

کانی‌شناسی، کانه‌زایی و زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی در منطقه مجیدآباد، اهر

(استان آذربایجان شرقی - شمال غرب ایران)

حانیه بابائی^{۱*}، سید غفور علوی^۱، وارطان سیمونز^۱

^۱گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

h.babai7394@gmail.com

تلفن: ۰۹۰۲۴۸۲۸۴۱۰

تاریخ تنظیم: (۱۴۰۳/۰۶/۱۸)

چکیده

منطقه مجیدآباد در فاصله ۳۲ کیلومتری شمال شرق شهرستان اهر، استان آذربایجان شرقی و شمال غرب ایران واقع می‌باشد. این منطقه از لحاظ تقسیم‌بندی ساختاری-تکتونیکی در پهنه البرز قرار دارد و بخشی از حاشیه انتهایی نوار آتشفشانی ارومیه-دختر است. واحدهای تشکیل‌دهنده منطقه شامل سنگ‌های آذرین و آذرآواری ائوسن با ترکیب آندزیتی، تراکی‌آندزیت تا تراکی‌بازالتی و توده‌های نفوذی الیگوسن با ترکیب مونزودیوریتی و گابرویی می‌باشند. در اثر فرآیندهای گرمایی شکل گرفته از این توده‌های نفوذی و با نفوذ آنها در واحدهای رسوبی-آتشفشانی ائوسن، دگرسانی‌های گسترده‌ای (فیلیک، آرژیلیک، پروپیلیتیک و سیلیسی) در منطقه رخ داده است. کانه‌زایی بشکل پراکنده و رگه-رگچه‌ای می‌باشد که در دو مرحله جداگانه درون‌زاد و برون‌زاد رخ داده است. کانی‌های درون‌زاد شامل کانی‌های پیریت و کالکوپیریت هستند که با کانی‌های برون‌زاد کالکوسیت، کوولیت، دیژنیت، هماتیت، لیمونیت و مالاکیت همراهی می‌شوند. سری‌های آتشفشانی و نفوذی منطقه خاستگاه مشترکی داشته و در گستره کالک‌آلکان پتاسیم بالا و شوشونیتی قرار می‌گیرند و از نظر شاخص اشباع از آلومین در محدوده پرآلومینوس و متاآلومینوس واقع می‌شوند. نمودارهای چند عنصری به‌نچار شده با کندریت نشان‌دهنده غنی‌شدگی LREE و تهی‌شدگی HREE است. واحدهای سنگی منطقه در محیط‌های زمین‌ساختی کمان قاره‌ای قرار گرفته‌اند.

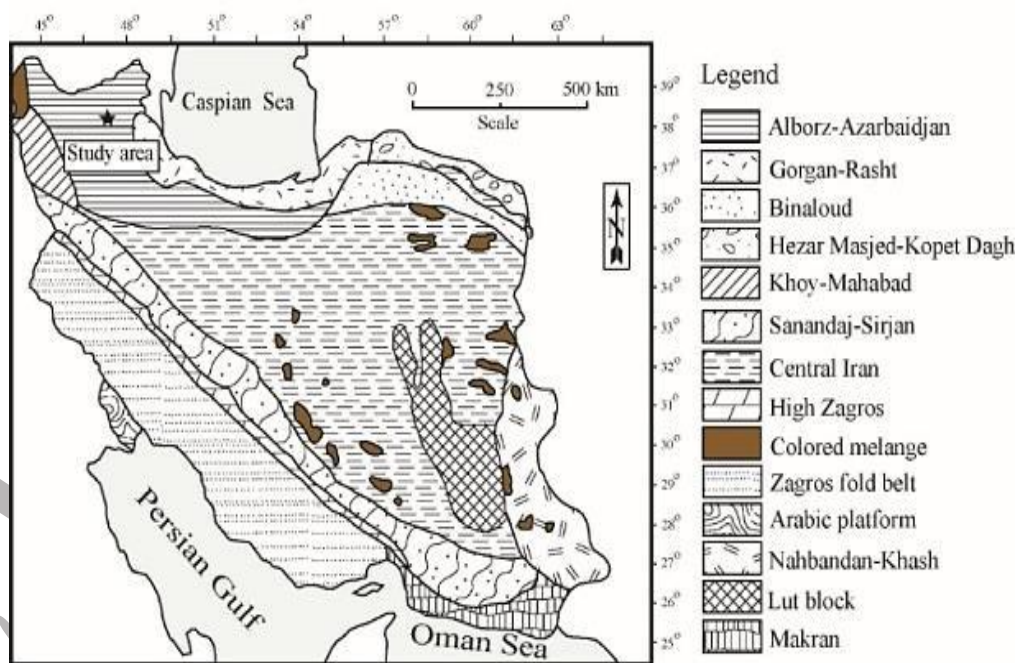
کلمات کلیدی: کانی‌شناسی، کانه‌زایی، سنگ‌های آتشفشانی، توده‌های نفوذی، مجیدآباد، اهر

محدوده مورد نظر در شمال غرب ایران، استان آذربایجان شرقی و در ۳۲ کیلومتری شمال شرق اهر واقع گردیده است. منطقه مجیدآباد در پهنه ارسباران قرار دارد. کمر بند فلز زایی ارسباران در شمال غربی ایران واقع بوده و شامل مناطقی از جمله اهر، کلیبر، ورزقان، سیه رود و بخش هایی از شمال و غرب مشکین شهر است. برخی زمین شناسان این کمر بند را ادامه قفقاز کوچک در نظر می گیرند که با روند شمال غرب-جنوب شرق وارد ایران می شود [۱]. عده ای آن را بخشی از پهنه ارومیه-دختر در نظر می گیرند [۲] و عده ای دیگر آن را کمر بند ماگمایی مجزا در نظر می گیرند که از البرز تا شمال شرق ترکیه کشیده شده است [۳-۵]. این کمر بند دارای برون زده های گسترده ای از رسوبات فیلیشی پالتوسن و سنگ های آذرین آتشفشانی و درونی ائوسن تا میوسن است. ماگماتیسم سنوزویک که از ائوسن آغاز می شود عمدتاً آتشفشانی بوده و اغلب ماهیت اسیدی و حد واسط دارند. از ائوسن بالایی تا میوسن، فعالیت آذرین بیشتر به شکل توده های نفوذی بروز می کند که با کانی سازی و دگرسانی گسترده ای همراه است [۶]. بخش های وسیعی از سنگ های ماگمایی به ویژه سنگ های آتشفشانی و آذر آواری آن دگرسان شده اند [۷]. توالی سنگ های مطالعه شده در این پهنه شامل دو دوره اصلی الیگوسن پسین- میوسن پیشین است [۸]. در این کمر بند کانه زایی هایی از جمله مس، مولیبدن، طلا، آهن، سرب، روی، آرسنیک، آنتیموان و جیوه به صورت ذخایر پورفیری، اسکارنی و رگه ای قابل پی جویی است [۹-۱۰]. از مطالعات اخیر روی ذخایر این پهنه می توان به ذخایر پورفیری مس- مولیبدن سونگون [۱۱]، مس- مولیبدن هفت چشمه [۱۲-۱۳] و برخی از ذخایر اپی ترمال مانند زایلیک- صفیخانلو [۱۴]، شرف آباد و مسجد داغی [۱۵] اشاره کرد. هدف از انجام این پژوهش شناسایی ویژگی های سنگ شناسی، تفکیک واحدهای آذرین، کانه زایی، زمین شیمی سنگ های آتشفشانی و نفوذی منطقه و همچنین تعیین خاستگاه و جایگاه زمین ساختی می باشد.

