

خاستگاه و ویژگیهای زمین‌ساختی توده گرانیتویدی

بروجرد (باختر ایران)

نوشته: احمد احمدی خلجی*، دکتر داریوش اسماعیلی* و دکتر محمدولی ولی‌زاده*

The Source and Tectonic Characteristics of the Boroujerd Granitoid Mass (western Iran)

By: A. Ahmadi Khalaji*, Dr. D. Esmaily* & Dr. M.V. Valizadeh*

چکیده

توده گرانیتویدی بروجرد به سن ژوراسیک میانی در زون ساختاری سنندج- سیرجان قرار دارد. این توده دارای طیف ترکیبی از کوارتز دیوریت و گرانودیوریت تا مونزوگرنیت بوده که در سنگهای دگرگونی ناحیه‌ای (فیلیتهای همدان) تزریق شده است. معیارهای محاسباتی برای تمایز گرانیتویدهای کوهزایی از ناکوهزایی که بر روی پارامترهای معرفی شده انجام گرفته است، نشان می‌دهد که این توده با داشتن $R > 0$ مشخصه گرانیتویدهای کوهزایی را دارد. به عنوان مثال، ویژگیهای ژئوشیمیایی غنی شدگی از LILEs (Cs, K, Rb, U, Th) نسبت به HFSEs (Nb, Ta) و تهی شدگی از عناصر Ba, Sr, Ti, P، بالا بودن نسبتهای Th/Yb (> 5) مطابق با بالا بودن نسبتهای La/Yb (> 10 تا 100)، داشتن ویژگی مربوط به گرانیت‌های نوع I، کالکوآلکالن، پتاسیم بالا، متآلومین تا کمی پرآلومین و ... نشان می‌دهند که این توده در ارتباط با یک زون فرورانش و در موقعیت کمان آتشفشانی آن تشکیل شده است. افزون بر آن، فرایندهای آغشتگی پوسته‌ای نیز در تغییر ویژگی اولیه ماگماها که کم و بیش در مناطق فرورانش متداول است، در سنگهای این توده نقش مهمی داشته‌اند.

نمودارهای تعیین محیط زمین‌ساختی نیز نشان می‌دهد که این توده از نوع گرانیت‌های کمان آتشفشانی (VAG) است و گمان می‌رود که در پیوند با پدیده فرورانش صفحه اقیانوسی نوتیس به زیر ورقه قاره‌ای سکوی ایران حاصل شده باشد.

کلید واژه‌ها: بروجرد، ژوراسیک میانی، سنندج- سیرجان، گرانیتویدهای کوهزایی، قوس آتشفشانی، فرورانش

Abstract

Boroujerd granitoid mass belongs to Sanandaj – Sirjan zone (SSZ). It consists of granodiorites, quartz diorites and monzogranites. The country rocks into which the Boroujerd granitoid was emplaced consist of greenschist rocks of the regional metamorphism.

The statistical technique of discriminant analysis, using major element differences alone, shows that this mass has characteristics of orogenic granitoids ($R > 0$). The Boroujerd granitoid has geochemical characteristics typical of arc intrusives e.g. I-type, high-K calc-alkaline series, metaluminous to weakly peraluminous, a greater enrichment in LILEs (Cs, K, Rb, U, Th) compared to HFSEs (Nb, Ta), depletion in Sr, Ba, P and Ti relative to other trace elements. High Th/Yb (> 5) ratios correlated to high values (> 10 , up to ca. 100) for La/Yb and plot as volcanic arc granites on various discriminant diagrams. This granitoid is a typical representative of a volcanic arc environment, spatially related to an active continental margin. Crustal contamination processes provide a further complication in the interpretation of the Boroujerd rocks. The rarity of primitive magma compositions in arcs, particularly continental margin arcs, points to the important and consistent role of such processes. Probably, Boroujerd granitoid is the result of the subduction of Neo-Tethyan oceanic plate below the Iranian microcontinent.

Keywords: Boroujerd, Middle Jurassic, Sanandaj- Sirjan, Orogenic granitoids, Volcanic arc, Subduction

۱- مقدمه

این زون، مرتبط با زایش اقیانوس نوتیس است که در طی چهار مرحله انجام گرفته است (Mohajjel et al., 2003):

منطقه بروجرد، جزئی از بخش شمالی زون دگرگون‌شده سنندج- سیرجان است (شکل ۱) که تکامل زمین‌ساختی آن همانند بخشهای دیگر

رخساره شیست سبز گسترش فراوانی دارند (نبوی، ۱۳۵۵) اما در نقاطی که توده‌های نفوذی جایگزین شده‌اند، اثر گرمایی آنها به اثر گرما-جنبشی موجود افزوده شده و درجه دگرگونی بالا رفته است.

چینه‌شناسی ناحیه مورد مطالعه با میکاشیست، مرمر، متادولومیت و متاریولیت‌های پالئوزویک آغاز می‌گردد. واحد آتشفشانی - رسوبی پرمین بالایی، آهک و دولومیت‌های بلورین چرت‌دار پرموتریاس با درون لایه‌هایی از شیست‌های سبز و سپس بخش‌های سنگ‌های آتشفشانی دگرگون شده و توف، آتشفشانی - رسوبی و مرمر تریاس، واحدهای چینه‌شناسی بعدی ناحیه را تشکیل می‌دهند (رادفر، ۱۳۶۶). بالاترین بخش از ردیف دگرگونی را شیست‌های پلیتی موسوم به فیلیتهای همدان تشکیل می‌دهند که تحت تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای در حد شیست سبز قرار گرفته‌اند. نهشته‌های آهکی دگرگون شده روی این فیلیتهای، حاوی آمونیت‌هایی با سن توآرسین (اواخر ژوراسیک پیشین) می‌باشند (واعظی‌پور و اقلیمی، ۱۳۶۳). بنابراین، سن نهشته شدن فیلیتهای، تریاس پسین - ژوراسیک پیشین در نظر گرفته می‌شود (رادفر، ۱۳۶۶). مهم‌ترین رویداد زمین‌شناسی این منطقه، پیدایش توده گرانیتوئیدی در زمان ژوراسیک میانی (قادری و همکاران، ۱۳۸۳) است که در درون این فیلیتهای نفوذ کرده و دگرگونی همبری در اثر نفوذ آن به‌وقوع پیوسته است. دو نوع دگرگونی ناحیه‌ای و همبری در منطقه رخ داده است که فیلیتهای همدان حاصل دگرگونی ناحیه‌ای شیل‌های پلیتی ژوراسیک است و دگرگونی همبری با گسترش محدودتر در اثر نفوذ توده گرانیتوئیدی به‌وقوع پیوسته است. در اثر گرمای ناشی از نفوذ این توده، درجه دگرگونی تا حد رخساره پروکسن هورنفلس پیش رفته است (احمدی، ۱۳۷۸). در بخش جنوبی توده، دگرگونی همبری به دلیل گسلی بودن، ناقص یا دیده نمی‌شود (Berthier et al., 1974; Masoudi, 1997) و نوار باریکی از شیست‌های کردیریت‌دار که به اسلیت و زونهای کلریت و بیوتیت ختم می‌شود، وجود دارد. ولی در بخش شمالی توده، میگماتیت‌های تزریقی (Ashworth, 1985) و هورنفلسها و زون سیلیمانیت - پتاسیم - فلدسپار دیده می‌شوند (احمدی، ۱۳۷۸؛ Masoudi, 1997).

۳- سنگ‌شناسی

توده گرانیتوئیدی بروجرد ۱۸۰ تا ۲۰۰ کیلومتر مربع وسعت داشته و همانند بیشتر توده‌های نفوذی موجود در زون سنندج - سیرجان، دارای روند شمال باختر - جنوب خاور است (شکل ۲). از نظر سنگ‌شناسی، طیفی از خانواده گرانیتوئیدها (کوآرتزیدوریت، گرانودیوریت، مونزوگرانیت) را می‌توان در این توده یافت و یک جهت یافتگی بارز ناشی از جهت یافتگی کانیها (بوژه بیوتیت) در آنها دیده می‌شود. با توجه به شواهد کانی‌شناسی،

۱- تشکیل تریاس در تریاس ۲- فرورانش صفحه اقیانوسی تریاس در امتداد حاشیه شمال خاوری در زمان ژوراسیک - میوسن ۳- فرارانش افیولیتها در امتداد حاشیه شمال خاوری صفحه عربی در زمان کرتاسه ۴- برخورد حاشیه شمال خاوری صفحه عربی با ایران مرکزی در زمان میوسن.

از سوی دیگر (Berberian & King, 1981) وجود دگرگونی و ماگماتیسیم کالک‌آلکان در طول زون سنندج - سیرجان در زمان مزوزویک را نشانگر توسعه کمان ماگمایی در طی فرورانش از زمان تریاس به شمار می‌آورند.

در این بخش از زون سنندج - سیرجان، ساختارهای مختلف زمین‌شناسی اعم از دگرگونی، ماگمایی و کوهزایی، تحت تأثیر چندین فاز زمین‌ساختی قرار داشته‌اند که از میان آنها، رویدادهای زمین‌ساختی مرتبط با زمان مزوزویک، اهمیت بیشتری دارند. نخستین رویداد زمین‌ساختی مزوزویک در زون سنندج - سیرجان که از آن به عنوان سیمین پیشین یاد می‌شود، در اواخر تریاس میانی رخ داده است. دومین رویداد زمین‌ساختی، پیش از بازوسین بالایی (ژوراسیک میانی) رخ داده که مانند رویداد اول از نوع کوهزایی بوده و سیمین میانی نام گرفته است. این رویداد با چین‌خوردگی، جایگیری توده‌های نفوذی و دگرگونی همراه بوده است. به عقیده (Berberian, 1972) این بخش از زون سنندج - سیرجان، بیش از دیگر نقاط تحت تأثیر عملکرد کوهزایی سیمین قرار گرفته است به گونه‌ای که در اواخر ژوراسیک، باعث دگرگونی شدیدی شده است. اگرچه رویداد کوهزایی سیمین پسین را به اواخر ژوراسیک نسبت می‌دهند، ولی مطالعات اخیر بیانگر حرکتی است که طی ژوراسیک میانی در ایران رخ داده است و باید خاطر نشان کرد که روی هم رفته، ایران در تمام ژوراسیک از آرامش برخوردار نبوده است (Berberian & Nogol, 1974, Berberian & King, 1981).

