫۵	۳۰٫۲	۳۲۶
Rb	۸۰٫۱	۱۷	۷۹٫۶	۶۲٫۹	۶۴٫۱	۱۸	۹۸٫۶	۳۹	۶۷	۹۵	۳۹
Sr	۲۴۹٫۶	۵۰۴٫۹	۲۶۵٫۶	۳۶۸٫۳	۲۷۸٫۳	۴۶۱٫۲	۶۰۷٫۲	۴۹۲	۲۹۳	۴۷۲	۵۰۵
Zr	۱۳۴	۸۳	۱۳۳	۱۹۰	۱۴۶	۹۴	۱۰۴	۹۲	۱۷۱	۱۱۰	۱۴۱
Nb	۸٫۷	۲٫۲	۹	۹٫۵	۷٫۹	۱٫۷	۳٫۶	۱	۷	۱	۹
Co	۷	۱۳٫۹	۸٫۱	۹٫۴	۸٫۸	۱۳٫۲	۲۴	۱۶	۹	۲۳	
La	۱۸٫۷	۸	۲۳	۱۷٫۷	۲۰٫۴	۶٫۸	۱۵٫۵	۶٫۵	۲۱	۱۵٫۷	۱۶
Ce	۳۳٫۴	۱۵٫۱	۴۰٫۲	۳۳٫۷	۳۹	۱۲٫۵	۲۸٫۶	۱۱٫۸	۳۹	۲۹	۴۳
Pr	۴٫۰۴	۲٫۶۴	۴٫۷۴	۴٫۵۵	۵٫۰۲	۲٫۲۵	۳٫۹۲	۲٫۳۳	۴٫۹۸	۳٫۸۷	
Nd	۱۴٫۵	۱۲٫۱	۱۶٫۴	۱۷٫۸	۱۸٫۹	۱۰٫۴	۱۵٫۷	۱۰٫۶	۱۸٫۵	۱۵٫۹	
Sm	۲٫۸	۳٫۲۶	۲٫۹۸	۳٫۷۵	۳٫۶۷	۲٫۷۷	۳٫۵۴	۲٫۸۲	۳٫۸۱	۳٫۶۳	
Eu	۰٫۶۹	۱٫۰۷	۰٫۷۶	۰٫۹۳	۰٫۸۶	۰٫۹۴	۱٫۰۷	۰٫۸۸	۰٫۹۲	۱٫۱۸	
Gd	۲٫۵۷	۳٫۳۸	۲٫۹۲	۳٫۴۲	۳٫۵۱	۲٫۸۱	۳٫۳۶	۲٫۷۸	۳٫۷۱	۳٫۴۱	
Tb	۰٫۳۹	۰٫۵۳	۰٫۴۴	۰٫۵۸	۰٫۵۴	۰٫۴۲	۰٫۵۴	۰٫۴۴	۰٫۵۶	۰٫۵۲	
Dy	۲٫۴۸	۳٫۳۹	۲٫۶۱	۳٫۵۷	۳٫۳۷	۲٫۷۶	۳٫۱۴	۲٫۵	۳٫۱	۲٫۹۹	
Ho	۰٫۵۴	۰٫۷۴	۰٫۵۴	۰٫۷۳	۰٫۶۸	۰٫۵۵	۰٫۶۶	۰٫۶۴	۰٫۶۹	۰٫۷۵	
Er	۱٫۷۵	۲٫۰۶	۱٫۶۲	۲٫۲۹	۲٫۱۴	۱٫۶۸	۲٫۰۸	۱٫۵۸	۲٫۱۹	۱٫۹۹	
Tm	۰٫۲۷	۰٫۳۲	۰٫۲۴	۰٫۳۶	۰٫۳۲	۰٫۲۶	۰٫۳	۰٫۲۲	۰٫۳۳	۰٫۳۴	
Yb	۱٫۸۷	۱٫۹۴	۱٫۸۴	۲٫۴۲	۲٫۲۶	۱٫۶۴	۲٫۰۵	۱٫۶۸	۲٫۳۳	۲٫۱۱	
Lu	۰٫۳۱	۰٫۳	۰٫۲۸	۰٫۳۸	۰٫۳۵	۰٫۲۴	۰٫۳	۰٫۲۶	۰٫۳۳	۰٫۳۲	
Y	۱۵٫۳	۱۸٫۵	۱۵٫۸	۲۱	۱۹٫۴	۱۵	۱۸٫۵	۱۹	۳۵	۳۳	۲۴
Cs	۱٫۱۵	۰٫۶۸	۱٫۱۹	۰٫۹۴	۰٫۹۱	۰٫۴۵	۲٫۰۲	۰٫۳۸	۱٫۹۲	۰٫۸۸	
Ta	۰٫۹	۰٫۱	۰٫۹	۰٫۸	۰٫۷	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۶	۰٫۲	
Hf	۴٫۱	۲٫۴	۳٫۹	۵٫۴	۴٫۱	۲٫۵	۲٫۴	۲٫۳	۳٫۹	۲٫۵	۵
Th	۱۳٫۱۳	۳٫۸۹	۱۳٫۳۲	۸٫۲۴	۸٫۴۶	۱٫۶۲	۲٫۰۸	۰٫۹۹	۴	۱	
U	۲٫۳۲	۰٫۴۹	۲٫۶۴	۱٫۷۵	۱٫۴	۰٫۳۶	۰٫۹۸	۰٫۲۹	۱	۰٫۸۹	
(La,Yb) <sub>N</sub>	۶٫۴۴	۲٫۷۸	۸٫۴۳	۴٫۹۳	۶٫۰۹	۲٫۸۰	۵٫۱۰	۲٫۶۱	۶٫۰۸	۵٫۰۲	
Eu/Eu*	۰٫۷۹	۰٫۹۹	۰٫۷۹	۰٫۸۰	۰٫۷۴	۱٫۰۴	۰٫۹۵	۰٫۹۷	۰٫۷۵	۱٫۰۳	



