



## پترولوژی و ژئوشیمی هورنبلند گابروهای پروتروزوئیک جنوب شرق فریمان، استان خراسان رضوی

سید مسعود همام

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

دریافت: 1393/1/12، پذیرش: 1393/04/31

### چکیده

منطقه مورد مطالعه در شمال شرق ایران، در زون ایران مرکزی و در جنوب شرقی فریمان واقع شده و از مجموعه سنگی پیچیده‌ای متشکل از سنگهای دگرگونی، آذرین درونی و آتشفشانی تشکیل گردیده است. هورنبلند گابروهای منطقه با سن پروتروزوئیک که برای نخستین بار مورد بررسی دقیق قرار گرفته‌اند، حاوی کانیه‌های اصلی پلاژیوکلاز، هورنبلند، بیوتیت، پیروکسن و اولیوین و کانیه‌های فرعی آپاتیت، ایلمنیت و مگنیتیت می‌باشند. در مثالهای متعدد، کانیه‌های هورنبلند و بیوتیت به صورت حاشیه‌ای در اطراف بلورهای پلاژیوکلاز، پیروکسن و اولیوین دیده می‌شوند در حالی که کانیه‌های اخیر به وضوح دارای بافت خوردگی هستند. این امر می‌تواند منعکس کننده واکنش بلورهای پلاژیوکلاز، پیروکسن و اولیوین با مذاب یا سیال غنی از آب جهت تشکیل هورنبلند و بیوتیت باشد. در برخی از موارد رورشدی در آمفیبول به شکل نوسانی است که این امر می‌تواند بیانگر تغییرات ناگهانی در فشار فاز سیال باشد. بافت غالب هورنبلند گابروها، هیپیدیمورف گرانولار است، اما بافت‌های اینتر گرانولار و پورفیری نیز در آنها به چشم می‌خورد.

سنگهای منطقه از لحاظ سری ماگمایی جز سری تولوئیت با ماهیت متآلومینوس می‌باشند. رفتار اکسیدهای عناصر اصلی روند عادی تفریق را در ماگما نشان می‌دهند. در نمودار عناصر نادر خاکی که نسبت به کندریت به‌هنجار شده‌اند غنی‌شدگی واضحی از LREE نسبت به HREE دیده می‌شود. هورنبلند گابروهای جنوب شرق فریمان در مقایسه با میانگین سنگهای MORB مقادیر متفاوتی از غنی‌شدگی در عناصر لیتوفیل بزرگ یون (LILE) را نشان می‌دهند در حالی که عناصر با شدت میدان بالا (HFS) در مقایسه با فراوانی این عناصر در سنگهای MORB تهی‌شدگی نشان می‌دهند. در نمودار عنکبوتی به‌هنجار شده بر حسب ترکیب مانتل اولیه آنومالی منفی Nb و Zr دیده می‌شود. گابروهای جنوب شرق فریمان دارای خصوصیت تولیت جزایر قوسی (IAT) بوده و نمودارهای ترسیم شده برای عناصر جزئی جهت بررسی و تعیین منشأ سنگ مادر نشان‌دهنده تشکیل آنها از یک منشأ گارنت لرزولیت با میزان حدود 3 تا 10 درصد ذوب بخشی است.

ویژگیهای کانی‌شناختی، بافتی و ژئوشیمیایی هورنبلند گابروهای جنوب شرق فریمان مؤید تشکیل ماگمای آنها در زون‌های فرافروانشی مرتبط با حوضه‌های حاشیه قوسی است.

واژه‌های کلیدی: هورنبلند گابرو، گرانیته، بازالت تولیتیتی، زون فرورانش، مورب، رورشدی، فریمان.

### مقدمه

یک فاز کانیایی مهم در سنگهای گابرویی مرتبط با زون‌های فرورانش، یا حاصل تبلور اولیه آنها از یک ماگمای مافیک آبدار بوده (Beard and Borgia, 1989) و یا ممکن است حاصل واکنش کانیه‌های انباشتی از قبل تبلور یافته نظیر اولیوین، پیروکسن با مذاب یا سیال غنی از آب باشد (Costa

هورنبلند گابروها در بسیاری از سوئیت‌های ماگمایی مرتبط با زون‌های فرورانش گزارش شده و بیانگر فرآیند تفریق در ماگماهای مرتبط با جزایر قوسی هستند (Heliker, 1995; Hickey-Vargas et al., 1995). حضور هورنبلند به‌عنوان

گرفته‌اند. هر چند از دیدگاه علوی و همکاران (Alavi et al., 1997) این منطقه در بلوک سبزواری-نائین قرار دارد. مجموعه دگرگونی - آذرین پروتروزوئیک جنوب شرقی فریمان (شکل 1) شامل مجموعه‌ای از میکاشیست‌های حاوی آندالوزیت، سیلیمانیت، کوردیریت و گارنت است که در آنها بلورهای درشت آندالوزیت و در برخی موارد گارنت به صورت پورفیروبلاست در نمونه دستی به‌خوبی قابل مشاهده هستند. در این مجموعه لایه‌هایی با پراکنندگی نامنظم از کوارتزیت، آهک‌های به‌شدت تبلور مجدد یافته و ماسه سنگ‌های رس‌دار دگرگون‌شده حاوی بیوتیت، مسکویت، فیبرولیت و گارنت قرار دارند. همچنین رگه‌های پگماتیتی و کوارتزی مجموعه دگرگونی مزبور را قطع می‌نمایند. یک مجموعه آتشفشانی - رسوبی متشکل از کربنات‌های تبلور مجدد یافته، سنگ‌های آتشفشانی دگرگون‌شده اسیدی و بازیک و گرانیت، موسوم به کمپلکس سیبک در جنوب، به‌صورت گسله در مجاورت با مجموعه دگرگونی بالا قرار دارند. مجموعه سنگ‌های آذرین درونی شامل گابرو و گرانیت به شکل یک نوار طویل با عرض حدود 500 متر و طول تقریبی 15 کیلومتر با روند شمال غربی - جنوب شرقی قابل تعقیب هستند (شکل 1). اگر چه توده‌های گرانیتی اغلب بافت معمول گرانیت‌ها را به نمایش می‌گذارند اما گاهی دارای بافت گنیسی و شبه میگماتیتی هستند. تفکیک صحرایی توده‌های گرانیتی و گابرویی از همدیگر و همچنین از سنگ‌های دربرگیرنده آنها (کمپلکس سیبک) بسیار مشکل می‌باشد. مطالعات صحرایی دقیق بر روی ارتباط صحرایی بین توده‌های گرانیتی و گابرویی نشان می‌دهد که در محل کنتاکت بین این دو، همواره توده‌های گابرویی به‌شدت برشی و ورقه‌ای شده و خش لغزها به‌وضوح در سطح آنها قابل مشاهده هستند (شکل‌های 2-A و B). این امر به‌وضوح نشان‌دهنده رابطه گسلی بین توده‌های مذکور است. بر اساس تعیین سن انجام شده بر روی زیرکن‌های یک نمونه گرانیت از مجموعه کمپلکس سیبک توسط گرامونت (Gramount, 1979)، سنی بین 630 تا 650 میلیون سال برای آنها تعیین گردیده است. تعیین سن با روش اورانیوم-سرب بر روی زیرکن‌های موجود در گرانیت‌های منطقه چاهک توسط نگارنده که در دانشگاه سانتا باربارای ایالت کالیفرنیا آمریکا صورت گرفت، سن اواخر پروتروزوئیک برای این مجموعه را تأیید می‌نماید. با توجه به نبود اطلاعات سن‌سنجی برای

(et al., 2002). بررسی دقیق سنگ‌نگاری و ژئوشیمی هورنبلند گابروهای منطقه چاهک با سن پروتروزوئیک، که برای نخستین بار گزارش می‌شوند می‌تواند موقعیت بسیار ارزشمندی جهت فهم شرایط پروتروزوئیک سنگ‌های مزبور را ارائه نماید. به‌علاوه، با توجه به موقعیت سنی و زمین‌ساختی خاص منطقه مورد مطالعه در گستره زمین‌شناسی ایران، مطالعه حاضر می‌تواند کلیدی برای فهم بهتر تاریخچه زمین‌شناسی ایران به‌ویژه زون ساختاری ایران مرکزی باشد.

### روش مطالعه

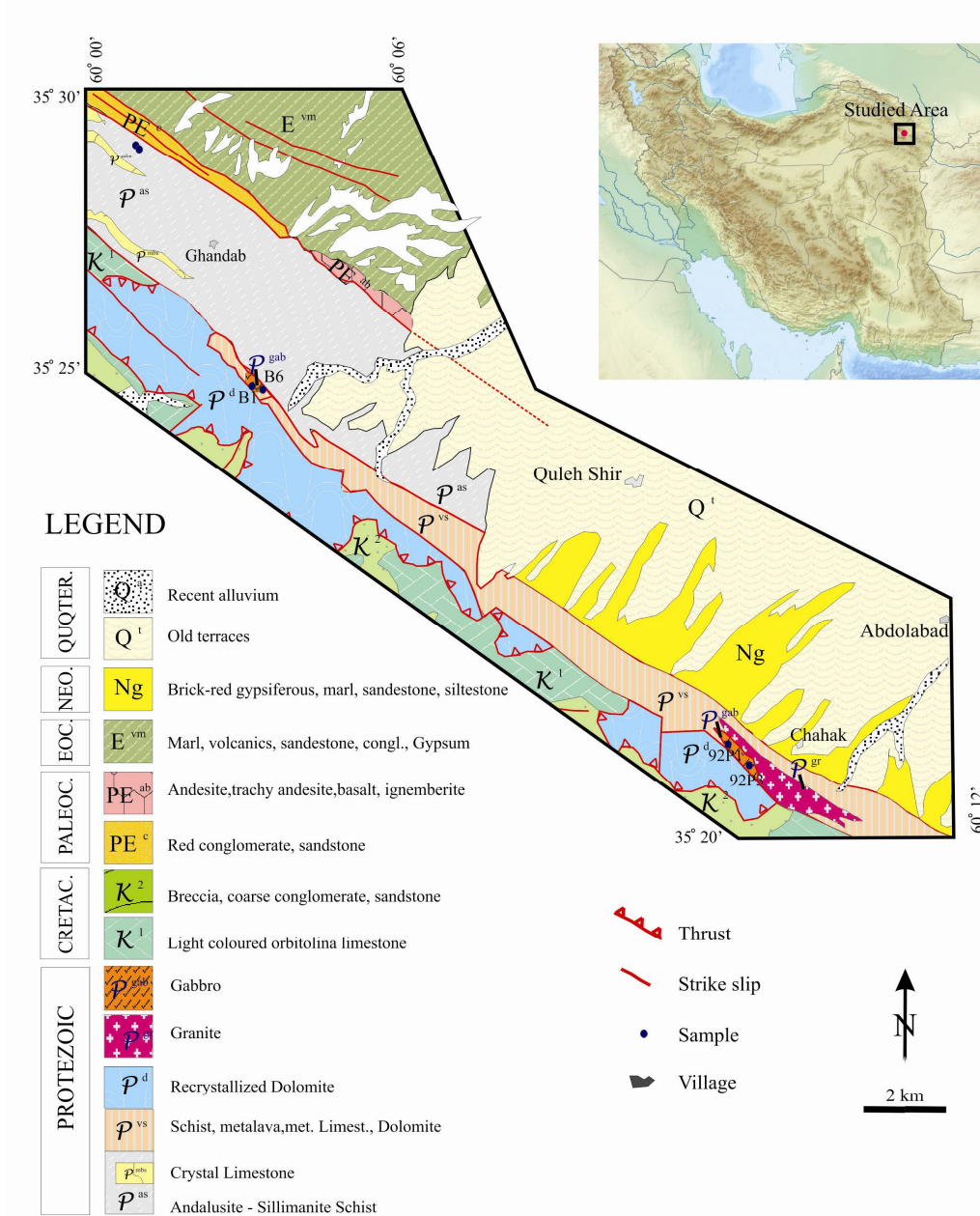
پژوهش حاضر حاصل مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی است. مطالعات صحرایی شامل بازدید از منطقه، شناسایی و تفکیک سنگها و به‌ویژه انواع مختلف توده‌های نفوذی و ارتباط آنها با یکدیگر و در نهایت برداشت 65 نمونه از توده‌های گابرویی بوده است. مطالعات آزمایشگاهی شامل تهیه مقاطع نازک از نمونه‌ها و مطالعه میکروسکوپی آنها، تجزیه شیمیایی 4 نمونه گابرو با استفاده از دستگاه ICP-MS بر اساس روش 4AB1 در آزمایشگاه ACME کانادا برای اکسیدهای اصلی عناصر جزئی و حاکی نادر بوده‌اند. در مرحله آخر، با استفاده از نرم‌افزار GCDkit نتایج آزمایشگاهی پردازش گردیدند.

### زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

بررسی زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه موضوع کار چند پژوهشگر بوده است (Gramount, 1979; Vaezi Pour et al., 1983; Safourae, 2008; Ranjbar-Moghadam, 2011; Partovifar, 2012). مجموعه سنگی پیچیده جنوب شرقی فریمان متشکل از سنگ‌های دگرگونی، آذرین درونی و آتشفشانی یکی از منحصر به فردترین بوم‌های قدیمی ایران زمین را تشکیل می‌دهد. منطقه مورد مطالعه در 110 کیلومتری جنوب شرق مشهد و 40 کیلومتری جنوب شرق فریمان به مختصات  $35^{\circ} 24'$  تا  $35^{\circ} 28'$  شرقی و  $60^{\circ}$  تا  $60^{\circ} 07'$  شمالی قرار گرفته است. از نظر تقسیمات زمین‌شناسی و ساختاری اختلاف نظرهای زیادی در خصوص قرارگیری منطقه مورد مطالعه در زون‌های زمین‌شناسی وجود دارد. نبوی (Nabavi, 1976) این منطقه را در بخش مرزی ایران مرکزی و زون بینالود و بخشی از البرز می‌داند. افتخارنژاد (Eftekhari-Nejad, 1973) و آق‌باتی (Aghanabati, 1975) نیز محدوده مورد مطالعه را جزو ایران مرکزی در نظر

و حضور دایک‌های مافیک درون گرانیت‌ها تصور جوانتر بودن توده‌های گابرویی نسبت به گرانیت‌ها را ایجاد می‌نماید.

توده‌های گابرویی و ارتباط گسلی با سنگهای اطراف، تقدم و تأخر آنها نسبت به توده‌های گرانیتی بسیار دشوار است با وجود این عدم حضور بیگانه سنگهای مافیک در توده گرانیتی



شکل 1. نقشه زمین‌شناسی مجموعه سنگی جنوب شرق فریمان. دایره‌های توپر موقعیت نمونه‌هایی را نشان می‌دهد که از آنها آنالیز تهیه شده است.

**Fig. 1.** Regional geological map of southeast of Fariman complex. Filled circles show the position of analyzed rocks.

شیشه دولومیت‌های سلطانیه هستند و با توجه به نقشه 1/100000 چهارگوش کارینو بر روی سازندهای کرتاسه رانده شده‌اند. توالی توصیف‌شده توسط سیستم گسلی با روند

مجموعه سبیک به صورت گسله در مجاورت دولومیت‌های دگرگون‌شده و تبلور مجدد یافته قرار می‌گیرند. این دولومیت‌های تیره‌رنگ و تبلور مجدد یافته از نظر لیتولوژیکی

ماسه‌سنگهای توفی و گری‌واکی، ژئپس، مارن، کنگلومرا و سنگهای آتشفشانی کرتاسه قرار گرفته است که خود توسط رسوبات پلیو - پلیئستوسن و در نهایت آبرفت‌های کواترنر پوشیده شده‌اند (شکل 1).

شمال غرب - جنوب شرق قطع شده است. این سیستم گسلی کمپلکس آتشفشانی - رسوبی و آندالوزیت شیست‌ها را از واحد دولومیت‌های رورانده جدا می‌نماید. مجموعه مورد مطالعه در شمال به صورت گسلی مجاور مجموعه‌ای متشکل از



**شکل 2. A:** مرز سنگهای گرانیتی و گابرویی. به ورقه‌ای شدن توده‌های گابرویی در مرز با گرانیت توجه نمایید. **B:** خش لغزهای موجود در سطح گابروها.

**Fig 2. A:** The boundary between granite and gabbro. Notice shearing in gabbro in the contact with granite. **B:** Slickenside in the gabbro surface.

### سنگ‌نگاری

به مجموعه‌هایی از اپیدوت، زئوزیت-کلینوزئوزیت و کلسیت در بسیاری از نمونه‌ها دیده می‌شود (شکل 3-C). هورنبلند بین 30 تا 70 درصد حجمی سنگها را به خود اختصاص داده است. هورنبلندها چند رنگی متفاوتی از بی‌رنگ تا سبز کم‌رنگ و سبز تا سبز - قهوه‌ای را نشان می‌دهند. هورنبلندها را می‌توان به دو گروه تقسیم نمود. نوع اول به صورت بلورهای مجزا، ریز تا متوسط‌دانه دیده می‌شوند که از آنها می‌توان به‌عنوان هورنبلندهای اولیه نام برد. نوع دوم هورنبلندها به صورت حاشیه در اطراف بلورهای اولیوین، پیروکسن و پلاژیوکلاز به چشم می‌خورند که احتمالاً حاصل واکنش این بلورها با مذاب یا سیال غنی از آب هستند. در هورنبلند گابروهای جنوب شرق فریمان رورشدی بلورهای سبز روشن تا تیره آمفیبول با ترکیب ترمولیت - اکتینولیت بر روی بلورهای قهوه‌ای رنگ هورنبلند (شکل 3-D) که بعضاً حاوی هسته خورده شده‌ای از بلور اوژیت هستند به وضوح قابل رؤیت است (شکل 3-E و F). چنین بافتی می‌تواند نشان‌دهنده تشکیل سنگهای مورد نظر از یک ماگمای با فشار فاز سیال نسبتاً بالا باشد که در آن پیروکسن ناپایدار شده و

سنگهای گابرویی جنوب شرق فریمان در نمونه دستی به رنگ سبز تیره بوده و بافت آنها از درشت‌دانه تا پورفیری متغیر است. در مقاطع میکروسکوپی بافت غالب هورنبلند گابروها، هیپیدئومورف گرانولار است اما بافت‌های اینتر گرانولار و پورفیری نیز در آنها به چشم می‌خورد. پلاژیوکلاز، هورنبلند، بیوتیت، پیروکسن و اولیوین از کانیهای مهم تشکیل‌دهنده گابروها محسوب می‌شوند. اگر چه آپاتیت، اسفن و برخی کانیهای تیره، نظیر مگنتیت و ایلمنیت نیز در این سنگها به چشم می‌خورند.

پلاژیوکلاز معمولاً به صورت بلورهای تیغه‌ای و توفالی شکل درشت‌بلور در گابروهای درشت‌دانه (شکل 3-A)، اگرگات‌های درشت تا متوسط‌دانه در گابروهای پوفیری و بلورهای توفالی ریزدانه در میکروگابرها دیده می‌شوند. پلاژیوکلاز بین 30 تا 45 درصد حجمی سنگهای گابرویی را تشکیل داده و ترکیب آن بین آندزین تا بیتونیت متغیر است. در مواردی می‌توان خوردگی در بلورهای پلاژیوکلاز در مجاورت با بلورهای هورنبلند را مشاهده نمود (شکل 3-B). دگرسانی پلاژیوکلاز

ترمولیت - اکتینولیت بیانگر دگرگون شدن سنگهای مورد مطالعه در حد رخساره شیستهای سبز است.

#### ژئوشیمی

تعداد 4 نمونه کمتر دگرسان شده از سنگهای گابرویی منطقه مورد مطالعه (92P-1، 92P-3، B1، و B6) از مجاورت روستای چاهک و رودخانه بردو (شکل 1) جهت آنالیز اکسیدهای اصلی و عناصر کمیاب و نادر خاکی با استفاده از دستگاه ICP-MS و بر اساس روش 4AB1 به آزمایشگاه ACME کانادا ارسال گردیدند. تعداد سه نمونه (89P-46، 89P-59، و 89P-62) نیز که آنالیز اکسیدهای اصلی به روش XRF در کانساران بینالود تهران بر روی آنها صورت گرفته بود از پرتوی فر (Partovifar, 2012) مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج آنالیز شیمیایی عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی (Wt%) و عناصر فرعی و کمیاب بر حسب (ppm) هورنبلند گابروهای منطقه مورد مطالعه در جدول 1 آورده شده است.

در بخش ژئوشیمی، هدف بررسی مقادیر اکسیدهای اصلی، عناصر کمیاب و نادر خاکی توده‌های گابرویی منطقه چاهک با استفاده از نمودارهای مناسب و مقایسه آنها با بازالت‌های موجود در پشته‌های میان‌اقیانوسی و جزایر قوسی است. با عنایت به این که عناصر نامتحرک و ناسازگار کمیاب و نادر دارای محدوده مشخصی در موقعیتهای تکتونیکی متفاوت هستند (Rollinson, 1993)، استفاده از آنها می‌تواند بسیار مفید باشد. در بخش حاضر سعی گردیده تا با استفاده از ویژگی این دسته از عناصر موقعیت تکتونیکی سنگهای مورد مطالعه تعیین گردد.

میزان  $Mg\#$  برای گابروهای منطقه چاهک از حدود 40 تا حدود 68 متغیر است که معرف مقادیر متفاوتی از تفریق بلوری در مخزن ماگمایی است. در نمودار (Cox et al., 1979)، نمونه‌ها در محدوده گابرو یا در مرز بین گابرو و دیوریت واقع شده و ماهیت ساب آلكالان را نشان می‌دهند (شکل 5-A). در نمودار  $K_2O$  در برابر  $SiO_2$  (Peccerillo and Taylor, 1976) نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده تولییتی و کالک - آلكالان واقع می‌شوند (شکل 5-B). به منظور تفکیک بهتر دو محدوده تولییتی و کالک - آلكالان از نمودار ضریب آلكالی در مقابل درصد وزنی  $Al_2O_3$  (Middlemost,