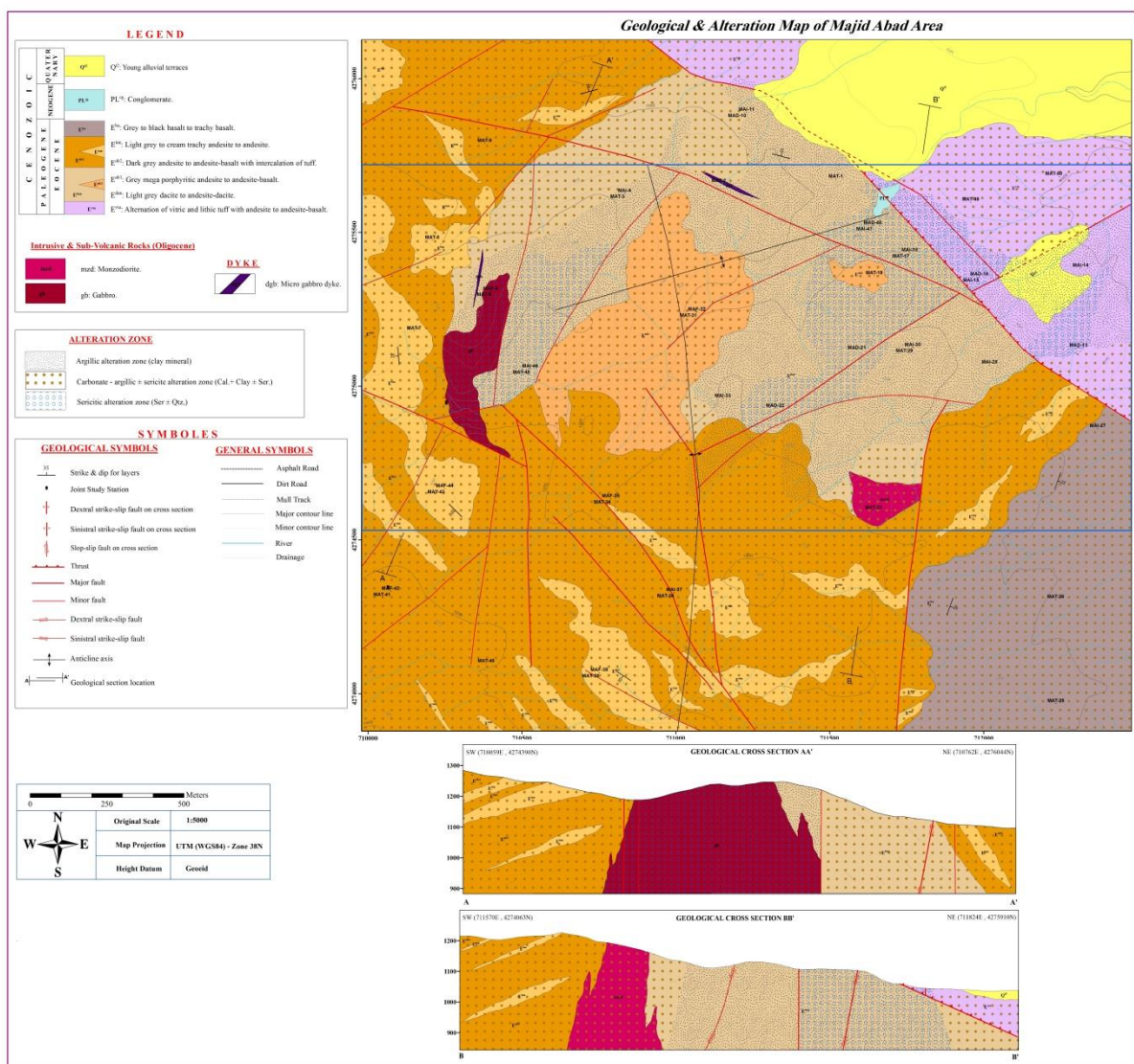
روش مطالعه

بررسی ها در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی صورت گرفت. در بخش صحرایی، بمنظور ارزیابی کلی و بررسی واحدهای سنگی منطقه و بررسی روابط واحدها و نمونه برداری از آنها از منطقه بازدید بعمل آمد. ۱۵ مقطع نازک از نمونه های برداشت شده از سنگ های آذر آواری و آتشفشانی برای بررسی سنگ شناسی و کانی شناسی و ۲۰ مقطع صیقلی از نمونه های برداشت شده از گمانه های اکتشافی که در آنها کانه زایی سولفیدی وجود داشت، بمنظور بررسی کانه زایی و تعیین توالی پاراژنتیکی تهیه شد و در دانشگاه تبریز مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی زمین شیمی واحدهای سنگی منطقه، ۲۰ نمونه از توده های نفوذی پورفیری، ۵ نمونه از توده های مافیک گابرویی و ۲۲ نمونه از سنگ های آتشفشانی با کمترین میزان دگرسانی برداشت شدند و بمنظور تجزیه شیمیایی به روش های طیف سنجی فلوئورسانس پرتو ایکس (XRF) برای عناصر اصلی و طیف سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) برای عناصر فرعی و کمیاب به آزمایشگاه زرآما ارسال شدند.

محدوده مورد مطالعه بمساحت ۵/۶ کیلومتر مربع، به مختصات جغرافیایی $39^{\circ} 24' 47''$ تا $25^{\circ} 26' 47''$ طول شرقی و 19° $35' 38^{\circ}$ الی $29^{\circ} 36' 38^{\circ}$ عرض شمالی، در ۳۲ کیلومتری شمال شرق شهرستان اهر در استان آذربایجان شرقی، شمال غرب ایران واقع شده است. این منطقه بر اساس تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختمانی ایران [۱۶] در پهنه البرز آذربایجان قرار دارد (شکل ۱). واحدهای سنگی آتشفشانی- آذرآوری تفکیک شده در محدوده مجیدآباد به ترتیب سنی از قدیم به جدید عبارتند از: تناوب ویتریک- لیتیک توف با گدازه‌های آندزیتی و آندزیت بازالتی (E^{vt})، گدازه داسیت تا آندزیت- داسیت (E^{dan})، گدازه‌های آندزیتی و آندزیت- بازالتی مگاپورفیری تیره‌رنگ (E^{ab1})، گدازه‌های آندزیتی تا آندزیت- بازالتی (E^{ab2})، گدازه‌های آندزیتی تا تراکی آندزیتی (E^{tan}) و گدازه‌های بازالت تا تراکی بازالت (E^{ba}). واحدهای سنگ‌های آذرین نفوذی و ساب‌ولکانیک نیز عبارتند از: گابرو (gb)، مونزودیوریت (mzd) و دایک‌های میکروگابرو (dgb) (شکل ۲).



شکل ۱ موقعیت منطقه مورد بررسی در نقشه تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختمانی ایران [۱۶]

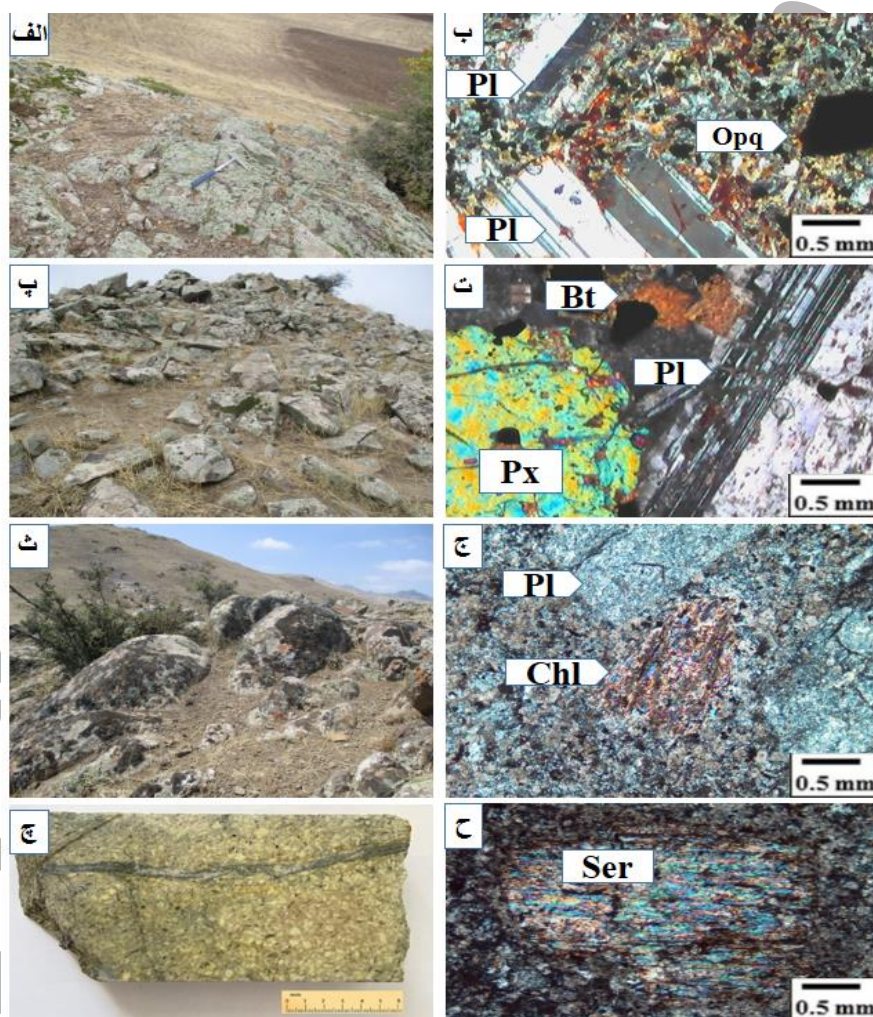


شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی مجیدآباد برگرفته از مراجع [۱۷-۱۸] با تغییرات

سنگ‌نگاری

در این منطقه گسل‌ها و شکستگی‌هایی وجود دارند که واحدهای آشفشانی ائوسن آندزیتی- بازالتی (شکل ۳-الف) و توده‌های نفوذی را قطع کرده‌اند و محل مناسبی برای تزریق محلول‌های گرمایی بوجود آورده‌اند. عبور سیال‌های گرمایی در راستای شکستگی‌ها و گسل‌ها افزون بر گسترش دگرسانی، موجب نهشته شدن کانه‌های فلزی در این منطقه شده است. از برجسته‌ترین سیمای زمین‌شناسی اقتصادی منطقه مجیدآباد می‌توان به نفوذ توده‌های آذرین درونی گابرویی (شکل ۳-پ) و مونزودیوریتی (شکل ۳-ث) به درون تشکیلات آندزیتی- بازالتی و گسترش یک سامانه دگرسانی گسترده اشاره کرد. سامانه دگرسانی یاد شده از پهنه‌های دگرسانی آرژیلیکی، فیلیک، پروپیلیتیک و سیلیسی تشکیل شده است. از نظر ریخت‌شناسی، توده‌های نفوذی ارتفاع متوسط تا خشن منطقه را تشکیل می‌دهند. رنگ این مجموعه در بازدیدهای صحرایی و نمونه دستی،

خاکستری متوسط تا خاکستری روشن است. مهمترین سنگ‌های میزبان منطقه، سنگ‌های آندزیتی-بازالتی هستند که براساس بررسی‌های میکروسکوپی کانی‌های اصلی آنها شامل پلاژیوکلاز و کوارتز می‌باشند (شکل ۳-ب). توده نفوذی گابرویی در غرب محدوده واقع شده و دارای کانی‌های پلاژیوکلاز و پیروکسن می‌باشد (شکل ۳-ث). توده نفوذی مونزودیوریتی در شرق محدوده واقع شده و دارای کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز و فلدسپار آکالن همراه با کانی‌های ثانویه کلریت (شکل ۳-ج) و سرسیت (شکل ۳-ح) می‌باشد.



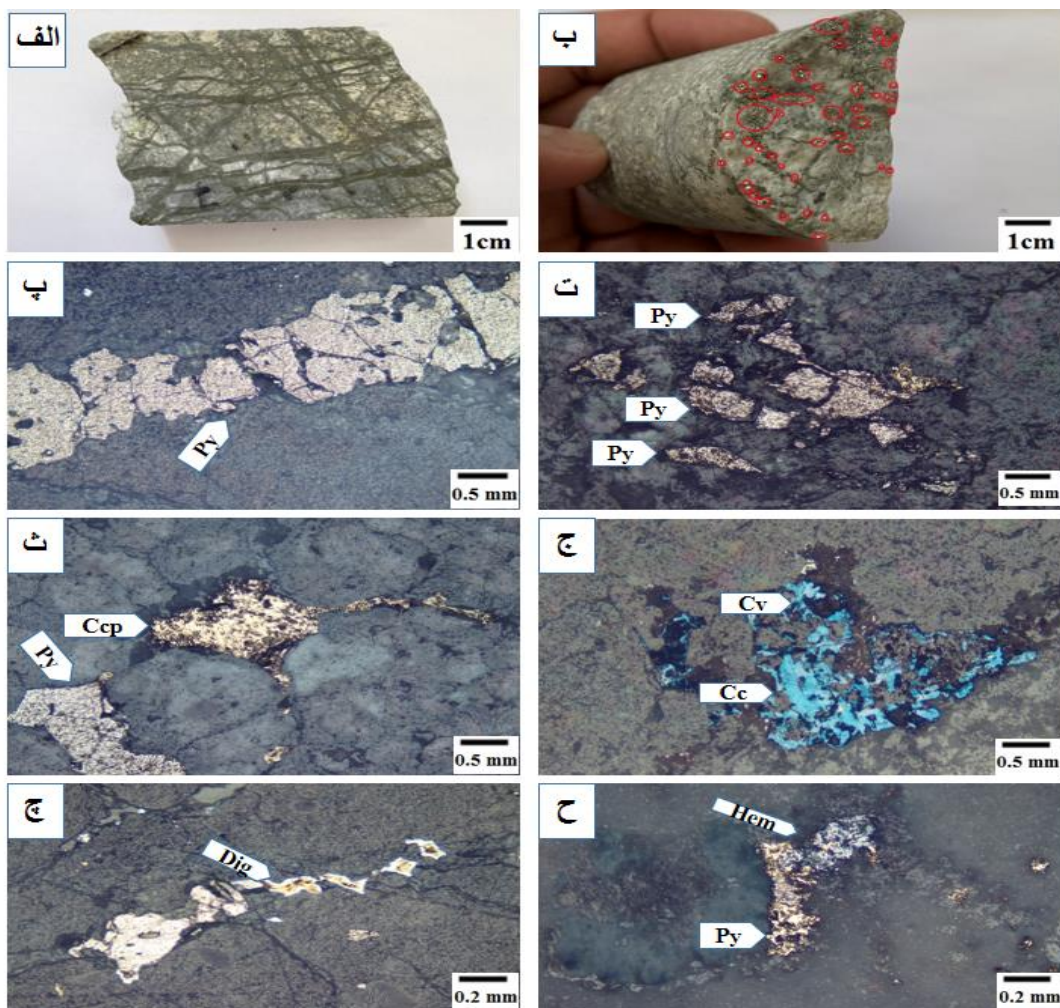
شکل ۳ تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از واحدهای سنگی منطقه. الف) نمایی از رخنمون واحد آندزیتی-بازالتی، ب) کوارتزهای ریزبلور و پلاژیوکلازهای درشت‌بلور به همراه کانی‌های اپک در واحدهای آندزیتی-بازالتی، پ) نمایی از رخنمون واحد گابرویی، ت) درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، بیوتیت و پیروکسن در واحد گابرویی، ث) نمایی از رخنمون واحد مونزودیوریتی، ج) بلورهای دگرسان پلاژیوکلاز و تشکیل کانی ثانویه کلریت در متن توده مونزودیوریت، چ) نمونه دستی از گمانه‌های حفاری مربوط به واحد مونزودیوریتی (عمق ۲۲۹ متری)، ح) تشکیل کانی ثانویه سرسیت در توده مونزودیوریت. تمامی مقاطع مربوط به نور xpl. علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از مرجع [۱۹] می‌باشند.

