



بررسی خاستگاه و زمین دما- فشارسنجی توده‌های گرانودیوریتی و گرانیتی شاه جهان: با کاربرد داده‌های ایزوتوپ ناپایدار، سن سنجی و ژئوشیمی

شهره حسن پور، محبوبه جمشیدی بدر*

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵ تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۹۳/۷/۲۵، نسخه نهایی: ۹۳/۱۰/۱۷)

چکیده: توده‌های گرانودیوریتی و گرانیتی شاه جهان بخشی از توده‌ی گرانیتوئیدی اردوباد است که در شمال غرب ایران و در ۱۰ کیلومتری جنوب رودخانه مرزی ارس و در منطقه ساختاری البرز-آذربایجان قرار گرفته است. توده‌ی گرانودیوریتی دارای بافت ریز دانه ای با کانی‌های پلاژیوکلاز با ترکیب آندزین، فلدسپار پتاسیم با ترکیب ارتوز، آمفیبول با ترکیب مگنزهورنبلند، بیوتیت، اسفن و مگنتیت است و فراوانی کانی‌های فلدسپار پتاسیم در توده‌ی گرانودیوریتی نسبت به توده‌ی گرانیتی کمتر است. نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه در توده‌ی گرانودیوریتی ۰۷۰۴۴۸۶ و در توده‌ی گرانیتی ۰۷۰۴۴۳۲ و مقدار ϵNd در این توده‌ها مثبت است که گویای خاستگاه گوشته‌ای و محیط‌های فرورانشی است. سن جایگیری توده‌ی گرانودیوریتی و گرانیتی بر مبنای نتایج سن سنجی به روش Ar-Ar بر روی کانی بیوتیت، به زمان ائوسن وابسته است. بر مبنای شیمی کانی‌های بیوتیت، آمفیبول و ژئوشیمی سنگ کل، شبه رخشان و جزء گرانیت‌های نوع I و از نظر سری ماگمایی جزء سری آهکی-قلیایی هستند. بی‌هنجاری‌های منفی Nb و Ti در نمودارهای بهنجار شده، گویای شکل‌گیری این توده‌ها در مناطق فرورانشی است. جای‌گیری توده‌ی گرانودیوریتی بر مبنای زمین دما- شیمی در دمای بین ۷۵۳ تا ۷۷۷ درجه‌ی سانتی‌گراد و در فشار بین ۱/۰۸ تا ۱/۹۱ کیلوبار است.

واژه‌های کلیدی: توده‌ی گرانودیوریتی و گرانیتی؛ ایزوتوپ ناپایدار؛ سال سنجی؛ دما-فشارسنجی؛ شیمی کانی؛ شاه جهان.

مقدمه

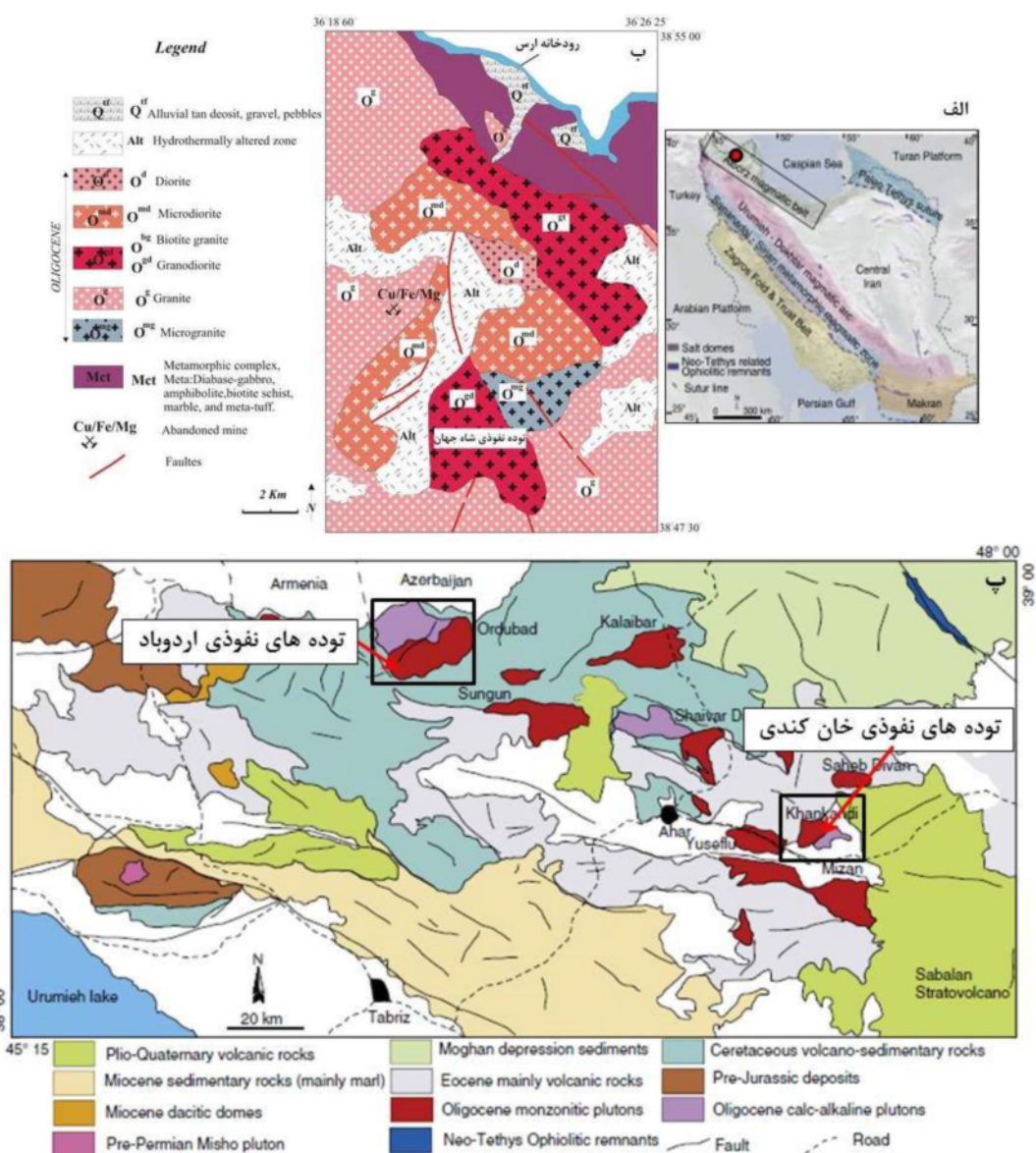
آذربایجان محسوب می‌شوند (شکل ۱ الف) [۴،۳]. کمربند آتشفشانی سنوزوئیک البرز که در شمال ایران راستای شرقی - غربی دارد، به‌وسیله‌ی گسل N-S رشت - تاکستان به دو بخش شرقی و غربی تقسیم شده است. بخش غربی آن که به‌عنوان کمربند آتشفشانی البرز - آذربایجان نامیده می‌شود [۵] شامل گدازه‌های آندزیتی تا داسیتی و تعداد زیادی از توده‌های گرانیتوئیدی با سرشت آهکی-قلیایی بوده (شکل ۱ الف، پ) و حاوی ذخایر مختلفی از پورفیری‌های مس، مولیبدن، طلا و کانسارهای آهن است که در بخش شرقی یافت نشده‌اند. به عقیده‌ی عزیز و جهانگیری [۵] کمربند آتشفشانی البرز - آذربایجان ارتباطی با فرورانش اقیانوس نئوتتیس زاگرس به زیر صفحه‌ی ایران مرکزی ندارند و به‌وسیله‌ی گسل تبریز از پلیت

باتولیت گرانیتوئیدی اردوباد با مساحتی بالغ بر 1500 km^2 در دوسوی رودخانه مرزی ارس در شمال غرب ایران و در کشورهای همسایه (جمهوری ارمنستان و نخجوان) برونزد دارد. بخش اصلی این باتولیت در ایران (شمال استان آذربایجان شرقی) با وسعت 350 km^2 رخنمون دارد، وسیع‌ترین توده‌ی گرانیتوئیدی منطقه‌ی فلز زایی Cu-Mo-Au را تشکیل می‌دهد [۲،۱]. باتولیت‌های گرانیتوئیدی اردوباد حواشی فعال قاره‌ای، حاصل تزریق و تبلور جدایشی ضربه‌های متعدد ماگمایی طیفی از بازی (گابرو) تا اسیدی (گرانیت) با برتری فازهای گرانودیوریتی - کوارتزموزنوئیتی (بیش از ۵۰٪ باتولیت) برونزد دارند [۲]. از نظر ساختاری بخشی از منطقه‌ی البرز -

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۵۳۵۷۵۱۳، نامبر: ۰۲۶۴۵۳۸۳۲۴۴، پست الکترونیکی: m_jamshidi@pnu.ac.ir

جهان که بخشی از باتولیت اردوباد هستند، در تعیین محیط زمین‌ساختی این منطقه می‌توانند نقش مهمی داشته باشند. به دلیل خاصیت مناسب در تشکیل توده‌های گرانودیوریتی شاه جهان، از شیمی کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز، از این کانی‌ها در تعیین دما و فشار و از شیمی کانی‌های بیوتیت و آمفیبول برای تعیین محیط زمین‌ساختی این منطقه استفاده شد. در اینجا نتایج حاصل از شیمی کانی‌ها با نتایج شیمی سنگ کل مقایسه شده‌اند [۷-۱۹].

