



ویژگی‌های تکتونو ماگمایی توده‌ی نفوذی بغم در جنوب شرقی اردستان بر مبنای شیمی کانی کلینوپیروکسن و آمفیبول

ناهید شبانیان بروجنی*^۱، علیرضا داوودیان دهکردی^۱، فرنوش سهیلیان^۲

۱- دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

۲- گروه زمین‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان

(دریافت مقاله: ۹۱/۱/۱۵، نسخه نهایی: ۹۱/۴/۱۰)

چکیده: توده‌ی نفوذی بغم با ترکیب سنگ‌شناسی گابرو در جنوب شرقی شهر اردستان قرار داشته و در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن نفوذ کرده است. منطقه‌ی مورد بررسی در پهنه‌ی ایران مرکزی و نوار ماگمایی ارومیه دختر قرار می‌گیرد. کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده‌ی سنگ‌ها عبارتند از کلینوپیروکسن، آمفیبول و پلاژیوکلاز. بررسی شیمی کانی‌ها نشان می‌دهد که کلینوپیروکسن‌های این توده‌ی نفوذی دارای ترکیب اوژیت بوده و بیشتر در گستره‌ی کلینوپیروکسن‌های فشار متوسط قرار می‌گیرند. ترکیب کلینوپیروکسن‌ها دماهای تبلور توده را ۸۴۰ تا ۹۲۰ درجه‌ی سانتیگراد نشان می‌دهد. از نظر تکتونوماگمایی ترکیب کلینوپیروکسن‌های توده‌ی نفوذی مورد بررسی در میدان کلینوپیروکسن‌های کوهزایی قرار می‌گیرند و به کمان ماگمایی وابسته‌اند. بلورهای آمفیبول در این سنگ‌های گابرویی جزء گروه آمفیبول‌های کلسیک بوده که در گستره‌ی مینیزوهورنبلند قرار می‌گیرند. از نظر تکتونوماگمایی ترکیب آمفیبول‌ها نشانگر ماهیت نیمه‌قلیایی برای این توده آذرین است. روش زمین-دماسنجی بر اساس جفت کانی‌های کلینوپیروکسن و آمفیبول همزیست، دماهای ۷۳۰ تا ۷۹۰ درجه سانتیگراد را بدست می‌دهد. پلاژیوکلاز تنها کانی فلسیک این سنگ‌های گابرویی است که از نظر ترکیبی در گستره‌های بیتونیت (هسته) و لابرادوریت تا آندزین (حاشیه) و آلبیت (حاصل سوسوریتی شدن) قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: کلینوپیروکسن؛ آمفیبول؛ تکتونوماگماتیک؛ اردستان.

مقدمه

برای تعیین گریزندگی اکسیژن ماگما [۴،۳] و برآورد عمق نفوذ ماگما، براساس زمین‌دماسنجی و زمین‌فشارسنجی می‌توان از ترکیب شیمی بلورهای آمفیبول استفاده کرد. ترکیب کانی‌های کلینوپیروکسن، آمفیبول و پلاژیوکلاز علاوه بر ترکیب شیمیایی ماگما به شرایط دما و فشار تبلور نیز حساس‌اند و بر این پایه روش‌های مختلف زمین‌دماسنجی و زمین‌فشارسنجی مطرح شده‌اند، برای مثال: محتوی Al در هورنبلند یک شاخص حساس به شرایط دما و فشار تبلور بوده

ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌های آذرین بازتاب دهنده‌ی ماهیت سنگ‌های میزبان آنهاست [۱] به طوری که تنوع ترکیبی کلینوپیروکسن‌ها غالباً با تغییرات در شیمی ماگما وابسته است. فرآیند جدایش ماگمایی و شرایط فیزیکی تبلور روی ترکیب ماگما تاثیر می‌گذارد. بنابراین ترکیب کلینوپیروکسن‌ها به شدت در اثر جدایش کاتیون‌ها و ساختار گدازه‌ای که از آن تبلور یابد، کنترل می‌شود [۲]. هم چنین

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۳۳۱۸۰۲۴۲، شماره: ۴۴۲۴۴۲۸ (۰۳۸۱)، پست الکترونیکی: nahid.shabanian@gmail.com

طول ۱۷۰۰ کیلومتر و عرض تقریبی ۱۰۰ کیلومتر به موازات روزاندگی زاگرس و در فاصله‌ی ۲۰۰-۱۵۰ کیلومتری از آن قرار دارد. فعالیت ماگمایی سنوزوئیک، هم به صورت آتشفشانی و هم به صورت نفوذی، عمل کرده که طی فازهای کمپرسیونی و متعاقب آن فاز کششی کشور ما را تحت تأثیر قرار داده است [۱۵].