کانه‌زایی

شواهد صحرایی و بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که نفوذ توده‌های مونزودیوریتی و گابرویی الیگوسن در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن همراه با عملکرد گسل‌ها در شکل‌گیری کانی‌سازی موثر بوده است. با توجه به نتایج سنگ‌نگاری انجام شده بر مقاطع صیقلی تهیه شده از نمونه‌هایی از کانسنگ، توالی تشکیل کانه‌ها در رگه‌های سیلیسی دربردارنده کانه‌های سولفیدی در منطقه مجیدآباد را می‌توان بصورت (شکل ۴) در نظر گرفت. کانه‌زایی در منطقه مجیدآباد بصورت رگه- رگچه‌ای (شکل ۵- الف) و پراکنده (شکل ۵-ب) به همراه رگه‌های سیلیسی در واحدهای نفوذی و میزبان صورت گرفته است. کانه‌زایی رگه- رگچه‌ای در گسل‌ها، شکستگی‌ها و درزه‌ها رخ داده است و در آن کانی‌های سولفیدی و سیلیس در اثر نهشت مستقیم از سیال‌های گرمابی کانه‌زا تشکیل شده‌اند و کانی‌های سولفیدی حدود ۸ تا ۱۰ درصد سنگ را تشکیل می‌دهند. رگه- رگچه‌های کوارتزی در منطقه توسط واحد مونزودیوریتی میزبانی می‌گردند. کانه‌زایی در منطقه در دو مرحله درون‌زاد و برون‌زاد رخ داده است. در مرحله درون‌زاد، فعالیت محلول‌های گرمابی سبب تشکیل رگه- رگچه‌های کوارتزی، گسترش پهنه‌های دگرسانی و کانی‌سازی سولفیدی (پیریت و کالکوپیریت) شده است (شکل ۵-پ،ت،ث). در مرحله برون‌زاد، واکنش سیال‌های جوی فرورو با کانی‌های سولفیدی اولیه سبب تشکیل کانی‌های ثانویه مانند سولفیدهای ثانویه مس (کالکوسیت، کولیت و دیجنیت) (شکل ۵-ج،چ)، اکسید و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت و لیمونیت) (شکل ۵-ح) و کربنات مس (مالاکیت) شده است.

Mineral	Hypogene mineralization stag	Supergene mineralization stag
Quartz		
Pyrite		
Chalcopyrite		
Calcite		
Chalcocite		
Covellite		
Digenite		
Hematite		
Limonite		
Goethite		
Jarosite		
Malachite		

شکل ۴ توالی پاراژنتیکی تشکیل کانی‌ها در منطقه مجیدآباد



شکل ۵. تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی از کانی‌سازی در منطقه مجیدآباد. الف) نمونه دستی از کانی‌زایی سولفیدی پیریت و کالکوپیریت در ارتباط با رگچه‌های استوک‌ورکی کوارتز (عمق ۲۵۹ متری)، ب) نمونه دستی از کانی‌زایی سولفیدی پیریت و کالکوپیریت بصورت افشان و پراکنده در توده مونزودیوریتی (عمق ۶۳ متری)، پ) تشکیل پیریت بصورت رگه‌ای در امتداد رگه‌های استوک‌ورکی کوارتز، ت) تشکیل پیریت بصورت منفرد و پراکنده، ث) بلورهای بی‌شکل پیریت به همراه کالکوپیریت، ج) تشکیل کانی‌های ثانویه مس (کالکوسیت و کوولیت حاصل از دگرسانی کالکوپیریت)، چ) تبدیل کالکوپیریت از حاشیه به کانی ثانویه دیجنیت، ح) تشکیل کانی هماتیت حاصل از دگرسانی پیریت. تمامی مقاطع مربوط به نور ppl. علایم اختصاری کانی‌ها برگرفته از مرجع [۱۹] می‌باشند.

زمین‌شیمی

زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی

امروزه از شیمی عناصر برای رده‌بندی سنگ‌ها، رسم نمودارهای تغییرات زمین‌شیمیایی و بعنوان وسیله‌ای برای مقایسه ترکیب‌های سنگی، که بطور تجربی تعیین شده‌اند و در نتیجه تعیین شرایط تشکیل استفاده می‌شود. نتایج تجزیه شیمیایی توده‌های نفوذی و آتشفشانی در جدول ۱ و ۲ آورده شده‌اند.

جدول ۱ نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی، فرعی و کمیاب برخی نمونه‌های برداشت شده از توده‌های نفوذی (اکسیدها برحسب wt% و

عناصر برحسب ppm)

Sample. No	MA7 133.7	MAJ 162	MAJ7 168.1	MAJ7 195.3	MAJ7 217	MAJ7 218	MAJ8 132.5	MAJ8 149.7	MAJ8 215	MAJ11 224	MAJ11 229.3
SiO ₂	۵۷/۷	۶۴/۴۱	۶۴/۵۷	۶۸/۰۲	۵۹/۹۵	۶۰/۳۱	۵۷/۵۴	۵۶/۸۹	۵۹/۸۸	۶۱/۰۲	۶۴/۳۸
Al ₂ O ₃	۱۵/۹۳	۱۴/۶۴	۱۴/۵۱	۱۳/۲۵	۱۶/۴۹	۱۵/۶۸	۱۷/۳۳	۱۶/۶۴	۱۵/۴۹	۱۵/۱۸	۱۴/۲۱
CaO	۴/۲۳	۲/۶۱	۲/۸۱	۱/۵۷	۲/۹۶	۳/۴۲	۲/۶۵	۵/۰۴	۳/۲۸	۴/۱۲	۳/۰۵
Fe ₂ O ₃	۲/۱۳	۱/۸۱	۱/۷۸	۱/۸۸	۲/۱۰	۱/۹۷	۲/۵۰	۱/۴۹	۲/۰۳	۱/۹۱	۱/۶۸
FeO	۳/۷۳	۳/۱۵	۳/۲۶	۳/۵۰	۲/۸۶	۲/۶۴	۴/۵۳	۲/۶۲	۳/۱۷	۲/۸۹	۲/۴۷
Na ₂ O	۱/۴۷	۱/۵۱	۱/۲۹	۰/۷۳	۳/۸۴	۳/۵۶	۰/۵	۱/۵۱	۳/۷۶	۳	۳/۱۶
K ₂ O	۴/۱۱	۳/۷۴	۳/۵	۳/۷۱	۳/۸۴	۴/۲۶	۴/۸۱	۴/۰۸	۲/۷۱	۳/۶۵	۳/۵۶
MgO	۱/۸۲	۱/۳۹	۱/۲۶	۱/۰۷	۱/۱۹	۱/۳۲	۱/۵۴	۱/۹۵	۱/۶	۱/۰۳	۱/۰۹
MnO	۰/۱۴	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱	۰/۱	۰/۱۱	۰/۱	۰/۱۲
P ₂ O ₅	۰/۲۳	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۰۷	۰/۳	۰/۲۷	۰/۲۴	۰/۲	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۴
SO ₃	۴/۷۹	۴/۳۹	۳/۹۵	۵/۴۳	۰/۵۴	۱/۱۱	۷/۷۴	۰/۹۳	۶/۸	۳/۱۴	۲/۶۲
TiO ₂	۰/۵۸	۰/۵۱	۰/۴۷	۰/۴۳	۰/۶۱	۰/۵۷	۰/۶۱	۰/۵۷	۰/۵۲	۰/۵۸	۰/۵۳
L.O.I	۷/۱۳	۵/۲۱	۵/۵۴	۴/۷۲	۵/۲	۵/۳۲	۷/۰۶	۸/۶۳	۵/۶۵	۵/۳۴	۴/۸
sum	۱۰۳/۱	۱۰۳/۳	۱۰۲/۶	۱۰۱/۵	۱۰۰/۵	۱۰۰/۶	۱۰۲/۹	۱۰۱/۷	۱۰۵	۱۰۴/۳	۱۰۳/۵
Ag	۱/۱	۳/۲	۲	۲/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۵	۰/۱	۰/۶	۱/۴	۱/۱
As	۴۸/۹	۱۰۰	۴۵/۹	۶۵	۳۱/۷	۲۴/۹	۱۶/۳	۱۲/۱	۳۴/۴	۴۲/۸	۱۶/۴
Ba	۸۳۰	۷۴۸	۳۶۹	۴۷۱	۲۰۲۷	۷۵۷	۳۱۷	۱۴۳	۴۳۵	۱۱۶۷	۸۹۹
Be	۱/۸	۱/۷	۱/۶	۱/۹	۱/۷	۱/۷	۲/۱	۱/۹	۱/۵	۱/۷	۱/۷
Bi	۰/۳	۰/۳	۰/۲	۰/۴	۰/۱	۰/۱	۰/۸	۰/۱	۰/۷	۰/۱	۰/۱
Cd	۰/۲	۰/۵	۰/۶	۰/۸	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۵	۰/۲	۰/۴	۰/۲
Ce	۳۴	۲۹	۲۶	۳۳	۹۲	۶۸	۳۵	۴۱	۲۸	۷۸	۸۲
Co	۱۱/۴	۹/۹	۱۲/۵	۱۳	۸/۲	۱۰/۴	۱۴/۱	۸/۲	۹/۸	۱۲/۲	۱۲/۲
Cr	۲۵	۲۱	۱۵	۵۵	۱۴	۱۵	۱۲	۱۴	۱۹	۲۳	۲۲
Cs	۵/۴	۴/۴	۵/۶	۴/۵	۸/۹	۸	۶/۳	۹	۲۶	۷/۲	۷
Cu	۱۵۰۷	۳۳۸۶	۳۳۶۷	۵۳۳۰	۴۴۴	۱۷۴۶	۵۳۸	۴۳۵	۵۶۴	۴۲۰۰	۳۴۹۵
Dy	۲/۶	۲/۴	۲	۲	۳	۲/۹	۲/۶	۲/۵	۲/۱	۳/۱	۲/۸
Er	۱/۳	۱/۳	۱	۱	۱/۶	۱/۵	۱/۴	۱/۴	۱/۱	۱/۶	۱/۵
Eu	۱/۲۶	۱	۰/۷۴	۰/۸۳	۲/۰۵	۱/۴۶	۱/۰۷	۱/۰۷	۰/۹۷	۱/۶۴	۱/۵۴
Gd	۳/۲۳	۲/۷۳	۲/۴۲	۲/۴۱	۴/۴۲	۳/۹۲	۳/۲۸	۳/۲۴	۲/۵۵	۴/۲۵	۴/۲۲
Hf	۰/۸	۰/۶	۰/۶	۰/۵	۱	۰/۶	۰/۹	۱	۰/۷	۰/۷	۰/۶
La	۲۳	۲۰	۱۹	۲۲	۵۲	۳۹	۲۴	۲۸	۲۱	۴۸	۵۱
Li	۱۸	۲۲	۱۷	۲۲	۵	۴	۲۱	۱۹	۱۹	۱۱	۹
Lu	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۲