توده گرانیتوئیدی بروجرد با سن ۱۷۲ تا ۱۶۹ میلیون سال که به روش U-Pb زیرکن این سنگها به‌دست آمده است (قادری و همکاران، ۱۳۸۳)، در قلمرو توده‌های نفوذی مرتبط با کوهزایی سیمین میانی قرار می‌گیرد. این توده از جهت خاستگاه و محیط زمین‌ساختی اهمیت قابل توجهی دارد. لذا در این مقاله، با استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی، سنگ‌شناسی و صحرایی به بررسی محیط زمین‌ساختی آن پرداخته می‌شود.

۲- زمین‌شناسی عمومی

بیشتر سنگ‌های برونزدیافته در زون سنندج - سیرجان مربوط به مزوزویک است و نهشته‌های مربوط به پالئوزویک به ندرت در قسمت شمال باختری و تا حدودی در قسمت جنوب خاوری، گزارش شده است (Berberian, 1977؛ سبزه‌ی، ۱۳۷۱). در این زون، سنگ‌های دگرگونی با

محاسباتی (Agrawal 1995) است که با استفاده از درصد اکسیدهای عناصر اصلی سنگ صورت می‌گیرد.

(Agrawal, 1995) با استفاده از روش تحلیل چند متغیره بر روی اکسیدهای عناصر اصلی سنگها، توانست گرانیتوئیدهای کوهزایی را از گرانیتوئیدهای ناکوهزایی تفکیک کند. معادله تفکیک خطی به دست آمده توسط وی عبارت است از:

$$D_i = B_y X_y + B_2 X_2 + \dots + B_p X_p + B_0$$

در این فرمول، D_i عدد تفکیک، B ضریب ثابت تفکیک و X درصد عناصر اصلی و B_0 عدد ثابت می‌باشد. در جدول ۲ مقادیر ثابت مذکور ارائه شده است. پس از محاسبه ضریب تفکیک (D_i) باید قانون میانگین R از طریق فرمول زیر محاسبه شود:

$$R = \frac{(D_i - C_i)}{(M_i - C_i)}$$

در این فرمول، D_i عدد تفکیک به دست آمده در مرحله اول و M_i و C_i ضرایب ثابتی هستند که برای انواع گرانیتوئیدها به دست آمده و در جدول ۲ ارائه شده‌اند. به این ترتیب اگر $R > 0$ به دست آمد، توده گرانیتوئیدی از نوع کوهزایی و اگر $R < 0$ شد، ناکوهزایی تلقی می‌شود. نتایج محاسبات انجام شده برای نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، مقادیر R برای سنگهای مورد مطالعه بزرگ‌تر از صفر و بنابراین توده گرانیتوئیدی بروجرد در ارتباط با فرایندهای کوهزایی تشکیل شده است.

همچنین (Batchelor & Bowden 1985) بر پایه تغییرات عناصر اصلی نمودار $R1-R2$ را به منظور تفکیک محیط زمین ساختمانی گرانیتوئیدها ارائه کرده‌اند. در این نمودار، گرانیتوئیدها به گروههای گوشته‌ای، پیش از برخورد، پس از برخورد، انتهای کوهزایی، ناکوهزایی، همزمان با برخورد و پس از کوهزایی تفکیک شده‌اند. در نمودار شکل ۳، بیشتر نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده ۲ یعنی در قلمرو گرانیتوئیدهای پیش از برخورد قرار می‌گیرند.

۴-۲- استفاده از عناصر فرعی

به منظور تعیین محیط زمین ساختمانی توده‌های گرانیتوئیدی، نمودارهای مختلفی بر اساس عناصر فرعی توسط محققان ارائه گردیده است. یکی از رایج‌ترین این نمودارها، نمودارهای (Pearce et al. 1984) است که در آنها گرانیتوئیدها از لحاظ جایگاه زمین ساختمانی به چهار گروه: گرانیتوئیدهای پشته میان اقیانوسی (ORG)، گرانیتوئیدهای کمان آتشفشانی (VAG)، گرانیتوئیدهای درون صفحه‌ای (WPG) و گرانیتوئیدهای همزمان با برخورد (Syn-COLG) تقسیم می‌شوند. همان‌طور که ملاحظه

این جهت‌یافتگی منشأ ماگمایی ندارد و در حالت جامد و دمای بالا، در اثر عملکردهای زمین ساختمانی حاصل شده است و می‌توان آن را در ارتباط با زونهای برشی موجود در منطقه دانست. در حاشیه شمالی این توده، پهنه‌های عظیمی به طول ۱۰ و عرض ۱/۵ کیلومتر از پگماتیت همراه با زونهایی از گرازن به وجود آمده است.

گرانودئوریتها بخش عمده توده را تشکیل داده و ترکیبی نسبتاً همگن متشکل از پلاژیوکلاز، کوارتز، بیوتیت و فلدسپار قلیایی دارند. سوگیری مشخص بیوتیتها، خردشدگی فلدسپارها و خاموشی موجی در کوارتز، نشان‌دهنده عملکرد فشارهای زمین ساختمانی بر روی این سنگهاست. کانیهای فرعی شامل آپاتیت، زیرکن و آلانیت است.

کوارتز دئوریتها غالباً ارتفاعات منطقه را تشکیل داده و با رنگ تیره‌تر و با درصدهای بالاتر پلاژیوکلاز، بیوتیت و آمفیبول از گرانودئوریتها متمایز می‌شوند. آپاتیت، اسفن و زیرکن عمده کانیهای فرعی این سنگها را تشکیل می‌دهند.

موزو گرانیتها به صورت توده‌های کوچک و با توپوگرافی پست‌تر عمدتاً در حاشیه جنوبی توده اصلی بروجرد برونزد دارند. رنگ روشن، کمبود نسبی بیوتیت و حضور گسترده پرتیت از ویژگی این نوع سنگهاست. بالاخره، دایکهای فلسیک با ترکیب آپلیتی و پگماتیتی با روند شمال باختر - جنوب خاور توده نفوذی و سنگهای میزبان را قطع کرده‌اند که در واقع نماینده فازهای پایانی فعالیت ماگمایی در منطقه هستند.

۴-۳- جایگاه زمین ساختمانی-ماگمایی

به منظور بررسی ویژگیهای ژئوشیمیایی و تعیین جایگاه زمین ساختمانی - ماگمایی توده گرانیتوئیدی بروجرد، تعداد ۳۴ نمونه از انواع سنگهای مورد مطالعه، در آزمایشگاه ALS Chemex کانادا مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفته است (جدول ۱) که با استفاده از نرم افزارهای IGPET و NEWPET پردازش گردیده و نتایج حاصل بر روی نمودارهای مختلف منتقل شده‌اند. در این اینجا سعی می‌شود تا با استفاده از ژئوشیمی عناصر اصلی و فرعی کوهزایی یا ناکوهزایی بودن این توده و محیط زمین ساختمانی استقرار آن تعیین گردد.

۴-۱- استفاده از عناصر اصلی

نخستین قدم برای مطالعه محیط زمین ساختمانی توده‌های گرانیتوئیدی، تعیین این مسئله است که تشکیل آنها در ارتباط با فرایندهای کوهزایی یا ناکوهزایی صورت گرفته است. بدین منظور، روشهای مختلفی توسط محققان ابداع شده است. یکی از روشهای جالب در این زمینه، روش

گروه III: توده‌های نفوذی کالک‌آلکانل مربوط به اواخر برخورد یا پس از برخورد که حدود ۵۰ میلیون سال پس از تزریق توده‌های نفوذی گروه II در پوسته جایگزین می‌شوند.

گروه IV: توده‌های نفوذی نیمه عمیق قلیایی پس از برخورد، که منشأ آنها از سنگ کره گوشته‌ای در مناطق برخوردی است.

توده گرانیتوئیدی بروجرد با توجه به ماهیت کالک‌آلکانل (شکل ۵) نمی‌تواند متعلق به گروه IV باشد و برای تفکیک دیگر گروه‌های مذکور، از نمودارهای ارائه شده در شکل ۶ استفاده می‌شود. در این نمودارها، سنگهای مورد مطالعه در محدوده کمان آتشفشانی (VA) یا گروه I قرار می‌گیرند که با قلمرو گرانیتوئیدیهای پیش از برخورد Batchelor and Bowden (1985) همپوشانی دارد.

علاوه بر این، تغییرات عناصر فرعی که نسبت به فراوانی آنها در کنسدریت عادی شده‌اند، به‌وضوح بی‌هنجاری منفی عناصر Nb, Ba, Sr, Ta, Ti و P که خاص توده‌های گرانیتوئیدی کالک‌آلکانل کمان می‌باشد (Sajona et al., 1996; Rogers & Hawkesworth, 1989; Floyd & Winchester, 1975) را نشان می‌دهند و LILEs مانند Cs, K, Rb, U, Th (سنگهای مورد مطالعه بی‌هنجاریهای هم مثبت و هم منفی از Th که خاص محیطهای کمان است را نشان می‌دهند) نسبت به HFSEs بویژه Nb و Ta غنی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۷). به عبارت دیگر، عناصر فرعی دارای نقاط بیشینه و کمینه‌ای هستند که اختلاف بین آنها زیاد بوده و نشانگر محیطهای در ارتباط با فرورانش می‌باشند زیرا رسوبات و مایعات همراه آنها می‌توانند باعث غنی‌شدگی غیرعادی عناصر فرعی شوند (Sajona et al., 1996; Rogers & Hawkesworth, 1989; Floyd & Winchester, 1975). بی‌هنجاری منفی Nb-Ta نیز نشانگر نقش پوسته در تولید ماگما است و شاخص مناطق مرتبط با فرورانش و حواشی فعال قاره‌ای می‌باشد (Wilson, 1989).