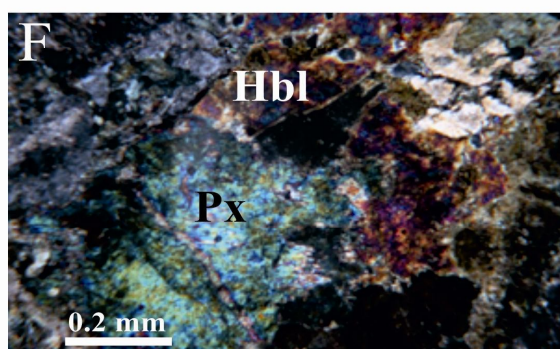
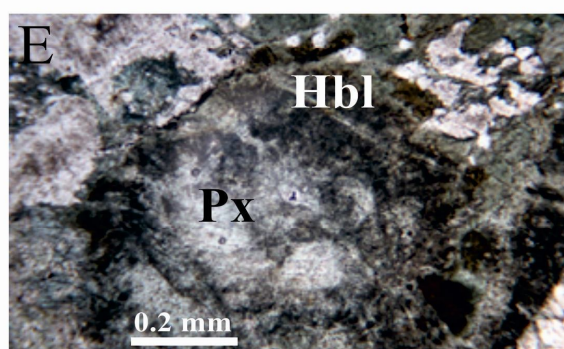
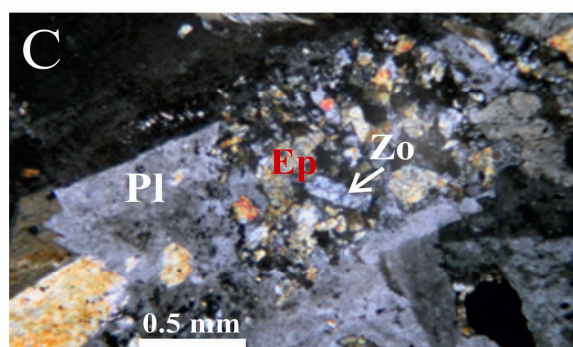
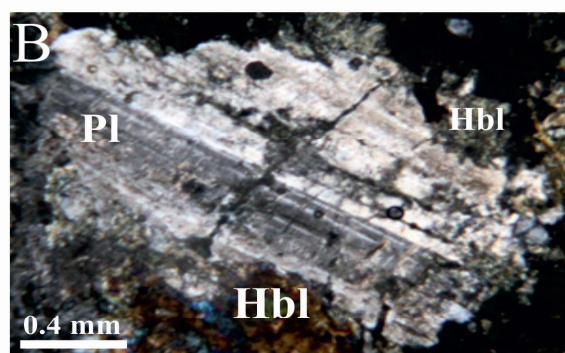
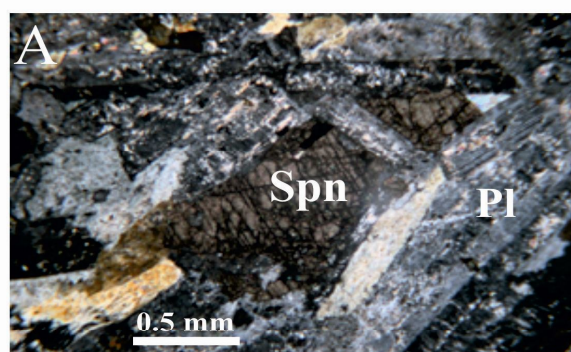
شرایط برای تشکیل آمفیبول فراهم گردیده است (Bowes and Kinloch, 1964). در برخی از موارد رورشدی در آمفیبول به شکل نوسانی است که این امر می‌تواند بیانگر تغییرات ناگهانی در فشار فاز سیال باشد (شکل 3-E و F). بیوتیت بین 7 تا 12 درصد حجمی سنگها را به خود اختصاص می‌دهد و به صورت بلورهای صفحه‌ای با چند رنگی بی رنگ تا قهوه‌ای دیده می‌شود. در بسیاری از مثالها کانی بیوتیت نظیر هورنبلند به صورت حاشیه در اطراف بلورهای اولیوین، پیروکسن و پلاژیوکلاز به چشم می‌خورند (شکل 4-A).

در هورنبلند گابروهای جنوب شرق فریمان پیروکسن از نوع کلینو پیروکسن و ارتو پیروکسن دیده می‌شوند. اگر چه فراوانی کلینو پیروکسن بیشتر بوده (10 تا 25 درصد) و ترکیب آنها عموماً از نوع دیوپسید بوده که به صورت بلورهای متوسط تا درشت‌دانه نیمه شکل‌دار دیده می‌شوند. جای‌گزینی پیروکسن توسط آمفیبول (اکتینولیت و ترمولیت) (شکل 4-B) در هورنبلند گابروهای جنوب شرق فریمان امری معمول بوده و در برخی مثالها پیروکسن به‌طور کامل توسط این کانیها جای‌گزين شده است. در برخی موارد بلورهای پیروکسن به شکل موضعی و در طول مرز دانه‌ها به هورنبلند تبدیل شده که به نظر حاصل حاشیه واکنشی است (شکل 4-C). میزان ارتوپيروکسن در هورنبلند گابروهای جنوب شرق فریمان اندک (0/5 تا 1 درصد) بوده و از نوع برونزیت است. اولیوین به صورت بلورهای مدور متوسط‌دانه با شکستگیهای فراوان دیده می‌شود که در مواردی به‌وسیله حاشیه‌هایی از پیروکسن، هورنبلند قهوه‌ای، بیوتیت و اکتینولیت احاطه گردیده است (شکل 4-D). فراوانی آن نسبتاً اندک و بین 2 تا 5 درصد می‌باشد. بلورهای اولیوین دارای شکستگیهای فراوانی هستند که به‌ویژه در طول آنها به‌وسیله ذرات بسیار نامنظم، ریز و تیره‌رنگ مگنتیت جای‌گزين شده‌اند.

آپاتیت به مقدار اندک و به شکل ذرات ریز عموماً همراه پیروکسن و کانیهای تیره یافت می‌شود. کانیهای کدر به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار ایلمنیت و مگنتیت همراه با پلاژیوکلاز و پیروکسن دیده می‌شوند. تبدیل ایلمنیت به لوکوکسن در سنگهای مورد مطالعه امری معمول است. جای‌گزینی معمول بلورهای پلاژیوکلاز توسط اپیدوت، زئوزیت - کلینوزئوزیت و هورنبلند و پیروکسن به‌وسیله

(شکل 5-D). نمودار تفکیک سنگهای ماگمایی از نظر آلومین در منطقه مورد مطالعه به‌وضوح در محدوده ترکیبات تولییتی قرار می‌گیرند (شکل 5-C). در نمودار AFM، (Irvine and Barager, 1971) سنگهای منطقه مورد مطالعه مشخصاً روندی تولییتی را نشان می‌دهند که مؤید خصوصیت یک ماگمای خوب تفریق یافته است (شکل 5-E).

(شکل 5-D). نمودار تفکیک سنگهای ماگمایی از نظر آلومین در منطقه مورد مطالعه به‌وضوح در محدوده ترکیبات تولییتی قرار می‌گیرند (شکل 5-C). در نمودار AFM، (Irvine and Barager, 1971) سنگهای منطقه مورد مطالعه مشخصاً روندی تولییتی را نشان می‌دهند که مؤید خصوصیت یک ماگمای خوب تفریق یافته است (شکل 5-E).

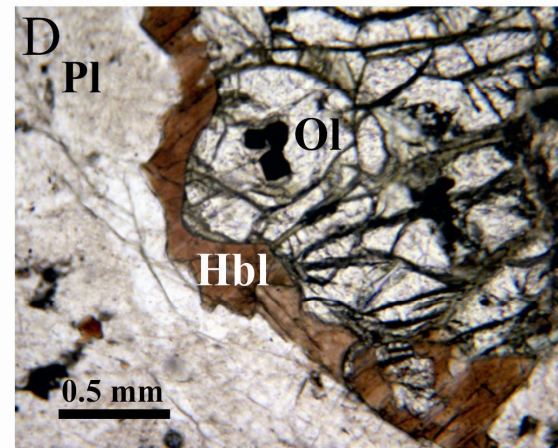
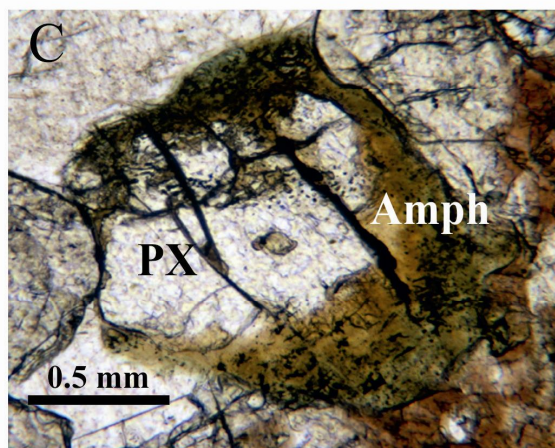
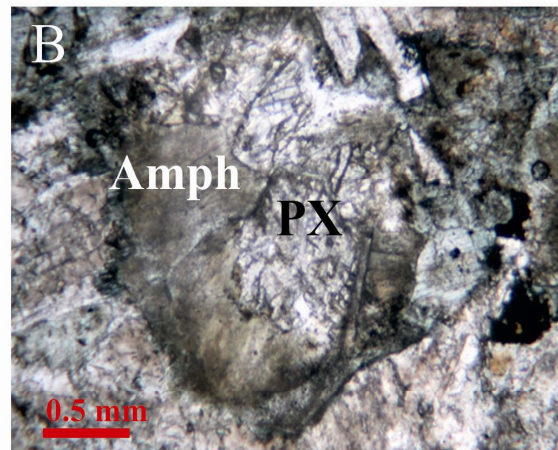
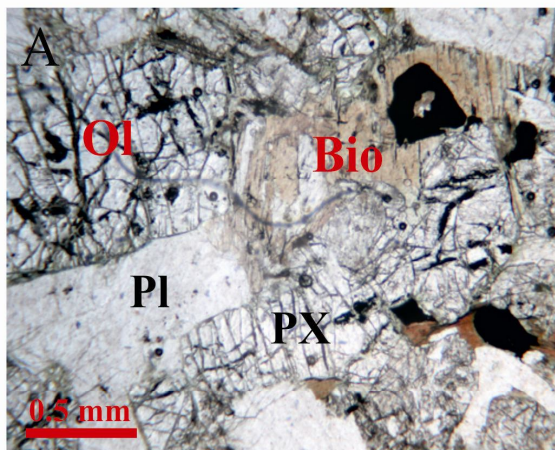


شکل 3. A: بلورهای توفالی پلاژیوکلاز. B: خوردگی پلاژیوکلاز در مرز با هورنبلند. C: تبدیل بلورهای پلاژیوکلاز به اپیدوت و زئوزیت. D: رورشدی اکتینولیت بر روی هورنبلند. E: رورشدی نوسانی هورنبلند بر روی یک پیروکسن خورده شده (PPL). F: رورشدی نوسانی هورنبلند بر روی یک پیروکسن خورده شده (XPL). پلاژیوکلاز (Pl)، اسفن (Spn)، هورنبلند (Hbl)، پیروکسن (Px)، زئوزیت (Zo)، اپیدوت (Ep).

**Fig. 3.** A: Lath-shaped plagioclase crystals. B: Plagioclase crystal with corroded margins in contact with hornblende. C: Plagioclase alteration to epidote and zoisite. D: Rhythmic overgrowth of hornblende on a corroded pyroxene (PPL). E: Rhythmic overgrowth of hornblende on a corroded pyroxene (XPL). Plagioclase (Pl), Sphene (Spn), Hornblende (Hbl), Pyroxene (Px), Zoisite (Zo), Epidote (Ep).

همچنین فاقد یک آنومالی مشخص در Eu می‌باشند که این موضوع می‌تواند ناشی از بالا بودن فوگاسیته اکسیژن در هنگام تبلور سنگهای منطقه مورد نظر و یا جدا شدن پلاژیوکلاز در ابتدای تفریق از ماگما باشد. از آنجایی که آمفیبول و ارتوپروکسن در مذابهای بازالتی دارای آنومالی منفی Eu و پلاژیوکلاز دارای آنومالی مثبت Eu است، تبلور هم‌زمان آمفیبول و یا کلینوپروکسن با پلاژیوکلاز نیز می‌تواند باعث فقدان آنومالی Eu باشد (Martin, 1999). اگر چه با توجه به سنگ‌نگاری و کانیهای اصلی متشکله سنگ، فرضیه آخر محتمل‌تر به نظر می‌رسد.