Mo	۱۹/۲	۲۷/۴	۱۹/۹	۹۴/۵	۱۲/۲	۱۲/۴	۳۷/۵	۴۰/۳	۶۴/۳	۱۷/۶	۱۶/۹
Nb	۲۱	۱۸/۳	۱۶/۴	۱۴/۵	۳۱/۷	۲۶/۲	۲۵/۴	۲۸/۸	۲۰/۸	۲۷/۵	۲۴/۶
Nd	۱۷/۵	۱۵/۷	۱۵/۵	۱۸/۳	۳۷/۷	۲۹	۱۷/۴	۲۲	۱۵/۵	۳۱/۵	۳۴/۲
Ni	۴	۹	۶	۱۹	۵	۵	۷	۳	۶	۶	۷
P	۸۸۰	۷۴۴	۵۸۲	۵۵۵	۱۱۴۵	۹۸۰	۹۰۳	۸۳۱	۸۷۷	۱۰۸۸	۱۰۰۵
Pb	۳۶	۶۶	۴۵	۸۳	۲۱	۲۷۱	۷۳	۲۱	۷۵	۵۹	۶۷
Pr	۴/۳۹	۳/۶۱	۳/۷۲	۳/۸۸	۱۱/۷۳	۸/۱۷	۴/۶۲	۵/۸۸	۳/۸۶	۱۰/۵۳	۱۰/۹۱
Rb	۱۱۱	۱۰۷	۹۰	۱۲۷	۹۷	۱۰۲	۱۵۱	۱۳۹	۸۸	۱۰۲	۹۳
Sb	۱۹/۱	۶۰/۵	۳۵/۸	۵۰	۵/۹	۳۳	۸/۶	۴/۶	۵۶/۵	۱۵	۵/۳
Sc	۵/۵	۴/۸	۴	۳/۹	۶/۷	۵/۸	۶	۴/۹	۴/۶	۶/۲	۵/۲
Se	۱/۷	۹/۶	۰/۹	۳/۷	۳/۲	۲/۷	۲/۷	۹	۵/۳	۶/۶	۱۱/۴
Sm	۴	۳/۲	۲/۹	۲/۹	۶/۴	۵/۲	۳/۸	۳/۵	۲/۸	۵/۴	۵/۶
Sn	۰/۶	۱/۴	۱/۲	۳/۶	۱	۵/۹	۲	۱/۶	۲/۷	۱/۱	۱/۱
Sr	۳۴۷	۱۹۰	۱۰۴	۱۲۶	۳۴۱	۲۳۱	۲۳۲	۱۱۹	۷۱۲۸	۴۴۹	۲۴۷
Ta	۰/۹	۰/۹	۰/۷	۰/۵	۱/۳	۱/۲	۱/۳	۱/۴	۱	۱/۳	۱/۲
Tb	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۳	۰/۶	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۴	۰/۶	۰/۵
Te	۱/۷	۱/۳	۰/۸	۱/۲	۲/۱	۰/۶	۱/۱	۰/۵	۰/۷	۱/۷	۱/۳
Th	۶/۳	۶/۴	۶/۲	۵/۲	۹/۷	۸/۷	۶/۷	۶/۸	۶/۳	۷/۶	۸/۲
Ti	۳۴۴۱	۳۱۸۹	۲۶۹۸	۲۴۵۸	۴۲۱۰	۳۵۷۳	۳۵۲۴	۳۵۸۳	۲۶۸۶	۳۷۹۴	۳۵۱۹
Tl	۰/۸	۱/۱	۰/۸	۱/۹	۰/۷	۰/۷	۱/۷	۱/۳	۱/۲	۰/۴	۰/۴
Tm	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
U	۱/۸	۱/۲	۱/۳	۱	۲	۱/۲	۱/۸	۱/۸	۱/۴	۱/۵	۱/۵
V	۱۱۲	۱۰۸	۸۵	۹۷	۱۱۸	۱۰۵	۱۰۶	۱۰۴	۷۸	۱۱۶	۹۸
W	۱	۲/۴	۴/۶	۳/۲	۱/۱	۱	۳/۱	۱/۶	۴/۵	۳/۴	۳/۱
Y	۱۵	۱۴/۱	۱۱/۹	۱۱/۶	۱۶/۳	۱۶	۱۶/۸	۱۴/۱	۱۲/۳	۱۷/۵	۱۴/۹
Yb	۱/۲۶	۱/۱۴	۰/۹۳	۰/۸۸	۱/۳۴	۱/۲۱	۱/۴۴	۱/۱۷	۱/۰۷	۱/۳۶	۱/۱۳
Zn	۱۰۲	۲۹۹	۳۶۱	۱۹۰	۸۵	۸۸	۹۲	۲۳۵	۱۲۷	۱۱۸	۸۷
Zr	۲۶	۲۳	۲۳	۱۹	۳۱	۲۰	۲۹	۳۰	۲۶	۱۴	۱۴
*Eu	۱/۰۷۲	۱/۰۳۴	۰/۸۵۴	۰/۹۶	۱/۱۷۹	۰/۹۸۹	۰/۹۲۷	۰/۹۷۲	۱/۱۱	۱/۰۴۷	۰/۹۶۹

جدول ۲. نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی، فرعی و کمیاب برخی نمونه‌های برداشت شده از توده‌های مافیک و آتشفشانی (اکسیدها

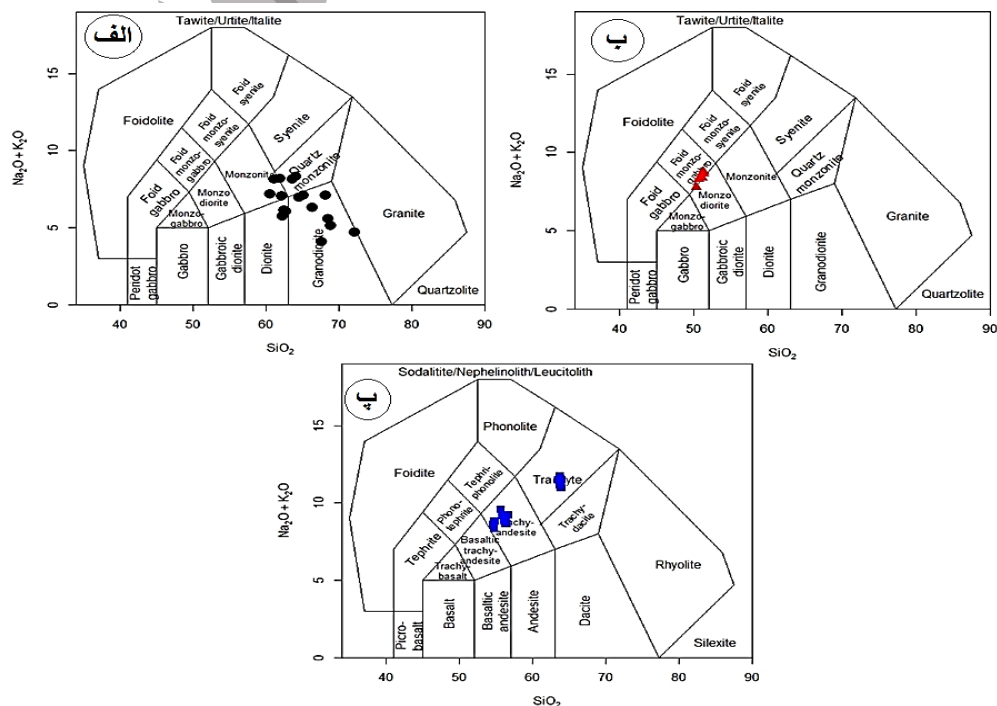
برحسب wt% و عناصر برحسب ppm)

Sample. No	GAB-02	GAB-08	GAB-14	GAB-16	GAB-21	MAF-32	MAF-03	MAF-04	MAF-08	MAF-12	MAF-18
SiO ₂	۴۹/۰۶	۴۹/۷۲	۵۰/۱۲	۴۸/۸۲	۵۰/۸۲	۵۲/۶۲	۵۳/۱۲	۵۲/۸۸	۵۳/۲۱	۵۴/۱۲	۶۲/۶۵
Al ₂ O ₃	۱۸/۲۶	۱۸/۱۲	۱۸/۰۸	۱۸/۳۴	۱۸/۰۲	۱۷/۸۳	۱۷/۸۲	۱۸/۰۱	۱۷/۶۸	۱۷/۵۲	۱۸/۸۱