همچنین بالا بودن نسبتهای Th/Yb (>5) مطابق با بالا بودن نسبتهای La/Yb (>10 تا 100) نشان می‌دهند (شکل ۸) که این توده متعلق به ماگماهای فلسیک کمان قاره‌ای است (Condie, 1989) و نمودارهای Th/Ta در برابر Yb (Gorton & Schandl, 2000) و نسبت لگاریتمی Th/Yb در برابر نسبت لگاریتمی Ta/Y (Schandl & Gorton, 2002) نیز بیانگر تشکیل این توده در محدوده حاشیه فعال قاره‌ای هستند (شکل ۹ و ۱۰).

۵- بحث

به دلیل پیچیدگی زیاد تاریخچه سنگ‌شناختی گرانیتوئیدها و همچنین دشواری دستیابی به نمونه‌های گرانیتوئیدی مربوط به جایگاههای

می‌شود در نمودار Y در برابر Nb (شکل ۴)، سنگهای مورد مطالعه در محدوده مشترک VAG (گرانیتوئیدی کمان آتشفشانی) و Syn-CLOG (همزمان با برخورد) قرار می‌گیرند. برای تفکیک این دو از هم، نمودارهای دیگری معرفی شده است که در شکل ۴ ارائه گردیده و براساس آنها نمونه‌های مورد مطالعه درون قلمرو VAG و به‌ندرت در محدوده مرز بین VAG و Syn-CLOG قرار گرفته‌اند. از طرف دیگر، ویژگیهایی همچون دارا بودن بیوتیت و هورنبلند، متآلومین تا کمی پراآلومین بودن و داشتن ویژگیهای گرانیتوئیدی نوع I (احمدی و همکاران، ۱۳۸۴) از جمله شواهدی هستند که نشان می‌دهند توده گرانیتوئیدی بروجرد در چنین محیط زمین‌ساختی تشکیل شده است.

توجه به این نکته، مهم است که استفاده از نمودارهای Pearce et al. (1984) و دیگر نمودارهای ژئوشیمیایی برای تعیین محیط زمین‌ساختی گرانیتوئیدها باید با احتیاط صورت گیرد، زیرا گاهی عواملی مانند ترکیب شیمیایی سنگ منشأ و یا تحولات ماگمایی ممکن است بر آن تأثیر داشته باشند. به عنوان مثال، با توجه به مطالعات Froster et al. (1997)، نمونه‌های متعلق به کمانهای نابالغ در نیمه پایینی محدوده VAG و سربهای حد واسط (اقیانوس-قاره‌ای) در بالای محدوده VAG قرار می‌گیرند. همچنین سنگهای مربوط به ماگماتیسیم کمان نسبت به ماگماتیسیم حاصل از برخورد کمان-قاره (که نزدیک مرز Syn-COLOG واقع می‌شوند)، در بخشهای پایینی قلمرو VAG قرار می‌گیرند. قرار گرفتن نمونه‌های مورد مطالعه نزدیک مرز Syn-COLOG با مقدار Rb بالا، بیانگر نقش زیاد پوسته در فرایند تولید ماگمای اولیه است. علاوه بر این، وجود سنگهای منشأ نابالغ یا پایین بودن میزان تفریق ماگما سبب می‌شود که گرانیتوئیدهای Syn-COLOG در محدوده VAG قرار گیرند. در رژیم برخوردی کمان-قاره اگر تنشهای کششی سنگهای قدیمی کمان را تحت تاثیر قرار دهند، سنگهای حاصل ممکن است ویژگیهای محیط VAG را نشان دهند، یا زمانی که رژیم کششی به حوضه پشت کمانی انتقال یابد (درون قاره)، سنگها در محدوده WPG قرار می‌گیرند.

همچنین Harris et al. (1986) با استفاده از عناصر فرعی، توده‌های گرانیتوئیدی را از لحاظ محیط زمین‌ساختی به چهار گروه به قرار زیر تقسیم کرده‌اند:

گروه I: توده‌های نفوذی کالک‌آلکانل پیش از برخورد که در حاشیه فعال قاره‌ها و در نتیجه فرورانش صفحه اقیانوسی به زیر صفحه قاره‌ای تشکیل می‌شوند.

گروه II: توده‌های نفوذی پراآلومین همزمان با برخورد (لوکوگرانیتها) که معادل گرانیتوئیدی تیپ S (Chappell & White, 1974) بوده و از ذوب بخشی سنگهای پوسته‌ای تشکیل می‌شوند.

فاز کوهزایی سیمین میانی (آقابات، ۱۳۷۱) در طی ژوراسیک میانی حاصل شده است.

۶- نتیجه گیری

با توجه به آنچه بحث شد نتایج زیر حاصل می شود:

- معیارهای محاسباتی انجام گرفته توسط Agrawal (1995) جهت تمایز گرانیتوئیدهای کوهزایی از ناکوهزایی برای توده گرانیتوئیدی بروجرد نشان می دهد که این توده با داشتن $R > 0$ مشخصه گرانیتوئیدهای کوهزایی را دارند.

- داده های ژئوشیمیایی، کانی شناسی و صحرایی نشان می دهند که تشکیل توده گرانیتوئیدی بروجرد در ارتباط با فرورانش بوده است و علاوه بر آن فرایندهای آغشتگی پوسته ای نیز در تغییر ویژگی اولیه ماگماها که کم و بیش در مناطق فرورانش امری متداول است، نقش مهمی داشته اند.

- الگوهای REE بهنجار شده به کندریت، همانند سنگهای فلسیک کالک آلکان تشکیل شده در حاشیه های فعال قاره ای است و نمودارهای تفکیک محیطهای زمین ساختی استفاده شده نیز ارتباط محیط تشکیل توده گرانیتوئیدی مورد مطالعه را با فرورانش و کمان آتشفشانی (VAG) نشان می دهند.

- نتایج به دست آمده با دیدگاه عمومی در مورد وجود کمان ماگمایی کالک آلکان سنندج- سیرجان در حاشیه فعال ایران مرکزی در زمان مزوزویک سازگار بوده و نشان می دهد که توده گرانیتوئیدی بروجرد به احتمال در پیوند با فرورانش صفحه اقیانوسی نوتیس به زیر پوسته قاره ای سکوی ایران و به سبب فعالیت فاز کوهزایی سیمین میانی در طی زمان ژوراسیک میانی حاصل شده است.

تشکر و قدردانی

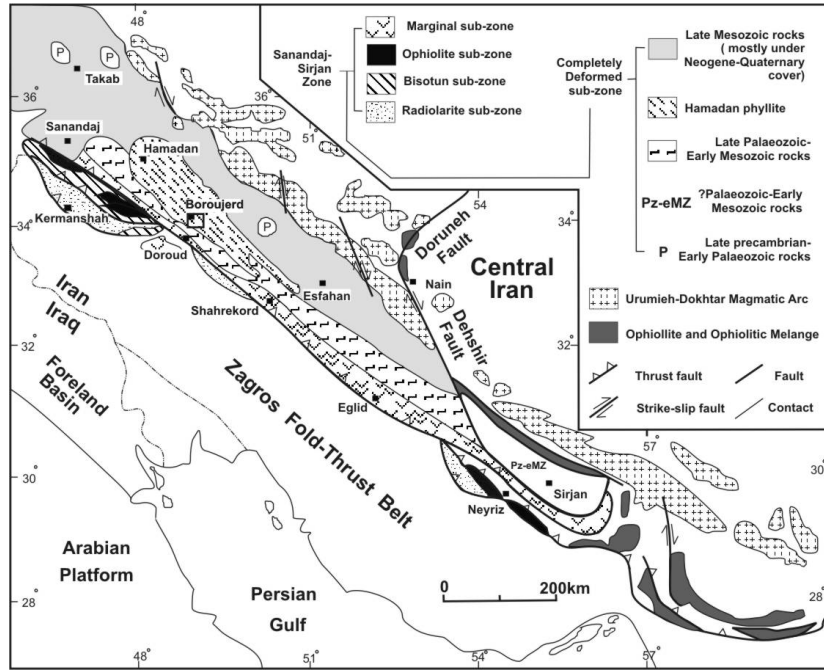
هزینه این پژوهش از محل اعتبار حوزه معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران در قالب طرح تحقیقاتی ماگماتیسیم و دگرگونی منطقه انا - بروجرد تأمین گردیده است که بدین وسیله از آن معاونت محترم تقدیر و تشکر می گردد.

زمین ساختی شناخته شده، گرانیتوئیدها نسبت به بازالتها از نظر جایگاه زمین ساختی کمتر مورد توجه قرار گرفته اند و به رغم پیشرفتهای اخیر در فهم فرایندهای ماگمایی در استفاده از ژئوشیمی عناصر، فرایندها و مواد منشأ سنگهای گرانیتوئیدی نوع I، کالک آلکان، پتاسیم بالادر هاله ای از ابهام است. با این حال برای چنین گرانیتوئیدهایی، مانند توده گرانیتوئیدی بروجرد که از نوع I (احمدی و همکاران ۱۳۸۴)، کالک آلکان (شکل ۵) و پتاسیم بالا (شکل ۱۱) می باشد، دو موقعیت زمین ساختی پیشنهاد شده است (Clemens & Roberts, 1993):

۱- موقعیت کمان قاره ای شبیه کوههای آند (Pitcher, 1987) ۲- موقعیتهای همزمان تاپس از برخورد مشابه کالدونیا (Pitcher, 1987). از سوی دیگر ویژگیهای ژئوشیمیایی ماگماهای حاشیه قاره ای یا کمان آتشفشانی نشان می دهد که آنها در طی فرایندهای متفاوتی نسبت به دیگر موقعیتهای زمین ساختی ساخته شده اند، به گونه ای که این ماگماها از LILEs غنی شدگی و از HFSEs تهی شدگی نشان می دهند. غنی شدگی از LILEs می تواند به خاطر فرورانش رسوبات باشد که البته ترکیب این رسوبات از محلی به محل دیگر ممکن است متفاوت باشد. بنابراین فهم زایش ماگما در کمانهای قاره ای مشکل است و چندین سازنده (گوه گوشته ای، پوسته اقیانوسی فرورونده، رسوبات فرورانش شده، پوسته قاره ای وغیره) و فرایند (آبزدایی صفحه فرورونده، جریان گوشته سست کره ای، ذوب بخشی با گسترشهای متفاوت، هضم پوسته ای و غیره) ممکن است در زایش طیف ترکیبی وسیع آنها دخالت نماید (Sajona et al., 1996; Rogers & Hawkesworth, 1989; Floyd & Winchester, 1975).