عناصر کمیاب خاکی انحلال‌پذیری کمی دارند و در طول فرآیندهای هوازدگی، دگرگونی درجه پایین و دگرسانی هیدروترمال نسبتاً غیرمتحرک می‌باشند. در نمودار عناصر نادر خاکی که نسبت به کندریت به‌هنجار شده‌اند (شکل 6-A)، غنی‌شدگی واضحی از LREE نسبت به HREE دیده می‌شود. بالا بودن نسبت LREE/HREE یکی از شاخصهای مهم ماگماهای مرتبط با فرورانش بوده که می‌تواند منعکس‌کننده غنی‌شدگی در گوشته توسط فاز مذاب یا سیال سرشار از آب در نتیجه فرورانش باشد (Fitton et al., 1991). همان‌طور که دیده می‌شود الگوهای عناصر نادر خاکی



شکل 4. A: تشکیل بیوتیت به صورت حاشیه‌ای در اطراف پیروکسن. B: تبدیل پیروکسن به ترمولیت و اکتینولیت. C: تبدیل پیروکسن به هورنبلند از حاشیه. D: تشکیل هورنبلند در مرز بین اولیوین و پلاژیوکلاز. پلاژیوکلاز (Pl)، اولیوین (Ol)، هورنبلند (Hbl)، پیروکسن (Px)، بیوتیت (Bio)، آمفیبول (Amph).

Fig. 4. A: Biotite formation in the margin of a pyroxene crystal. B: Pyroxene alteration to actinolite and tremolite. C: Pyroxene alteration to hornblende from its margin D: Hornblende formation in the boundary between olivine and plagioclase. Plagioclase (Pl), Olivine (Ol), Hornblende (Hbl), Pyroxene (Px), Biotite (Bio), Amphibole (Amph).

Hf, Ti و Sm در مقایسه با فراوانی این عناصر در سنگ های MORB تهی شدگی نشان می دهند (شکل 6-B). این ویژگی هورنبلند گابروهای جنوب شرق فریمان با بازالت های تولییتی جزایر قوسی (Wilson, 1989) مشابهت قابل توجهی را نشان می دهند.

هورنبلند گابروهای مورد مطالعه در مقایسه با میانگین سنگ های MORB (Wilson, 1989) مقادیر متفاوتی از غنی شدگی در عناصر لیتوفیل بزرگ یون (LILE) نظیر Sr، K، Ba، Rb، Th، Ta، Nb، و Ce را نشان می دهند در حالی که عناصر با شدت میدان بالا (HFS) نظیر Yb، Y، Zr.

جدول 1. نتیجه آنالیز اکسیدهای اصلی بر حسب درصد وزنی، و عناصر جزئی و نادر خاکی بر حسب گرم در تن هورنبلند گابروهای جنوب شرق فریمان.

**Table 1.** Whole rock major (wt.%), trace element and rare earth elements (ppm) composition of the hornblende gabbros from southeast of Fariman.

sample	92P-1	92P-3	B1	B6	89p-46	89p-59	89p-62
(Wt%)							
SiO <sub>2</sub>	49.27	49.10	52.28	50.70	51.48	52.46	52.17
TiO <sub>2</sub>	1.01	1.01	2.01	1.76	1.55	2.83	3.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.18	13.57	13.37	13.76	11.60	2.74	12.39
TFeO	10.23	10.33	9.91	11.37	11.47	13.05	13.19
MnO	0.14	0.14	0.14	0.15	0.20	0.25	0.29
MgO	9.45	10.80	5.37	5.37	8.90	4.50	4.84
CaO	8.98	8.80	8.60	9.86	8.42	8.22	8.11
Na <sub>2</sub> O	2.00	2.00	3.90	3.51	2.25	3.65	3.40
K <sub>2</sub> O	0.72	0.73	0.78	0.55	0.78	0.17	0.35
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.12	0.13	0.19	0.28	0.55	0.44
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.06	0.005	0.005	0.05	0.01	0.01
LOI	3.07	3.10	3.30	2.60	2.70	1.33	1.18
Mg#	64.07	67.40	51.80	48.30	60.60	40.60	42.10
Total	99.02	99.76	99.80	99.82	99.68	99.76	99.38
(ppm)							
Ba	184	180	202	140			
Be	1	2	<1	<1			
Co	54.4	56.1	37.40	37.90			
Cs	1.2	1.00	0.30	0.30			
Ga	14.4	15.10	18.90	19.80			
Hf	1.5	1.60	3.10	2.80			
Nb	8.2	8.10	10.00	10.30			
Rb	26.5	24.50	19.20	13.30			
Sn	<1	<1	2	1			
Sr	311.4	330	277.3	376.4			
Ta	0.5	0.50	0.50	0.70			
Th	1.52	1.40	2.20	1.80			
U	0.2	0.60	0.50	0.50			
V	142	150	174	170			
W	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5			
Zr	59.7	57.70	107.40	97.20			
Y	12.9	11.40	20.50	22.50			
La	8.9	8.90	10.90	14.60			
Ce	16.6	17.70	22.50	28.80			
Pr	2.15	2.18	2.91	3.83			
Nd	9.6	9.30	3	17.90			



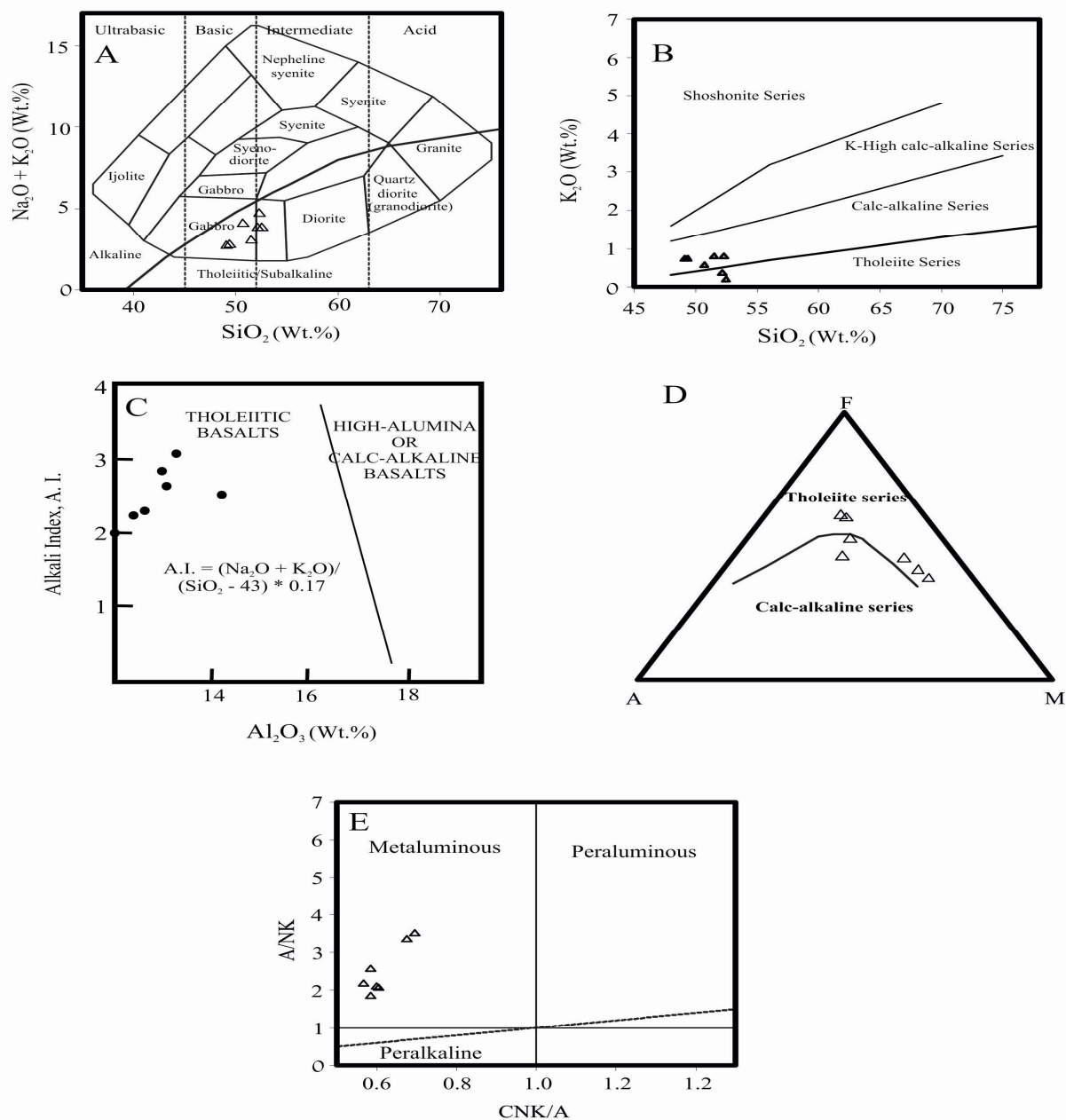
ادامه جدول 1. نتیجه آنالیز عناصر جزئی و نادر خاکی بر حسب گرم در تن هورنبلند گابروهای جنوب شرق فریمان.

**Table 1 (continued).** Whole rock trace element and rare earth elements (ppm) composition of the hornblende gabbros from southeast of Fariman.

sample	92P-1	92P-3	B1	B6	89p-46	89p-59	89p-62
(ppm)							
Sm	2.42	2.39	3.84	4.42			
Eu	0.90	0.91	1.41	1.66			
Gd	2.81	2.75	4.31	5.06			
Tb	0.43	0.43	0.76	0.86			
Dy	2.67	2.35	4.42	4.65			
Ho	0.49	0.45	0.87	0.92			
Er	1.28	1.22	2.24	2.58			
Tm	0.18	0.17	0.33	0.36			
Yb	1.10	0.99	1.85	2.02			
Lu	0.14	0.14	0.26	0.28			
Mo	0.70	0.40	0.50	0.40			
Cu	59.80	68.30	21	21.50			
Pb	15.20	15.60	9.90	15.20			
Zn	78	63	6.50	71			
Ni	127.2	119.40	35.90	34.30			
As	1.60	1.40	2.00	2.60			
Cd	0.80	0.30	0.10	<0.1			
Sb	<0.1	<0.1	0.20	0.20			
Bi	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1			
Ag	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1			
Au	<0.5	<0.5	0.90	1.30			
Hg	0.01	0.02	<0.01	<0.01			
Ti	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1			
Se	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5			
Eu/Eu*	0.345	0.354	0.346	0.363			

شاخص Pb، در نمودار عنکبوتی به‌هنجار شده بر حسب ترکیب مانند اولیه همچنین می‌تواند بیانگر متاسوماتیسم گوه گشته‌ای توسط سیالهای ناشی از پوسته اقیانوسی فروروا شده باشد (Kamber et al., 2002). از آنجایی که گابروهای همراه با توده‌های گرانیتی به‌عنوان توده‌های گرانیتوئیدی محسوب می‌گردند، به‌منظور تشخیص نوع گابروها از نمودار (Whalen et al., 1987) که جهت تفکیک گروههای گرانیتوئیدی کاربرد دارد استفاده شد (شکل 7). بر این اساس گابروهای منطقه مورد مطالعه در محدوده گرانیتوئیدهای نوع I و S قرار گرفته و ارتباطی با گرانیتوئیدهای نوع A ندارند.