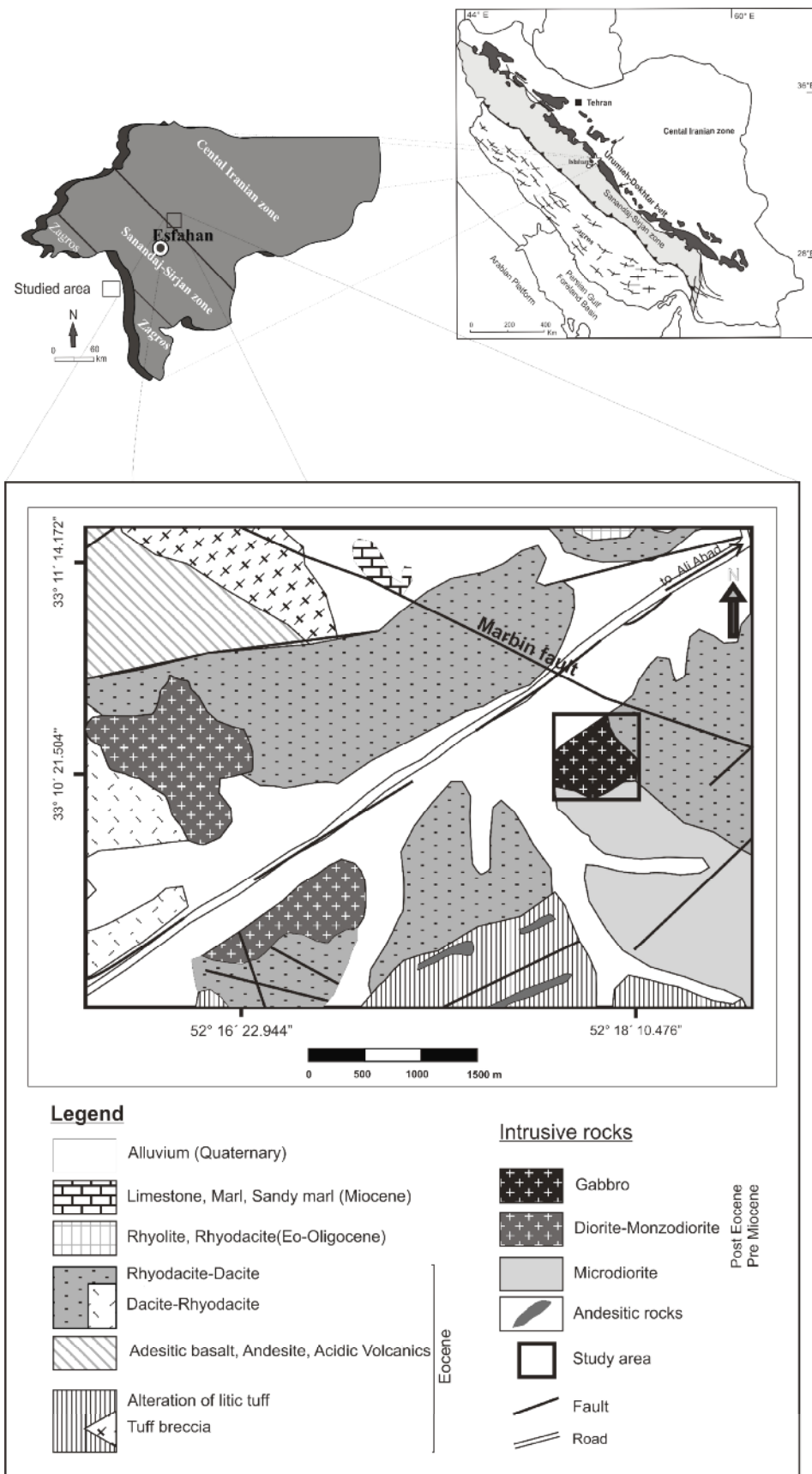
این توده‌ی آذرین در سنگ‌های آتشفشانی به سن ائوسن که در منطقه مورد بررسی گسترش گسترده‌ای دارند، تزریق شده است (شکل ۱). چنانکه در شکل ۱ دیده می‌شود، در حاشیه‌ی شمال غربی و غرب و جنوب غربی توده‌ی آبرفت‌های کواترنری مشاهده می‌شوند. به دلیل اینکه مرز بین این دو واحد با رسوب‌های آبرفتی پوشیده شده است تأثیر گرمایی توده بر سنگ‌های آتشفشانی آشکار نیست. از طرف دیگر بررسی‌های میکروسکوپی بر روی سنگ‌های آتشفشانی میزبان نیز شواهد روشنی از دگرگونی مجاورتی را نشان نداد. در جنوب شرقی این توده‌ی گابرویی مورد بررسی نیز یک توده‌ی میکرودیوریتی رخنمون دارد که تأثیر توده گابرویی بر سنگ‌های میکرودیوریتی تا حدودی به صورت تجدید تبلور بوده و بطور کلی آثار چشمگیری از یک دگرگونی مجاورتی را نشان نمی‌دهند. در برداشته‌های صحرایی که در منطقه صورت گرفت، مواردی از حضور زئولیت‌های از جنس آندزیت و سنگ‌های آتشفشانی دیگر در این توده مشاهده نشدند. از آنجاکه این توده در سنگ‌های آتشفشانی منطقه تزریق شده است، بنابراین سن این توده پس از ائوسن بوده و با توجه به دیگر توده‌های نفوذی منطقه و بر مبنای نقشه‌ی زمین‌شناسی چهارگوش اردستان، سن آن پیش از میوسن است. بدین جهت می‌توان آن را به آخرین حادثه‌ی بزرگ ماگماتیسم نفوذی وابسته دانست که در ایران در اولیگو-میوسن رخ داده و بیشتر در مرکز ایران (نظیر نوار کرکس) و جنوب شرقی (نوار جبال بارز) گسترش داشته است [۱۶]. نوار کرکس که این توده نیز بخشی از آن است مشتمل بر توده‌های نفوذی بازی تا گرانیتی است. این سنگ‌ها به درون سنگ‌های آتشفشانی ائوسن تزریق شده‌اند و یک دگرگونی گرمایی را سبب شده‌اند [۱۷-۱۹]. سن این توده‌های نفوذی بر مبنای روش Rb/Sr، ۱۷ تا ۱۹ میلیون سال برآورده شده است [۱۷، ۱۸].