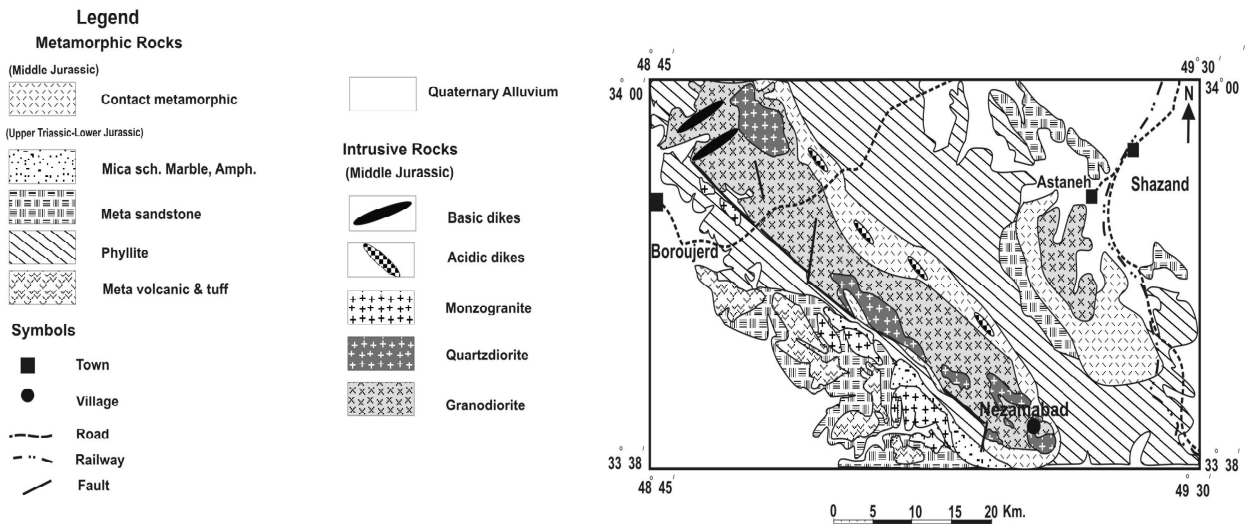
به هر حال داده های ژئوشیمیایی، کانی شناسی و صحرایی موجود نشان می دهند که توده گرانیتوئیدی بروجرد به گرانیتوئیدهای مرتبط با فرورانش شباهت داشته و به نظر می رسد در منطقه کمان آتشفشانی تشکیل شده باشد، لذا مدل اول برای توده گرانیتوئیدی بروجرد منطقی تر به نظر می رسد.

این نتایج، با مدل عمومی (Berberian (1983) و Shahabpour (2005) (شکل ۱۲) در تطابق خوبی هستند که پیشنهاد می کنند در طی مزوزویک، در حاشیه فعال ایران مرکزی (حاشیه شمال خاوری تیس) یک کمان آتشفشانی (کمان ماگمایی کالک آلکان سنندج- سیرجان) وجود داشته است، بنابراین توده گرانیتوئیدی بروجرد به احتمال در پیوند با فرورانش صفحه اقیانوسی نوتیس به زیر پوسته قاره ای سکوی ایران و به سبب فعالیت



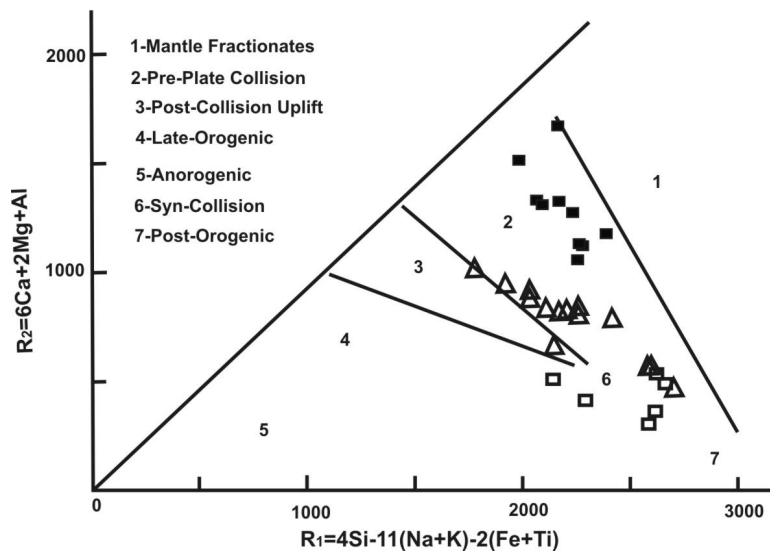
شکل ۱- موقعیت زمین ساختی زونها در باختر ایران (Mohajjel et al. 2003).

موقعیت منطقه مورد مطالعه با علامت □ نشان داده شده است.

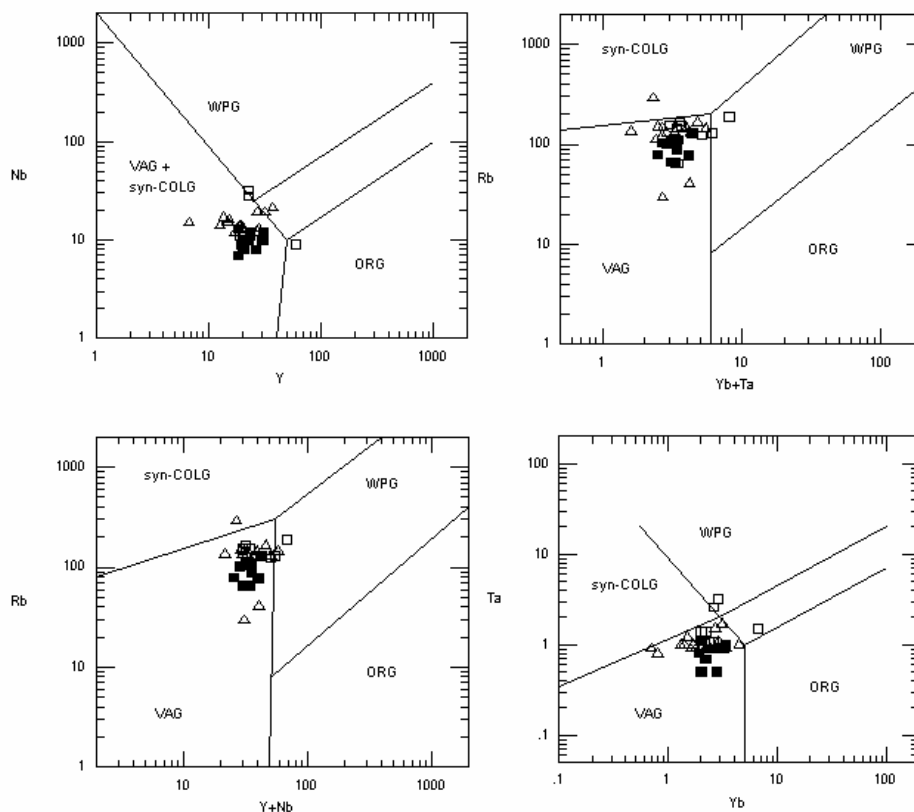


شکل ۲- نقشه ساده شده زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

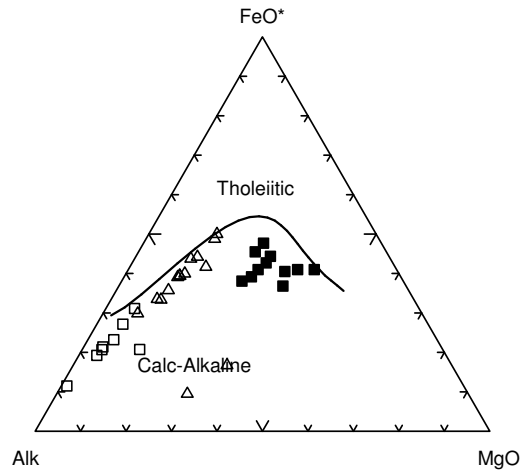
(سهیلی، ۱۳۷۱ با اندکی تغییرات).