CaO	۸/۲	۸/۰۲	۷/۹۸	۸/۳۳	۷/۹۱	۶/۲۲	۶/۱۳	۶/۱۲	۶/۲۱	۶/۱۲	۱/۰۸
Fe ₂ O ₃	۳/۲۱	۳/۲۸	۳/۳۵	۳/۲۲	۳/۵۹	۲/۷۶	۳/۱۳	۲/۸۹	۲/۹۲	۳/۰۷	۱/۸۱
FeO	۴/۵۱	۴/۵۵	۴/۴۸	۴/۷۹	۴/۶۴	۳/۱۴	۳/۲۰	۳/۰۹	۳/۱۷	۳/۱۸	۱/۲۹
MgO	۳/۶۸	۳/۵۸	۳/۴۲	۳/۸۵	۳/۴۸	۱/۱۳	۱/۱۴	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۰۸	۰/۲۸
Na ₂ O	۴/۳۹	۴/۴۲	۴/۶۲	۴/۱۲	۴/۶۸	۲/۹	۳/۰۲	۳/۲۴	۳/۰۲	۳/۲۴	۵/۷۴
K ₂ O	۳/۶۵	۳/۷۲	۳/۸۱	۳/۴۲	۴/۰۱	۵/۱۶	۶/۱۲	۵/۴۵	۵/۴۴	۵/۵۶	۵/۶۲
TiO ₂	۱/۰۸	۱/۰۶	۱/۰۲	۱/۲۴	۱/۰۴	۰/۸۱	۰/۸۸	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۷۲	۰/۳۸
MnO	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۲۶	۰/۲۱	۰/۳۱	۰/۱۴	۰/۲۴	۰/۱۸	۰/۲۴	۰/۳۲	۰/۲۴
P ₂ O ₅	۰/۱۶	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۶۸	۰/۶۳	۰/۵۸	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۶۶	۰/۶۱	۰/۳۲
L.O.I	۲/۴۳	۲/۳۲	۱/۲۴	۱/۶۸	۱/۰۲	۶/۱۶	۳/۴۲	۵/۰۲	۴/۸۲	۴/۱۲	۱/۳۲
Sum	۹۹/۷۶	۹۹/۴۱	۹۹/۴۸	۹۹/۲۳	۹۹/۹۹	۹۹/۸۰	۹۹/۱۹	۹۹/۷۰	۹۹/۶۹	۹۹/۹۹	۹۹/۶۸
Ba	۲۴۹	۲۴۴	۲۴۲	۲۳۹	۲۴۱	۱۳۴۸	۱۳۲۴	۱۲۸۲	۱۲۹۲	۱۳۴۵	۶۱۳
Ce	۴۰/۳	۴۰/۴	۴۱/۲	۳۹/۸	۴۲/۱	۴۴/۲	۴۴/۶	۴۵/۴	۴۷/۴	۴۸/۲	۶۴
Co	۱۵/۳	۱۵/۱	۱۵/۴	۱۶/۲	۱۶/۴	۱۵/۸	۱۶/۱	۱۵/۶	۱۵/۹	۱۶/۶	۱۷/۱
Cr	۱۳۳/۱	۱۳۲/۱	۱۳۰/۲	۱۲۸/۶	۱۲۹/۴	۱۴۵/۲	۱۷/۴	۱۵/۳	۱۸/۲	۱۵/۴	۱۸/۲
Cs	۸/۸	۸/۴	۸/۲	۷/۸	۸/۱	۵/۵	۵/۴	۵/۸	۵/۷	۶/۱	۵/۸
Cu	۳۳	۳۸	۴۲	۴۸	۳۶	۲۳۱	۲۴۴	۲۳۲	۲۰۸	۲۴۴	۲۴۷
Dy	۸/۳	۸/۲	۸/۱	۷/۸	۸/۴	۳/۲۵	۳/۲۲	۳/۱۶	۳/۴۴	۳/۱۲	۳/۲۶
Er	۱/۴	۱/۳	۱/۴	۱/۲	۱/۳	۱/۷۳	۱/۶۸	۱/۸۲	۱/۶۴	۱/۷۶	۱/۷۸
Eu	۱/۶	۱/۶۸	۱/۷۲	۱/۵۸	۱/۶۶	۱/۶۲	۱/۶۸	۱/۵۸	۱/۶۶	۱/۵۴	۱/۶۲
Ga	۲۴/۱	۲۳/۸	۲۴/۶	۲۳/۲	۲۴/۴	۱۹/۲	۱۸/۸	۱۹/۴	۱۸/۹۸	۱۸/۶۴	۱۸/۹۴
Gd	۳/۲	۳/۲۴	۳/۳۴	۳/۳۶	۳/۱۲	۳/۹۹	۳/۹۲	۴/۰۲	۳/۸۹	۳/۹۲	۴/۰۴
Ge	۲/۸	۲/۷	۲/۶	۲/۸	۲/۴	۳/۲	۳/۱	۳/۳	۳/۱	۳/۳	۳/۱
Hf	۱۰/۶	۱۰/۵۸	۱۰/۶۶	۱۰/۷۴	۱۰/۴۸	۱/۷۳	۱/۷۲	۱/۶۸	۱/۷۴	۱/۷۶	۱/۷۵
Ho	۰/۷	۰/۷۲	۰/۷۴	۰/۶۸	۰/۷۴	۰/۸۸	۰/۸۶	۰/۸۴	۰/۹۲	۰/۹۱	۰/۸۴
La	۱۷/۲	۱۷/۴	۱۷/۵	۱۶/۸	۱۷	۲۰	۱۹/۸	۱۹/۶	۲۰/۴	۲۰/۲	۱۸/۸
Li	۳۴/۱	۳۳/۸	۳۴/۲	۳۳/۶	۳۴/۴	۹	۹/۴	۱۰/۱	۹/۸	۹/۶	۹/۲
Lu	۰/۳	۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۲۸	۰/۲۶	۰/۳۲	۰/۲۶	۰/۲۸	۰/۳۱
Mo	۳۳/۳	۳۲/۴	۳۳	۳۵	۲۸	۱/۰۲	۱/۰۴	۱/۰۲	۰/۹۸	۱/۰۲	۱/۰۳
Nb	۳۰/۳	۳۰/۴	۲۹/۸	۳۱/۲	۲۹/۶	۱۴/۷	۱۴/۴	۱۴/۶	۱۴/۸	۱۵/۲	۱۴/۲
Nd	۳۹/۲	۳۹/۶	۴۰/۱	۳۸/۹	۴۰/۲	۲۴/۳	۱۳/۸	۲۴/۴	۲۴/۸	۲۵/۱	۲۴/۲
Ni	۵۸/۵	۵۷/۸	۵۸/۲	۵۸/۶	۵۶/۴	۱۴	۱۵/۲	۱۶/۱	۱۴/۲	۱۵/۴	۱۴/۸
Pb	۲۹۹/۵	۲۸۶/۴	۲۹۰/۲	۲۸۸/۶	۲۹۲/۶	۴۶/۲	۳۸/۳	۴۲/۴	۴۱/۴	۳۲/۲	۴۹/۱
Pr	۴/۵	۴/۴۸	۴/۵۲	۴/۴۴	۴/۶۱	۵/۶۵	۵/۴۸	۵/۶۲	۵/۷۸	۵/۶۸	۵/۶۲
Rb	۱۱۷/۷	۱۱۸/۴	۱۲۰/۴	۱۱۶/۲	۱۱۷/۴	۱۲۱	۱۲۴/۲	۱۲۶/۴	۱۲۵/۳	۱۲۴/۸	۱۲۰/۸
Sb	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۵	۰/۵	۰/۴	۳/۹	۳/۸	۳/۷	۴/۱	۳/۶	۴/۱
Sc	۳۴/۳	۳۳/۸	۳۵/۳	۳۶/۲	۳۴/۱	۹/۶	۸/۹	۹/۲	۸/۸	۹/۷	۹/۸

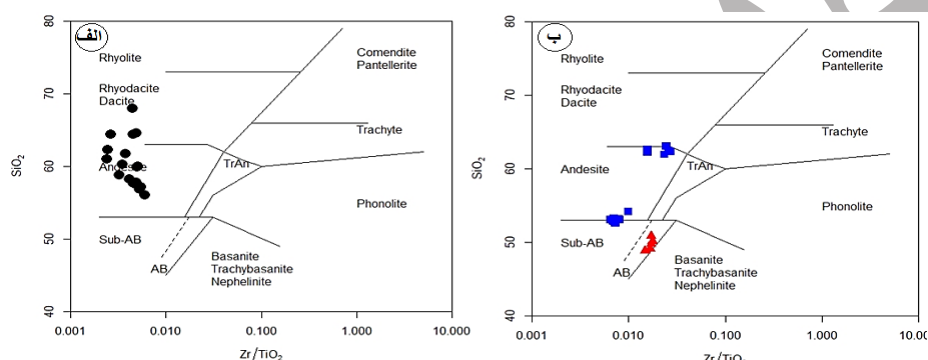
Se	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۱	۰/۲	۰/۴	۰/۳	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۴
Sm	۶/۷	۶/۶۶	۶/۵۴	۶/۸۲	۶/۷۴	۴/۷۱	۴/۶۸	۴/۷۴	۴/۵۸	۴/۶۸	۴/۶۹
Sn	۳/۵	۳/۲	۳/۴	۳/۳	۳/۶	۱/۴	۱/۲	۱/۳	۱/۱	۱/۳	۱/۲
Sr	۲۹۸/۸	۲۹۵/۲	۳۰۰/۲	۲۹۴/۶	۲۹۲/۴	۳۷۷/۴	۳۸۲/۶	۳۷۵/۳	۳۷۷/۲	۳۸۴/۵	۳۷۰/۲
Ta	۰/۷	۰/۶۸	۰/۷۲	۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۶۸	۰/۶۵	۰/۶۸	۰/۶۶	۰/۶۹	۰/۶۶
Tb	۰/۵	۰/۵۴	۰/۵۶	۰/۵۲	۰/۵۴	۰/۵۶	۰/۵۸	۰/۵۵	۰/۵۷	۰/۵۹	۰/۵۶
Te	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۲۹	۰/۳۴	۰/۲۸
Th	۱۵/۳	۱۴/۸	۱۴/۶	۱۳/۲	۱۴/۱	۶/۱۷	۶/۱۴	۵/۸۲	۶/۱۴	۶/۰۲	۵/۹۸
Tl	۱	۰/۹۸	۰/۹۴	۱/۰۲	۱/۰۴	۰/۶۵	۰/۶۴	۰/۶۶	۰/۶۳	۰/۶۱	۰/۶۶
Tm	۰/۳	۰/۳۲	۰/۲۹	۰/۳۳	۰/۳۲	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۲۳	۰/۲۲
U	۳	۲/۸	۳/۲	۳/۱	۳/۴	۲/۴	۲/۶	۲/۲	۲/۴	۲/۵	۲/۴
V	۲۴۷/۳	۲۴۵/۴	۲۴۹/۶	۲۴۸/۴	۲۵۰/۲	۱۰۷/۸	۱۰۸/۲	۱۰۶/۸	۱۱۰/۲	۱۱۲/۸	۱۱۳/۴
Y	۳۲/۸	۳۲/۴	۳۱/۸	۳۳/۱	۳۱/۹	۱۴/۲	۱۴/۳	۱۳/۹	۱۴/۱	۱۴/۲	۱۳/۸
Yb	۳/۷	۳/۶	۳/۸	۳/۵	۳/۷	۱/۴	۱/۴	۱/۳	۱/۵	۱/۶	۱/۲
Zn	۱۰۲	۱۰۴	۱۰۳	۱۰۱	۹۸	۶۸	۶۵	۶۸	۶۵	۶۲	۶۹
Zr	۱۷۹/۴	۱۸۱/۲	۱۷۸/۹	۱۸۳/۲	۱۷۶/۸	۵۸/۶	۶۸/۴	۵۸/۲	۵۹/۶	۷۱/۴	۵۹/۴
*Eu	۱/۰۵۷	۱/۱۰۶	۱/۱۲۵	۱/۰۰۹	۱/۱۰۷	۱/۱۴۳	۱/۱۹۹	۱/۱۰۷	۱/۲۰۲	۱/۰۹۹	۱/۱۳۸

برای نام‌گذاری سنگ‌های آذرین نفوذی و آتشفشانی (براساس اکسیدها)، از نمودار $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ در مقابل SiO_2 [۲۰] و Zr/TiO_2 در مقابل SiO_2 [۲۱] استفاده گردید. براساس نمودار پیشنهادی [۲۰]، توده‌های نفوذی فلسیک در منطقه در محدوده گرانودیوریت، دیوریت، کوارتز مونزونیت و مونزونیت قرار می‌گیرند (شکل ۶-الف). همچنین سنگ‌های مافیک ترکیب مونزوگابروی (شکل ۶-ب) و سنگ‌های آتشفشانی ترکیب تراکیتی تا تراکی‌اندزیتی دارند (شکل ۶-پ).