ایران در جنوب جدا می‌شود و به سمت مرزهای شمالی ایران تا درون ارمنستان و قفقاز ادامه می‌یابد [۶]. توده‌های نفوذی گرانودیوریتی و گرانیتی شاه جهان که در بخش مرکزی باتولیت بزرگ اردوباد و تقریباً در فاصله ۳۰ الی ۳۵ کیلومتری (فاصله هوایی) از معادن مس پورفیری (Cu±Mo) سونگون، هفت چشمه و در فاصله‌ی ۱۰ کیلومتری جنوب رودخانه مرزی ارس برونزد دارند، و در شمال شرق نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ سیه رود قرار گرفته‌اند (شکل ۱ ب، پ). تعیین خاستگاه و سن توده‌های نفوذی گرانودیوریتی و گرانیتی شاه



شکل ۱ الف) نقشه‌ی زمین‌ساختی ایران توده‌های نفوذی شاهجهان در روی نقشه با علامت قرمز در منطقه‌ی ساختاری البرز-آذربایجان نشان داده شده است، اقتباس از [۳]، ب) نقشه‌ی زمین‌شناسی خلاصه شده منطقه‌ی اردوباد که توده‌ی نفوذی گرانیتی نشان داده شده است اقتباس از نقشه‌ی ۱/۱۰۰۰۰۰ سیه رود [۴]، پ) موقعیت توده‌های نفوذی منطقه اردوباد نسبت به توده‌های نفوذی شاهجهان [۳].

روش بررسی

برای بررسی خاستگاه توده‌های گرانودیوریتی و گرانیتهی شاه جهان، نتایج تعیین داده‌های ایزوتوپ‌های ناپایدار $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ مورد بررسی قرار گرفت و سن جایگیری توده‌های نفوذی نیز با روش آرگون - آرگون به‌وسیله‌ی کانی بیوتیت مشخص شده است. بررسی‌های ایزوتوپی و تعیین سن در آزمایشگاه علوم زمین دانشگاه بریتیش کلمبیای^۱ کانادا انجام شده است (جدول ۱ و ۲).

از آنالیز ریز پردازشی الکترونی^۲ برای بررسی شیمی کانی-های پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم، آمفیبول، بیوتیت، اسفن و کانی‌های فلزی توده‌ی نفوذی گرانودیوریتی و از آنالیز^۳ ICP برای تعیین شیمی سنگ کل ۲ نمونه از توده‌ی نفوذی گرانودیوریتی و ۳ نمونه از توده‌ی نفوذی گرانیتهی استفاده شدند (جدول‌های ۳ و ۴). ریز پردازش الکترونی در آزمایشگاه بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه ماساریک جمهوری چک^۴ و شیمی سنگ کل در آزمایشگاه امدل استرالیا^۵ انجام گرفت.

بحث

سنگ‌نگاری و شیمی کانی‌ها

توده‌های نفوذی گرانودیوریتی و گرانیتهی شاه جهان، در بررسی-های ماکروسکوپی دارای کانی‌های پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم، کوارتز و نیز کانی‌های مافیک آمفیبول، بیوتیت و کانی‌های فرعی فلزی و تیتانیت هستند. از نظر بافتی، بافت عمومی این توده‌ها دانه‌ای بوده ولی در توده‌ی گرانودیوریتی، بافت غالب از نوع ریزدانه و در توده‌ی گرانیتهی، بافت پرتیت، آنتی پرتیت است. توده‌ی نفوذی گرانودیوریتی به رنگ خاکستری تا خاکستری نسبتاً تیره و بافت میان دانه تا ریز بلورند. توده‌های نفوذی گرانیتهی نسبت به گرانودیوریت‌ها دارای ضریب رنگی روشن‌تر بوده و فراوانی کانی‌های مافیک مثل کانی‌های آمفیبول و بیوتیت در آن‌ها کمتر است.

توده‌ی نفوذی گرانودیوریتی شاه جهان در بررسی میکروسکوپی گویای حضور بافت‌های میان دانه تا ریز بلور و حضور کانی‌های روشن پلاژیوکلاز با فراوانی ۶۰ تا ۷۰٪ شکل-دار تا نیمه‌شکل‌دار با ترکیب آندزین $(X_{\text{Ab}} = 0.59 - 0.62)$ ، با ماکل پلی‌سنتتیک، و در برخی موارد توام با ماکل کارلسباد و با

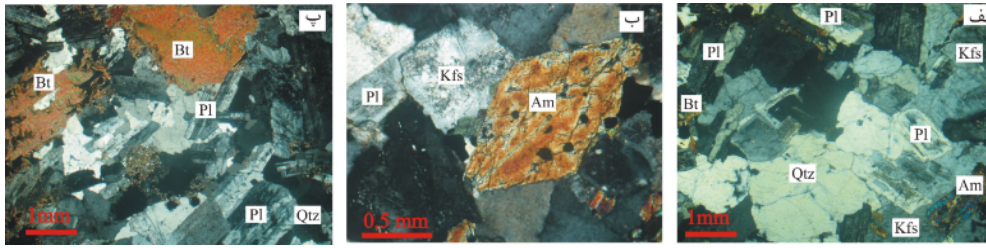
منطقه بندی مشاهده می‌شوند. ارتوز با فراوانی کمتر از ۱۵٪، کوارتز اغلب بی‌شکل و با فراوانی ۱۰٪ تا ۲۰٪ دیده می‌شوند. در رده‌بندی مدی، توده‌ی نفوذی شاه جهان در گستره‌ی گرانودیوریت قرار می‌گیرد و در بعضی از نمونه‌ها به‌دلیل کاهش فراوانی کانی‌های کوارتز و ارتوز در گستره‌ی کوارتز دیوریت و دیوریت دیده می‌شود. فراوان‌ترین کانی فرومنیزین در این توده عبارت است از آمفیبول سبز، گاه با فراوانی ۱۵-۵٪ با بلورهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار لوزی مانند یا ستونی کشیده و کوتاه که اغلب حاوی ماکل ساده با تیغه‌ی میانی (شکل ۲ ب)، ترکیب شیمی آمفیبول‌ها از نوع کلسیک و در رده‌بندی آمفیبول‌های نوع کلسیک در گستره‌ی مگنزهورنبلند قرار می‌گیرند (شکل ۳ ب) [۲۰]. بیوتیت در مقادیر کمتر نسبت به آمفیبول‌ها و با فراوانی ۵-۲٪ به‌صورت ورقه‌های با رخ موازی (شکل ۲ پ)، ترکیب شیمی کانی بیوتیت بر اساس رده‌بندی [۲۱] در رده‌ی بیوتیت و در گستره‌ی Meronex قرار می‌گیرد که گویای فقیر بودن بیوتیت‌ها از آلومینیوم است (شکل ۲ الف). کانی‌های فرعی مهم در این سنگ‌ها شامل اسفن، آپاتیت‌های خاکستری تا بی‌رنگ (به‌صورت ادخال)، مقدار جزئی زیرکن و کانی‌های فلزی از نوع مگنتیت هستند و شامل کانی‌های ثانویه عموماً کلریت، سریسیت است. ترکیب شیمیایی کانی‌های توده‌ی گرانودیوریتی در جدول ۳ نشان داده شده است.

توده‌ی گرانیتهی شاه جهان در بررسی میکروسکوپی شامل کانی‌های پلاژیوکلاز شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با فراوانی ۴۵ تا ۵۵٪، ارتوز نیمه‌شکل‌دار با بافت پرتیت و با فراوانی ۳۵ تا ۴۵٪، کوارتز بی‌شکل با فراوانی بیش از ۲۰٪، کانی‌های مافیک بیوتیت و آمفیبول با فراوانی کمتر از ۱۰٪، کانی‌های فرعی تیتانیت و مگنتیت نیز در این سنگ‌ها حضور دارند (شکل ۲ الف). در رده‌بندی مدی اغلب نمونه‌های این توده در گستره‌ی گرانیتهی قرار می‌گیرند.

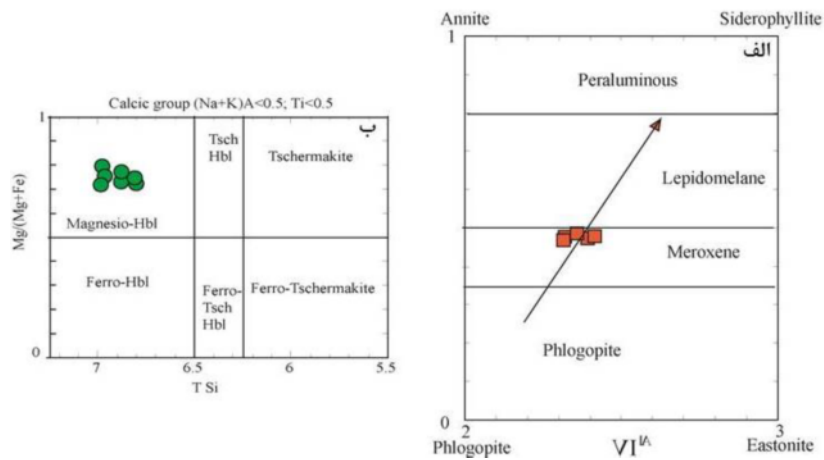
بررسی‌های ایزوتوپ Nd-Sr و تعیین سن با روش Ar-Ar بیوتیت