شکل ۳ الف) نامگذاری سنگ‌های نفوذی-نیمه نفوذی جنوب معین آباد با استفاده از مرجع [۱۷]، ب) میانگین ترکیب توده‌های نفوذی در انواع اسکارن‌ها [۲۰] و موقعیت نمونه‌های مورد بررسی.

درصد است. در میانگین ترکیب توده‌های نفوذی در انواع اسکارن‌ها [۲۶] و موقعیت نمونه‌های مورد بررسی شکل ۳ ب نشان داده شده است.

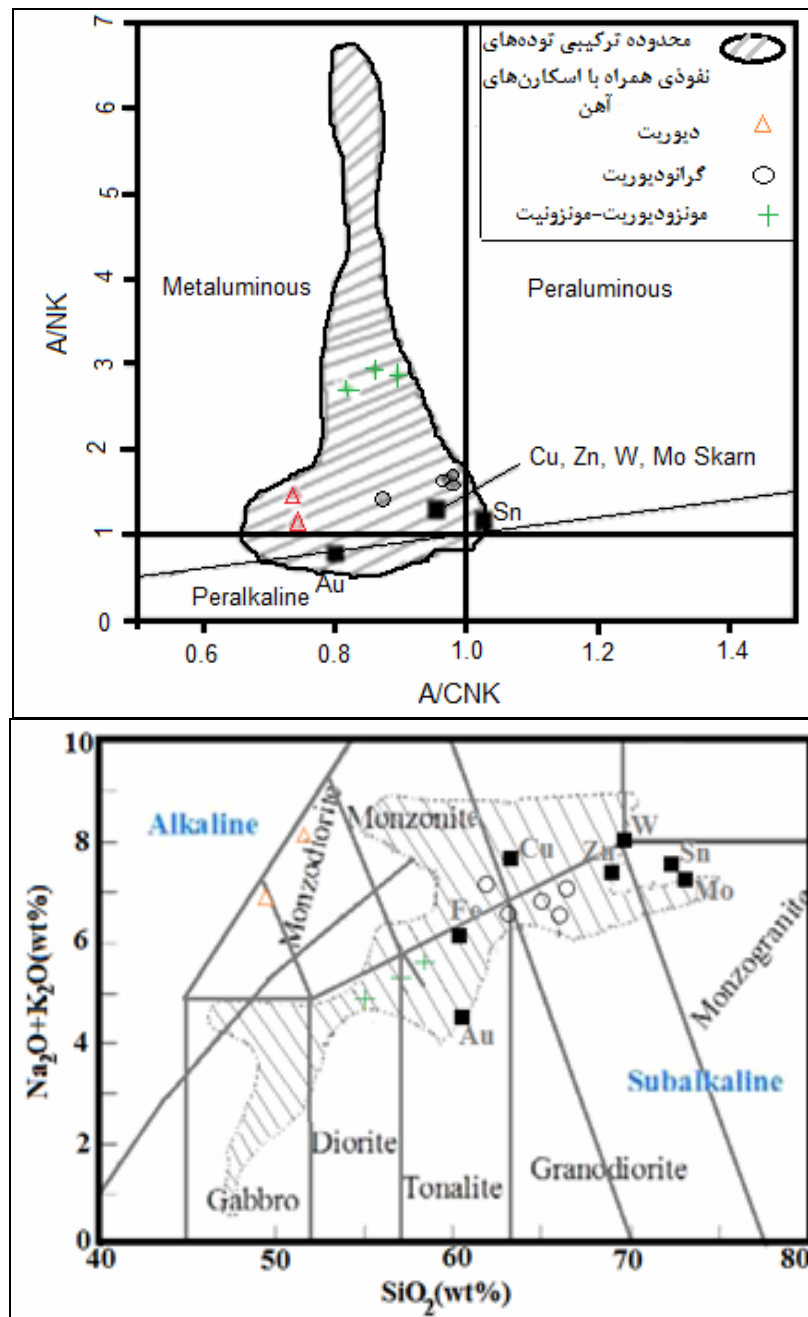
یکی از روش‌های بررسی توده‌های نفوذی برپایه اشباع از آلومینیوم است. درجه اشباع‌شدگی گدازه از آلومینیوم به ویژه در تعیین خاستگاه ماگمای گرانیتوئیدی به عنوان یک عامل مهم پذیرفته شده است. به عقیده مینرت [۲۱] بیشتر سنگ‌های نفوذی وابسته به اسکارن در نمودار مرجع [۲۷] نمونه‌های نفوذی مورد بررسی در منطقه جنوب معین آباد در گستره متاآلومین واقع شده‌اند و چنان که در شکل ۴ الف دیده