و به عنوان یک زمین فشارسنج بکار رفته است [۹-۵]. نمودار ترسیمی دمای کلینوپیروکسن‌ها [۱۰] و زمین‌دماسنجی جفت کانی‌های کلینوپیروکسن و آمفیبول همزیست [۱۲، ۱۱] به عنوان زمین‌دماسنج کاربرد دارند. بررسی‌های بسیاری در خصوص ژئوشیمی توده‌های نفوذی نوار ماگمایی ارومیه - دختر صورت گرفته است ولی در خصوص بررسی ویژگی‌های شیمی کانی‌ها به ویژه کانی کلینوپیروکسن، اطلاعات گسترده‌ای در دسترس نیست. هدف این مقاله، بررسی ترکیب آمفیبول و کلینوپیروکسن ماگمایی در گابروهای مورد بررسی برای دستیابی به شاخص پتروژنیکی مطمئن برای شناسایی نوع ماگما و محیط زمین‌ساختی است. نتایج به دست آمده آگاهی بهتری از فرآیندهای تبلور و شکل‌گیری ماگما را فراهم می‌آورد.

زمین‌شناسی منطقه

توده‌ی نفوذی بغم در ۲۳ کیلومتری جنوب شرقی اردستان به صورت یک ارتفاع گنبدی شکل در منطقه دیده می‌شود و در مجاورت جاده‌ی اصلی آسفالت‌هی اصفهان - اردستان قرار دارد و از دو سمت مورد بهره برداری معدنی قرار گرفته است. از سنگ‌های این توده به‌عنوان سنگ‌نما استفاده می‌شود که دلیل رنگ زیبا و نیز آثار نسبتاً کم تجزیه و فقدان درز و شکاف فراوان در آن است. با توجه به اختلاف ارتفاع آن با مناطق مجاور، این توده شباهت به یک اینسلبرگ (ناهمواری منفرد) دارد. مختصات جغرافیایی این توده برابر با عرض جغرافیایی "۳۳°۱۰'۱۵" تا "۳۳°۱۰'۳۷" شمالی و طول جغرافیایی "۵۲°۱۷'۵۲" تا "۵۲°۱۸'۲۰" شرقی است. وسعت این توده حدود ۰/۳ کیلومتر مربع است. از نظر تقسیمات زمین‌شناسی ایران، این توده بخشی از مجموعه توده‌های نفوذی پهنه‌ی ایران مرکزی و پهنه‌ی ماگمایی ارومیه - دختر است [۱۴، ۱۳] و در بخش مرکزی آن قرار دارد (شکل ۱) و روی نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان به عنوان دیوریت - مونزودیوریت گزارش شده است.