در نمودار عنکبوتی به‌هنجار شده بر حسب ترکیب مانند اولیه (شکل 6-C) از لحاظ ژئوشیمیایی، آنومالی منفی Nb تشکیل ماگما در مناطق فرورانش را تأیید می‌کند (Wilson, 1989). به‌علاوه غنی‌شدگی نمونه‌ها از عناصر لیتوفیل با شعاع یونی بزرگ (LIL = Rb, K) و تهی‌شدگی یکنواخت از عناصر با قدرت یونی بالا (HFS = Ti, Nb) بیانگر ماگماتیسیم مرتبط با جزایر قوسی است (Wilson, 1989; Chappell, 1999). تهی‌شدگی عناصر با شدت میدان بالا (HFS) نظیر Nb, P و Ti که از ویژگیهای شاخص محیطهای کمانی است، می‌تواند از خاستگاه ماگما از یک پوسته اقیانوسی فرورانده شده و گوه گشته‌ای دگرنهاد روی آن، ناشی شده باشد. ناهنجاری مثبت



شکل 5. A: محل قرارگیری نمونه‌ها در نمودار TAS برگرفته از (Cox et al., 1979). B: نمودار  $\text{SiO}_2$  در مقابل  $\text{K}_2\text{O}$  برای نمونه‌های مورد مطالعه برگرفته از (Peccerillo and Taylor, 1976). C: نمودار ضریب آلكالی در مقابل درصد وزنی  $\text{Al}_2\text{O}_3$  برای نمونه‌های مورد مطالعه. کلیه نمونه‌ها در محدوده توانیت بازالت واقع شده‌اند. برگرفته از (Middlemost, 1985). D: نمودار AFM برای نمونه‌های مورد مطالعه. به روند تولییتی نمونه‌ها توجه فرمایید. برگرفته از (Irvine and Barager, 1971). E: نمودار تفکیک سنگهای ماگمایی از نظر آلومین. برگرفته از (Maniar and Piccoli, 1989)

**Fig. 5.** Plots of various elements or element ratios for hornblende gabbros from southeast of Fariman in A: TAS diagram (Cox et al., 1979). B:  $\text{K}_2\text{O}$  versus  $\text{SiO}_2$  (Peccerillo and Taylor, 1976). C: Alkali Index versus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Wt%) (Middlemost, 1985). D: AFM diagram (Irvine and Barager, 1971). E: Molecular  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  versus molecular  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  diagram after Maniar and Piccoli (1989) showing classification of the rocks into metaluminous, peraluminous and peralkaline fields.

آهن را نشان می‌دهند. این امر نشان‌دهنده غنی‌شدگی پیش‌رونده مقدار آهن در طی تفریق و تبلور تحت فشار بخشی اندک اکسیژن است. مقادیر نسبتاً بالای Ni هورنبلند گابروهای جنوب شرق فریمان نیز می‌تواند نشان‌دهنده اولیه بودن ماگمای مادر باشد. غنی‌شدگی در عناصر (Cs, LILE), (Sr, La, Ba, Rb, Yb, Sm, Hf, Y) و تهی‌شدگی در عناصر HFSE (Ti, Zr) مطالعه محسوب می‌گردد. این ویژگی‌های ژئوشیمیایی با ترکیب شیمیایی گابروهای هورنبلنددار واحدهای افیولیتی با خصوصیت تولیت جزایر قوسی در زون‌های فرورانش منطبق است. غنی‌شدگی در عناصر ناسازگار با پتانسیل یونی کم در مقایسه با MORB، آنومالی مثبت شاخص سرب، و ترکیب مانتل اولیه در هورنبلند گابروهای جنوب شرق فریمان می‌تواند نمایانگر تشکیل آنها از یک منشأ گوشته‌ای باشد که توسط رسوبات فرورانده شده و سیالات زون فرورانش در معرض متاسوماتیسم قرار گرفته‌اند.

بر اساس اطلاعات برگرفته از (Wilson, 1989) میزان  $\text{SiO}_2$  هورنبلند گابروهای منطقه چاهک با تولیت‌های جزایر قوسی و میانگین موربها و میزان MgO آنها با بازالت‌های جزایر قوسی و متوسط موربهای آتلانتیک قابل مقایسه هستند. میزان  $\text{CaO}$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  کمتر از متوسط تولیت‌های جزایر قوسی و موربها می‌باشد. در بین اکسیدهای فرعی  $\text{K}_2\text{O}$  با میانگین تولیت‌های جزایر قوسی و  $\text{TiO}_2$  با میانگین تولیت‌های جزایر قوسی و موربهای آتلانتیک قابل مقایسه‌اند. بسیاری از عناصر جزئی نظیر Rb, Zr, Y و با متوسط مقادیر این عناصر در تولیت جزایر قوسی برابر است. اگر چه غنی‌شدگی در میزان عناصر Rb, Th, La, Sr در هورنبلند گابروهای جنوب شرق فریمان به احتمال فراوان حاصل متاسوماتیسم منشأ مانتل توسط رسوبات فرورانده شده و سیالات زون فرورانش باشد.

به‌منظور بررسی و تعیین منشأ و سنگ مادر سنگهای منطقه مورد مطالعه، از نمودارهای Rb در برابر Rb/Yb از (Ozdemir et al., 2006) استفاده شده است (شکل 12). دلیل استفاده از این نمودار آن است که گارنت کانی اصلی نگهدارنده Yb است و نسبت متغیر Rb/Yb وابسته به گارنت می‌باشد، بنابراین بین ذوب گوشته اسپینل لرزولیتی و گارنت لرزولیتی می‌توان تفاوت قائل شد. همان‌طور که در شکل 12

جهت تفکیک بیشتر از نمودار تعیین موقعیت تکتونیکی گرانیتوئیدهای (Pearce et al., 1984) استفاده شد که بر این اساس گابروهای مورد مطالعه در موقعیت کمربندهای آتشفشانی زون فرورانش قرار می‌گیرند که مؤید تعلق توده‌های مورد مطالعه به سری I می‌باشد (شکل 8). بر اساس نمودارهای (Pearce, 1982) گابروها در محدوده کمربندهای آتشفشانی زون فرورانش واقع می‌شوند (شکل 9). پلات نمونه‌ها در نمودار (Pearce and Cann, 1973) معرف طبیعت تولیتی جزایر قوسی و MORB آنهاست (شکل 10-A و B). همچنین بر اساس نمودارهای (Mullen, 1983) و (Meschede, 1986) نیز هورنبلند گابروهای مورد مطالعه خصوصیت تولیتی جزایر قوسی و MORB را نشان می‌دهند (شکل 10-C و D). در نمودار (Batchelor and Bowden, 1985) نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده قبل از تصادم قرار می‌گیرند (شکل 11).

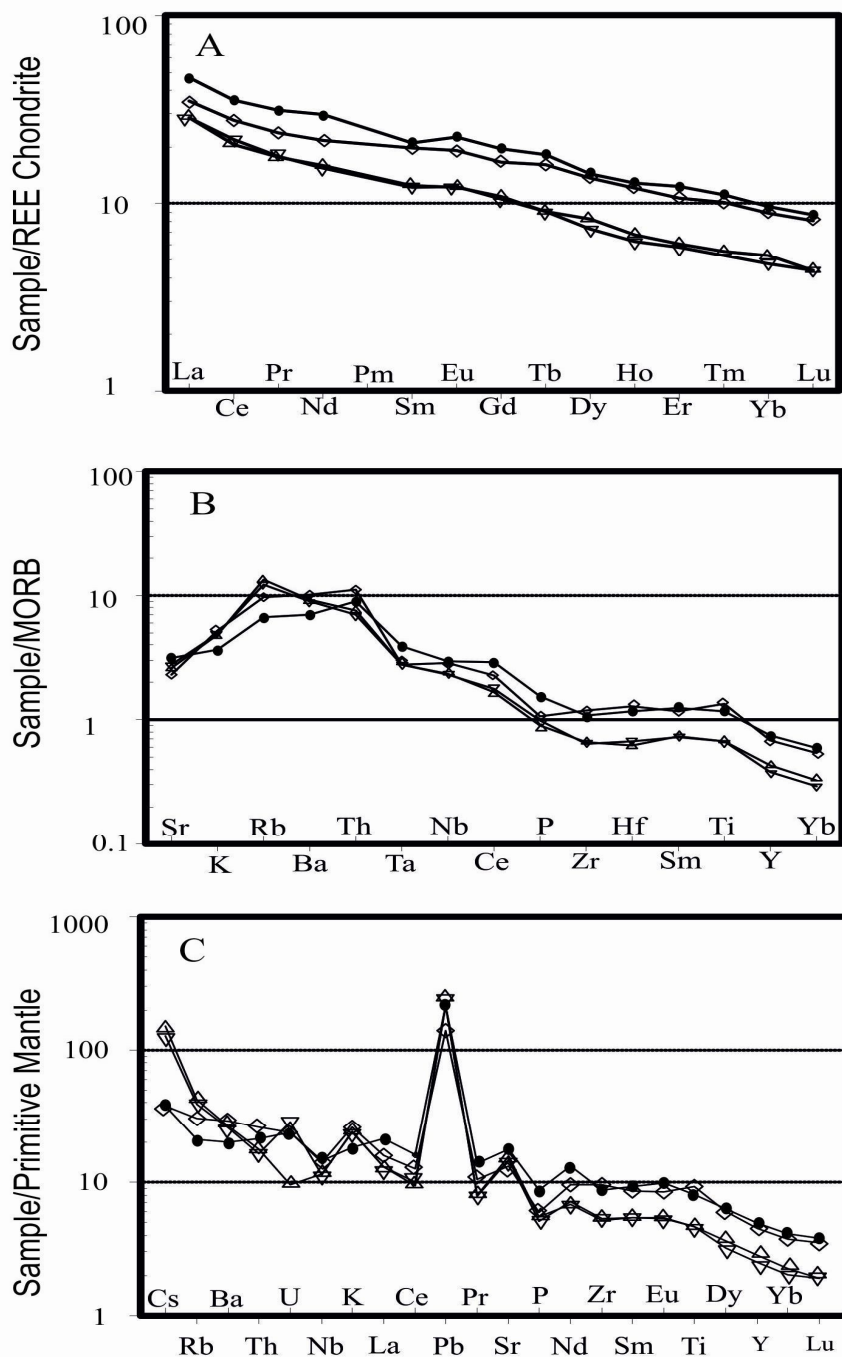
#### پتروژن

زون‌های فرورانش را می‌توان به‌عنوان پیچیده‌ترین مناطق تولید ماگما در نظر گرفت (Mandal et al., 2012). این امر پیش از هر چیز به طبیعت چند منشأ (پوسته اقیانوسی فرورونده و رسوبات همراه آن، گوه مانتل بالایی پوسته و سیالات همراه با زون فرورانش) و تکامل چند مرحله‌ای ماگماهای مرتبط با زون فرورانش مربوط می‌شود (Wilson, 1989). سنگهای ماگمایی مجموعه افیولیتی در یک زون فرورانش به‌وضوح خصوصیت تولیت جزایر قوسی (IAT) و یا بنونیتی را نشان می‌دهند. فازهای سیال به شکل معمول نقش به‌سزایی در فرآیند ماگمایی زون‌های فرورانش دارند. به همین دلیل کانیهای آبدار نظیر هورنبلند و بیوتیت در توده‌های نفوذی مرتبط با این محیط تکتونیکی به‌وفور دیده می‌شوند. هورنبلند در سنگهای گابرویی زون فرورانش هم به شکل بلورهای نسبتاً ریز اولیه و هم به شکل بلورهای درشت‌تر با یک حاشیه واکنشی دیده می‌شوند (Mandal et al., 2012). لازم به ذکر است که هر دو حالت بافتی هورنبلند به‌وضوح در گابروهای منطقه مورد مطالعه قابل مشاهده هستند.