شکل ۶ طبقه‌بندی سنگ‌های آذرین با استفاده از نمودار $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ در مقابل SiO_2 [۲۰]. الف) توده نفوذی فلسیک، ب) توده نفوذی مافیک و پ) سنگ‌های آتشفشانی (مربع آبی: سنگ‌های آتشفشانی، مثلث قرمز: توده مافیک (گابرو))

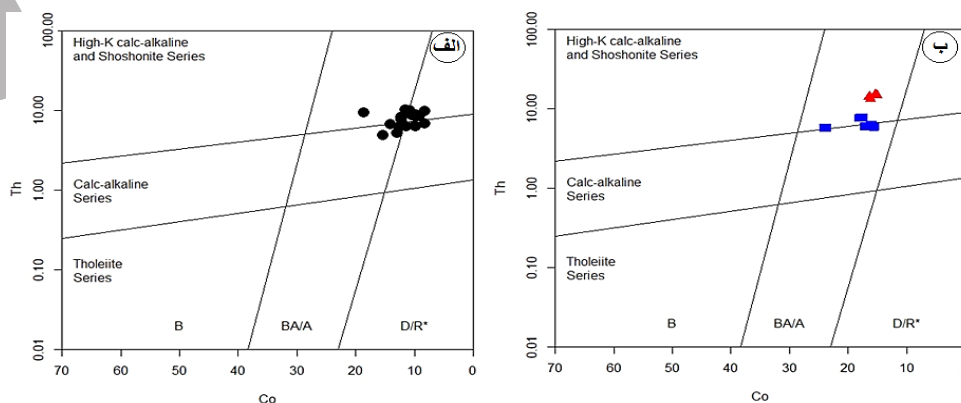
براساس نمودار پیشنهادی [۲۱]، ترکیب شیمیایی توده نفوذی فلسیک بیشتر در محدوده آندزیت و به مقدار کمتر در محدوده داسیت و ریوداسیت قرار می‌گیرد که معادل درونی آنها بترتیب شامل دیوریت، کوآرتزدیوریت و گرانودیوریت می‌باشد (شکل ۷-الف). ترکیب شیمیایی توده نفوذی مافیک در محدوده آلکالی‌بازالت که معادل بیرونی گابرو است، قرار می‌گیرد. همچنین ترکیب سنگ‌های آتشفشانی اکثریت در محدوده آندزیت قرار می‌گیرد (شکل ۷-ب).



شکل ۷ طبقه‌بندی سنگ‌های منطقه مورد مطالعه با استفاده از نمودار SiO_2 در مقابل Zr/TiO_2 [۲۱]. الف) توده نفوذی فلسیک، ب) توده نفوذی مافیک و سنگ‌های آتشفشانی (مربع آبی: سنگ‌های آتشفشانی، مثلث قرمز: توده مافیک (گابرو))

تعیین سری ماگمایی

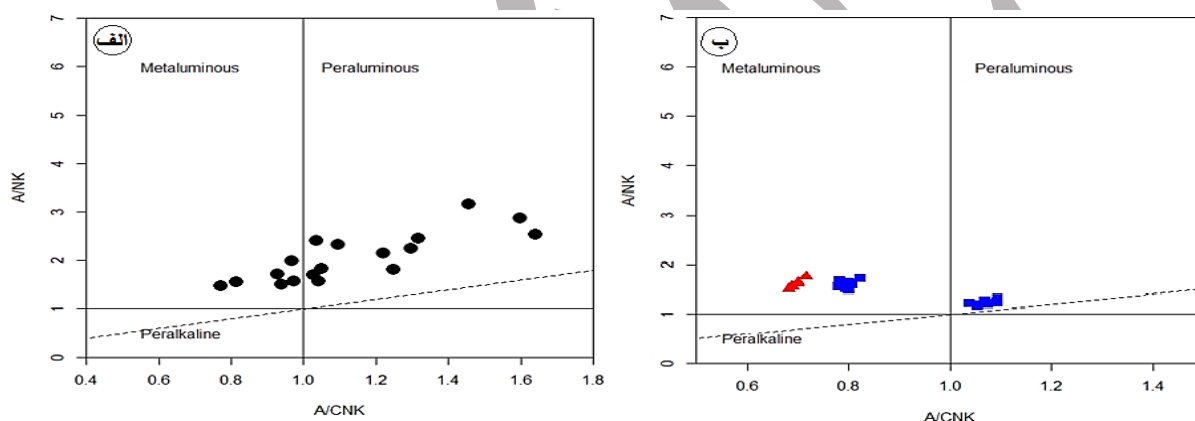
به دلیل این که عناصر آلکالن در طول فرآیندهای دگرسانی ممکن است از سنگ خارج شوند، از نمودارهای عناصر کمیاب غیرمتحرک استفاده شده است. برای تعیین سری ماگمایی سنگ‌های نفوذی و آتشفشانی از نمودار Co-Th [۲۲] استفاده شده است. توده‌های نفوذی مونزودیوریتی (شکل ۸-الف)، توده‌های مافیک و سنگ‌های آتشفشانی (شکل ۸-ب) در محدوده کالک‌آلکالن پتاسیم بالا و شوشونیت قرار می‌گیرند.



شکل ۸ نمودار طبقه‌بندی براساس Th در مقابل Co [۲۲]. الف) توده نفوذی فلسیک، ب) توده نفوذی مافیک و سنگ‌های آتشفشانی (مربع آبی: سنگ‌های آتشفشانی، مثلث قرمز: توده مافیک (گابرو))

تعیین ضریب اشباع از آلومین

رده‌بندی‌های مختلفی تاکنون به منظور تعیین مقدار آلومینیوم در سنگ‌های آذرین ارائه شده است. یکی از نمودارهای مفید برای تعیین مقدار آلومین سنگ‌ها، نمودار [۲۳] است. سنگ‌های آذرین بر اساس شاخص اشباع از آلومینیوم به سه گروه پراآلومینوس، متاآلومینوس و پراآلکالن تقسیم می‌شوند. مبنای این تقسیم‌بندی بر اساس مقدار مولی CaO ، Na_2O ، K_2O و Al_2O_3 استوار است. در این نمودار محور X بر اساس $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ و محور Y بر اساس $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ می‌باشد. طبق این نمودار توده نفوذی فلسیک (شکل ۹-الف)، توده مافیک و سنگ‌های ولکانیک (شکل ۹-ب) در محدوده متاآلومینوس و پراآلومینوس واقع می‌شوند.

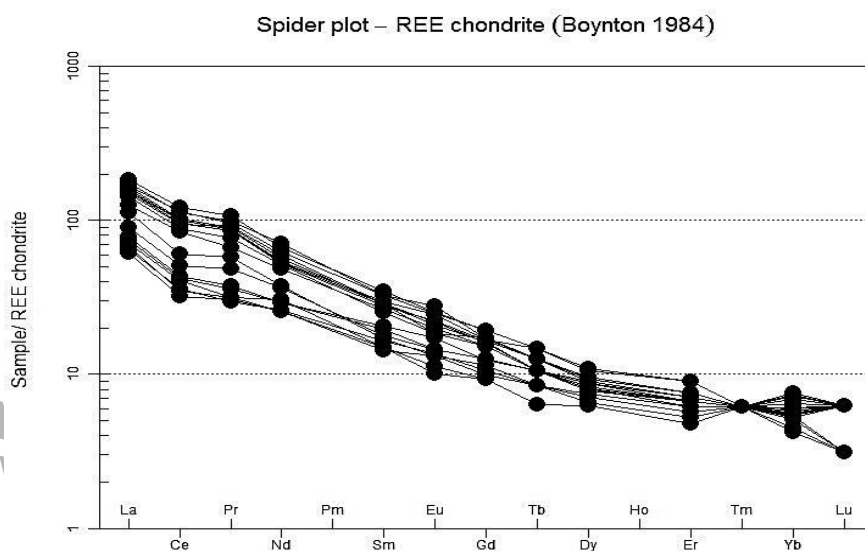


شکل ۹ نمودار طبقه‌بندی براساس A/NK در مقابل A/CNK [۲۳]. الف) توده نفوذی فلسیک، ب) توده نفوذی مافیک و سنگ‌های آتشفشانی. اکثر نمونه‌ها در محدوده متاآلومینوس و پراآلومینوس قرار می‌گیرند (مربع آبی: سنگ‌های آتشفشانی، مثلث قرمز: توده مافیک (گابرو))

نمودار عنکبوتی بهنجار شده نسبت به کندریت توده نفوذی مونزودیوریتی، توده مافیک و سنگ‌های آتشفشانی

در این نمودار، الگوی تغییرات عناصر کمیاب توده نفوذی مونزودیوریتی بصورت موازی می‌باشد (شکل ۱۰). مطابق این الگو، اگر یک مجموعه از سنگ‌های آذرین در اثر تحمل فرآیندهای تبلور تفریقی با یکدیگر مرتبط باشند، باید مقادیر عناصر کمیاب و نسبت‌های آنها بصورت ثابت و پیوسته در یک سری تغییر کند [۲۴]. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که عناصر خاکی کمیاب سبک (LREE) نسبت به عناصر خاکی کمیاب سنگین (HREE) غنی‌شدگی دارند. دو احتمال برای غنی‌شدگی LREE در سنگ‌های منطقه وجود دارد: ۱) LREE تا حدی ناسازگارتر از HREE هستند [۲۵] که ممکن است در اثر تحولات ماگمایی در سنگ‌های دگرسان شده منطقه متمرکز شده باشند، ۲) این سنگ‌ها در مناطق فروانش تشکیل شده