ارتباط بین ترکیب شیمیایی توده نفوذی و نوع اسکارن با توجه به محتوای فلزی آن توسط پژوهشگران مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۲۱-۲۶]. این بررسی‌ها بر این اصل استوار است که ممکن است ارتباطی بین ترکیب توده نفوذی و نوع اسکارن وجود داشته باشد. علت این ارتباط رابطه زایشی بین فرایندهای ماگمایی و کانه‌زایی است. در جدول ۱ میانگین ترکیبات عناصر اصلی و کمیاب توده‌های نفوذی همراه با اسکارن‌های آهن [۲۱] نیز آمده است. میانگین درصد سیلیس در توده‌های نفوذی همراه اسکارن‌های آهن ۵۹٫۳ درصد (جدول ۱) و در نمونه‌های منطقه جنوب معین آباد ۶۰٫۲۴

توده‌های نفوذی جنوب معین آباد با توده‌های نفوذی مربوط به کانسارهای آهن رسم شدند (شکل ۴ ب). در نمودار  $(\text{NaO} + \text{K}_2\text{O})$  نسبت به سیلیس [۲۸]، سنگ‌های منطقه مورد بررسی در گستره دیوریت، مونزودیوریت و گرانودیوریت و گستره شبه قلیایی قرار می‌گیرند. در این نمودار، بیشتر نمونه‌ها در گستره توده‌های نفوذی همراه با اسکارن‌های آهن قرار گرفته‌اند.

می‌شود با گستره میانگین توده‌های نفوذی همراه با اسکارن‌های آهن همخوانی دارد.

بر اساس بررسی‌های کولکو و همکاران [۲۴] بهترین نمودارها برای تشخیص توده‌های نفوذی همراه با اسکارن‌های آهن، مس، طلا، تنگستن و مولیبدن نمودارهای  $\text{MgO}$  نسبت به  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{K}_2\text{O}$  نسبت به  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  نسبت به  $\text{SiO}_2$  هستند. به همین منظور این نمودارها برای مقایسه



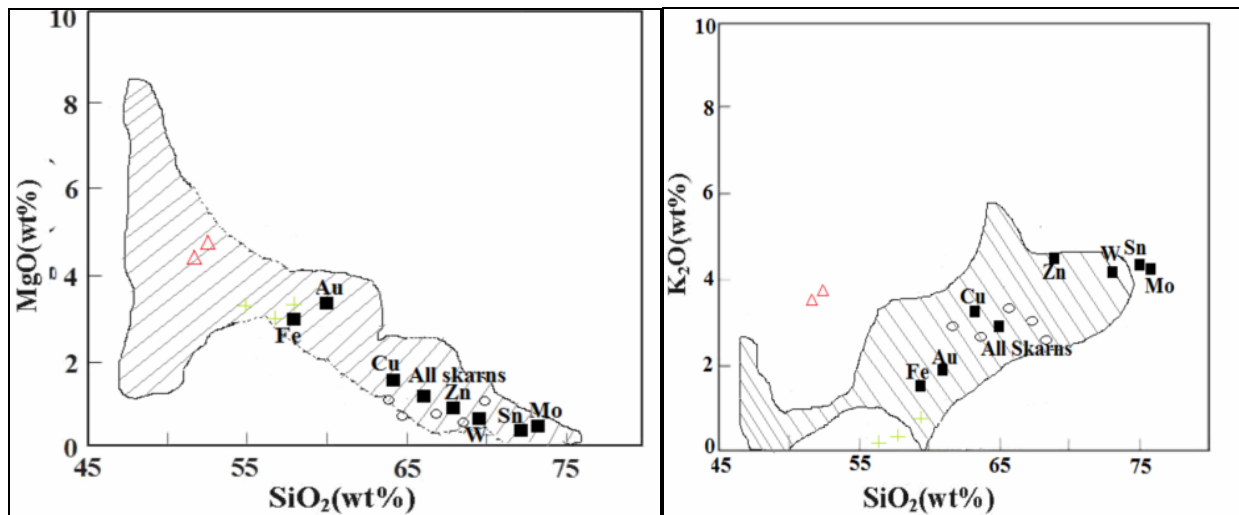
شکل ۴ الف) موقعیت توده‌های نفوذی منطقه مورد بررسی در نمودار تفکیک گرانیتوئیدها [۲۶]، ب) موقعیت توده‌های نفوذی منطقه جنوب معین آباد و گستره متوسط توده‌های نفوذی همراه با اسکارن‌های آهن [۲۷].

وابسته به اسکارن آهن همخوانی دارند.