مقادیر ایزوتوپ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ از دو نمونه‌ی سنگی توده‌های گرانودیوریتی و گرانیتهی و برای تعیین خاستگاه اولیه‌ی توده‌ها مشخص شده است. مقدار ایزوتوپ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه در توده‌ی گرانودیوریتی ۰/۷۰۴۴۸۶ و در توده‌ی گرانیتهی ۰/۷۰۴۴۳۲، و مقدار ایزوتوپ $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ اولیه در توده‌ی گرانودیوریتی ۰/۵۱۲۷۹۴ و در توده‌ی گرانیتهی ۰/۵۱۲۷۷۶ تعیین شده است. مقدار ϵNd در این توده‌ها با استفاده از فرمول زیر محاسبه شده است (جدول ۱):

1. British Columbia University
2. Laboratory of Electron Microscopy and Microanalysis
3. Inductively Coupled Plasma
4. Institute of Geological Sciences Faculty of Science Masaryk University-Czech Republic
5. Amdel Australia



شکل ۲ الف) تصویر میکروسکوپی از توده‌ی گرانیتی شاه جهان با بافت دانه‌ای و کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم، بیوتیت و آمفیبول (نور XPL، ب) تصویر میکروسکوپی سنگ‌های گرانودیوریت توده‌ی نفوذی شاه جهان با بافت دانه‌ای و کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم و آمفیبول (نور XPL، پ) نمایش کانی بیوتیت در سنگ‌های گرانودیوریتی توده‌ی نفوذی شاه جهان (نور XPL) علائم استفاده در شکل: Pl: پلاژیوکلاز، Qtz: کوارتز، Kfs: فلدسپار پتاسیم، Am: آمفیبول، Bt: بیوتیت.



شکل ۳ الف) رده‌بندی کانی‌های بیوتیت بر مبنای شیمی آن‌ها در توده‌ی نفوذی گرانودیوریتی شاه جهان [۲۱]، ب) رده‌بندی کانی‌های آمفیبول توده‌ی نفوذی گرانودیوریتی شاه جهان [۲۰] (علامت مربع قرمز: به کانی بیوتیت و علامت دایره سبز: به کانی آمفیبول در توده گرانودیوریتی وابسته است).

جدول ۱ نتایج آنالیز ایزوتوپ Sr-Nd، نمونه A-36 از توده‌ی نفوذی گرانودیوریتی شاه جهان و نمونه A-15 از توده‌ی نفوذی گرانیتی شاه جهان آنالیز شده است.

نمونه ها	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	⁸⁶ Sr/ ⁸⁸ Sr	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴⁵ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴⁶ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	Sr norm	2SE	Sm/143Nd	Nd norm	2SE
A-36	۰٫۷۰۴۵۰۱	۰٫۱۱۹۵	۰٫۵۱۲۷۹۴	۰٫۳۴۸۴۰۳	۰٫۷۲۰۵	۰٫۷۰۴۴۸۶	۰٫۰۰۰۰۰۸	۰٫۲۹۲۴	۰٫۵۱۲۸۰۰	۰٫۰۰۰۰۰۷
A-18	۰٫۷۰۴۴۴۶	۰٫۱۱۹۶	۰٫۵۱۲۷۷۶	۰٫۳۴۸۴۱۲	۰٫۷۲۳۱	۰٫۷۰۴۴۳۲	۰٫۰۰۰۰۰۸	۰٫۲۹۱۳	۰٫۵۱۲۸۰۰	۰٫۰۰۰۰۰۸

نمایش داده شدند این نتایج با داده‌های ایزوتوپی آتشفشانی اورمیخ - دختر [۲۳] و ماگماتیسیم دماوند [۲۴] و ماگماتیسیم خان کندی که توسط [۲۵] ارائه شد مقایسه شده است. نتایج حاصل از آنالیز ایزوتوپی توده‌های گرانودیوریتی و گرانیتی شاه جهان، و توده‌های خان کندی در یک گستره قرار می‌گیرند و با توجه به جایگاه توده‌های خان کندی نسبت به شاه جهان می‌توانند خاستگاه مشترکی را که در ارتباط با محیط‌های فرورانشی است، داشته باشند. موقعیت جغرافیایی توده‌ی خان-کندی در (شکل ۱ پ) نشان داده شده است.

بر مبنای داده‌های تعیین سن بروش Ar-Ar روی کانی بیوتیت، سن توده‌ی گرانودیوریتی شاه جهان 40.52 ± 0.44 میلیون سال و توده گرانیتی سنی معادل 2.6 ± 46.4 میلیون

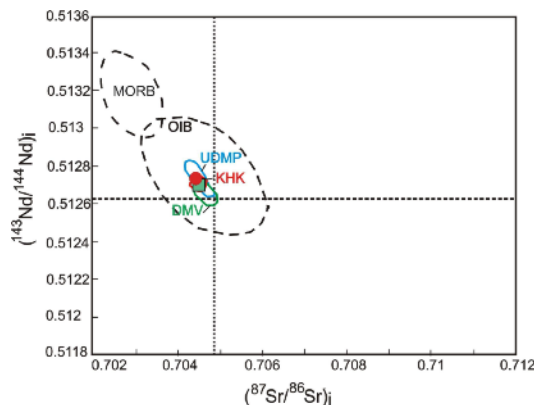
$$\epsilon Nd = \left[\left(\frac{^{143}Nd}{^{144}Nd} \right)_s / \left(\frac{^{143}Nd}{^{144}Nd} \right)_{CHUR} - 1 \right] \times 10000$$

(معادله شماره ۱)

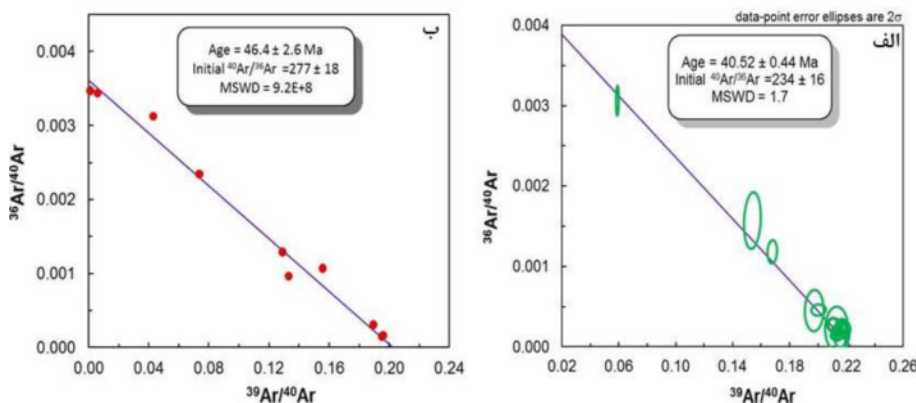
در معادله‌ی شماره ۱ $(^{143}Nd/^{144}Nd)_s$ مقدار $^{143}Nd/^{144}Nd$ حاصل بررسی ایزوتوپی توده‌ی گرانودیوریتی و توده‌ی گرانیتی شاه جهان است (مقدار $(^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR} = 0.512638$) مقدار $^{143}Nd/^{144}Nd$ در کندریت از هامیلتون و همکاران [۲۲] اقتباس شده است. مقدار ϵNd در توده‌ی نفوذی گرانودیوریتی 3.043 و در توده‌ی نفوذی گرانیتی 2.692 تعیین شد. مقدار مثبت ϵNd حاکی از این است که ماگمای این توده‌ها در ارتباط با ذوب بخشی پوسته‌ی اقیانوسی و به یک محیط فرورانشی وابسته بوده است [۱]. در شکل ۴ نتایج آنالیز ایزوتوپی توده‌های نفوذی گرانودیوریتی و گرانیتی شاه جهان

مافیک مثل بیوتیت و آمفیبول در این توده‌هاست. روند کاهشی TiO_2 گویای گریزندگی بالای اکسیژن در محیط است. اکسیدهای Al_2O_3 ، Na_2O ، K_2O نسبت به SiO_2 روند تبلور عادی نشان نمی‌دهند و می‌تواند ناشی از تاثیر گرماب‌ها در منطقه باشد. الگوی REE با میانگین $(La/Lu)_N$ برای توده‌ی (۱۵/۹۵) - نفوذی گرانودیوریتی ۱۱/۶۱ و برای توده‌ی گرانیتی (۱۹/۵۵) - ی گرانودیوریتی و نسبت $(La/Sm)_N = (۶/۶۳-۸/۵۵)$ توده گرانیتی دارای غنی شدگی مشخص LREE نسبت به HREE با مقادیر $(Gd/Lu)_N = (۱/۲۷-۱/۶۲)$ توده‌ی گرانودیوریتی و $(Gd/Lu)_N = (۱/۶۸)$ توده‌ی گرانیتی است. مقدار $(Eu/Eu^* =$ الف و جدول ۴) [۲۷،۲۶].