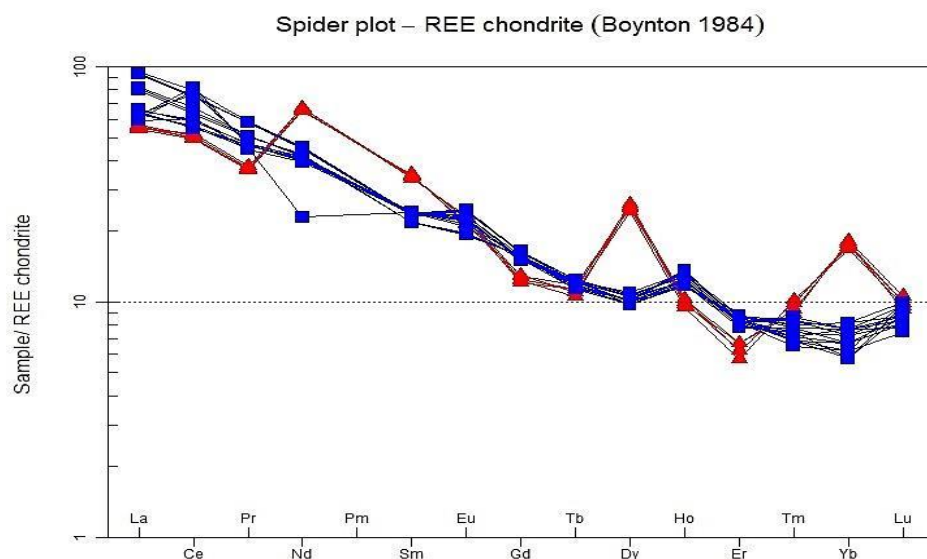
باشند [۲۶]. برای بی‌هنجاری Eu از رابطه $(Eu/Eu)^* = Eu_N / \sqrt{(Sm)_N \times (Gd)_N}$ استفاده شده که در (جدول ۱) این مقادیر محاسبه و ذکر گردیده است. بنابراین نسبت Eu/Eu^* سنجشی از بی‌هنجاری Eu بوده که اگر بزرگ‌تر از ۱ باشد بی‌هنجاری مثبت و اگر کوچک‌تر از ۱ باشد بی‌هنجاری منفی خواهد بود. نسبت Eu/Eu^* محاسبه شده برای نمونه‌های منطقه مورد مطالعه، بطور مساوی کوچک‌تر و بزرگ‌تر از ۱ است، بنابراین هم دارای بی‌هنجاری منفی و هم دارای بی‌هنجاری مثبت می‌باشند. بی‌هنجاری منفی Eu در نتیجه جدا شدن پلاژیوکلاز و یا فلدسپار پتاسیم‌دار از مذاب فلسیک چه بدلیل تفریق بلوری و چه به علت ذوب بخشی (که در آن فلدسپار در تفاله باقی می‌ماند) می‌باشد. نبود بی‌هنجاری‌های منفی و مثبت نشان دهنده این است که تبلور پلاژیوکلاز نقش مهمی در تحول ماگما ندارد و ممکن است فقط متحمل تبلور فشار بالا، قبل از جایگیری در سطوح بالاتر شده باشد [۲۷].



شکل ۱۰ نمودار بهنجار شده توده نفوذی مونزودیوریتی نسبت به کندریت [۲۸]

در نمودار عنکبوتی توده مافیک (گابرو) و سنگ‌های آتشفشانی بهنجار شده نسبت به کندریت [۲۸]، شیب از سمت عناصر خاکی کمیاب سبک به سمت عناصر خاکی کمیاب سنگین کم می‌شود (شکل ۱۱). به عبارتی در این نمودار، نمونه‌های توده مافیک (گابرو) و سنگ‌های آتشفشانی، غنی‌شدگی از LREE و تهی‌شدگی از HREE را نشان می‌دهند که می‌تواند بیانگر این باشد که سنگ مادر ماگما دارای گارنت بوده که در ذوب شرکت نکرده و عناصر خاکی کمیاب سنگین را در گوشته دیرگداز نگه داشته است [۲۹]. نسبت Eu/Eu^* محاسبه شده برای نمونه‌های منطقه مورد مطالعه در (جدول ۲) ارائه شده است و نمونه‌های مورد مطالعه بی‌هنجاری مثبت دارند. بی‌هنجاری مثبت Eu در نتیجه انباشت فلدسپار می‌باشد [۳۰]. بالا بودن نسبت LREE/HREE نشان دهنده عمق زیاد تولید ماگما، یعنی همان خاستگاه گارنت لرزولیت است. زیرا عناصر خاکی کمیاب سنگین معمولاً در شبکه روتیل، زیرکن و گارنت جای می‌گیرند. بنابراین وقتی ذوب در اعماق زیاد صورت می‌گیرد،

HREE در گارنت، روتیل و زیرکن متمرکز می‌شوند و از ورود آنها به مذاب حاصل از ذوب بخشی جلوگیری شده، در نهایت نسبت HREE/LREE در فاز مایع کاهش می‌یابد. همچنین درجات کم ذوب بخشی (کمتر از ۱۰ درصد) می‌تواند به تشکیل ماگمای بازالتی آکالن منجر شود، که یک غنی‌شدگی در الگوی عناصر خاکی کمیاب سبک (LREE) را نشان می‌دهد [۳۱]. بنابراین می‌توان گفت درجات پایین ذوب بخشی به همراه وجود گارنت، روتیل و زیرکن در منشا، از مهم‌ترین عوامل برای غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE محسوب می‌شود.



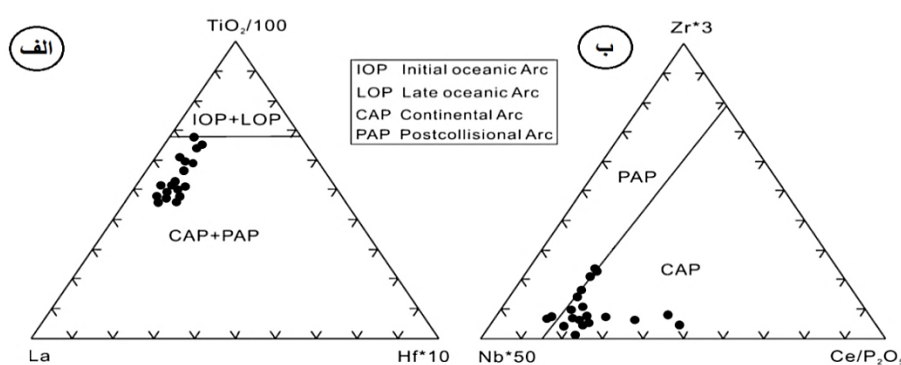
شکل ۱۱ نمودار بهنجار شده توده مافیک (گابرو) و سنگ‌های آتشفشانی نسبت به کندریت [۲۸] (مربع آبی: سنگ‌های آتشفشانی، مثلث قرمز: توده مافیک (گابرو))

تعیین جایگاه زمین‌ساختی

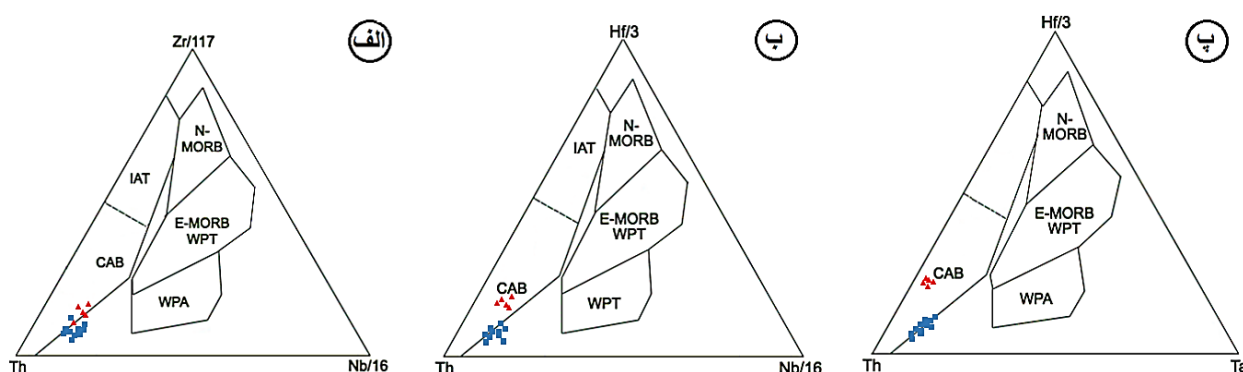
امروزه این امر پذیرفته شده است که در اکثر رژیم‌های زمین‌ساختی، ذوب بخشی مواد گوشته‌ای باعث ایجاد ماگمای اولیه با ترکیب بازیک تا فوق بازیک و فرآیندهای بعدی که شامل تبلور تفریقی، اختلاط ماگمایی و آرایش پوسته‌ای هستند، سبب ایجاد طیف وسیعی از سنگ‌های آذرین در زمین می‌گردند. خصوصیات زمین‌شیمیایی ماگماهای اولیه به عواملی از جمله ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی سنگ منشا عمیق و میزان ذوب بخشی بستگی دارد. ماگماهای اولیه در اعماق بالای ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلومتری گوشته تشکیل می‌شوند، هرچند این عمق گاهی تغییر می‌کند.

سنگ‌های پتاسیک محیط‌های زمین‌ساختی قاره‌ای و پس از برخورد، با تمرکز متوسط LREE، LILE و HFSE در بین سایر زیرگروه‌ها مشخص می‌شوند [۳۲]. کمان‌های اقیانوسی که بوسیله فروورانش یک صفحه اقیانوسی به زیر صفحه دیگر مشخص می‌شوند، معمولاً دارای تمرکز پایین LREE، LILE و HFSE می‌باشند. سنگ‌های آذرین کمان‌های اقیانوسی را می‌توان با

استفاده از نمودارهای سه‌تایی $TiO_2/100 - La - Hf \times 10$ از سنگ‌های کمان‌های قاره‌ای و کمان‌های پس از برخورد جدا کرد. در این نمودار سنگ‌های منطقه در محدوده کمان‌های قاره‌ای و کمان‌های پس از برخورد قرار می‌گیرند (شکل ۱۲-الف). برای جدا کردن سنگ‌های کمان‌های قاره‌ای از کمان‌های پس از برخورد از نمودار سه‌تایی $Zr \times 3 - Nb \times 50 - Ce/P_2O_5$ می‌توان استفاده کرد. با توجه به این نمودار اغلب نمونه‌های مورد تجزیه شیمیایی، در محدوده کمان‌های قاره‌ای قرار می‌گیرند (شکل ۱۲-ب).



شکل ۱۲ الف) نمودار سه‌تایی $TiO_2/100 - La - Hf \times 10$ برای جدایش کمان‌های اقیانوسی از کمان‌های قاره‌ای، ب) نمودار سه‌تایی $Zr \times 3 - Nb \times 50 - Ce/P_2O_5$ برای جدا کردن کمان‌های قاره‌ای از کمان‌های پس از برخورد [۳۲].
برای تعیین محیط زمین‌ساختی توده مافیک (گابرو) و سنگ‌های آتشفشانی، از نمودارهای مثلی $Hf/3-Th$ ، $Hf/3-Th-Ta$ و $Zr/117-Th-Nb/16$ استفاده شده است [۳۳]. با توجه به این نمودارها، نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده بازالت‌های کمان‌های آتشفشانی قرار می‌گیرند (شکل ۱۳).