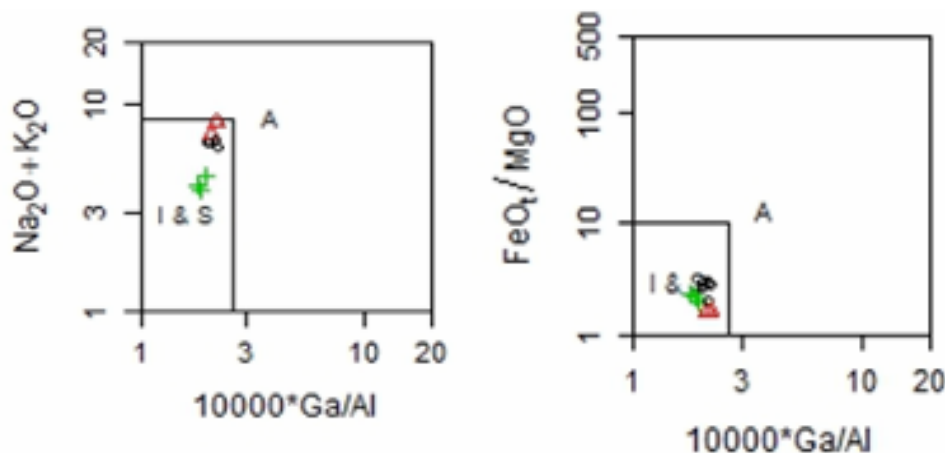
#### خاستگاه و محیط زمین‌ساختی

در نمودار تفکیک گرانیتوئیدهای نوع A از نوع S و I [۳۰] که بر پایه اکسیدهای اصلی و عناصر آلومینیوم و گالیوم است، گرانیتوئیدهای مورد بررسی در گستره نوع S یا I قرار می‌گیرند و ماهیت زمین‌شیمیایی آنها با گرانیتوئیدهای نوع A متفاوت است (شکل ۶). سنگ‌های گرانیتوئیدی نوع I با پایین بودن مقدار  $Y$ ،  $Zr$ ،  $Ga$ ،  $Nb$  و  $REE$ ، از گرانیتوئیدهای نوع A تمیز داده می‌شوند. همه نمونه‌ها از آنجا که دارای مقدار  $A/CNK$  کمتر از یک هستند، در گستره گرانیتوئیدهای نوع I قرار می‌گیرند [۳۲،۳۱].

در نمودار  $MgO$  نسبت به  $SiO_2$  توده‌های نفوذی منطقه مورد بررسی دارای مقدار  $MgO$  مشابه با توده‌های نفوذی همراه با کانسارهای آهن هستند. میانگین  $MgO$  گرانیتوئیدهای اسکارنی آهن حدود ۳ درصد است که این مقدار در توده‌های نفوذی جنوب معین آباد حدود ۲٫۳۷ درصد است. میانگین  $K_2O$  در گرانیتوئیدهای اسکارنی آهن ۲٫۱ درصد گزارش شده است و این مقدار در توده نفوذی جنوب معین آباد ۲٫۲ درصد است. توده‌های نفوذی همراه با اسکارن‌های آهن دارای  $SiO_2$  و  $K_2O$  کمتر و  $MgO$  بیشتری نسبت به توده‌های نفوذی همراه سایر اسکارن‌ها هستند [۲۹،۲۱]. چنانکه در شکل ۵ دیده می‌شود، نمونه‌های مورد بررسی با توده‌های



شکل ۵ نمودار  $MgO$  و  $K_2O$  نسبت به  $SiO_2$ ، موقعیت توده‌های نفوذی منطقه مورد بررسی و توده‌های نفوذی همراه اسکارن آهن [۱۹]، علائم مانند شکل ۴.

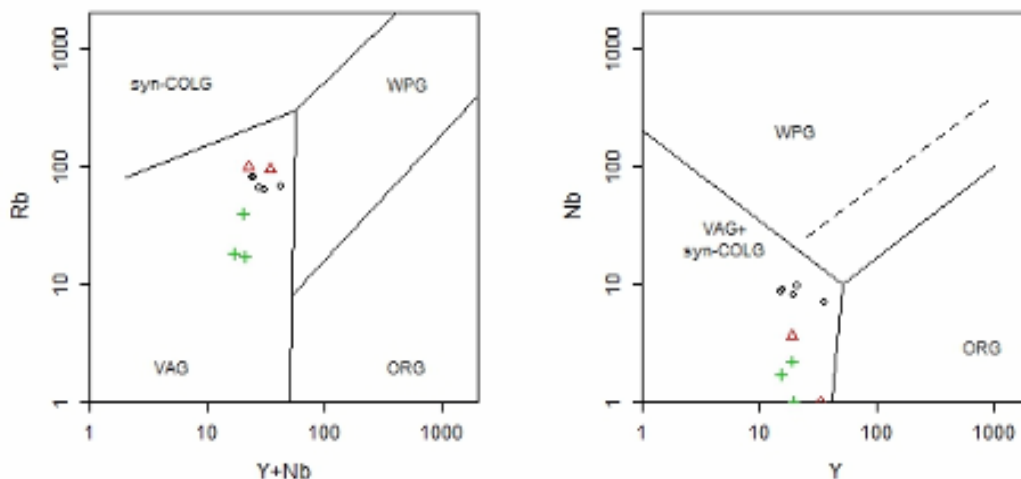


شکل ۶ موقعیت توده‌های نفوذی جنوب معین آباد در نمودار متمایزکننده گرانیتوئیدها [۳۰].