نوار ماگمایی ارومیه دختر با روند شمال غربی، جنوب شرقی از ناحیه‌ی دریاچه‌ی ارومیه در آذربایجان تا آتشفشان‌های بزمان در بلوچستان کشیده شده است که سن فعالیت‌های ماگمایی در آن از ائوسن و الیگوسن آغاز و به آتشفشان‌های عهد حاضر ختم می‌شود [۱۵]. این کمر بند با



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی ساده شده از منطقه‌ی مورد بررسی [۲۰].

روش بررسی

در این مقاله به منظور بررسی این توده از دیدگاه سنگ‌شناسی، نخست از آن به صورت سیستماتیک و با استفاده از GPS نمونه‌برداری شد و سپس به منظور بررسی شیمی کانی‌ها پس از تهیه‌ی مقاطع نازک و بررسی‌های میکروسکوپی، تعدادی از نمونه‌های با کمترین دگرسانی انتخاب و پس از تهیه‌ی مقاطع نازک صیقلی با استفاده از یک ریزپردازنده‌ی الکترونی آنالیز نقطه‌ای شدند. آنالیزهای ریزپردازش الکترونی در گروه زمین‌شناسی دانشگاه اکلاهما آمریکا با استفاده از دستگاه Cameca SX50 در شرایط ۲۰ کیلوولت، جریان ۲۰ نانو آمپر و ۱۰ ثانیه زمان شمارش با انتخاب نقاط ۲ میکرون متری انجام گرفتند. آنالیز کانی‌ها با نرم‌افزار کامپیوتری PET [۲۱] محاسبه شدند و محاسبه‌ی مقادیر Fe^{+3} بر مبنای ملاحظات استوکیومتری انجام شده توسط [۲۲] انجام گرفت.

سنگ نگاشتی سنگ‌های گابرویی توده‌ی بغم

سنگ‌های گابرویی توده‌ی بغم بافت دانه‌ای هم بعد (شکل ۲ الف) تا در بعضی موارد ناهم بعد را نشان می‌دهند. کانی‌شناسی این سنگ‌ها نسبتاً ساده بوده و از کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز، پیروکسن، هورنبلند و کانی کدر تشکیل یافته‌اند. آثار تجزیه اورالیتی و سوسوریتی دیده می‌شوند.

پلاژیوکلاز

این کانی از تشکیل‌دهنده‌های اصلی سنگ است که اندازه‌ی دانه‌ها غالباً متوسط بوده و از نظر فرم نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل است و دارای ماکل تکراری (پلی‌سینتتیک) و آلبیتی است.

گاه منطقه‌بندی نشان می‌دهد (شکل ۲ ب) و خرد شده‌اند که آثاری از تجزیه به کلریت در راستای شکستگی‌ها و خردشدگی‌ها مشاهده می‌شوند. همچنین میزان متفاوتی از تجزیه سوسوریتی را نشان می‌دهند که در اثر تجزیه سوسوریتی در حال تبدیل به آلبیت، کلسیت، کلریت و اپیدوت است.