سال نشان داده‌اند که به توده‌های نفوذی ائوسن در منطقه‌ی البرز-آذربایجان (ارسباران) وابسته‌اند (شکل ۵) (جدول ۲). در بررسی شیمی سنگ کل توده‌های گرانودیوریت و گرانیت شاه جهان، فراوانی کوارتز توده‌های نفوذی گرانودیوریتی و گرانیتی شاه جهان از ۶۴/۶۶ تا ۷۲/۴۰ درصد وزنی تغییر می‌کند و دارای (۲/۰۹-۲/۶۰ wt%) اکسید پتاسیم، (۴/۶۴-۵/۰۱ wt%) اکسید سدیم و (۱۴/۷۹-۱۶/۹۶ wt%) اکسید آلومینیوم بوده و در مقادیری کمتر، دارای اکسیدهای منگنز (۰/۰۶-۰/۱)، منیزیم (۰/۱۴-۰/۳۳)، کلسیم (۰/۲۳-۰/۴۲)، فسفر (۰/۰۶-۰/۱۳) و تیتانیوم (۰/۲۳-۰/۴۲) هستند (جدول ۳). در نمودارهای هارکر، با افزایش اکسید SiO_2 مقادیر اکسیدهای Fe_2O_3 ، MgO ، P_2O_5 و TiO_2 روند کاهشی تبلور تفریقی کانی‌های



شکل ۴ نمودار نسبت مقادیر ایزوتوپ‌های ناپایدار اولیه $^{87}Sr/^{86}Sr$ نسبت به ایزوتوپ‌های ناپایدار اولیه $^{143}Nd/^{144}Nd$ ، مربوط به توده‌های آداکیتی پس از برخورد میوسن زون ارومیه - دختر [۲۳]، DMV ، مربوط به ولکانیسم دماوند زون البرز مرکزی [۲۵]، KHK ، مربوط به توده‌های پلوتونیک خان کندی [۲۵]. مقدار مثبت ϵNd در نمونه‌های گرانودیوریتی و گرانیتی شاه جهان و قرار گیری آن‌ها در گستره‌ی مشابه با توده‌های نفوذی وابسته به فرورانشی، گویای این است که جای‌گیری این توده‌ها به محیط‌ها فرورانشی وابسته است (دایره به‌رنگ سرخ به نمونه توده‌ی گرانیتی شاه جهان و مربع سبز به توده گرانودیوریتی شاه جهان وابسته است).



شکل ۵ الف) نمودار ایزوکرون تعیین سن توده‌ی نفوذی گرانودیوریتی شاه جهان، سن به‌دست آمده برای توده‌ی گرانودیوریتی 40.52 ± 0.44 میلیون سال است. ب) نمودار ایزوکرون تعیین سن توده نفوذی گرانیتی شاه جهان، سن به‌دست آمده برای توده گرانیتی 46.40 ± 2.6 میلیون سال است.

جدول ۲ نتایج آنالیز سن سنجی آرگون-آرگون، نمونه A-36 از توده نفوذی گرانودیوریتی شاه جهان و نمونه‌ی A-18 از توده نفوذی گرانیتی شاه جهان آنالیز شده است.

نمونه ها	Laser		Isotope Ratios					Age	2σ
	Power (%)	40Ar/39Ar	i□	37Ar/39Ar	i□	36Ar/39Ar	i□		
A-36-1	۲,۹۰ W	۶,۵۳	۰,۱۰	۰,۱۰	۰,۰۱	۰,۰۱۰	۰,۰۰۱	۳۱,۶۵	±۵,۲۱
A-36-2	۳,۲۰ W	۵,۹۹	۰,۰۵	۰,۰۷	۰,۰۰۳	۰,۰۰۷	۰,۰۰۰۳	۳۵,۲۰	±۲,۰۱
A-36-3	۳,۹۰ W	۵,۰۲	۰,۰۵	۰,۰۲	۰,۰۰۱	۰,۰۰۲	۰,۰۰۰۱	۳۹,۱۵	±۱,۱۵
A-36-4	۴,۲۰ W	۴,۷۹	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰۱	۳۹,۶۸	±۰,۹۹
A-36-5	۴,۵۰ W	۴,۶۴	۰,۰۳	۰,۰۵	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰۱	۳۹,۰۱	±۰,۸۹
A-36-6	۴,۸۰ W	۴,۷۳	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰۱	۴۰,۲۱	±۰,۹۳
A-36-7	۵,۱۰ W	۴,۶۸	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰۱	۴۰,۲۴	±۰,۸۳
A-36-8	۵,۴۰ W	۴,۷۳	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰۱	۴۰,۹۰	±۰,۸۳
A-36-9	۵,۷۰ W	۴,۷۳	۰,۰۳	۰,۰۵	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰۱	۴۰,۸۹	±۰,۸۱
A-36-10	۶,۰۰ W	۴,۷۱	۰,۰۳	۰,۰۶	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰۱	۴۰,۳۷	±۱,۰۳
A-36-11	۶,۳۰ W	۵,۱۰	۰,۰۷	۰,۰۵	۰,۰۰۴	۰,۰۰۲	۰,۰۰۱	۳۹,۸۵	±۳,۰۷
A-36-12	۶,۳۰ W	۴,۷۲	۰,۰۷	۰,۰۸	۰,۰۰۴	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۳۹,۷۳	±۳,۰۶
A-36-13	۶,۶۰ W	۴,۶۵	۰,۰۵	۰,۰۹	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰۳	۳۹,۸۶	±۲,۰۱
A-18-1	۳,۰۰ W	۶,۴۵	۰,۰۶	۰,۱۴	۰,۰۰۲	۰,۰۰۶	۰,۰۰۰۱	۴۱,۳۷	±۱,۳۷
A-18-2	۳,۶۰ W	۵,۱۵	۰,۰۵	۰,۰۸	۰,۰۰۲	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰۰۳	۴۶,۱۱	±۰,۸۷
A-18-3	۴,۰۰ W	۵,۱۳	۰,۰۵	۰,۱۷	۰,۰۰۵	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰۰۲	۴۵,۶۸	±۰,۹۲
A-18-4	۴,۶۰ W	۵,۳۱	۰,۰۳	۰,۱۷	۰,۰۰۶	۰,۰۰۲	۰,۰۰۰۰۴	۴۵,۱۶	±۰,۵۳
A-18-5	۵,۱۰ W	۷,۵۴	۰,۰۷	۰,۱۴	۰,۰۰۲	۰,۰۰۷	۰,۰۰۰۰۳	۵۰,۴۸	±۲,۱۸
A-18-6	۵,۹۰ W	۷,۷۷	۰,۰۶	۱,۸۸	۰,۰۰۴	۰,۰۱۰	۰,۰۰۰۰۲	۴۵,۰۹	±۱,۶۴
A-18-7	۶,۶۰ W	۷,۴۸	۰,۰۶	۱,۳۸	۰,۰۰۴	۰,۰۰۸	۰,۰۰۰۰۳	۴۹,۶۸	±۲,۰۵
A-18-8	۷,۰۰ W	۱۳,۶۰	۰,۱۹	۲,۹۱	۰,۰۰۷	۰,۰۳۲	۰,۰۰۰۰۳	۳۹,۳۵	±۱۷,۸۸

جدول ۳ نتایج آنالیز ریز پردازش الکترونی کانی‌های توده‌ی گرانودیوریتی شاه جهان. (به‌علت محدودیت تعداد صفحات، نتایج آنالیز چند نقطه در جدول آورده شده‌اند)، علائم خط چین در جدول نشان دهنده‌ی عدم حضور اکسید در آنالیز کانی است.

نمونه ها کانی ها	A-15	A-36	A-15	A-36	A-36	A-36	A-36	A-36
درصد وزنی اکسیدها	آمفیبول	بیوتیت	فلدسپار پتاسیم	پلاژیوکلاز	مگنتیت	تیتانیت		
SiO ₂	۴۸,۱۶	۴۶,۳۸	۳۶,۸۶	۳۷,۱۹	۶۵,۳۱	۵۸,۶۰	۰,۰۲۱	۰,۰۰۹
Al ₂ O ₃	۶,۳۰	۷,۶۹	۱۴,۰۳	۱۳,۹۴	۱۸,۴۷	۲۶,۱۲	۰,۰۰۳	۰,۰۲۶
BaO	۰,۰۷	۰,۰۳۸	-----	-----	۰,۰۰۹	۰,۰۰۰	-----	-----
P ₂ O ₅	۰,۰۰۴	۰,۰۱۶	-----	-----	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	-----	-----
K ₂ O	۰,۵۵	۰,۷۸	۹,۴۴	۹,۵۴	۱۵,۳۴	۰,۱۸	-----	-----
Na ₂ O	۱,۱۳	۱,۱۲	۰,۳۱	۰,۲۴	۱,۰۸	۶,۷۶	-----	-----
CaO	۱۱,۱۲	۱۱,۹۰	۰,۱۵	۰,۲۱	۰,۰۰۶	۸,۲۲	۰,۰۱۵	۰,۰۹۹
FeO	۱۴,۷۵	۱۶,۵۵	۱۹,۱۹	۱۸,۹۹	۰,۱۳	۰,۲۵	۱۰,۴۴۸	۳۶,۵۹
SrO	-----	-----	-----	-----	۰,۱	۰,۰۹	-----	-----
MgO	۱۳,۹۵	۱۲,۴۰	۱۱,۸۶	۱۱,۵۶	-----	-----	-----	۰,۱۸۵
Cr ₂ O ₃	۰,۰۲	۰,۰۱۲	۰,۰۱۱	-----	-----	-----	۰,۰۷۱	۰,۰۰۳
TiO ₂	۱,۰۸	۱,۲۸	۴,۶۹	۴,۶۶	-----	-----	۰,۱۲۱	۴۹,۹۷
MnO	۰,۶۴	۰,۷۵۸	۰,۴۸	۰,۴۵	-----	-----	۰,۱۰۴	۱۱,۵۷
NiO	۰,۰۷۷	۰,۰۱۴	-----	-----	-----	-----	۰,۰۰۳	-----
V ₂ O ₃	۰,۰۴۲	۰,۰۶۲	۰,۰۶۴	۰,۰۷۶	-----	-----	۰,۴۷۴	۰,۰۵
Cl	۰,۰۸	۰,۱۲	۰,۰۸	۰,۰۷۶	-----	-----	-----	-----
ZnO	-----	-----	-----	-----	-----	-----	۰,۰۱۹	۰,۱۰۹
F	۰,۱۹۷	۰,۱۶۱	۰,۲۵۵	۰,۲۵۲	-----	-----	-----	-----

جدول ۴ نتایج آنالیز ICP سنگ کل توده‌های گرانودیوریتی و گرانیتی شاه جهان.