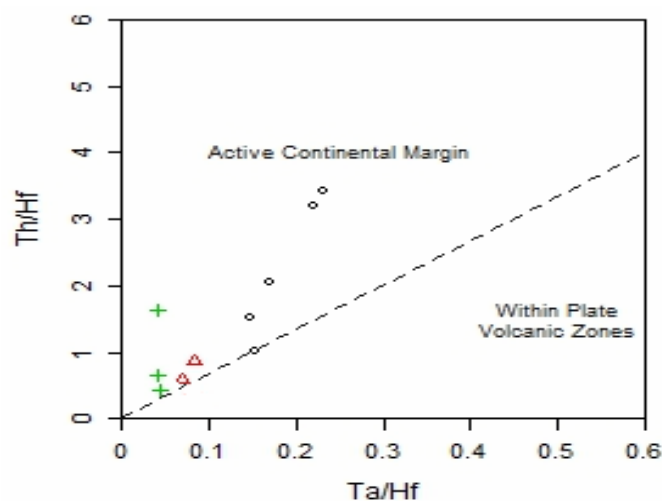


HREE مشخصه ماگمای تشکیل شده در منطقه فرورانش است [۳۵، ۳۸-۴۰]. الگوی عناصر REE و پایین بودن نسبی  $(La/Yb)_N$  (۲/۷۸ تا ۸/۴۳) در همه نمونه‌ها نیز تشکیل ماگما در عمق کمتر از گستره پایداری گارنت و یا کم بودن مقدار این کانی در ناحیه خاستگاه را نشان می‌دهد. همچنین عنصر Eu در تمام نمونه‌ها ناهنجاری منفی نشان داده است  $(Eu/Eu^*=0.71-1.04)$ . مقدار کم این عنصر می‌تواند به علت حضور پلاژیوکلاز در ناحیه خاستگاه و یا تبلور جدایشی این کانی باشد. عناصر سنگ دوست با شعاع یونی بزرگ (LILE)، عناصری ناسازگار و متحرکند، در حالی‌که عناصر واسط با شدت میدان بالا (HFSE) و برخی از عناصر متحولی در شرایط دگرگونی و دگرسانی، عناصری سازگار و تقریباً نامتحرکند.

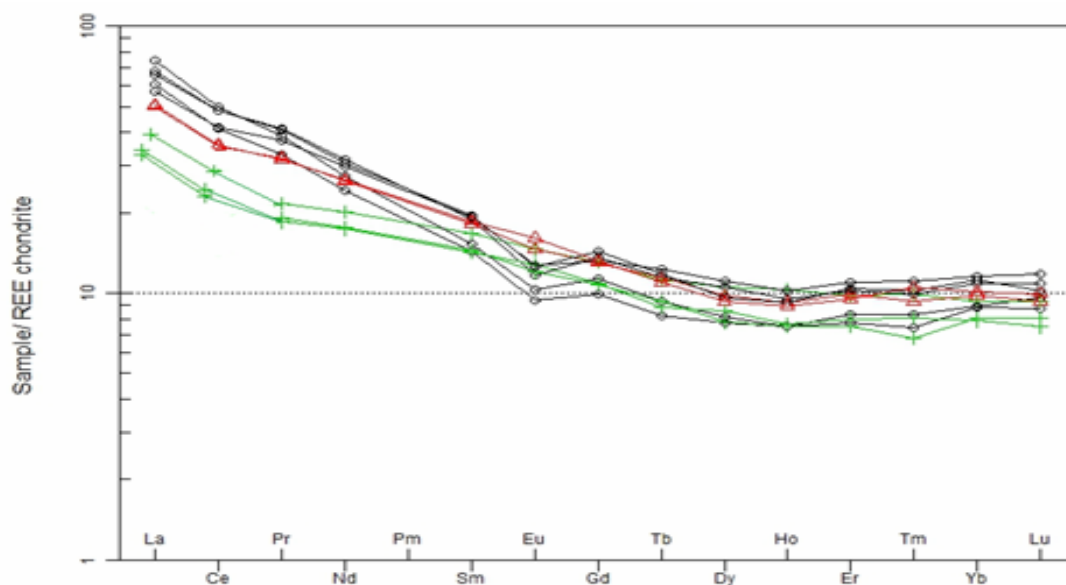
بر پایه مقدار عناصر Nb، Rb و Y در نمودار مرجع [۳۳]، موقعیت زمین‌ساختی تشکیل توده‌های نفوذی، کمربندهای آتشفشانی منطقه فرورانش (VAG) است (شکل ۷). همچنین در نمودار  $Th/Hf$  نسبت به Ta/Hf [۳۴]، نمونه‌ها در محیط کرانه قاره فعال واقع می‌شوند (شکل ۸). عناصر REE نسبت به سایر عناصر به مقدار کمتری در معرض هوازدگی و دگرسانی‌های گرمایی قرار می‌گیرند، بنابراین الگوی فراوانی آنها می‌تواند نشان دهنده خاستگاه آذرین سنگ‌ها باشد [۳۵، ۳۶]. نمودار REE توده‌ها که نسبت به کندریت بهنجار شده است، [۳۷] (شکل ۹) یک غنی‌شدگی نسبی عناصر خاکی نادر سبک (LREE) نسبت به عناصر خاکی نادر سنگین (HREE) نشان می‌دهد. این روند غنی‌شدگی در LREE نسبت به