پیروکسن

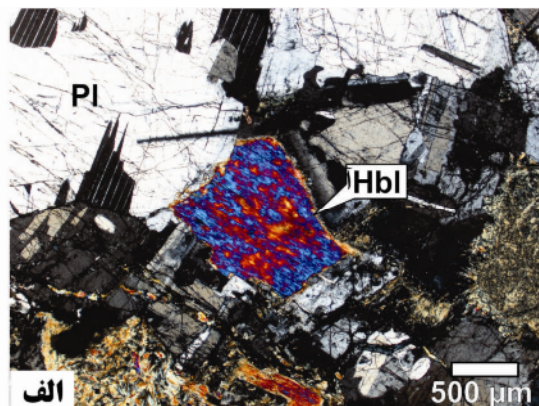
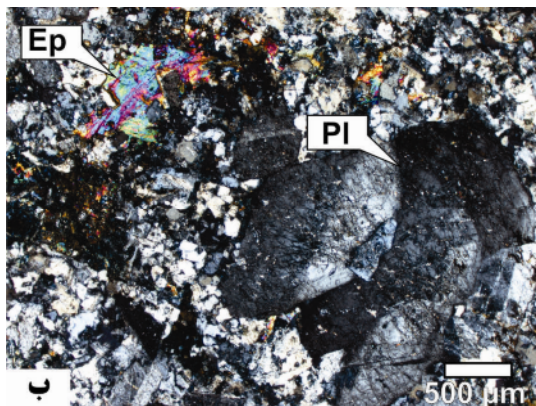
این کانی از لحاظ فرم بی‌شکل، نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار بوده و مقاطع عرضی دو دسته رخ عمود برهم را نشان می‌دهند. آثار تجزیه اورالیتی (ترمولیت و اکتینولیت) و تجزیه به کلسیت و اپیدوت و کلریت مشاهده می‌شوند که در راستای رخ‌ها تیتانیت آزاد شده است.

هورنبلند

این کانی بی‌شکل تا نیمه شکل‌دار بوده و به صورت کشیده دیده می‌شوند. مقاطع طولی، دسته‌ای رخ دارند و چند رنگی سبز کم‌رنگ تا کمی پررنگ و قهوه‌ای کم‌رنگ نشان می‌دهند. تجزیه به بیوتیت (با چندرنگی قهوه‌ای کم‌رنگ تا قهوه‌ای)، کلریت (بلورهای زرد تنباکویی)، کلسیت و کانی‌های کدر را نشان می‌دهند.

کانی کدر

این کانی از لحاظ اندازه ریز بلور بوده و از نظر فرم بی‌شکل تا نیمه شکل‌دار و گاهی آمیبی شکل‌اند. در پیرامون آن‌ها گاهی انباشت ریزدانه‌ی تیتانیت ثانویه (از لحاظ اندازه ریز بلور و از نظر فرم بی‌شکل) دیده می‌شود.



شکل ۲ الف) بافت دانه‌ای هم بعد در سنگ گابرو توده‌ی نفوذی بغم، ب) منطقه بندی آشکار در یک بلور درشت پلاژیوکلاز همراه با بلورهای ریز پلاژیوکلاز و اپیدوت. نور پلاریزه XPL

شیمی کانی‌ها

پیروکسن

نتایج آنالیزهای ریزپردازش الکترونی از کلینوپيروکسن‌های توده‌ی نفوذی مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده‌اند. چنان‌که در این جدول مشاهده می‌شود ترکیب اعضای انتهایی کلینوپيروکسن‌ها از این توده برابر با $Wo_{40.96} - En_{44.48-45.23} - Fs_{12.87-13.90}$ است. ترکیب کلینوپيروکسن‌ها یکسان بوده و همه‌ی آن‌ها در میدان اوژیت [۲۳] قرار می‌گیرند (شکل ۳). در نمودار Q-J ($J = 2Na, Q = Ca + Mg + Fe^{2+}$) نمونه‌های مورد بررسی در گستره‌ی پیروکسن‌های کلسیم-

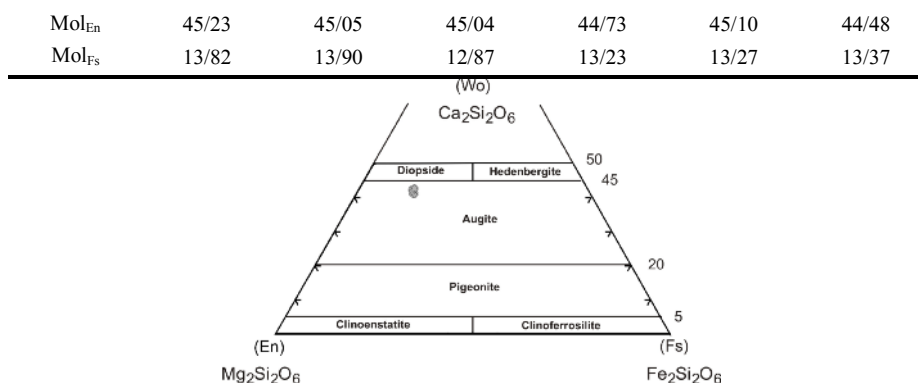
آهن-منیزیم‌دار (Quad) قرار می‌گیرند (شکل ۴).