نمونه ها	A-15	A-36	A-19	A-18	A-20
	نمونه های توده نفوذی گرانودیوریتی			نمونه های توده نفوذی گرانیتی	
Major Oxides Wt %					
SiO ₂	۶۵٫۶۶	۶۴٫۶۶	۷۲٫۳۹	۷۲٫۴۰	۷۱٫۵۸
TiO ₂	۰٫۴۲	۰٫۴۲	۰٫۲۳	۰٫۲۳	۰٫۲۳
Al ₂ O ₃	۱۶٫۷۴	۱۶٫۹۶	۱۵٫۷۴	۱۴٫۷۹	۱۵٫۰۹
TFe ₂ O ₃	۴٫۰۶	۴٫۰۶	۲٫۶۲	۲٫۳۴	۲٫۵۰
MnO	۰٫۱۰	۰٫۱۰	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۰۶
MgO	۱٫۱۴	۱٫۴۰	۰٫۳۳	۰٫۳۳	۰٫۳۳
CaO	۴٫۷۸	۴٫۸۰	۲٫۸۸	۲٫۷۷	۲٫۸۴
Na ₂ O	۴٫۶۴	۴٫۶۴	۵	۴٫۷۹	۵٫۰۱
K ₂ O	۲٫۱۳	۲٫۰۹	۲٫۶۰	۲٫۵۱	۲٫۵۲
P ₂ O ₅	۰٫۱۳	۰٫۱۳	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۷
LOI	۰٫۵۸	۰٫۵۸	۰٫۱۷	۰٫۱۷	۰٫۱۸
TOTAL	۱۰۰٫۳۸	۹۹٫۸۴	۱۰۲٫۰۹	۱۰۰٫۴۵	۱۰۰٫۴۱
	Rare-earth element (ppm)				
La	۱۹٫۵۰	۱۹٫۵۰	۱۴٫۶	۱۴٫۷	۱۴٫۵
Nd	۱۶٫۲۰	۱۷٫۲۰	۷٫۶۶	۷٫۳۸	۸٫۴۶
Gd	۲٫۴۵	۲٫۴۵	۱٫۰۵	۱	۱٫۱۵
Yb	۱٫۱۵	۱٫۱۷	۰٫۵	۰٫۴۵	۰٫۵۵
Ce	۳۵٫۳۰	۳۵٫۳۰	۲٫۱۳	۲٫۰۴	۲٫۰۷
Sm	۳٫۰۶	۳٫۰۶	۱٫۴۲	۱٫۲۴	۱٫۴۴
Tb	۰٫۳۶	۰٫۳۶	۰٫۱۴	۰٫۱۴	۰٫۱۶
Er	۱٫۲۰	۱٫۲۰	۰٫۵	۰٫۴۵	۰٫۵۵
Lu	۰٫۱۸	۰٫۱۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸
Pr	۴٫۴۵	۴٫۴۵	۲٫۲	۲٫۱	۲٫۴۵
Eu	۰٫۹۲	۰٫۹۲	۰٫۵	۰٫۴۶	۰٫۵
Dy	۲٫۱۸	۲٫۱۸	۰٫۹۴	۰٫۸۲	۰٫۹۶
Tm	۰٫۲۰	۰٫۲۰	۰٫۱	۰٫۰۵	۰٫۱
	Trace-element (ppm)				
Ba	۸۱۶	۸۱۶	۸۵۶	۸۹۱	۹۰۵
Y	۱۱٫۷۰	۱۲٫۷۰	۵٫۸	۵٫۷	۵٫۶
Th	۵	۶	۳٫۹	۳٫۷	۳٫۷
Zn	۷۷	۷۷	۵۵	۴۹	۴۶
V	۷۰	۷۰	۴۰	۳۵	۳۵
Cs	۱	۱	۰٫۸	۰٫۸	۰٫۸
Co	۶۹۰	۶۹۰	۲٫۷	۲٫۳	۲٫۴
Rb	۴۹٫۸۰	۴۸٫۸۰	۵۶٫۴	۵۸٫۸	۵۴٫۸
Zr	۱۱	۱۰	۷	۷	۷
Pb	۹	۱۰	۱۴	۱۱	۱۲
Cu	۱۳	۱۳	۲۰	۱۸	۱۸
Cr	۱۳	۱۳	۲۰	۱۸	۱۸
Sc	۶	۶	۲	۲	۲
Li	۶۵۰	۶۵۰	۱۰٫۵	۱۰	۸
Sr	۶۲۹	۶۳۹	۴۸۲	۴۸۸	۵۰۳
Nb	۷	۷	۵	۵	۴٫۵
Ni	۵	۵	۵	۲	۲
Hf	۰٫۷۰	۰٫۷۰	۰٫۴	۰٫۳	۰٫۳
Be	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰

در رده‌بندی سنگ‌های آذرین بر مبنای درصد وزنی، اکسیدهای $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ نسبت به SiO_2 از نمودار [۲۹] نمونه‌های وابسته به توده‌ی نفوذی گرانودیوریتی و توده‌ی

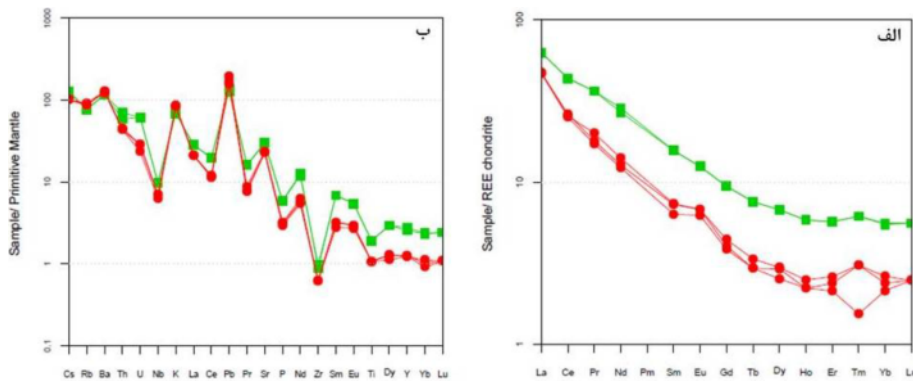
بی‌هنجاری منفی Nb و Ti در نمودارهای بهنجار شده، می‌تواند برای توده‌های نفوذی گرانیتی و گرانودیوریتی شاه جهان نشان دهنده‌ی شکل‌گیری توده‌های نفوذی در مناطق فرورانشی باشد [۲۸] (شکل ۶ ب).

گرانیتی شاه جهان در نمودار دوتایی K_2O-SiO_2 [۳۳] و نمودار سه تایی $FeO_1 - (Na_2O + K_2O) - MgO$ در گستره-ی آهکی-قلیایی قرار گرفته [۳۴] (شکل ۸ ب، پ) و توده‌های نفوذی گرانیتی و گرانودیوریتی شاه جهان در نمودارهای جدایش محیط زمین‌ساختی $Rb - Y, Rb - (Nb + Yb)$ در گستره‌ی قوس آتشفشانی قرار می‌گیرند (شکل ۹ الف، ب) [۳۵].

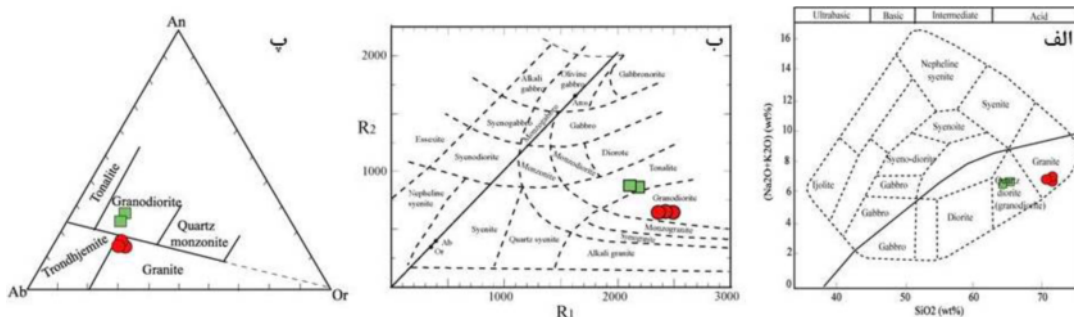
تعیین سری ماگمایی و محیط زمین‌ساختی توده نفوذی گرانودیوریتی شاه جهان بر مبنای شیمی کانی‌ها
سری ماگمایی توده‌ی گرانودیوریتی شاه جهان، با استفاده از رده‌بندی سری ماگمایی بر مبنای شیمی کانی بیوتیت عبدالرحمن [۷] در نمودارهای $FeO-MgO-Al_2O_3$ و Al_2O_3-MgO در گستره‌ی C و آهکی-قلیایی که به محیط-های فرورانشی وابسته‌اند، قرار می‌گیرند (شکل ۱۰ الف، ب).

گرانیتی شاه جهان در گستره‌های گرانودیوریت و گرانیت قرار می‌گیرند (شکل ۷ الف).