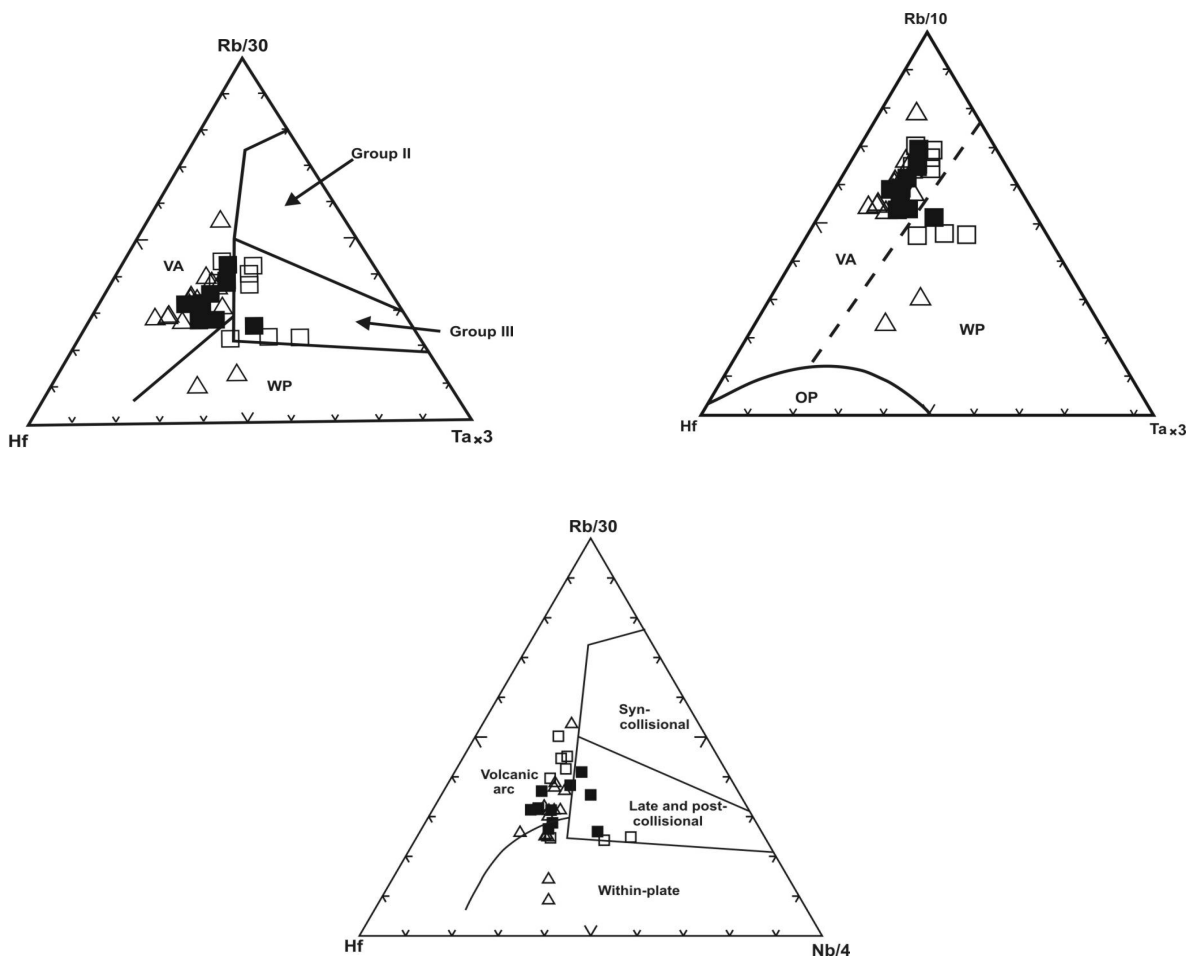
شکل ۳- تمایز انواع گرانیتوئیدهای کوهزایی و ناکوهزایی بر اساس پارامترهای چند کاتیونی R_1 و R_2 (Batchelor and Bowden, 1985).
 ■ : کوارتز دیوریت، □: مونزو گرانیت، Δ: گرانودیوریت



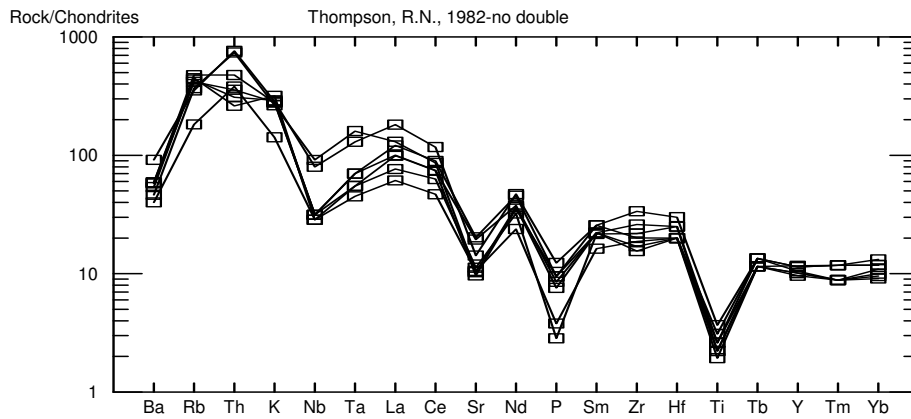
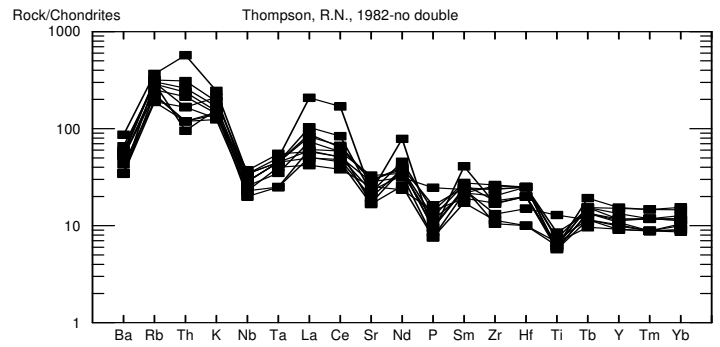
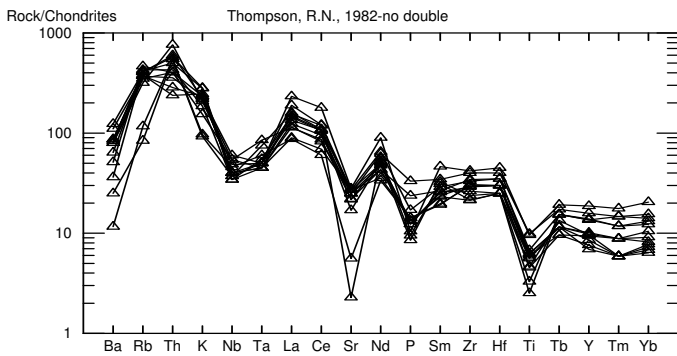
شکل ۴- نمودارهای تفکیک محیط زمین ساختی گرانیتوئیدها (Pearce et al., 1984). (علائم مشابه شکل ۳). VAG (گرانیتوئیدهای کمان آتشفشانی)؛ Syn-CLOG (گرانیتوئیدهای همزمان با برخورد)؛ WPG (گرانیتوئیدهای درون صفحه‌ای)؛ ORG (گرانیتوئیدهای پشته میان اقیانوسی). اغلب نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده کمان آتشفشانی (VAG) قرار می‌گیرند.



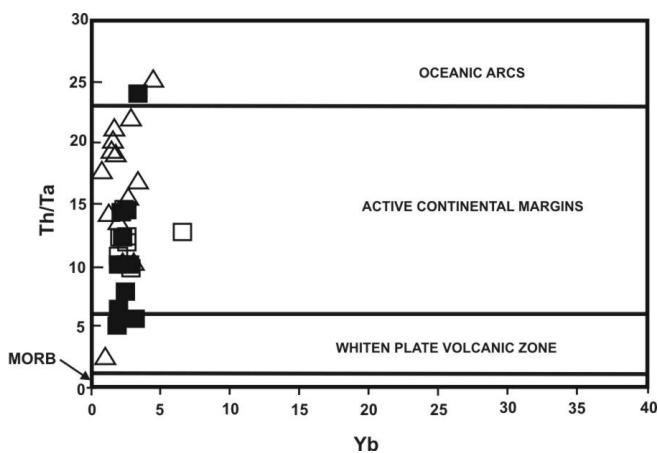
شکل ۵- نمودار مثلثی AFM که در آن سریهای کالکوآلکالن از تولیتی جدا شده‌اند (Irvine & Baragar, 1971).



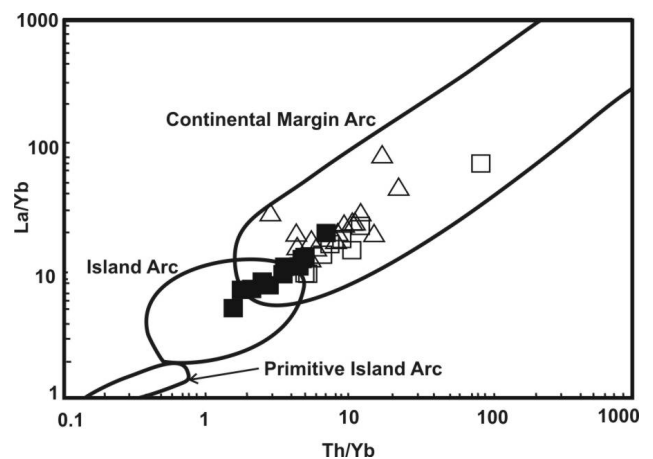
شکل ۶- تفکیک انواع گرانیتوئیدها براساس عناصر فرعی (Harris et al. 1986). همان طور که ملاحظه می شود بیشتر نمونه های مورد مطالعه در محدوده کمان آتشفشانی قرار می گیرند. (علائم مشابه شکل ۳). (علائم مشابه شکل ۳).



شکل ۷ - نمودار عنکبوتی فراوانی عناصر فرعی بهنجار شده به کندریت (Thompson, 1982). (علائم مشابه شکل ۳).