پیروکسن‌های مورد بررسی فاقد منطقه‌بندی هستند.

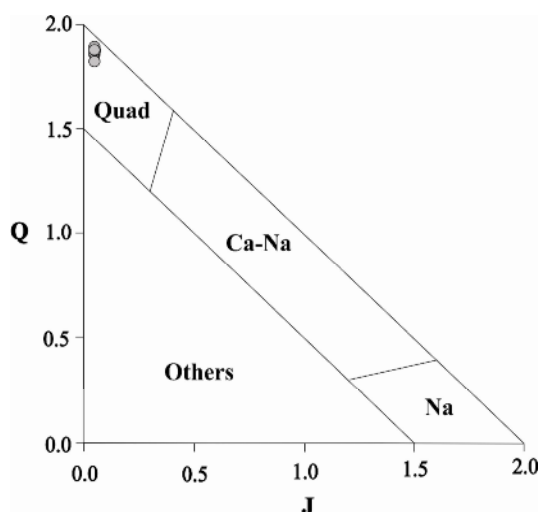
براساس نمودار تغییرات $Ti + Na + Cr$ نسبت به Al، تمامی کلینوپيروکسن‌ها ماهیت آذرین دارند (شکل ۵). میزان تغییرات Al_2O_3 از ۱/۸۴ تا ۲/۵۶ درصد وزنی بوده و تغییرات CaO آنها بسیار کم است و از ۲۰/۰۷ تا ۲۰/۵۲ درصد وزنی تغییر می‌کند. مقدار Mg# نیز بطور متوسط در حدود ۰/۸۲ است. میزان Al^{IV} از ۰/۰۶۶ تا ۰/۰۹۱ اتم در واحد فرمول (a.p.f.u.) و Al^{VI} نیز از ۰/۰۱ تا ۰/۰۲۶ متغیر است.

جدول ۱ نتایج آنالیزهای ریزپردازشی کلینوپيروکسن‌های توده‌ی نفوذی مورد بررسی بر اساس ۶ اتم اکسیژن.

Label	Cpx-1	Cpx-2	Cpx-3	Cpx-4	Cpx-5	Cpx-6
SiO ₂	52/29	52/11	51/47	51/80	51/92	51/57
TiO ₂	0/63	0/61	0/74	0/70	0/69	0/73
P ₂ O ₅	0/04	0/04	0/01	0/02	0/01	0/00
Al ₂ O ₃	1/84	1/85	2/54	2/36	2/31	2/56
Cr ₂ O ₃	0/00	0/00	0/08	0/02	0/03	0/04
Fe ₂ O ₃	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00
FeO	8/40	8/43	7/80	8/07	8/08	8/12
MnO	0/29	0/27	0/22	0/20	0/21	0/20
MgO	15/96	15/83	15/75	15/69	15/81	15/53
NiO	0/00	0/02	0/03	0/00	0/01	0/00
CaO	20/11	20/07	20/48	20/52	20/31	20/48
Na ₂ O	0/29	0/28	0/29	0/32	0/30	0/29
K ₂ O	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00
F	0/00	0/10	0/02	0/01	0/15	0/00
Total	99/85	99/57	99/42	99/71	99/77	99/52
Si	1/934	1/929	1/909	1/917	1/914	1/914
Ti	0/018	0/017	0/021	0/019	0/019	0/020
P	0/001	0/001	0/000	0/001	0/000	0/000
Al	0/080	0/081	0/111	0/103	0/100	0/112
Cr	0/000	0/000	0/002	0/001	0/001	0/001
Fe ³⁺	0/033	0/066	0/053	0/047	0/089	0/039
Fe ²⁺	0/226	0/195	0/189	0/203	0/160	0/213
Mn	0/009	0/008	0/007	0/006	0/007	0/006
Mg	0/880	0/874	0/871	0/866	0/869	0/859
Ni	0/000	0/001	0/001	0/000	0/000	0/000
Ca	0/797	0/796	0/814	0/814	0/802	0/814
Na	0/021	0/020	0/021	0/023	0/021	0/021
K	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000
F	0/000	0/012	0/002	0/001	0/017	0/000
Sum	3/999	4/000	4/001	4/001	3/999	3/999
Al ^{IV}	0/066	0/071	0/091	0/083	0/086	0/086
Al ^{VI}	0/014	0/010	0/020	0/020	0/014	0/026
Mol _{Wo}	40/96	41/05	42/09	42/04	41/64	42/15