شکل ۷ موقعیت توده‌های نفوذی منطقه مورد بررسی در نمودار مرجع [۳۳]، گرانیتوئیدهای قوس آتشفشانی (VAG)، گرانیتوئید درون صفحه‌ای (WPG)، گرانیتوئیدهای پشته میان اقیانوسی (ORG)، گرانیتوئیدهای همزمان با برخورد قاره‌ها (Syn-COLG).



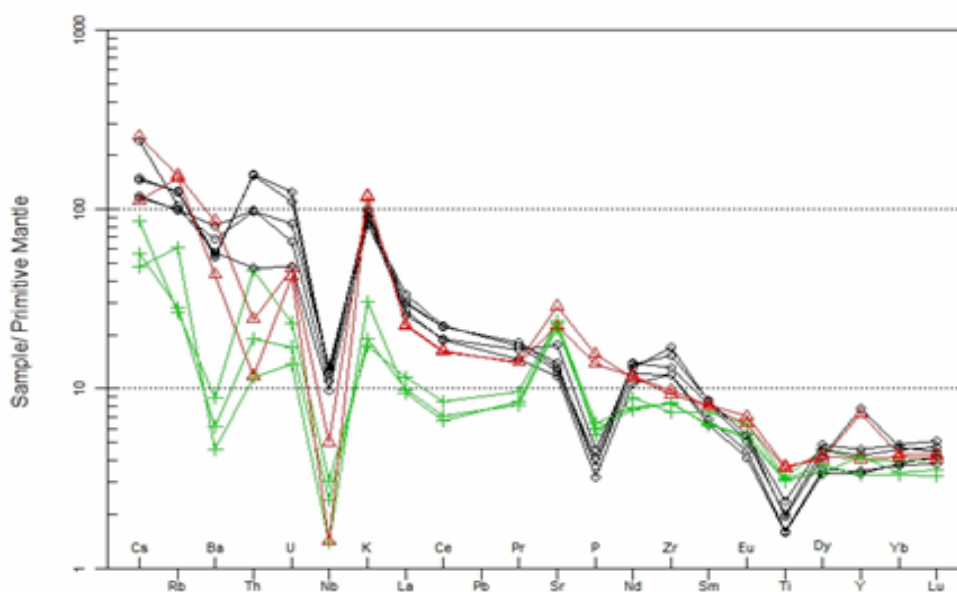
شکل ۸ موقعیت توده‌های نفوذی منطقه مورد بررسی در نمودار مرجع [۳۵].



شکل ۹ نمودار عنکبوتی عناصر خاکی نادر بهنجار شده با کندریت در توده‌های نفوذی منطقه [۳۷].

غلظت عناصر با سنگ دوست با شعاع یونی بزرگ به عنوان تابعی از فاز شاری است، در حالی که غلظت عناصر واسط با شدت میدان بالا تابعی از شیمی خاستگاه و فرایندهای ذوب-تبلور است [۳۵]. نمودار عنکبوتی عناصر فرعی و برخی عناصر خاکی نادر بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه برای توده‌های نفوذی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. غنی‌شدگی از عناصر LILE (Cs, Ba, Rb, K) و عناصر ناسازگاری که رفتاری شبیه به آنها دارند مثل Th، نسبت به عناصر HFSE (Ta, Nb, Ti)،

در همه نمونه‌ها نسبت به گوشته اولیه دیده می‌شود و تفاوت‌های اندک مربوط به تغییر ترکیب کلی سنگ است. غنی‌شدگی در عناصر LILE نسبت به HFSE نشان دهنده ماگمای وابسته به مناطق فرورانش است [۳۳، ۳۸ - ۴۰]. احتمال این که عناصر HFSE در فازهایی مانند روتیل یا ایلمنیت وارد شوند بسیار بالاست که این مطلب به وجود ورقه فرورنده شده اشاره دارد [۴۱]. ناهنجاری منفی فسفر در نمونه‌ها می‌تواند نتیجه جداسدن آپاتیت از ماگما باشد [۴۲].



شکل ۱۰ نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب بهنجار شده با گوشته اولیه در توده‌های نفوذی منطقه [۴۳].