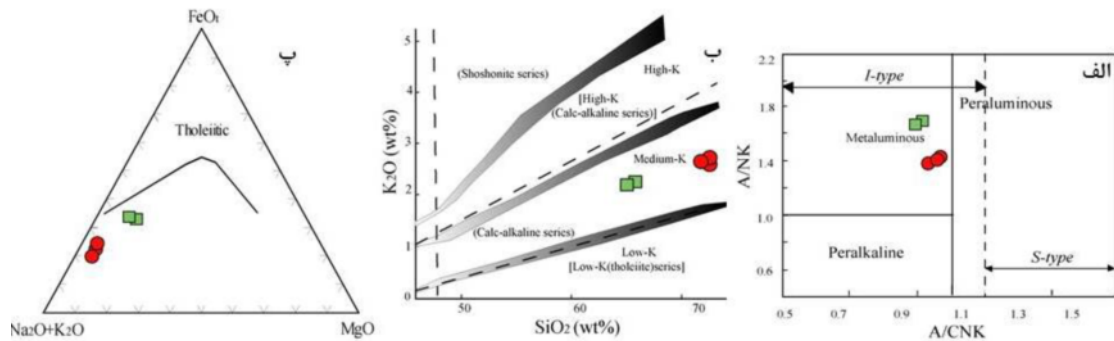
در رده‌بندی بر مبنای کاتیون‌ها در نمودار R_1-R_2 به‌دلیل فراوانی کانی‌های فرومنیزین در این توده‌ها و تاثیر مقادیر Mg, Ca, Fe, در رده‌بندی کاتیون‌های R_1-R_2 نمونه‌های وابسته به توده‌ی گرانودیوریت در گستره‌ی تونالیت و نمونه‌های توده‌ی گرانیتی در گستره‌ی گرانودیوریت قرار می‌گیرند [۳۰] (شکل ۷ ب)، ولی در رده‌بندی بر مبنای کانی‌های بهنجار در نمودار [۳۱]، نمونه‌های گرانودیوریتی و گرانیتی شاه جهان در گستره-ی گرانودیوریت و گرانیت قرار می‌گیرند (شکل ۷ پ). برای جدایش اشباع از آلومینیوم، انواع گرانیتوئیدها از محاسبات ضریب اشباع از آلومینیوم [۳۲، ۲۸] استفاده شد که توده‌های نفوذی گرانودیوریتی و گرانیتی شاه جهان با مقدار $(A/CNK < 1.1)$ و در گستره‌ی نوع I قرار می‌گیرند (شکل ۸ الف). از نظر سری ماگمایی، توده‌های نفوذی گرانودیوریتی و



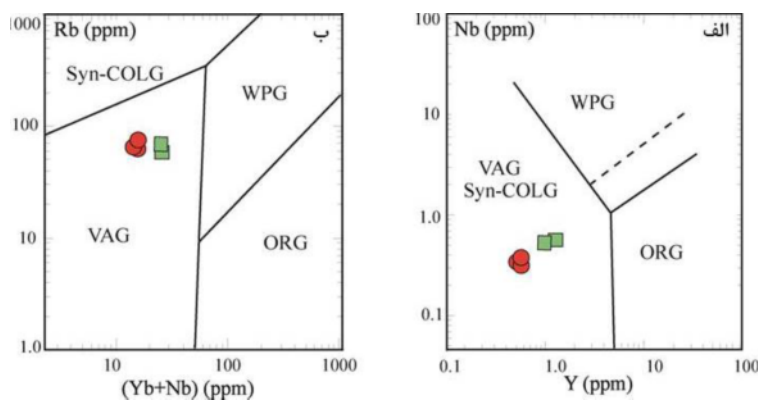
شکل ۶ الف) نمودار تغییرات عناصر نادر خاکی توده‌های گرانیتی بهنجار شده نسبت به کندریت‌ها [۲۶]، ب) نمودار تغییرات عناصر ناسازگار بهنجار شده نسبت به گوشته‌ی اولیه [۲۷]، این نمودارها گویای تشابه تغییرات ژئوشیمی توده‌های گرانیتی و گرانودیوریتی شاه جهان هستند که نشان‌دهنده‌ی هم‌ماگما بودن این توده‌هاست (رنگ سبز مربوط به توده‌های گرانودیوریتی و رنگ قرمز مربوط به توده‌های گرانیتی شاه‌جهان است).



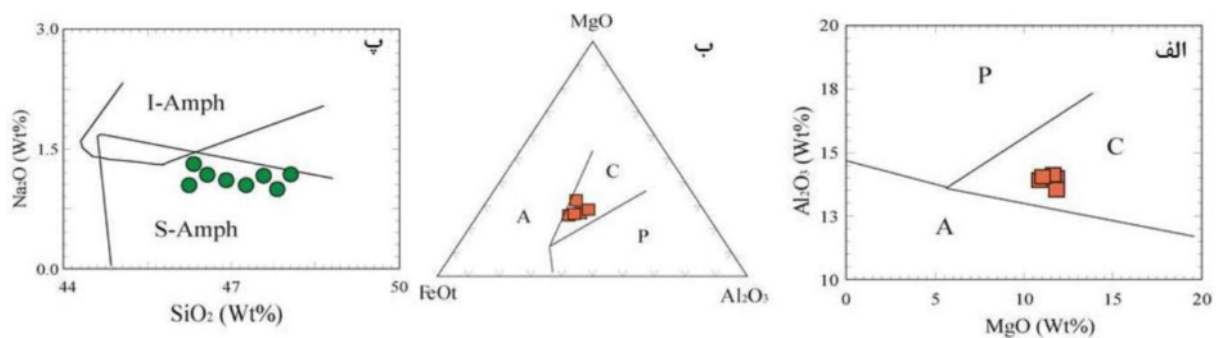
شکل ۷ الف) نمودار نامگذاری سنگ‌های آذرین بر مبنای اکسیدهای $K_2O + Na_2O$ نسبت به SiO_2 ، اقتباس از [۲۹]، ب) نمودار رده‌بندی سنگ‌های آذرین بر مبنای کاتیون‌های $R_1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)$ نسبت به $R_2 = 6Ca + 2Mg + Al$ اقتباس از [۳۰]، پ) نمودار نامگذاری بر مبنای کانی‌های نورماتیو [۳۱]. در این نمودارها نمونه‌های توده‌های گرانیتی و گرانودیوریتی از یکدیگر تفکیک می‌شوند (شکل مربع سبز مربوط به توده گرانودیوریتی و شکل دایره قرمز مربوط به توده نفوذی گرانیتی شاه جهان است).



شکل ۸ الف) نمودار تعیین شاخص آلومینیوم اکتباس از [۳۲] و خط چین برای تعیین نوع گرانیتوئیدها اکتباس از [۲۸] در این نمودار نمونه‌های هر دو توده‌ی گرانیتی و گرانودیوریتی در گستره‌ی شبه رخشان قرار می‌گیرند. ب) نمودار دوتایی K_2O-SiO_2 برای تعیین سری ماگمایی [۳۳] در این نمودار، نمونه‌های هر دو توده‌ی گرانیتی و گرانودیوریتی در گستره‌ی ماگماهای آهکی-قلیایی قرار می‌گیرند، پ) نمودار سه تایی $FeO_1 - (Na_2O + K_2O) - MgO$ برای تعیین سری ماگمایی [۳۴] در این نمودار، نمونه‌های هر دو توده‌ی گرانیتی و گرانودیوریتی در گستره‌ی ماگمای آهکی-قلیایی قرار می‌گیرند (مربع سبز مربوط به توده‌ی گرانودیوریتی و دایره سرخ به توده‌ی نفوذی گرانیتی شاه جهان وابسته‌اند).



شکل ۹ الف) نمودار تعیین محیط زمین‌ساختی اکتباس از [۳۵]، ب) نمودار $Rb-(Yb + Nb)$ تعیین محیط زمین‌ساختی اکتباس از [۳۵]. در این نمودارها هر دو توده‌ی گرانیتی و گرانودیوریتی در گستره محیط‌های فرورانشی قرار می‌گیرند (مربع سبز به توده‌ی گرانودیوریتی و دایره سرخ به توده‌ی نفوذی گرانیتی شاه جهان وابسته‌اند).



شکل ۱۰ الف) نمودار دوتایی Al_2O_3-MgO جدایش سری ماگمایی گرانیت‌ها بر اساس ترکیب شیمیایی بیوتیت اکتباس از [۷]. ب) نمودار سه تایی $MgO-Al_2O_3-FeO_1$ ترکیب شیمیایی بیوتیت، پ) نمودار جدایش محیط زمین‌ساختی فرورانشی (نوع S-Amph) و درون صفحه‌ای (نوع I-Amph) بر مبنای شیمی کانی آمفیبول اکتباس از [۸] (مربع سرخ: مربوط به کانی بیوتیت و دایره سبز: به کانی آمفیبول در توده‌ی گرانودیوریتی وابسته‌اند).

۱۲-۱۴]. همچنین شرط لازم دیگر برای استفاده از فشارسنجی آلومینیوم در هورنبلند این است که باید در آنالیز ریز پردازشی، کانی هورنبلندی آنالیز شود که در برخوردگاه با کوارتز یا فلدسپار پتاسیم باشد [۱۴]. شرایط یاد شده در مورد توده‌ی گرانودیوریتی شاه جهان در نظر گرفته شده است.