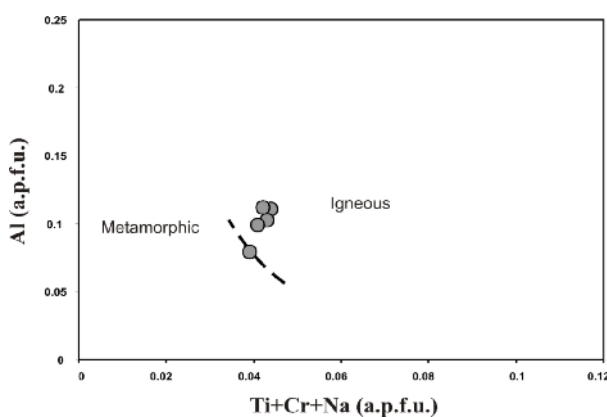


شکل ۳ موقعیت کلینوپیروکسن‌های توده‌ی نفوذی بغم در نمودار تقسیم بندی کلینوپیروکسن‌ها از [۲۳].



شکل ۴ کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی در نمودار Q-J ($J = 2Na$, $Q = Ca + Mg + Fe^{2+}$) در گستره‌ی کلینوپیروکسن‌های کلسیم-منیزیم-

آهن‌دار قرار می‌گیرند [۲۳].



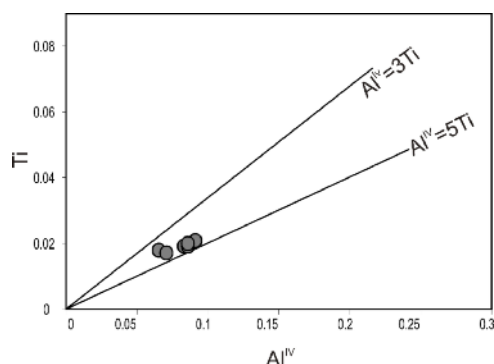
شکل ۵ در نمودار $Ti + Na + Cr$ نسبت به Al بیشتر کلینوپیروکسن‌ها ماهیت آذرین نشان می‌دهند [۲۴].

می‌یابد، بستگی دارد [۲۶،۲۵] با توجه به نمودار تغییرات Ti - Al^{IV} ، میزان پایین تیتانیوم در کلینوپیروکسن‌ها بیانگر وجود کانی‌های تیتانیوم‌دار (ایلمنیت یا با احتمال قوی‌تر

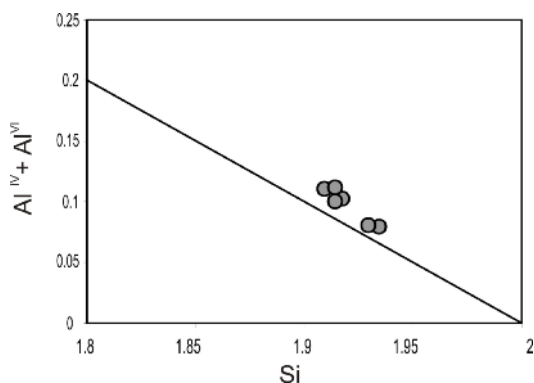
محتوای Ti و Al کلینوپیروکسن‌ها به فعالیت سیلیس مذابی که از آن متبلور شده‌اند و به نسبت این عناصر که به ترتیب در انواع ماگماهای توله‌ایتی، قلیایی و پرآلکان افزایش

ساختار هشت وجهی می‌شوند. بنابراین میزان Fe^{3+} در کلینوپیروکسن‌ها تابعی از گریزندگی اکسیژن و میزان Al در موقعیت چار وجهی و هشت وجهی است، نمودار $Al^{VI} + 2Ti + Cr$ نسبت به $Na + Al^{IV}$ بیانگر این ادعاست [۲۸، ۲۷]. قرارگیری نمونه‌ها در بالای خط $Fe^{3+} = 0$ موید بالا بودن گریزندگی اکسیژن است (شکل ۸) و با توجه به فاصله‌ی نمونه‌ها با خط $Fe^{3+} = 0$ گریزندگی محیط تبلور نسبتاً بالاست.