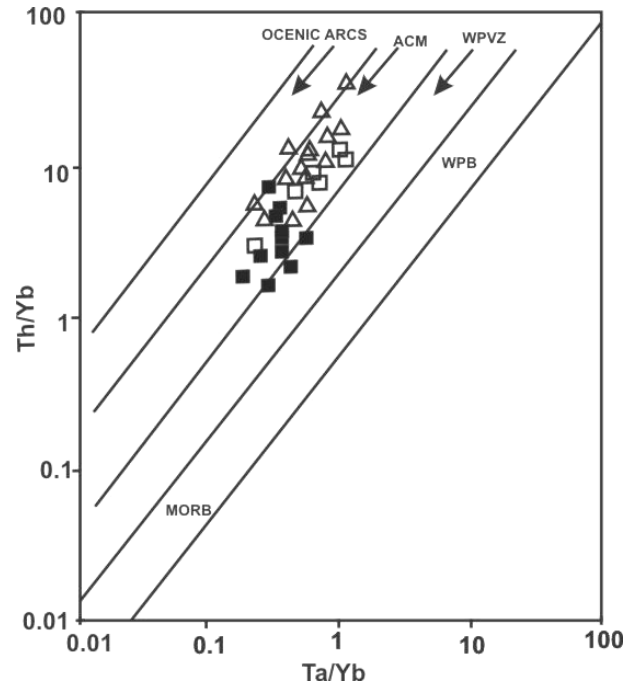


شکل ۹ - نمودار Th/Ta در برابر Yb (Gorton & Schandl, 2000). در این نمودار، نمونه‌های منطقه مورد مطالعه در محدوده حاشیه فعال قاره‌ای واقع شده‌اند. (علائم مشابه شکل ۳).

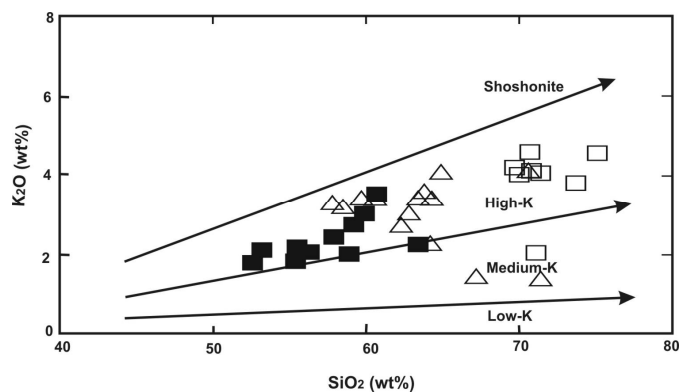


شکل ۸ - نمودار La/Yb در برابر Th/Yb (Condie, 1989) بیشتر نمونه‌ها در محدوده کمان حاشیه قاره‌ای قرار می‌گیرند. (علائم مشابه شکل ۳).

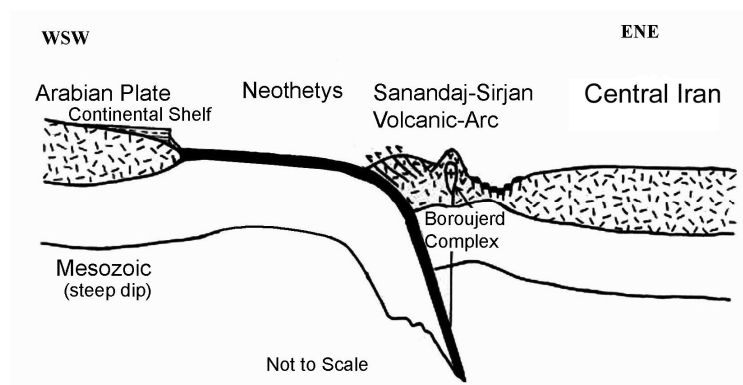
شکل ۱۰- نمودار نسبت لگاریتمی Th/Yb در برابر نسبت لگاریتمی Ta/Y در بیشتر نمونه‌های مورد مطالعه در ارتباط با فرورانش هستند و در محدوده حاشیه فعال قاره‌ای قرار می‌گیرند. WPB: بازالت‌های درون صفحه ای ACM: حاشیه فعال قاره‌ای و WPVZ: مناطق آتشفشانی درون صفحه ای. (علائم مشابه شکل ۳).



شکل ۱۱- نمودار SiO₂ در برابر K₂O با محدوده‌های پیاده شده براساس Gill (1981) بیشتر نمونه‌های منطقه مورد مطالعه در محدوده پتاسیم بالا قرار می‌گیرند. (علائم مشابه شکل ۳).



شکل ۱۲- موقعیت زمین ساختی گرانیتوئیدهای مزوزوییک زون سندج- سیرجان (توده‌ی گرانیتوئیدی بروجرد) (Shahabpour, 2005) با اندکی تغییرات.



جدول ۱ - نتایج تجزیه شیمیایی انواع سنگهای مورد مطالعه (اکسیدهای عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی و عناصر فرعی بر حسب PPM).

Sample	گرانیت‌پیریتها											
	MA3	AS2	GM5	AGH1	G6	G4	G5	AGH6	B1A65	AD4	AKY13	B4A19
SiO ₂	71.4	70.6	67.2	64.9	64.3	63.8	63.4	62.8	60.6	59.7	58.5	57.8
TiO ₂	0.3	0.3	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6	1.0	1.0
Al ₂ O ₃	14.7	14.5	15.5	16.0	16.7	16.9	16.1	16.9	17.5	20.2	18.0	18.3
Fe ₂ O ₃ (t)	1.0	3.5	2.0	4.5	5.5	5.6	5.2	5.7	6.5	4.3	8.0	8.7
MnO	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1
MgO	2.9	0.9	3.9	1.4	1.6	1.6	1.5	1.8	1.8	1.3	2.4	2.5
CaO	0.3	2.2	0.7	2.5	3.9	3.8	3.8	3.8	4.1	5.2	4.1	4.3
Na ₂ O	4.8	3.0	4.2	3.1	3.1	3.0	2.9	3.4	2.9	3.6	2.5	2.6
K ₂ O	1.3	4.1	1.4	4.0	3.4	3.6	3.4	3.0	3.4	3.4	3.2	3.3
P ₂ O ₅	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.4	0.1
Ni	12.0	13.0	18.0	18.0	17.0	16.0	19.0	21.0	22.0	10.0	32.0	47.0
Cr	20.0	120.0	40.0	150.0	120.0	120.0	90.0	110.0	150.0	100.0	180.0	160.0
Co	55.3	6.4	41.9	10.2	12.0	11.1	11.1	11.8	12.8	8.9	18.6	19.6
V	31.0	36.0	55.0	60.0	88.0	88.0	81.0	78.0	97.0	50.0	155.0	152.0
Cs	0.5	5.2	0.9	9.3	3.8	3.5	3.0	4.5	5.8	4.3	4.1	4.7
Rb	40.8	142.5	29.3	146.0	130.5	133.5	122.0	111.0	134.5	133.5	129.5	142.5
Sr	26.9	200.0	65.9	256.0	322.0	319.0	295.0	320.0	338.0	484.0	294.0	330.0
Ba	80.2	441.0	172.5	577.0	598.0	596.0	551.0	549.0	765.0	1150.0	763.0	853.0
Th	23.0	24.0	23.0	21.0	12.0	10.0	17.0	32.0	2.0	14.0	15.0	25.0
U	2.2	2.7	1.6	1.9	2.4	3.3	2.5	2.3	1.4	2.3	1.9	2.2
La	1.5	1.1	1.2	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9	0.8	0.9	1.0
Nb	13.0	12.0	16.0	14.0	14.0	13.0	14.0	17.0	15.0	15.0	19.0	21.0
La	52.3	48.7	28.6	47.3	29.4	44.2	40.7	62.1	19.5	64.0	51.0	76.4
Ce	94.1	93.6	52.2	91.1	59.9	92.6	82.5	104.5	40.8	118.5	103.0	155.0
Pr	10.6	10.0	6.0	9.6	6.4	9.3	8.6	11.8	4.1	11.6	11.0	16.2
Nd	35.8	33.1	21.2	32.3	22.4	31.0	30.0	40.9	15.1	38.8	39.2	56.6
Sm	6.3	6.6	3.9	5.3	4.0	4.8	5.2	5.9	2.3	6.2	7.0	9.4
Eu	0.6	1.2	0.2	1.2	1.0	1.1	0.9	0.9	1.3	2.2	1.3	0.8
Gd	5.7	6.6	3.7	6.0	4.1	4.3	4.7	5.9	2.2	6.3	6.8	8.3
Tb	0.8	0.8	0.5	0.7	0.5	0.6	0.6	0.6	0.2	0.8	0.9	1.0
Dy	4.5	5.1	2.7	3.8	2.9	3.4	3.6	3.0	1.1	3.6	5.3	6.3
Ho	0.9	1.0	0.6	0.7	0.6	0.7	0.7	0.6	0.2	0.5	1.1	1.4
Er	2.8	3.1	1.6	2.0	2.1	2.1	2.0	1.6	0.7	1.2	3.6	4.5
Yb	0.4	0.4	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.5	0.6
Tb	2.7	2.9	1.5	1.7	2.0	2.3	1.8	1.4	0.7	0.8	3.4	4.5
Lu	0.4	0.4	0.2	0.2	0.3	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.5	0.6
Y	27.8	27.2	15.2	19.2	18.8	20.2	19.6	13.8	6.7	15.0	31.6	37.4
Hf	5.0	5.0	6.0	5.0	6.0	6.0	6.0	7.0	6.0	9.0	8.0	9.0
Zr	147.5	162.5	210.0	179.5	203.0	203.0	198.5	227.0	232.0	341.0	274.0	287.0
Zn	10.0	27.0	18.0	43.0	56.0	52.0	51.0	48.0	58.0	53.0	83.0	124.0
Ga	15.0	17.0	15.0	21.0	22.0	20.0	21.0	20.0	20.0	25.0	22.0	26.0
Sn	2.0	2.0	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	1.0	2.0
W	550.0	5.0	420.0	15.0	6.0	9.0	4.0	7.0	8.0	5.0	10.0	5.0
Bu/Bu*	0.3	0.6	0.2	0.7	0.8	0.7	0.6	0.5	1.8	1.1	0.6	0.3
(La/ Yb) _n	13.0	11.2	12.7	18.6	9.8	12.9	15.1	29.7	18.6	53.5	10.0	11.4