در این پژوهش، برای تعیین فشار جایگیری توده‌ی نفوذی گرانودیوریتی شاه جهان، از روش مدرج کردن [۹] استفاده شده است و کلیه روش‌های مختلف محاسبات فشار، برای مقایسه با روش مدرج کردن [۹] در جدول ۵ آورده شده‌اند. فشار به کار رفته در این پژوهش، برای توده نفوذی شاه جهان بین ۱٫۰۸ تا ۱٫۹۱ کیلو بار بوده است.

فشارسنجی آلومینیوم در بیوتیت

میزان آلومینیوم موجود در کانی بیوتیت نیز توسط اوچیدا [۱۶] برای تعیین فشار جایگیری توده‌های نفوذی گرانیتیوئیدی معرفی شده است. در توده‌ی نفوذی شاه جهان، برای مقایسه فشار جایگیری توده‌ی نفوذی با روش‌های فشارسنجی آمفیبول، از این روش نیز استفاده شده است. نتایج فشارسنجی حاصل از این روش، فشار جای‌گیری توده‌ی شاه جهان را بین ۱٫۴ تا ۱٫۶ کیلو بار نشان می‌دهد که در گستره‌ی فشار محاسبه شده با روش فشارسنجی آمفیبول قرار می‌گیرد (جدول ۶).

برداشت

توده‌ی گرانیتی و گرانودیوریتی شاه جهان بخشی از توده‌ی گرانیتیوئیدی اردوباد بوده که در شمال غرب ایران و در ۱۰ کیلومتری جنوب رودخانه‌ی مرزی ارس و در منطقه‌ی ساختاری البرز- آذربایجان برونزد دارد. توده گرانودیوریتی دارای بافت دانه‌ای و شامل کانی‌های روشن کوارتز نیمه شکل-دار تا بی‌شکل، پلاژیوکلاز شکل‌دار با ترکیب شیمیایی آندزین ($X_{Ab} = 0.62 - 0.59$)، فلدسپار پتاسیم شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار با ترکیب شیمیایی ارتوز و شامل کانی‌های مافیک آمفیبول با ترکیب شیمیایی منگنز و هورنبلند و بیوتیت، دارای کانی‌های فرعی اسفن شکل‌دار و کانی‌های کدر از نوع مگنتیت است. توده‌ی نفوذی گرانیتی با بافت‌های دانه‌ای و پرتیتی و شامل کانی‌های روشن کوارتز نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل،

با استفاده از رده‌بندی محیط زمین‌ساختی بر مبنای شیمی کانی آمفیبول، کلوئوری و همکاران [۸]، کانی آمفیبول توده‌ی نفوذی گرانودیوریتی شاه جهان، در گستره‌ی (S-Amph) که وابسته به محیط‌های فرورانشی است، قرار می‌گیرند (شکل ۱۰ پ).

زمین دما-فشارسنجی توده نفوذی گرانودیوریتی شاه جهان بر مبنای شیمی کانی‌های بیوتیت و آمفیبول

دماسنجی هورنبلند- پلاژیوکلاز

هورنبلند و پلاژیوکلاز دو کانی مناسب برای دماسنجی توده‌های نفوذی گرانیتیوئیدی هستند به شرطی که شرایط یاد شده توسط محققینی مثل [۱۱-۱۴] در سنگ‌های گرانیتیوئیدی وجود داشته باشد. شرایط شامل دما در گستره‌ی ۹۰۰-۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و آمفیبول‌هایی با ترکیب $Na_{(A)} > 0.20 pfu$ ، $Si, Al^{(IV)} < 1.8 pfu$ ، و $6-7 pfu$ و پلاژیوکلاز با $X_{An} < 0.9$ باشد. با توجه به اینکه تمام شرایط یاد شده و پاراژنرها در مورد توده نفوذی گرانودیوریتی شاه جهان وجود دارد، لذا از این دماسنجی برای تعیین دما و فشار جایگیری توده‌ی گرانودیوریتی شاه جهان استفاده شد. دمای جایگیری توده با روش‌های مختلف دماسنجی انجام شده و در این پژوهش، نتایج حاصل از دماسنج $T(ed-ri)$ [۱۱] به دلیل اینکه پارامترهای مختلفی را در دماسنجی دخالت داده است مورد استفاده قرار گرفته است. با این روش، دمای جایگیری توده‌ی ۷۵۳-۷۷۷ درجه‌ی سانتی‌گراد مشخص شده است و نیز نتایج دماسنج‌های دیگر برای جهت مقایسه با دماسنج $T(ed-ri)$ [۱۱] در (جدول ۵) آورده شده‌اند.

فشارسنجی آلومینیوم در هورنبلند

بررسی‌های تجربی گویای این است که در یک تشکیل دوگانه سنگ‌های خاص، مقدار آلومینیوم در آمفیبول کلسیک در طول تبلور توده‌ی نفوذی می‌تواند رابطه‌ی خطی با فشار داشته باشد [۱۵، ۱۳]. شرایط لازم برای استفاده از فشارسنجی آلومینیوم در هورنبلند حضور کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم، بیوتیت، هورنبلند، تیتانیت و مگنتیت در سنگ است [۱۰، ۹]،

جدول ۵ نتایج زمین دما- فشارسنجی توده‌ی نفوذی گرانودیوریتی شاه جهان، علائم استفاده شده در جدول Plag Ab: مقادیر نسبی $[Na/(Na + Ca + K)]$ Amph Al (Total)، تعداد کاتیون‌های آلومینیوم محاسبه شده در ساختار اتمی هورنبلند، T(ed-ri): دمای محاسبه شده با کاربرد روش دماسنج (edenite-richterite) از [۱۱]، P-H&Z: فشار محاسبه شده بر حسب کیلو بار با استفاده از روش [۱۰]، P-Sch: فشار محاسبه شده بر حسب کیلو بار با استفاده از روش [۱۳]، P-J&R: فشار محاسبه شده با استفاده از روش [۱۲]، P-A&S: فشار محاسبه شده با استفاده از روش [۹]. دمای و فشار استفاده شده در این پژوهش به صورت تیره در جدول نشان داده شده‌اند و بقیه دما-فشارسنج‌ها برای مقایسه آورده شده‌اند.

نمونه‌ها	Plag Ab	Amph Al (Total)	T(ed-ri) (° C)	P-H&Z (Kbar)	P-Sch (Kbar)	P-J&R (Kbar)	P-A&S (Kbar)
A-15	۰٫۵۹	۱٫۰۹۵	۷۶۱	۱٫۵۹	۲٫۲	۱٫۱۷	۱٫۰۸
A-15	۰٫۶۰	۱٫۳۴۰	۷۷۱	۲٫۸۲	۳٫۳۷	۲٫۲۱	۱٫۹۱
A-15	۰٫۵۹	۱٫۲۷۰	۷۷۷	۲٫۴۷	۲٫۰۴	۱٫۹۱	۱٫۵۱
A-15	۰٫۶۱	۱٫۱۲۸	۷۵۳	۱٫۷۵	۲٫۳۶	۱٫۳۱	۱٫۳۶
A-36	۰٫۶۲	۱٫۱۸۴	۷۶۷	۲٫۰۴	۲٫۶۳	۱٫۱۸	۱٫۴۱
A-36	۰٫۵۹	۱٫۲۰۱	۷۶۵	۲٫۱۲	۲٫۷۱	۱٫۲۰	۱٫۵۱
A-36	۰٫۶۱	۱٫۲۸۸	۷۷۶	۲٫۵۶	۳٫۱۲	۱٫۲۸	۱٫۶۶

جدول ۶ نتایج فشارسنجی آلومینیوم بر مبنای تعداد کاتیون‌های آلومینیوم در کانی بیوتیت بر مبنای فشارسنجی [۱۶].

بارومتر آلومینیوم در بیوتیت [۱۶].						
نمونه‌ها	A-15	A-15	A-15	A-36	A-36	A-36
Al-in- biotite	۲٫۶۷۷	۲٫۶۶۱	۲٫۶۲۲	۲٫۵۶۱	۲٫۶۶۴	۲٫۶۸۳
P (Kbar)	۱٫۵۸	۱٫۵۳	۱٫۴۱	۱٫۲۳	۱٫۵۴	۱٫۶

اند. در نمودارهای هارکر، روند کاهش Fe_2O_3, MgO, CaO گویای تبلور جدایشی کانی‌های مافیک مثل بیوتیت و آمفیبول است. از نظر شاخص شاند، این توده‌ها شبه رخشان و جزء گرانیت‌های نوع I و از نظر سری ماگمایی آهکی- قلیایی هستند. بی‌هنجاری‌های منفی Nb و Ti در نمودارهای بهنجار شده، می‌تواند حاکی از شکل‌گیری توده‌های نفوذی در مناطق فرورانشی باشد. LREE با نسبت $(La/Sm)_N = (۴/۱۱)$ در توده‌ی گرانودیوریتی و نسبت $(La/Sm)_N = (۶/۶۳-۸/۵۵)$ در توده‌ی گرانیتی، دارای غنی‌شدگی مشخص نسبت به HREE با مقادیر $(Gd/Lu)_N = (۱/۲۷-۱/۶۲)$ و $(Gd/Lu)_N = (۱/۶۸)$ در توده‌ی گرانیتی است که نشان‌دهنده‌ی شکل‌گیری ماگما در عمق زیاد است. مقدار $(Eu/Eu^* = ۰/۷۱-۰/۹۹)$ در توده‌های نفوذی گرانودیوریتی و گرانیتی شاه جهان، حکایت از عدم

پلاژیوکلاز شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار، فلدسپار پتاسیم با بافت پرتیت، آمفیبول با فراوانی کمتر نسبت به توده‌ی نفوذی گرانودیوریتی، بیوتیت، اسفن و مگنتیت است. فراوانی کانی‌های فلدسپار پتاسیم در توده‌ی نفوذی گرانیتی نسبت به توده‌ی نفوذی گرانودیوریتی بیشتر است.