هورنبلند گابروهای جنوب شرق فریمان دارای خصوصیت تولیتی بوده و در نمودار AFM روند غنی‌شدگی در میزان

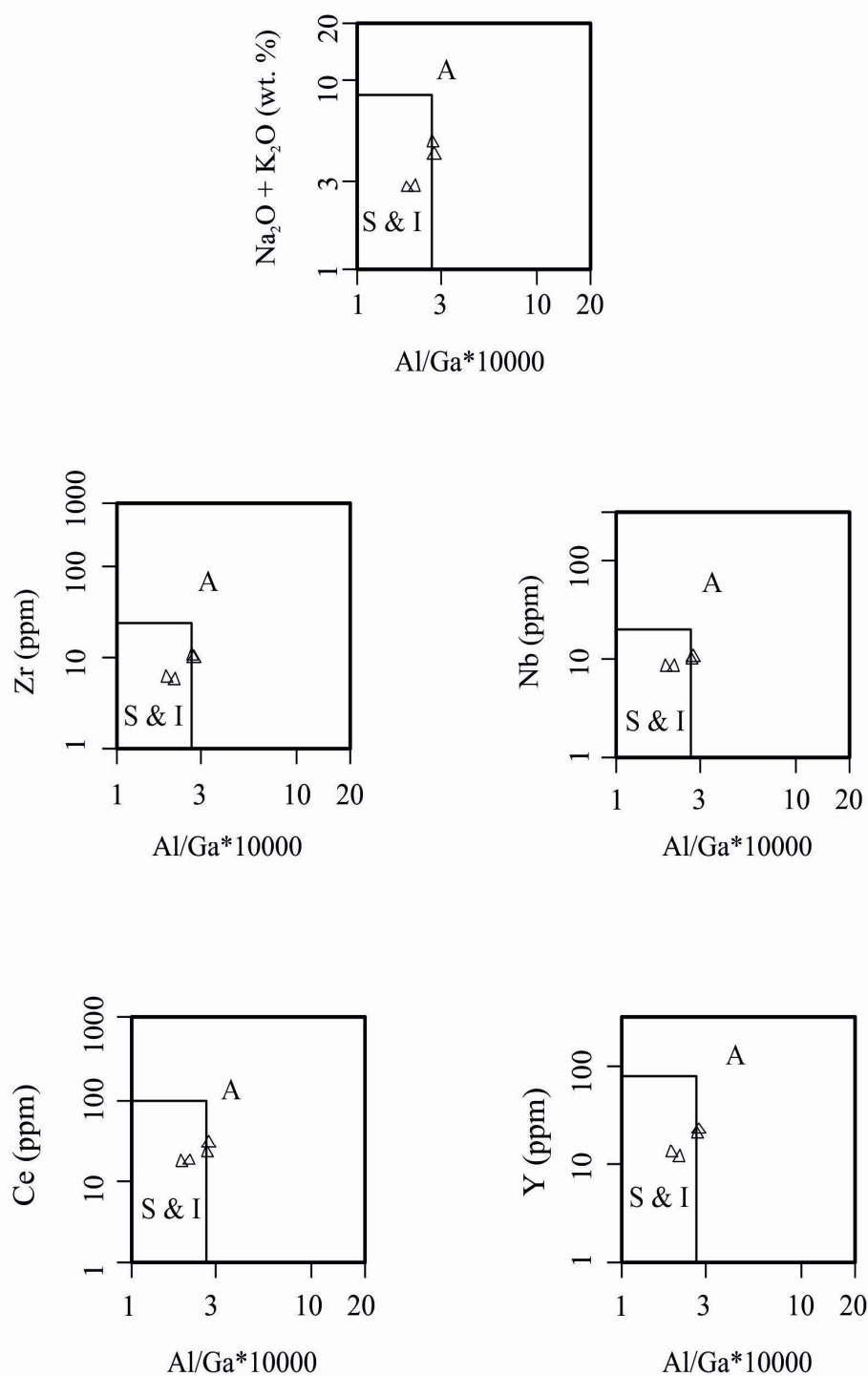
برای تولید ماگمای تشکیل‌دهنده این سنگهاست.

دیده می‌شود، روند داده‌های سنگهای منطقه، بر منحنی ذوب گارنت لروولیت منطبق بوده و بیانگر میزان 3% تا 10% ذوب



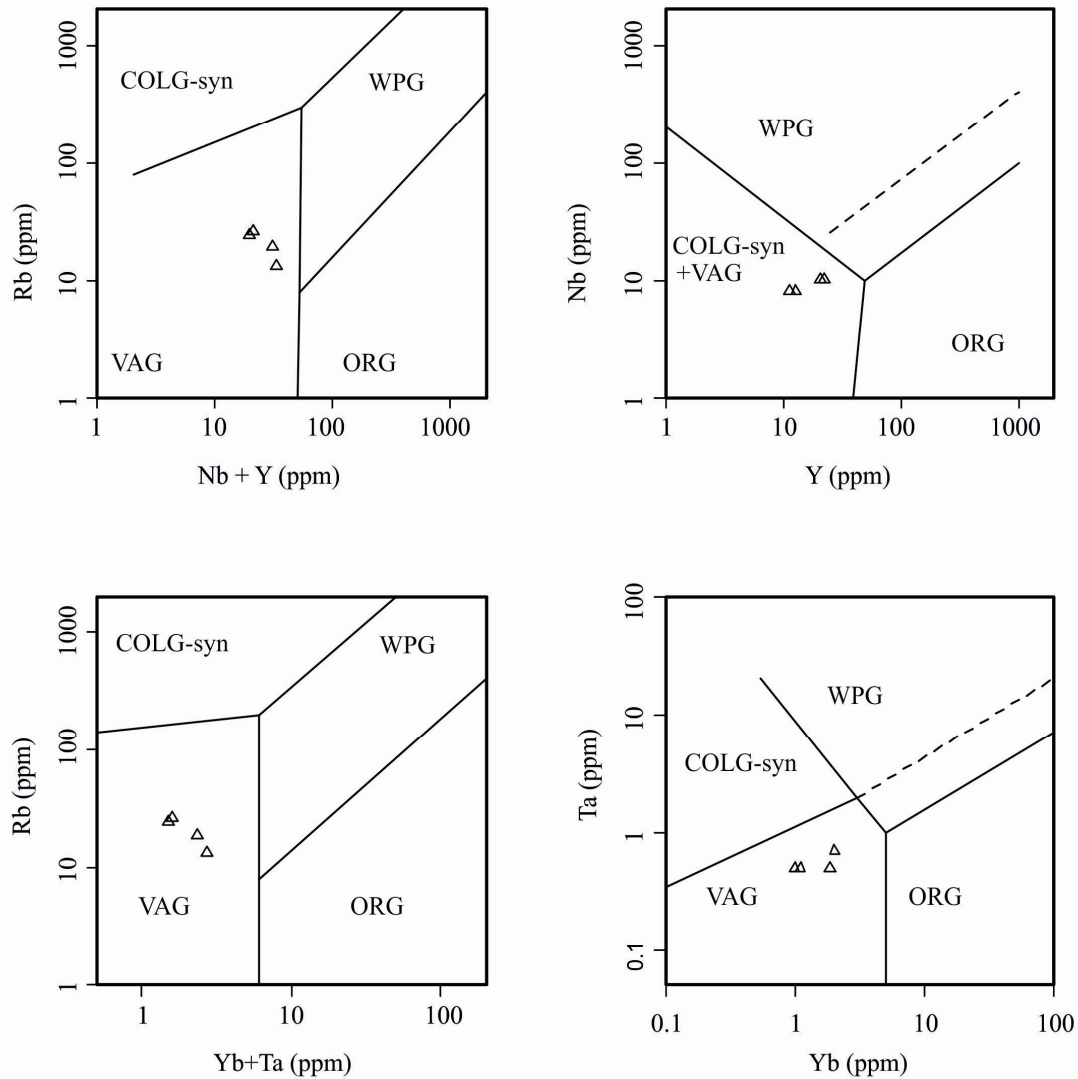
شکل 6. A: نمودار عناصر نادر خاکی که نسبت به کندریت به‌هنجار شده اند. B: نمودار عنکبوتی به‌هنجار شده نسبت به مورب. C: نمودار عنکبوتی به‌هنجار شده نسبت به ترکیب اولیه گوشته. برگرفته از (Fitton et al., 1991)

**Fig. 6.** A: Chondrite-normalized REE diagram B: MORB normalized trace elements spider diagram C: Primitive mantle-normalized trace element spider diagram (Fitton et al., 1991).



شکل 7. موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه در نمودار (Whalen et al., 1987) به فرارگیری کلیه نمونه‌ها در محدوده گرانیت‌های I و S توجه فرمایید.

**Fig. 7.** Plots of various elements or element ratios in diagrams after Whalen et al. (1987) for hornblende gabbros from southeast of Fariman.



شکل 8. موقعیت قرارگیری هورنبلند گابروهای مورد مطالعه در نمودار (Pearce et al., 1984). گابروهای مورد مطالعه در موقعیت کمرندهای آتشفشانی زون فرورانش قرار می‌گیرند

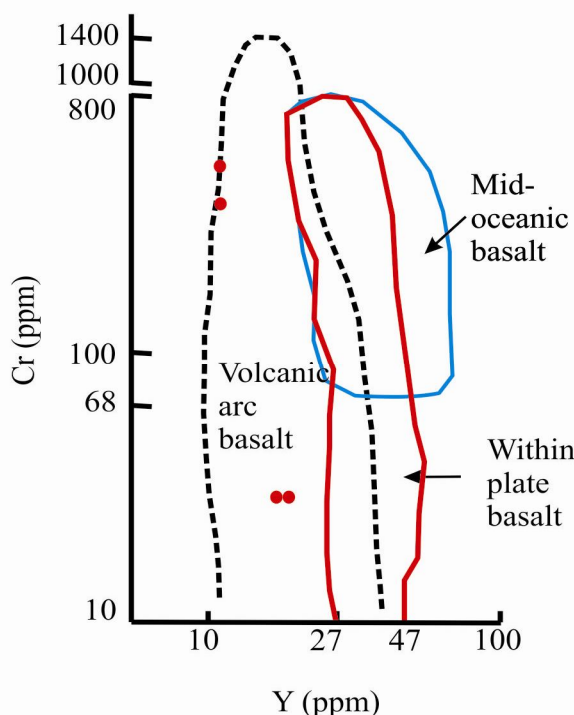
**Fig. 8.** Plots of various elements in diagrams after Pearce et al. (1984) for hornblende gabbros from southeast of Fariman.

که این عمق در 70 km تا 80km گوشته فوقانی قرار دارد. برخی نیز اعتقاد دارند که بسیاری از گارنت لرزولیتها در دماهای 900°C تا 1400°C و فشار حاکم در اعماق km 120 تا 170km پایدار هستند (Gurney and Harte, 1980). آنها همچنین معتقدند انواعی که در انتهای بالایی این محدوده حرارتی در تعادل هستند، در هاله‌های پر حرارت دیاپیرهای صعودی تشکیل شده‌اند. البته اسپینل حداکثر تا

میزان درجه ذوب‌بخشی کم (5% تا 10%) سنگ منشأ، با شیب نسبتاً تند نمودارهای عنکبوتی که ناشی از درجات ذوب‌بخشی کم منشأ است کاملاً سازگار است. زون انتقال بین اسپینل لرزولیت و گارنت لرزولیت، در اعماق بین 60km تا 80km در نظر گرفته شده است (Ellam, 1992). برخی زمین‌شناسان دیگر نظیر میدل‌موس (Middlemost, 1985) و فرای و همکاران (Fray et al., 1991) اعتقاد دارند

و عدم حضور اسپینل در منشأ سنگهای این منطقه می باشد می توان حداقل عمق جای گیری ماگمای تشکیل دهنده این سنگها را تا اعماق بیشتر از 80 km دانست.