## برداشت

توده‌های نفوذی جنوب معین آباد دارای ماهیت کم‌قلیایی با آلومینیوم متوسط هستند که در یک موقعیت زمین‌ساختی کمان ماگمایی کرانه فعال قاره جایگیری کرده‌اند. این توده‌ها دارای ترکیب سنگ‌شناختی گرانودیوریتی، دیوریتی، کوارتز مونزونیتی هستند. نفوذ این سنگ‌ها در آهک‌های کرتاسه موجب کانی‌سازی اسکارن شده است. کانه‌زایی آهن به صورت عدسی‌شکل بیشتر در مرز توده‌های نفوذی و واحد آهکی صورت گرفته است. غنی‌شدگی از عناصر (Ba, Rb, K) LILE، Cs نسبت به عناصر HFSE (Y, Zr, Ta, Nb, Ti) نشان دهنده ماگمای وابسته به مناطق فرورانش است. مقایسه ترکیب و سایر ویژگی‌های زمین‌شیمیایی این توده‌ها با توده‌های نفوذی همراه با اسکارن‌های آهن نمایانگر شباهت آنها با یکدیگر است. بررسی‌های صحرایی، سنگ‌شناختی، اطلاعات زمین‌شیمیایی و مقایسه آنها با توده‌های نفوذی همراه با اسکارن‌های آهن حضور کانی‌سازی اسکارن آهن را در منطقه جنوب معین آباد تأیید می‌کند.

## مراجع

- 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 (2010) 15-32.
- [7] Arjmandzadeh R., Karimpour M.H., Mazaheri S.A., Santos S.A.J.F., Medina J.M., Homam S.M., "Sr-Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut Block, Eastern Iran)", Journal of Asian Earth Sciences, 41(2011) 283-296.
- [8] Eftekharnjad G., "A Few Articles About the Formation of the Flish Concentration in Eastern Iran and its justification to plate tectonics theory", Appendix No. 33, Geological Survey of Iran.
- [9] Camp V.E., Griffis R.J., "Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran", Lithos 15(1982) 221-239.
- [10] Tirul R., Bell I.R., Griffis R.J., Camp V.E., "The Sistan suture zone of eastern Iran", Geological Society of America Bulletin, 94(1983) 134-150.
- [11] Berberian M., "Geotechnical evolution of the Iran-Earth mountains", Seventh Earth Sciences Conference, Geological Survey of Iran.
- [12] Arjmandzadeh R., Karimpour M.H., Mazaheri S.A., Santos J.F., Medina J.M., Homam S.M., "Two-sided asymmetric subduction; implications for tectonomagmatic and metallogenic evolution of the (Lut Block, eastern Iran)", Journal Of Economic Geology 3(2011) 1-14.
- [13] Tarkian M., Lotfi M., Baumann A., "Tectonic, magmatism and the formation of mineral deposits in the central Lut, east Iran", Ministry of mines and metals, GSI, geodynamic project (geotraverse) in Iran, 51(1983) 357-383.
- [14] Samani B., Ashtari S., "Geological Development of Sistan and Baluchestan Region" Geosciences Collection, No. 4, Geological Survey of Iran .
- [15] Aghanabati SA, "Geological Survey of Iran, Tehran", Geological Survey of Iran, 585 p.
- [16] Saadat S., report on the end of exploration operations of Kalateh Nasser Range .100 p.
- [17] Pichler H., Schmitt-Riegraf C., "Rock-forming Minerals in Thin Section", Springer Netherlands, 2(1997) 220 p.
- [18] Whitney D.L., Evans B.W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", American mineralogist, Volume 95 (2010) 185-187.
- [19] Middlemost E.A.K.,. "Naming materials in the magma/ igneous rock system", Earth Sciences Review. 37(1994) 215-224.
- [1] Berberian M., King G.C.P., "ToWards a paleogeography and tectonic evolution of Iran", Canadian Journal of Earth Sciences, 18(1981)210-265.
- [2] Karimpour M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., Mazaheri S.A., Heydarian M. R., "Magmatism and Types of Copper, Gold, Tin and Tungsten Condensation in the Lut Blocks", Proceedings of the 15th Conference of the Iranian Society of Crystallography and Cenozonics, Ferdowsi University of Mashhad, p. 598-604.
- [3] Jung D., Keller J., Khorasani R., Marcks Chr., Baumann A., Horn P., "Petrology of the Tertiary magmatic activity the northern Lut area, East of Iran, Ministry of mines and metals, GSI, geodynamic project (geotraverse) in Iran", v. 51, (1983) p. 285-336.
- [4] Karimpour M.H., Zaw K., Huston D.L., "S-C-O isotopes, fluid inclusion microthermometry, and the genesis of ore bearing fluids at Qaleh-Zari Fe-oxide Cu-Au-Ag mine, Iran", Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran ,v. 16 (2005) p. 153-168.
- [5] Karimpour M.H., Stern C. R., Farmer L., Saadat S., Malekzadeh shafaroudi, A., "Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block", Eastern Iran, JGeope 1 (1) (2011) p. 19-36.
- [6] Malekzadeh Shafaroudi A., Karimpour M.H., Mazaheri S.A., "Rb-Sr and Sm-Nd isotopic