شکل ۱۳ نمودارهای مثلی $Hf/3-Th-Ta$ ، $Hf/3-Th-Nb/16$ و $Zr/117-Th-Nb/16$ ، توده مافیک (گابرو) و سنگ‌های آتشفشانی در محدوده‌های بازالت‌های کمان‌های آتشفشانی قرار گرفته‌اند. IAT= بازالت‌های تولیتی جزایر قوسی، CAB= بازالت‌های کالک‌آلکان قوسی

قاره‌ای، WPA = بازالت‌های آلکان داخل صفحه‌ای، WPT = تولیت‌های داخل صفحه‌ای، N-MORB = بازالت‌های عادی پشته میان‌اقیانوسی، E-MORB = بازالت‌های غنی‌شده پشته میان‌اقیانوسی [۳۳]

برداشت

براساس بررسی‌های صحرایی و مطالعات میکروسکوپی واحدهای اصلی سنگی منطقه و کانی‌های تشکیل دهنده آنها عبارتند از: (۱) واحد مونزودیوریتی شامل کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز و فلدسپار آلکان همراه با کانی‌های ثانویه کلریت و سرسیت، (۲) واحد گابرویی شامل پلاژیوکلاز و پیروکسن، (۳) واحد آندزیتی-بازالتی شامل کوارتز و پلاژیوکلاز. نفوذ توده‌های مونزودیوریتی و گابرویی در سنگ‌های آتشفشانی همراه با عملکرد گسل‌ها در شکل‌گیری کانی‌سازی و دگرسانی در منطقه مجیدآباد موثر بوده است. کانه‌زایی در منطقه مجیدآباد بصورت پراکنده و رگه-رگچه‌ای در گسل‌ها، شکستگی‌ها و درزه‌ها رخ داده است و در آن کانی‌های سولفیدی و سیلیس در اثر نهشت مستقیم از سیال‌های گرمابی کانه‌زا تشکیل شده‌اند. با بررسی کانه‌ها در مقاطع صیقلی و نازک‌صیقلی، کانه‌زایی به انواع درون‌زاد و برون‌زاد قابل تقسیم است. کانه‌های درون‌زاد شامل پیریت و کالکوپریت هستند که در اثر غنی‌شدگی‌های ثانویه کانی‌های برون‌زاد کالکوسیت، کوولیت، هماتیت، لیمونیت، گوتیت و مالاکیت تشکیل شده‌اند. براساس زمین‌شیمی عناصر اصلی، فرعی و کمیاب توده‌های نفوذی و سنگ‌های آتشفشانی موجود در منطقه، ماگمای مولد آنها دارای سرشت کالک‌آلکان با پتاسیم بالا و شوشونیتی بوده و ویژگی پرآلومینوس و متآلومینوس نشان می‌دهد که بدلیل آرایش با پوسته و شکل‌گیری کانی‌های ثانویه مانند سرسیت و کانی‌های رسی در طی دگرسانی گرمابی است. الگوی تغییرات عناصر خاکی کمیاب بهنجار شده به ترکیب کندریت برای نمونه‌های سنگی منطقه مجیدآباد نشان دهنده غنی‌شدگی این سنگ‌ها از LREE و تهی‌شدگی از HREE است، که این پدیده بیانگر پیدایش آنها در پهنه‌های فروران‌ش می‌باشد. توده مونزودیوریت دارای بی‌هنجاری مثبت و منفی Eu و توده گابرویی و سنگ‌های آتشفشانی دارای بی‌هنجاری مثبت Eu هستند. رخداد بی‌هنجاری منفی Eu نشانگر تخریب پلاژیوکلاز توسط سیال‌های گرمابی دما بالا است و بی‌هنجاری‌های مثبت Eu نتیجه انباشت پلاژیوکلاز می‌باشند. برپایه نمودارهای شناسایی محیط زمین‌ساختی پیدایش ماگما، این سنگ‌ها به کمان قاره‌ای تعلق دارند.

قدردانی

نویسندگان این مقاله از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز بخاطر در اختیار گذاشتن امکانات مالی پژوهش و نیز از داوران محترم و مسئولین گرامی مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران جهت هرچه پربارتر شدن مقاله، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

- [1] Innocenti, F., Mazzuoli, R., Pasquare, G., Radicati di Brozolo, F. and Villari, L., 1982- Tertiary and quaternary volcanism of the Erzurumkars area (Eastern Turkey): geochronological data and geodynamic evolution, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 13, 223-240.
- [2] Hezarkhani, A., 2006- Petrology of the intrusive rocks within the Sungun porphyry copper deposit, Azerbaijan, Iran, *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(3), 326-340.
- [3] Dilek Y., Imamverdiyev N., Altunkaynak, S., "Geochemistry and tectonics of Cenozoic volcanism in the Lesser Caucasus (Azerbaijan) and the peri-Arabian region: Collision-induced mantle dynamics and its magmatic fingerprint", *International Geology Review* 52(2010) 536-578.
- [4] Dercourt, J.E, Zonenshain, LP, Ricou, LE, Kazmin, V. G., Le Pichon, X., Knipper, A.L., Grandjacquet, C., Sbertshikov, I.M., Geyssant, J., Lepvrier, C., Pechersky, D.H., 1986- Geological evolution of the Tethys belt from the Atlantic to the Pamirs since the Lias, *Tectonophysics*, 123(1-4): 241-315.
- [5] Alavi, M., 2007- Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. *American Journal of science*, 307(9), 1064-1095.
- [6] Jamali, H., Dilek, Y., Daliran, F., Yaghubpur, A. and Mehrabi, B., 2010- Metallogeny and tectonic evolution of the Cenozoic Ahar–Arasbaran volcanic belt, northern Iran, *International Geology Review*, 52(4-6), 608-630.
- [7] Ghorbani, M., 2013- A summary of geology of Iran, In *The Economic Geology of Iran*, Springer, Dordrecht, 45-64.
- [8] Jamali, H. & Mehrabi, B., 2015- Relationships between arc maturity and Cu–MO–Au porphyry and related epithermal mineralization at the Cenozoic Arasbaran magmatic belt. *Ore Geology Review* 31, 123–138.
- [9] Simmonds V., Calagari A. A., Kyser K., "Fluid inclusion and stable isotope studies of the Kighal porphyry Cu–Mo prospect, East- Azarbaidjan, NW Iran", *Arabian Journal of Geosciences* 8 (2015) 473-453.
- [10] Simmonds V., Moazzen M., "Re-Os dating of molybdenites from Oligocene Cu-Mo-Au mineralized veins in the Qarachilar area, Qaradagh batholith (northwest Iran): Implications for understanding Cenozoic mineralization in South Armenia, Nakhchivan, and Iran", *International Geology Review* 57 (2015) 290-304.
- [11] Calagari, A. A., 2004- Fluid inclusion studies in quartz veinlets in the porphyry copper deposit at Sungun, East-Azarbaidjan, Iran. *Journal of Asian Earth Science* 23, 179–189.

- [12] Mohamadi, M. & Borna, B., 2006- Report of Geology and Drilling in the Masjed Daghi Area (National Iranian Copper Industries Company (NICICO)).
- [13] Zarnab Company, 2007- Geology and Alteration Studies of the Haftcheshmeh Area (National Iranian Copper Industries Company (NICICO)).
- [14] Ebrahimi, S., Alirezaei, S. & Pan, Y., 2011- Geological setting, alteration, and fluid inclusion characteristics of Zaglic and Safikhanloo epithermal gold prospects, NW Iran. Geological Society, London, Special Publications 350(1), 133-147.
- [15] Alirezaei, S., Ebrahimi, S. & Pan, Y., 2008- Fluid Inclusion Characteristics of Epithermal Precious Metal Deposits in the Arasbaran Metallogenic Zone, Northwestern Iran [extended abs.], ACROFI-II, India, 1–4.
- [16] Nabavi M.H., *An introduction to the Iranian geology (in Persian)*, Geological Survey of Iran, (1976) 110p.
- [17] Babakhani, A.R., Lesquyer, J.L. and Rico, R., 1990. Geological map of Ahar quadrangle (scale 1:250,000): Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- [18] Mehrpartou M., Kh. Nazer N., “Geological map of Kaleybar (scale 1:100.000)”, Geology survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian) (1999).
- [19] Whitney D. W., Evans B. W., “*Abbreviations for names of rock forming minerals*”, American Mineralogist 95 (2010) 185-187.
- [20] Middlemost, E.A.K., 1994, Naming materials in the magma igneous system, Earth-Science Reviews 37, 215–224.
- [21] Winchester, J.A., and Floyd, P.A. (1977) Geochemical classification of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20, 325-343.
- [22] Hastie A.R., Kerr A.C., Pearce J.A., Mitchell S.F., "Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements", development of the Th-Co discrimination diagram. Journal of Petrology 48(2007) 2341-2357.
- [23] Maniar, P.D. and Piccoli, P.M., 1989. Tectonic discrimination of granitoids, Geological Society of America Bulletin. 101(5): 635-643.
- [24] Wilson, M., 1989. Igneous petrogenesis, a global tectonic approach. Chapman and Hall, 466 p.
- [25] Krauskopf, K. P. and Bird D (1976) Introduction to geochemistry. Mc Graw Hill, 788 pp.

[26] Winter, J.D. (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, NJ, 697p.

[27] Ying, J., Zhang, H., Sun, M., Tang, Y. and Zhou, X., 2007. Petrology and geochemistry of zijinshan alumin intrusives complex in shanxi Province, Western north China Craton: Implication for magma mixing of different sources in an extensional regime. *Lithos*, v. 01566, p. 1- 22.

[28] Boynton W. V., "Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson, P. (ed), *Rare Earth Element Geochemistry*", Elsevier (1984) 63-114.

[29] Rollinson, H.R. (2014) *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Routledge, London, 384 p.

[30] Jung, S., Hffer, E. and Hoernes, S., 2007. Neo-Proterozoic rift-related syenites (North Damara Belt, Namibia): Geochemical and Nd-Sr-PB-O isotope constraints for mantle sources and petrogenesis. *Lithos*, v. 96, p. 415-435.

[31] Wass, S.Y. and Roger, N.W., 1980. Mantle Metasomatism-Precursor to alkaline continental volcanism. *Geochim, Cosmochim. Acta*, v. 44, p. 1811-1823.

[32] Müller, D., Rock, N. M. S. and Groves, D. I.. 1992- Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks in different tectonic settings: a pilot study. *Mineralogy and Petrology* 46, 259–289.

[33] Wood, D. A., 1980- The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British tertiary volcanic province. *Earth Planet Sci Lett* (50), Pp. 11-30.