ادامه جدول ۱

Sample	کوآرتز پودیشها										
	G14	G16	G18	G19	B2A31	GM25	G12	G11	AG2	B2A28	B2A33
SiO ₂	63.4	60.7	59.9	59.2	58.9	57.9	56.3	55.5	55.4	53.2	52.6
TiO ₂	0.6	0.6	0.6	0.8	0.7	0.6	0.9	0.7	1.3	0.7	0.6
Al ₂ O ₃	16.6	14.9	15.4	15.9	16.2	15.3	17.1	15.9	16.8	15.6	15.2
Fe ₂ O ₃ (t)	6.0	6.4	6.6	7.1	7.1	6.9	8.0	7.8	8.6	8.7	8.7
MnO	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
MgO	3.3	4.3	4.6	4.8	4.7	6.5	5.1	6.5	4.6	7.6	8.4
CaO	5.6	5.2	5.6	5.5	5.9	6.1	6.9	6.4	7.3	7.8	8.9
Na ₂ O	1.4	2.2	2.3	2.4	2.5	2.4	2.5	2.5	2.7	2.3	1.9
K ₂ O	2.3	3.5	3.0	2.8	2.0	2.5	2.1	2.2	1.8	2.1	1.8
P ₂ O ₅	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1	0.1
Ni	37.0	53.0	57.0	63.0	49.0	115.0	75.0	101.0	38.0	86.0	103.0
Cr	260.0	280.0	260.0	330.0	320.0	420.0	360.0	450.0	150.0	490.0	690.0
Co	20.0	20.3	20.6	22.9	23.8	48.0	27.8	28.7	54.5	31.9	36.4
V	176.0	144.0	144.0	148.0	150.0	170.0	204.0	210.0	168.0	217.0	274.0
Cs	9.9	6.0	6.2	7.5	4.7	10.0	5.4	4.6	4.2	3.2	3.5
Rb	103.0	128.0	105.0	111.0	77.4	106.5	88.2	101.0	66.6	78.8	65.9
Sr	299.0	263.0	269.0	261.0	231.0	347.0	347.0	388.0	334.0	197.0	202.0
Ba	242.0	596.0	388.0	372.0	361.0	407.0	355.0	454.0	296.0	236.0	238.0
Th	4.0	24.0	7.0	13.0	5.0	11.0	9.0	10.0	7.0	5.0	5.0
U	2.5	3.0	2.0	1.8	2.3	2.1	2.4	2.6	1.9	1.4	1.2
Ta	0.8	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7	1.1	0.5	0.5
Nb	8.0	12.0	10.0	12.0	10.0	10.0	12.0	9.0	13.0	7.0	8.0
La	13.8	68.3	19.4	33.8	16.4	28.8	27.2	24.1	19.0	16.6	20.0
Ce	32.9	146.5	44.2	72.3	41.5	55.6	57.6	50.1	44.4	39.4	50.7
Pr	3.8	14.8	5.4	7.9	5.7	6.7	6.7	5.8	5.1	4.4	6.1
Nd	14.8	49.4	20.9	28.7	24.0	24.0	25.0	21.8	19.8	16.2	23.9
Sm	3.9	8.3	4.4	5.6	5.4	4.8	5.0	4.4	4.8	3.5	5.0
Eu	0.1	1.1	0.7	1.2	0.8	1.1	0.4	0.1	1.1	0.8	0.1
Gd	3.8	7.8	4.6	5.6	5.3	4.6	5.1	4.1	4.5	3.8	5.2
Tb	0.6	1.0	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.8
Dy	3.7	5.7	4.2	4.4	5.1	3.8	4.3	3.5	3.8	3.5	4.6
Ho	0.7	1.1	0.9	0.9	1.0	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	1.0
Er	2.1	3.4	2.6	2.6	3.2	2.3	2.6	2.2	2.1	2.1	2.9
Tm	0.3	0.5	0.4	0.4	0.5	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4
Yb	1.9	3.4	2.5	2.6	3.2	2.3	2.5	2.2	2.0	2.0	2.8
Lu	0.3	0.5	0.4	0.4	0.5	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4
Y	20.4	30.7	22.5	23.3	30.2	21.6	23.4	19.8	18.2	18.4	26.6
Hf	4.0	4.0	5.0	5.0	4.0	5.0	5.0	5.0	3.0	2.0	2.0
Zr	117.0	115.0	139.0	179.5	123.5	164.0	161.5	175.5	90.0	77.6	71.6
Zn	96.0	70.0	62.0	69.0	58.0	68.0	127.0	118.0	79.0	63.0	114.0
Ga	19.0	18.0	17.0	19.0	18.0	18.0	22.0	20.0	19.0	16.0	18.0
Sn	5.0	3.0	2.0	2.0	2.0	6.0	3.0	4.0	3.0	1.0	2.0
W	9.0	5.0	3.0	4.0	14.0	217.0	8.0	5.0	269.0	1.0	3.0
Eu/Eu*	0.1	0.4	0.5	0.7	0.5	0.7	0.2	0.1	0.7	0.7	0.0
(La/Yb) _N	4.9	13.4	5.2	8.7	3.4	8.4	7.3	7.3	6.4	5.6	4.8

ادامه جدول ۱

Sample	آنکالوهای میکروگراتودوریتی			موزوگراتیتها								
	AGH2	B2A24	AD	G22	AG19	GM11	AB6	AG18	G24	GM10	G23	
SiO ₂	64.2	62.3	55.0	75.1	73.7	71.4	71.1	70.8	70.7	70.0	69.7	
TiO ₂	0.7	0.6	0.8	0.1	0.3	0.3	0.2	0.4	0.2	0.3	0.2	
Al ₂ O ₃	15.7	16.7	18.5	12.8	12.8	14.0	14.5	13.5	14.6	14.1	14.9	
Fe ₂ O ₃ (t)	6.0	6.2	7.7	1.1	2.2	3.0	2.0	2.8	2.2	3.5	2.5	
MnO	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	
MgO	1.8	2.4	2.3	0.1	0.4	0.6	1.2	0.6	0.4	0.7	0.5	
CaO	3.6	3.4	1.8	0.5	0.9	1.8	0.9	1.0	1.7	2.1	1.8	
Na ₂ O	3.3	3.3	2.5	3.7	3.8	3.0	4.2	3.9	3.8	2.8	4.1	
K ₂ O	2.2	2.7	8.3	4.6	3.8	4.1	2.1	4.1	4.6	4.0	4.2	
P ₂ O ₅	0.3	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	
Ni	22.0	19.0	46.0	7.0	7.0	11.0	13.0	20.0	9.0	12.0	8.0	
Cr	100.0	100.0	130.0	130.0	10.0	20.0	150.0	10.0	80.0	20.0	110.0	
Co	14.2	14.2	14.6	1.2	54.1	32.9	3.3	54.7	3.7	53.4	3.5	
V	64.0	130.0	172.0	3.3	17.0	24.0	23.0	27.0	11.0	29.0	11.0	
Cs	9.5	7.0	13.3	3.7	0.8	2.7	2.3	1.1	4.5	6.2	4.5	
Rb	162.5	149.5	290.0	189.0	129.0	146.5	63.8	123.5	157.0	166.5	152.5	
Sr	260.0	294.0	205.0	27.8	121.5	229.0	114.0	168.0	124.5	239.0	132.5	
Ba	353.0	250.0	1105	38.5	320.0	399.0	276.0	631.0	408.0	404.0	372.0	
Th	17.0	18.0	14.0	19.0	31.0	15.0	16.0	32.0	11.0	20.0	13.0	
U	1.9	3.0	1.7	3.8	5.8	2.6	2.5	5.3	2.4	2.7	2.6	
Ta	1.7	0.9	1.0	1.5	3.2	1.4	1.1	2.6	0.9	1.4	1.1	
Nb	19.0	12.0	14.0	9.0	32.0	11.0	10.0	28.0	10.0	11.0	11.0	
La	37.3	37.7	30.5	7.3	42.7	32.9	32.5	59.5	20.1	39.7	25.1	
Ce	74.7	71.3	63.5	18.0	74.6	64.6	64.1	101.5	40.5	77.4	54.5	
Pr	7.8	7.8	6.8	2.4	7.2	6.9	6.5	9.7	4.2	8.3	5.6	
Nd	27.2	27.1	24.2	9.8	23.0	23.7	22.3	29.6	15.0	28.7	20.3	
Sm	5.4	4.7	4.7	4.0	4.5	4.5	4.5	5.2	3.3	5.2	4.4	
Eu	1.1	0.8	1.4	0.1	0.9	0.7	0.7	0.1	0.4	0.5	0.2	
Gd	5.8	4.9	3.8	5.7	4.6	4.1	4.2	5.3	3.6	5.1	4.2	
Tb	0.8	0.6	0.4	1.2	0.7	0.6	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	
Dy	5.2	3.2	2.4	8.8	4.2	3.5	3.7	4.0	3.5	3.9	4.1	
Ho	1.0	0.6	0.5	2.0	0.8	0.7	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8	
Er	3.0	1.8	1.4	6.0	2.5	1.9	2.2	2.5	2.1	2.2	2.7	
Tm	0.5	0.2	0.2	1.0	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	
Yb	3.1	1.6	1.3	6.6	2.9	2.0	2.4	2.6	2.1	2.2	2.6	
Lu	0.4	0.2	0.2	0.9	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	
Y	27.2	17.1	12.7	59.5	22.8	19.2	20.2	22.8	20.3	21.0	23.3	
Hf	7.0	5.0	5.0	4.0	5.0	4.0	4.0	6.0	4.0	4.0	5.0	
Zr	235.0	145.5	157.5	81.5	178.0	116.5	106.0	230.0	128.0	137.0	149.0	
Zn	56.0	53.0	69.0	16.0	30.0	29.0	13.0	79.0	39.0	35.0	47.0	
Ga	24.0	20.0	22.0	16.0	19.0	17.0	17.0	20.0	17.0	17.0	17.0	
Sn	2.0	1.0	4.0	3.0	3.0	2.0	3.0	4.0	4.0	2.0	4.0	
W	6.0	4.0	2.0	8.0	469.0	225.0	8.0	416.0	11.0	429.0	11.0	
Fe, Fe'	0.6	0.5	1.0	0.0	0.6	0.5	0.5	0.0	0.4	0.3	0.1	
La, La'	8.0	15.8	15.7	0.7	9.8	11.0	9.1	15.3	6.4	12.1	6.5	

جدول ۲ - ضرایب و اعداد ثابت برای تفکیک گرانیتهای کوهزایی از ناکوهزایی (Agrawal, 1995).