- Mineralogy and Petrology (95): 407-419.
- [21] Chappell B. W., White A. J. R., "*I- and S-type granites in the Lachlan Fold belt, Transactions of the Royal Society of Edinburgh*", Earth Science (83) (1992) 1-26.
- [32] Chappell B. W., White A. J. R., "*Two contrasting granite type: 25 years later.*" Australian Journal of Earth Science (48): 489-499.
- [33] Pearce J. A., Harris N. B. W., Tindle A. G., "*Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks*", Journal of Petrology (25) (1984) 956-983.
- [34] Schandl E.S., Gorton M.P., "*Application of high field strength element to discriminate tectonic setting in VMS environment*", Economic Geology 97 (2002) 629-642.
- [35] Rollinson H., "*Using geochemical data, Evaluation, Presentation, Interpretation*", Harlow, UK, Longman (1993) 352 p.
- [36] Boynton W.V., "*Cosmochemistry of the rare earth elements, Meteorite studies*", in Rare Earth Element Geochemistry (P. Henderson, ed.), (Developments in Geochemistry 2), Elsevier, Amsterdam (1985) 115-1522.
- [37] Boynton W. V., "*Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies, in rare earth element geochemistry*". Elsevier, Amsterdam (1985).
- [38] Gill J. B., "*Orogenic Andesites and Plate Tectonics*", Springer, New York (1981).
- [39] Wilson M., "*Igneous Petrogenesis*", Uniwin Hyman, London (1989).
- [40] Pearce J. A., "*Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins*", In: Hawakesworth, C.J., Norry, M.J. (Eds.), Continental Basalt and Mantle Xenoliths, Shiva, Nantwich (1983) 230-249.
- [41] Ryerson F.J., Watson E.B., "*Rutile saturation in magmas: implications for Ti-Nb-Ta depletion in island-arc basalts*", Earth and planetary Science Letters 86 (1987) 225-239.
- [42] Wu F. Y., Jahn B. M., Wilde S. A., Lo C. H., Yui T. F., Lin Q., Ge, W. C., Sun D. Y., "*Highly fractionated I-type granites in China (I): geochronology and petrogenesis*", Lithos 66(2003) 241-273.
- [43] Sun S. S., McDonough W. F., "*Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, magmatism in ocean basins*". Journal of Geological Society of London (42) (1989) 313-345.
- [20] Oyman T., "*Geochemistry, mineralogy and genesis of the Ayazmant Fe-Cu skarn deposit in Ayvalik, (Balikesir), Turkey*", Ore Geology Reviews, 37 (2010) 175-201.
- [21] Meinert L.D., "*Compositional variation of igneous rocks associated with skarn deposits - chemical evidence for a genetic connection between petrogenesis and mineralization*", In: THOMPSON, J.F.H.(ed), Magmas, fluids, and ore deposits. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series 23 (1995) 401-418.
- [22] Keith J.D., Van middelbaar W.T., Clark A.H. Hodgson C.J., "*Granitoid textures, compositions, and volatile fugacities associated with the formation of tungsten-dominated skarn deposits. In Ore Deposition Associated with Magmas (J.M. Robertson, ed.)*", Reviews Econ. Geol, 4(1989) 235-250.
- [23] Ray G.E., Webster I.C.L., Ballantyne S. B., Kilby C. E., Cornlius S. B., "*The Geochemistry of Three Tin-Bearing Skarns and Their Related Plutonic Rocks, Atlin, Northern British Columbia*", Economic Geology, 95 (2000) 1349-1365.
- [24] Kuscu I., Gençalioglu-Kuscu G., Erler A., "*Geochemical Signatures of Granitoids Associated with Skarns in Central Anatolia*", International Geology Review, 43(2001) 722-735.
- [25] Yücel-Öztürk Y., Helvaci C., Satir M., "*Genetic Relations Between Skarn Mineralization and Petrogenesis of the Evciler Granitoid, Kazdag, Canakkale, Turkey and Comparison with World Skarn Granitoids*", Turkish Journal of Earth Sciences (Turkish J. Earth Sci.), 14( 2005) 255-280.
- [26] Meinert L. D., "*Igneous Petrogenesis and Skarn Deposits*", in Mineral Deposit Modeling: R. V. Kirkham, W. D. Sinclair, R. I. Thorpe and J. M. Duke (eds.), Geological Association of Canada Special Paper, 40 (1993) 569-583.
- [27] Maniar P.D., Piccoli P.M., "*Tectonic discrimination of granitoids*", Geological Society of America Bulletin 101(1989) 635-643.
- [28] Bellieni G., Visentin E.J., Zanettin B., "*Use of chemical TAS diagram (total alkali silica) for classification of plutonic rocks: Problems and suggestions*", I.U.G.S.: Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks Contribution, no. 157(1996) 35 p.
- [29] Meinert L.D., Dipple G.M., Nicolescu S., "*World skarn deposits*", Society of Economic Geologists, Inc. Economic Geology 100<sup>th</sup> Anniversary Volume(2005) 299-336.
- [30] Whalen J. B., Currie K. L., Chappell B. W., "*A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis*", Contributions to