عمق 80 کیلومتری پایدار است ولی گارنت می تواند تا بخشهای عمیق گوشته نیز حضور داشته باشد (Ellam, 1992) با توجه به این که این نمودار نشان دهنده حضور گارنت



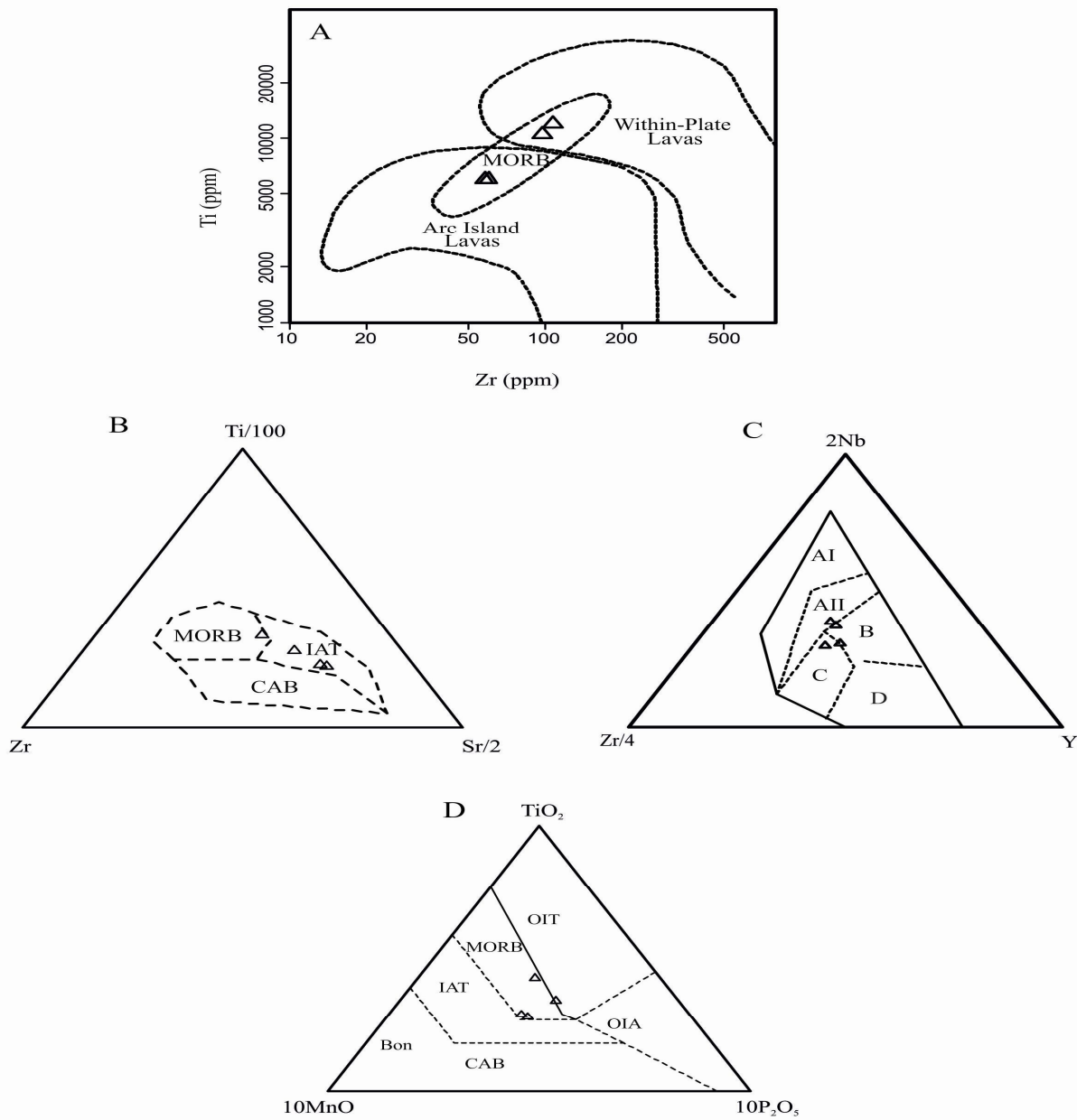
شکل 9. موقعیت نمونه های مورد مطالعه در نمودار Cr در مقابل Y. برگرفته از (Pearce, 1982).

**Fig. 9.** Plots of hornblende gabbros from southeast of Fariman in Cr (ppm) various Y (ppm) diagram after Pearce (1982)

### نتیجه گیری

بر اساس مطالعات سنگ نگاری در مثالهای متعدد، کانیهای هورنبلند و بیوتیت به صورت حاشیه ای در اطراف بلورهای پلاژیوکلاز، پیروکسن و اولیوین دیده می شوند در حالی که کانیهای اخیر به وضوح دارای بافت خوردگی هستند. این امر می تواند منعکس کننده واکنش بلورهای پلاژیوکلاز، پیروکسن و اولیوین با مذاب یا سیال غنی از آب جهت تشکیل هورنبلند و بیوتیت باشد. رورشدی بلورهای سبز روشن تا تیره آمفیبول با ترکیب ترمولیت - اکتینولیت بر روی بلورهای قهوه ای رنگ هورنبلند که بعضاً حاوی هسته خورده شده ای از بلور اوژیت است معرف تشکیل سنگهای مورد نظر از یک ماگمای با فشار فاز سیال نسبتاً بالا می باشد که در آن پیروکسن ناپایدار شده و شرایط برای تشکیل آمفیبول فراهم گردیده است. رورشدی در آمفیبول به شکل نوسانی می تواند بیانگر تغییرات ناگهانی

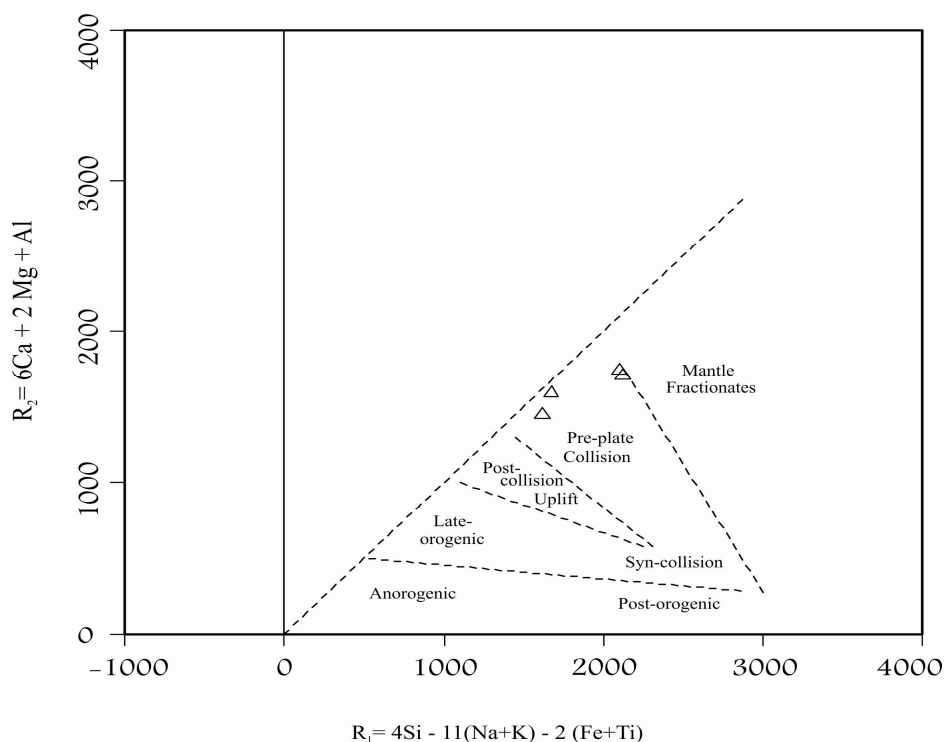
در فشار فاز سیال در زمان تبلور ماگما باشد. کلیه شواهد بالا در هورنبلند گابروهای منطقه مورد مطالعه نمایانگر تبلور ماگما در یک محیط عمیق و در شرایط غنی از مواد فرار و فشار بالا اما متغیر گاز است. در نمودار عناصر نادر خاکی که نسبت به کندریت به هنجار شده اند، غنی شدگی واضحی از LREE نسبت به HREE دیده می شود. هورنبلند گابروهای مورد مطالعه در مقایسه با میانگین سنگهای MORB مقادیر متفاوتی از غنی شدگی در عناصر لیتوفیل بزرگ یون (LILE) را نشان می دهند در حالی که عناصر با شدت میدان بالا (HFS) در مقایسه با فراوانی این عناصر در سنگهای MORB تهی شدگی نشان می دهند. در نمودار عنکبوتی به هنجار شده بر حسب ترکیب ماتل اولیه نیز آنومالی منفی Zr و Nb دیده می شود.



شکل 10. A: موقعیت هورنبلند گابروهای مورد مطالعه در نمودار Zr در مقابل Ti. برگرفته از (Pearce and Cann, 1973). B: موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه در نمودار Ti/100-Zr-Sr/2 که بیانگر طبیعت تولییتی جزایر قوسی و MORB آنهاست. برگرفته از (Pearce and Cann, 1973). C: موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه در نمودار 2Nb-Zr/4-Y برگرفته از (Meschede, 1986). AI- آلکالی بازالت‌های درون صفحه‌ای، AII- آلکالی بازالت‌های تولییتی درون صفحه‌ای، B- موربهای نوع E، C- بازالت‌های تولییتی درون صفحه‌ای و بازالتی کمان آتشفشانی، D: موربهای نوع N و بازالتی کمان آتشفشانی. D: موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه در نمودار 10MnO-TiO<sub>2</sub>-10P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> برگرفته از (Mullen, 1983).

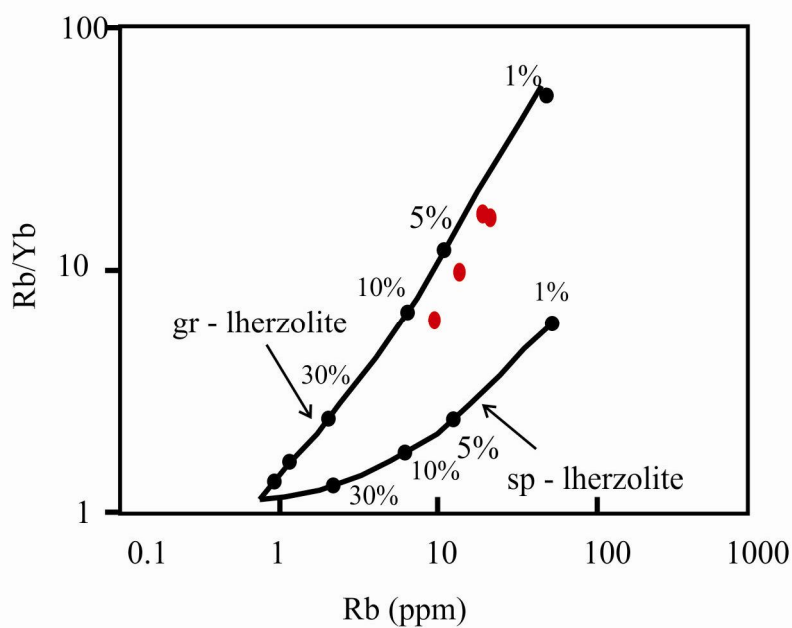
**Fig. 10.** Plots of hornblende gabbros from southeast of Fariman in A: Zr (ppm) various Ti (ppm) diagram after Pearce and Cann, 1973. B: Ti/100-Zr-Sr/2 diagram after Pearce and Cann, 1973. C: 2Nb-Zr/4-Y diagram after Meschede, 1986. AI- within-plate alkali basalts, AII- within-plate tholeiite basalts B- E-type MORBS C- within-plate tholeiite and island-arc basalts D- N-type MORBS and island-arc basalts D: 10MnO-TiO<sub>2</sub>-10P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> diagram after Mullen, 1983.





شکل 11. موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه در نمودار  $R_1-R_2$ . برگرفته از (Batchelor and Bowden, 1985).

**Fig. 11.** Plots of hornblende gabbros from southeast of Fariman in  $R_1-R_2$  diagram after Batchelor and Bowden (1985).



شکل 12. نمودار Rb در مقابل Rb/Yb برای تعیین منشأ و محیط تشکیل سنگهای جنوب شرق فریمان. برگرفته از (Ozdemir et al., 2006).

**Fig. 12.** Plots of hornblende gabbros from southeast of Fariman in Rb/Yb versus Rb diagram after Ozdemir et al. (2006).

فرورانشی مرتبط با حوضه‌های حاشیه قوسی دارد که نمایانگر تشکیل و جای‌گیری آنها در این زون‌هاست.

#### قدردانی

مقاله حاضر در راستای انجام یک طرح پژوهشی با کد 2/28035 مصوب 1392/7/30 فراهم آمده است بنابراین نگارنده بر خود لازم می‌داند تا از همکاری و مساعدت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد تشکر نماید.