نسبت ایزوتوپ ناپایدار $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه در توده‌ی گرانودیوریتی $۰/۷۰۴۴۸۶$ و در توده‌ی گرانیتی $۰/۷۰۴۴۳۲$ و مقدار ϵNd در این توده‌ها مثبت است که گویای خاستگاه گوشته‌ای در محیط‌های فرورانشی است. بر مبنای داده‌های سال‌سنجی بروش Ar-Ar، روی کانی بیوتیت، سن توده‌ی گرانودیوریتی $۰/۴۴ \pm ۴۰/۵۲$ میلیون سال و توده‌ی گرانیتی $۲/۶ \pm ۴۶/۴$ میلیون سال به‌دست آمده‌اند که به توده‌های نفوذی ائوسن شمال غرب ایران، زون البرز-آذربایجان وابسته-

- Sanandaj-Sirjan Zone, Iran*", Journal of Geodynamics 45 (2008) 178–190.
- [6] Azizi H., Moinevaziri H., "Review of the tectonic setting of Cretaceous to Quaternary volcanism in northwestern Iran", Journal of Geodynamics 47 (2009) 167–179.
- [7] Abdel-Rahman A., "Nature of Biotites from Alkaline, Calc-alkaline, and Peraluminous Magmas", Journal of petrology 35 (1994) 525-541.
- [8] Coltorti M., Bondaiman C., Faccini B., Grégoire M., O'Reilly S.Y., Powell W., "Amphiboles from suprasubduction and intraplate lithospheric mantle", Lithos 99 (2007) 68-84.
- [9] Anderson J.L., Smith D.R., "The effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer", American Journal of Science 80 (1995) 549-559.
- [10] Hammarstrom J.M., Zen E., "Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer", American Journal of Science 71 (1986) 1297-1313.
- [11] Holland T., Blundy J., "Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry", Contributions to Mineralogy and Petrology 116 (1994) 433-447.
- [12] Johnson M.C., Rutherford M.J., "Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley Caldera (California) volcanic rocks", Geology 17 (1989) 837-841.
- [13] Schmidt M.W., "Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer", Contributions to Mineralogy and Petrology 110 (1992) 304-310.
- [14] Stein E., Dietl C., "Hornblende thermobarometry of granitoids from the Central Odenwald (Germany) and their implications for the geotectonic development of the Odenwald", Mineralogy and Petrology 72 (2001) 185-207.
- [15] Thomas W.M., Ernst W.G., "The aluminium content of hornblende in calc-alkaline granitic rocks: A mineralogic barometer calibrated experimentally to 12kbar: In: Spencer R.J. and

جدایش پلاژیوکلازها دارد. بر مبنای شیمی کانی‌های بیوتیت، توده‌ی نفوذی گرانودیوریتی شاه جهان به مناطق فرورانشی، سری آهکی-قلیایی و از نوع گرانیت‌های نوع I وابسته است. همچنین آمفیبول آن‌ها از نوع (S-Amph) بوده و گویای شرایط تشکیل در محیط‌های فرورانشی گرانیت‌هاست. توده‌ی نفوذی گرانودیوریتی شاه جهان، دارای پاراژنز مناسب $(Qtz + Pl + Kfs + Amph + Bt + Tit + Opq)$ برای استفاده از زمین‌دما-شیمی‌های مختلف آمفیبول و بیوتیت استفاده شده. محیط فیزیکوشیمیایی این توده، بر مبنای بررسی‌های زمین‌دما-شیمی، در گستره‌ی فشار ۱۰۸ تا ۱۹۱ کیلو بار و در گستره‌ی دمای ۷۵۳ تا ۷۷۷ درجه‌ی سانتی‌گراد تعیین شد.

مراجع

- [1] Hassanpour Sh., Alirezaei S., Selby D., Sergeev S., "SHRIMP zircon U-Pb and biotite and hornblende Ar-Ar geochronology of Sungun, Haftcheshmeh, Kighal, and Niaz porphyry Cu-Mo systems: evidence for an early Miocene porphyry-style mineralization in northwest Iran", International journal of earth sciences 104 (2015) 45-59.
- [۲] حسن پور ش.، "متالوژی کانسارهای مس پورفیری و طلایابی ترمال در زون ارسباران (شمال غرب کشور)"، پایان نامه دکتری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی (۱۳۸۹).
- [3] Castro A., Aghazadeh M., Badrzadeh Z., Chichorro M., "Late Eocene–Oligocene post-collisional monzonitic intrusions from the Alborz magmatic belt, NW Iran. An example of monzonite magma generation from a metasomatized mantle source", Lithos 180–181 (2013) 109–127.
- [۴] مهرپرتو م.، امامی م.ه.، میرزائی م.، و علائی س.، "نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ سیه رود؛ سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۷۶).
- [5] Azizi H., Jahangiri A., "Cretaceous subduction-related volcanism in the north- ern

- Sr, Nd, Pb isotope constraints*", International Journal of Earth Sciences 97 (2008) 89–102.
- [25] Aghazadeh M., Castro A., Omran N.R., Emami M.H., Moinvaziri H., Badrzadeh Z., "The gabbro (shoshonitic)–monzonite–granodiorite association of Khankandi pluton, Alborz Mountains, NW Iran", Journal of Asian Earth Sciences 38 (2010) 199–219.
- [26] Boynton W.V., "Consmochemistry of the rare earth elements meteorite stud-ies. In: Henderson, P. (Ed.), Rare Earth Element Geochemistry", Elsevier Sciences, Amsterdam (1984) 63–114.
- [27] Thompso R.N., "Magmatism of the British Tertiary volcanic province", Scottish Journal of Geology 18 (1982) 9–107.
- [28] 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 Sciences 83 (1992) 1–26.
- [29] Cox K. g., Bell J. D., Pakhurst R. J., "The interpretation of igneous rocks Allen and unwin", London (1979) 450p.
- [30] De La Roche h., Leterrier J., Grandclaude P., Marchal M., "A classification of volcanic and plutonic rocks using R_1 - R_2 diagrams and major element analyses, its relationship and current nomenclature", Chemical Geology 29 (1980) 183–210.
- [31] Barker F., "Terohjamite definition, environment and hypotheses of origin, in Terohjamites, dacites and related rocks", edited by F Barker., Elsevier Science Publication Amsterdam (1979) 1-12.
- [32] Maniar P.D., Piccoli P.M., "Tectonic discrimination of granitoids", Geological Society of American Bulletin 101 (1989) 635–643.
- [33] Le Maitre R.W., Bateman P., Dubek A., Keller J., Lameyre J., Le Bas M.J., Sabine P.A., Schmid R., Sřensen H., Streckeisen A., Woolley A.R., Zanettin B., "A classification of igneous rocks and glossary of terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks", Blackwell, Oxford (1989) 193.
- Chou I.M (Eds.), *Fluid-mineral interactions: A tribute to HP Eugster*", The Geochemical Society Special Publication 2 (1990) 59–63.
- [16] Uchida E., Endo S., Makino M., "Relationship between Solidification Depth of Granitic Rocks and Formation of Hydrothermal Ore Deposits", Resource Geology 57 (2007) 47–56.
- [۱۷] اسماعیلی د، طبخ شعبانی ا. ع، نجار ح، رضایی م، "استفاده از شیمی کانی آمفیبول در بررسی ویژگی های اگمایی و سازنده و زمین دما-فشارسنجی توده های گرانیتوئیدی شمال غرب ساوه، ایران مرکزی"، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۲۱ (۱۳۹۲) ص ۴۱۷-۴۳۰.
- [۱۸] طهماسبی ز، خلیلی م، احمدی خلجی ا، مکی زاده م، "مقایسه انواع آمفیبول ها و ژئوترموپارومتری توده نفوذی آستانه (زون سنندج-سیرجان)"، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۱۷ (۱۳۸۸) ص ۲۷۹-۲۹۰.
- [۱۹] قدمی غ، مرادیان شهر بابکی ع، مرتضوی س. م، زمین دما-فشارسنجی و کانی شناسی توده های نفوذی اسیدی الیگو-میوسن شمال غرب شهر بابک، کرمان"، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۲۲ (۱۳۹۳) ص ۵۴۳-۵۵۶.
- [20] Leake B.E., "On aluminous and edenitic amphiboles", Mineralogical Magazine 38 (1971) 389–407.
- [21] Deer W. A., Howie A., Sussman J., "An interdiction to rock- forming minerals", 17th. Longman Ltd (1986) 528p.
- [22] Hamilton P.J., Evensen N.M., O'Nions R.K., Smith H.S., and Erlank A.J., "Sm-Nd dating of Onverwach group volcanics, southern Africa", Nature 279 (1979) 28-300.
- [23] Shafiei B., Haschke M., Shahabpour J., "Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran", Mineralium Deposita 44 (2009) 265–283.
- [24] Liotard J.M., Dautria J.M., Bosch D., Condomines M., Mehdizadeh H., Ritz J.-F., "Origin of the absarokite–banakite association of the Damavand volcano (Iran): trace elements and

[35] 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] Irvine T.N., Baragar W.R.A., "A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks". Canadian Journal of Earth Sciences 8 (1971) 523-548.