X	B	M_i (mean score)	C_i (cut of value)	B_0 (constant)
Fe ₂ O ₃	0.929241			
MgO	-2.570311	-0.4898	0.2915	-11.75422
Na ₂ O	1.246346			
K ₂ O	1.266569			

جدول ۳- نتایج محاسبات انجام شده D_i و R برای سنگهای مورد مطالعه و تفکیک انواع کوهزایی از ناکوهزایی. مقدار R برای همه نمونه‌ها مثبت و در نتیجه توده گرانیتوئیدی بروجرد از نوع کوهزایی است.

SAMPLE	D_i	$D_i - C_i$	$M_i - C_i$	R
AGH1	-2.22306	-2.51456	-0.7813	3.218431
AS2	-1.86802	-2.15952	-0.7813	2.764011
AGH6	-2.94696	-3.23846	-0.7813	4.144964
AD4	-2.18494	-2.47644	-0.7813	3.169639
AGH2	-3.829	-4.1205	-0.7813	5.273903
B2A24	-4.65729	-4.94879	-0.7813	6.334051
AB6	-5.09146	-5.38296	-0.7813	6.889753
GM11	-1.65822	-1.94972	-0.7813	2.495484
GM10	-1.64418	-1.93568	-0.7813	2.477511
AG18	-0.73966	-1.03116	-0.7813	1.319805
AG19	-1.32556	-1.61706	-0.7813	2.06971
G22	-0.60362	-0.89512	-0.7813	1.145683
G23	-0.25604	-0.54754	-0.7813	0.700801
G24	-0.25279	-0.54429	-0.7813	0.696648
AKY13	-3.31919	-3.61069	-0.7813	4.621385
B1A55	-2.31954	-2.61104	-0.7813	3.341921
B4A19	-2.77037	-3.06187	-0.7813	3.918948
G4	-2.55118	-2.84268	-0.7813	3.638399
G5	-2.89941	-3.19091	-0.7813	4.084108
G6	-2.74668	-3.03818	-0.7813	3.888618
B2A28	-17.6983	-17.9898	-0.7813	23.02548
B2A31	-11.7115	-12.003	-0.7813	15.3628
B2A33	-20.5805	-20.872	-0.7813	26.71446
G11	-15.2941	-15.5856	-0.7813	19.94827
G12	-11.8718	-12.1633	-0.7813	15.56797
GM25	-15.9385	-16.23	-0.7813	20.7731
AG2	-9.93547	-10.227	-0.7813	13.08968
G14	-9.95933	-10.2508	-0.7813	13.12022
G16	-9.59563	-9.88713	-0.7813	12.65472
G18	-10.5938	-10.8853	-0.7813	13.93234
G19	-11.0159	-11.3074	-0.7813	14.47252
GM5	-12.778	-13.0695	-0.7813	16.72791
MA3	-10.5025	-10.794	-0.7813	13.81547
AD	2.931517	2.640017	-0.7813	-3.37901

کتابنگاری

- آقاباتی، س.ع، ۱۳۷۱- معرفی رویداد زمین ساختی کیمبرین میانی (ژوراسیک میانی)، فصلنامه علوم زمین، شماره ۶، صفحات ۵-۲.
- احمدی خلجی، ا.، ولی زاده، م. و اسماعیلی، د. ۱۳۸۴- پترولوژی و ژئوشیمی توده‌ی گرانیتوئیدی بروجرد (غرب ایران)، مجله دانشکده علوم، دانشگاه تهران (زیر چاپ).
- احمدی خلجی، ا.، ۱۳۷۸- بررسی پترولوژی و پتروفابریک توده‌های نفوذی و دگرگونی مجاورتی منطقه بروجرد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه تهران.
- رادفر، ج.، ۱۳۶۶- بررسیهای زمین شناسی و پترولوژی سنگهای گرانیتوئیدهای ناحیه آستانه- گوشه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه تهران.
- سبزه‌یی، م.، ۱۳۷۱- نقشه زمین شناسی حاجی آباد، مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، سازمان زمین شناسی کشور.
- سهیلی، م.، ۱۳۷۱- نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش خرم آباد، سازمان زمین شناسی کشور.
- قادری، م.، رضایی، ج.، ولی زاده، م. و، فردین دوست، ز.، و احمدی خلجی، ا.، ۱۳۸۳- تعیین سن اورانیم - سرب کمپلکس نفوذی ژوراسیک بروجرد و توده‌های وابسته در زون سندج - سیرجان، مجموعه مقالات بیست و سومین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵- دیباچه‌ای بر زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۰۹ص.
- واعظی پور، م. ج.، و اقلیمی، ب.، ۱۳۶۳- یافته‌های نوین در نهشته‌های ژوراسیک ناحیه لکان (چهارگوش گلپایگان)، گزارش داخلی، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

References

- Agrawal, S., 1995- Discrimination between late-orogenic, post-orogenic and anorogenic granites by major element compositions. The journal of geology, 103, 529 – 537.
- Ashworth, J.R., 1985- Migmatitites: Blackie, New York.
- Batchelor, R.A. and Bowden, P., 1985- Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. Chem. Geol. 48, pp. 43–55.
- Berberian, M., 1983- Generalized tectonic map of Iran. In: Berberian, M., (Ed.), Continental Deformation in the Iranian Plateau, Geological Survey of Iran, Report No. 52.
- Berberian, M. and King G.C.P., 1981- Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Canadian journal of Earth sciences. vol.18, No.2. pp.210-265.
- Berberian, M., 1977- Three phases of metamorphism in Haji-Abad quadrangle (southern extremity of the Sanandaj–Sirjan structural Zone): a palaeotectonic discussion. In: M. Berberian, Editor, Geological Survey of Iran, Report 40, Tehran, Iran Geological Survey of Iran, Report 40, Tehran, Iran, pp. 239–263.
- Berberian, M. and Nogol, M., 1974- Preliminary explanatory text of the geology of Deh Sard and Khabr maps with some remarks on the metamorphic complexes and the tectonics of the area (two geological maps 1:100000, from the Hadjiabad quadrangle map). G.S. of Iran, internal report, 60 p.
- Berberian, M., 1972- A brief note on early Kimmerian orogeny and high grade metamorphism in Sanandaj-Sirjan belt, Iran. Geological Survey of Iran, internal report.
- Berthier, F.; Billiaul, H.P; Halbronn, B and Marizot, p., 1974- Etude Stratigraphique, petrologique et structural de La region de khorramabad (zagros, Iran) - These De 3e cycle, Grenoble, 282.p.
- Chappell, B.W., White, A.J.R., 1974- Two contrasting granite types. Pacific Geology 8, 173–174.
- Condie, K.C., 1989- Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean–Proterozoic boundary: identification and significance. Lithos 23, pp. 1–18.
- Floyd, P.A. and Winchester, J.A., 1975- Magma type and tectonic setting discrimination using immobile elements. Earth and Planetary Science Letters 27, pp. 211–218.
- Froster, H.J., Tischendorf, G. and Trumbull, R.B., 1997- An evaluation of the Rb vs. (Y+Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silicic igneous rocks. Lithos 40, pp. 261–293.
- Gill, J.B., 1981- Orogenic Andesite and Plate Tectonics, Springer Verlag, New York, p. 390.
- Gorton, M. P., and Schandl, E. S., 2000- From continental to island arc: A geochemical index of tectonic setting for arc-related and within plate felsic to intermediate volcanic rocks. Canadian Mineralogist, Vol. 38, pp. 1065-1073.
- Harris, N.B.W., Pearce, J.A., Tindle, A.G., 1986- Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward, M.P., Ries, A.C. (Eds.), Collision Tectonics. Geological Society London, Special Publication 19, pp. 67–81.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971- A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Can. J. Earth Sci., 8, 523-484.



- Masoudi, F., 1997- Contact metamorphism and pegmatite development in the region SW of Arak, Iran, Unpublished PhD Thesis, Leeds University, UK.
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L., Sahandi, M.R., 2003- Cretaceous–Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan zone, Western Iran. *Journal of Asian earth Sciences* 21, 397–412.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G., 1984- Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of petrology*, 25, 956 – 983.
- Pitcher, W.S., 1987- Granites and yet more granites forty years on: *Geologische Rundschau*, v.76, p.51-79.
- Roberts M.P. and Clemens, J.D., 1993- Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids. *Geology* 21, pp. 825–828.
- Rogers, G. and Hawkesworth, C.J., 1989- A geochemical traverse across the North Chilean Andes: evidence for crust generation from the mantle wedge. *Earth and Planetary Science Letters* 91, pp. 271–285.
- Sajona, F.G., Maury, R.C., Bellon, H., Cotton, J. and Defant, M., 1996- High field strength elements of Pliocene-Pleistocene island-arc basalts Zamboanga Peninsula, Western Mindanao (Philippines), *Journal of Petrology* 37, pp. 693–726.
- Schandl, E. S., and Gorton, M. P., 2002- Application of high field strength elements to discriminate tectonic setting in VMS environments. *Economic Geology*, Vol. 97, pp. 629–642.
- Shahabpour, J., 2005- Tectonic evolution of the orogenic belt in the region located between Kerman and Neyriz. *Journal of Asian Earth Sciences* 24, 405-417.
- Thompson, A.B., 1982- Magmatism of the British Tertiary volcanic Province, *Scott. J. Geol.* 18, pp. 50–107.
- Wilson, M., 1989- *Igneous petrogenesis*, Unwin Hyman London., 466 p.

*گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران

*Department of Geology, Faculty of Science, University of Tehran, Tehran, Iran