نمودارهای ترسیم شده برای عناصر جزئی جهت بررسی و تعیین منشأ سنگ مادر نشان‌دهنده ذوب هورنبلند گابروهای جنوب شرق فریمان از یک منشأ گارنت لرزولیت با میزان حدود 5 تا 10 درصد ذوب‌بخشی است.

روابط صحرائی، نوع سنگها، کانی‌شناختی، بافت و ویژگیهای ژئوشیمیایی هورنبلند گابروهای مورد مطالعه مشابهتهای فراوانی با سنگهای گابرویی زون‌های فرورانش و سنگهای بازیک کمپلکس‌های افیولیتی توسعه‌یافته در زون‌های فرا

#### References

- Aghanabati, S.A., 1975. Etude geologique de la region de Kalmard (W.Tabas) Iran Central; stratigraphie et tectonique. Ph.D. Thesis, Grenoble University, Grenoble, France, 231 pp.
- Alavi, M., Vaziri, H., Seyed-Emami, K. and Lasemi, Y., 1997. The Triassic and associated rocks of the Naxhlak and Aghdarband areas in central and northeastern Iran as remnants of the southern Turanian active continental margin. Geological survey of America Bulletin, 109(12): 1563-1575.
- Batchelor, R.A. and Bowden, P., 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. Chemical Geology, 48(1-4): 43-55.
- Beard, J.S., and Borgia, A., 1989. Temporal variation of mineralogy and petrology in cognate gabbroic enclaves at Arenal volcano, Costa Rica. Contributions to Mineralogy and Petrology, 103(1): 110-122.
- Bowes, D.R.E.D. and Kinloch, A.E., 1964. Wright Rhythmic Amphibole Overgrowths in Appinites Associated with Explosion-Breccias in Argyll. Mineralogical Magazine, 266: 963-973.
- Chappell, B.W., 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. Lithos, 46(3): 535-551.
- Costa, F., Dungan, M.A., and Singer, B.S., 2002. Hornblende- and phlogopite-bearing gabbroic xenoliths from Volcán San Pedro (36°S), Chilean Andes: Evidence for melt and fluid migration and reactions in subduction-related Plutons. Journal of Petrology, 43(3): 219-241.
- Cox, K.G., Bell, J.D. and Pankhurst, R.J., 1979. The interpretation of igneous rocks. George Allen and Unwin, London, 450 pp.
- Eftekhar-Nejad, J., 1973. Some information about the origin of the flysch basin in Eastern Iran and its relation to plate tectonics theory. Geological Survey of Iran, Tehran, Report 22, 125 pp.
- Ellam, R.M., 1992. Lithospheric as a control on basalt geochemistry. Geology, 20(2): 153-156.
- Fitton, J., James, D., Leeman, W., 1991. Basic magmatism associated with Late Cenozoic extension in the western United States: Compositional variations in space and time. Journal of Geophysical Research, 96(B8), 13693-13711.
- Fray, F.A., Garcian, M.O., Wise, W.S., Kennedy, A., Gurriet, P.A. and Albarede, F., 1991. The evolution of Mauna Kea volcano, Hawaii: Petrogenesis of tholeiitic and alkalic basalts. Journal of Geophysical Research, 96(B9): 14347-14375.
- Gramont, X.B. and Guillou, Y., 1979. Geological map of Kariznow. Geological Survey of Iran, Scale 1:100,000.
- Gurney, J.J. and Harte, B., 1980. Chemical variations in upper mantle nodules from southern Africa kimberlites. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 297(1431): 273-293.
- Heliker, C., 1995. Inclusions in Mount St. Helens dacite erupted from 1980 through 1983. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 66(1-4): 115-135.
- Hickey-Vargas, R., Abdollahi, M.J., Parada, M.A., Lopez-Escobar, L. and Frey, F.A., 1995. Crustal xenoliths from Calbuco volcano, Andean southern volcanic zone: Implications

- for crustal composition and magma-crust interaction. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119(4): 331–344.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A.A., 1971. Guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523–548.
- Kamber, B.S., Ewart, A., Collerson, K.D., Bruce, M.C. and McDonald, G.D., 2002. Fluid–mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archaean crustal growth models. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(1): 38–56.
- Mandal, A., Ray, A., Debnath, M. and Paul, S.B., 2012. Geochemistry of hornblende gabbro and associated dolerite dyke of Paharpur, Puruliya, West Bengal: Implication for petrogenetic process and tectonic setting. *Journal of Earth System Science*, 121(3): 793–812.
- Maniar, P.D. and Picooli, P.M., 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(3): 635–643.
- Martin, H., 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411–429.
- Meschede, M., 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, 56(3-4): 207-218.
- Middlemost, E.A.K., 1985. Magmas and magmatic rocks: An introduction to igneous petrology. Longman Group, United Kingdom, 390 pp.
- Mullen, E.D., 1983. MnO/TiO<sub>2</sub>/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: a minor element discriminate for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 62(3): 53-62.
- Nabavi, M.H., 1976. An Introduction to Geology of Iran. Geologic Survey of Iran, Tehran, 109 pp. (in Persian)
- Ozdemir, Y., Karaoglu, O., Tolluoglu, A.U. and Gulec N., 2006. Volcano stratigraphy and petrogenesis of the Nemrat stratovolcano (East Anatolian High Plateau): The most recent post collisional volcanism in Turkey. *Chemical Geology*, 226(3-4): 189–211.
- Partovifar, F., 2012. Petrology and geochemistry studies of granitic rocks from Chahak village, Kariz-Now area, southeast of Fariman, Iran. Unpublished M.Sc. thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 145 pp. (in Persian)
- Pearce, J.A., 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: R.S. Thorp (Editor), *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. John Wiley and Sons, New York, pp. 525-548.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R., 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290-300.
- 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(4): 956–983.
- Peccerillo, A. and Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc–alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81.
- Ranjbar-Moghadam, F., 2011. The petrology and petrogenesis of metamorphic rocks in east and southeast of Fariman. Unpublished M.Sc. thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 156 pp. (in Persian)
- Rollinson, H.R., 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Group, UK, 315 pp.
- Safourae, S., 2008. Petrology and geochemistry of metamorphic rocks from southeast of Fariman. Unpublished M.Sc. thesis, University of Shahrood, Shahrood, Iran, 120 pp. (in Persian)
- Vaezi-Pour, M, Kholghi, M.H. and Alavi-Naeini, M., 1983. The geology of Farima-Zharf area and study of metamorphic rocks in northeast of Iran. Geological Survey of Iran Report.
- Whalen, J.B., Currie, K.L. and Chappell, B.W., 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407-419.
- Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis*. Chapman and Hall, London, 466 pp.



## Petrology and geochemistry of Late Proterozoic hornblende gabbros from southeast of Fariman, Khorasan Razavi province, Iran

Seyed Masoud Homam

Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Submitted: Apr. 1, 2014

Accepted: July 22, 2014

**Keywords:** *Hornblende Gabbro, Granite, Tholeiitic Basalt, Subduction zone, MORB, Overgrowths, Fariman*

### Introduction

Hornblende-bearing gabbroic rocks are quite common in subduction-related magmatic suites and considered to represent magmatic differentiation process in arc magmas (Heliker, 1995; Hickey-Vargas et al., 1995; Mandal and Ray, 2012). The presence of hornblende as an important mineral phase in gabbroic rocks of subduction zone has been considered either as an early crystallizing mineral from water-bearing mafic magmas (Beard and Borgia 1989; Mandal and Ray, 2012) or as a product of reaction of early crystallized minerals (olivine, pyroxene and plagioclase) and water-rich evolved melt/aqueous fluid (Costa et al., 2002; Mandal and Ray, 2012). The careful study of petrology and geochemistry of hornblende-bearing gabbroic rocks from Chahak area, of Neoproterozoic age, can provide important information about their petrogenesis. Because of the special characteristics of Chahak hornblende gabbros according to their age and their situation in the main structural units of Iran, their study can present critical keys for the knowledge of geological history of Iran specially central Iran zone.

### Material and Methods

This study carried out in two parts including field and laboratory works. Sampling and structural studies were carried out during field work. Geological map for the study area was also prepared. 65 thin and polished thin sections for petrographical purpose were studied. Major oxides, rare earth elements and trace elements were analyzed for 4 samples (92P-1, 92P-3, B1 and B6) from hornblende gabbros on the basis of 4AB1 method using ICP-MS of ACME Laboratory from Canada. In addition, major

oxides of three hornblende gabbro samples (89P-62, 89P-59 and 89P-46) were used from Partovifar (Partovifar, 2012).

### Results and discussion

Fariman metamorphic terrains, of Proterozoic age, consist of metamorphosed sedimentary and igneous (plutonic and volcanic) rocks. Hornblende gabbros of the study area include plagioclase, hornblende, biotite pyroxene and olivine as major minerals and apatite, ilmenite and magnetite as minor minerals. In many examples, hornblende and biotite can be seen as corona textures around plagioclase, pyroxene and olivine, while plagioclase, pyroxene and olivine show obviously corrosion features. This can be considered to be formed by the reaction of early formed crystals with aqueous fluid/evolved melt. In some cases, amphiboles show rhythmic overgrowths. The rhythmic amphibole overgrowths represent deep-seated crystallization in a volatile-rich magma under conditions of high but varying gas pressure. In the study area, the most dominant texture of the hornblende gabbros is hypidiomorphic granular, but intergranular and porphyric textures are common too.

Based on geochemical data from major and minor elements, studied rocks belong to tholeiite series with meta-aluminous nature. The geochemical behavior of main elements of the studied rocks reveals the normal trend of differentiation in their magma. Chondrite-normalized REE diagram of hornblende gabbros indicates an obvious enrichment of LREE in compare with HREE. MORB-normalized spider diagrams indicate variable enrichment in LILE and depletion in high field strength elements (HFSE). Primitive mantle-normalized spider diagram show negative

anomaly for Nb and Zr. Gabbros from southeast of Fariman have an island arc tholeiite nature and based on trace element diagrams, they formed as a result of 3 to 10% partial melting of a garnet lherzolite source.

The mineralogy, texture and geochemistry of the studied rocks show striking similarities with gabbroic rocks of subduction zone developed in supra subduction zone of arc-marginal basin setting.

#### Acknowledgments

The Research Foundation of Ferdowsi University of Mashhad, Iran, supported this study (Project 28035.2). I thank the university authorities for funding.

#### Reference

- Beard, J.S., and Borgia, A., 1989. Temporal variation of mineralogy and petrology in cognate gabbroic enclaves at Arenal volcano, Costa Rica. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 103(1): 110–122.
- Costa, F., Dungan, M.A., and Singer, B.S., 2002. Hornblende- and phlogopite-bearing gabbroic xenoliths from Volcán San Pedro (36°S), Chilean Andes: Evidence for melt and fluid migration and reactions in subduction-related plutons. *Journal of Petrology*, 43(3): 219–241.
- Heliker, C., 1995. Inclusions in Mount St. Helens dacite erupted from 1980 through 1983. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 66(1-4): 115–135.
- Hickey-Vargas, R., Abdollahi, M.J., Parada, M.A., Lopez-Escobar, L. and Frey, F.A., 1995. Crustal xenoliths from Calbuco volcano, Andean southern volcanic zone: Implications for crustal composition and magma-crust interaction. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119(4): 331–344.
- Mandal, A., Ray, A., Debnath, M. and Paul, S.B., 2012. Geochemistry of hornblende gabbro and associated dolerite dyke of Paharpur, Puruliya, West Bengal: Implication for petrogenetic process and tectonic setting. *Journal of Earth System Science*, 121(3): 793–812.
- Partovifar, F., 2012. Petrology and geochemistry studies of granitic rocks from Chahak village, Kariz-Now area, southeast of Fariman, Iran. Unpublished M.Sc. thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 145 pp. (in Persian)