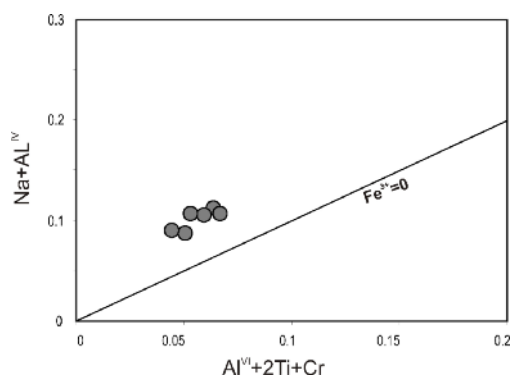
تیتانومگنتیت در سنگ است (شکل ۶) که با احاطه شدن کانی‌های کدر به وسیله‌ی تیتانیت تایید می‌شود. در نمودار توزیع Al و Si پیروکسن‌های توده مورد بررسی، نمونه‌ها در بالای خط اشباع جایگاه چار رخی قرار می‌گیرند (شکل ۷). بنابراین موقعیت چار رخی این کلینوپیروکسن‌ها به صورت کامل با Si و به صورت بخشی با $Al (Al^{IV})$ پر می‌شود و نمی‌تواند با کاتیون‌های سه ظرفیتی مثل Fe^{+3} ، Ti و Cr اشغال شود. Al اضافی همراه با عناصر سه ظرفیتی نیز وارد



شکل ۶ با توجه به نمودار تغییرات $Ti-Al^{IV}$ ، میزان پایین تیتانیم در کلینوپیروکسن‌ها بیانگر وجود کانی‌های تیتانیم‌دار (ایلمنیت) در سنگ است [۲۹].



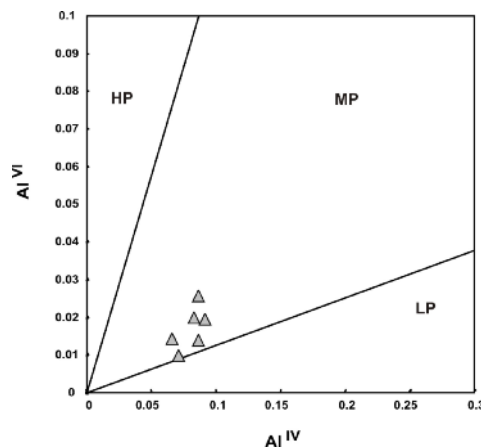
شکل ۷ پیروکسن‌های توده‌ی مورد بررسی در نمودار توزیع Al و Si در بالای خط اشباع جایگاه چار وجهی قرار می‌گیرند [۲۸].



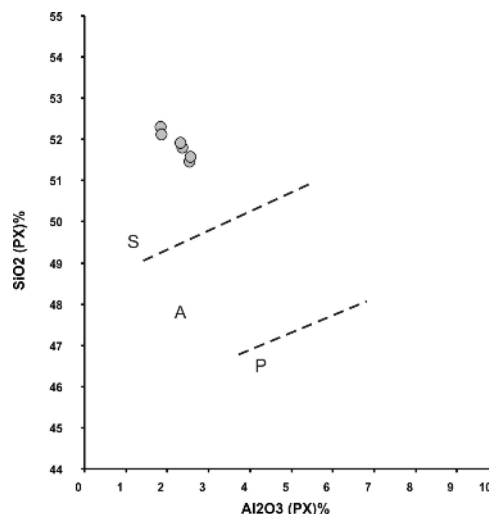
شکل ۸ قرارگیری نمونه‌ها در بالای خط $Fe^{3+} = 0$ در نمودار $Al^{VI} + 2Ti + Cr$ نسبت به $Na + Al^{IV}$ گویای بالا بودن گریندگی اکسیژن است و با توجه به فاصله نمونه‌ها با خط $Fe^{3+} = 0$ گریندگی محیط تبلور نسبتاً بالاست [۲۸].

بنابر نمودار SiO_2 نسبت به Al_2O_3 ، ماهیت ماگمایی که کلینوپیروکسن‌ها از آن متبلور می‌شوند، نیمه‌قلیایی (تولیتی و آهکی-قلیایی) است (شکل ۱۰). نمودار $Ca + Na$ نسبت به Ti و نمودار TiO_2 نسبت به Al_2O_3 ماهیت تولیتی نشان می‌دهند (شکل ۱۱). در نمودار تفکیکی $Ca-Ti$ و $Ca - Ti + Cr$ تمامی کلینوپیروکسن‌ها در میدان کوهزایی قرار می‌گیرند (شکل ۱۲A,B) که در توافق با تشکیل آنها در یک موقعیت زمین‌ساختی وابسته به کمان است. هم‌چنین در نمودار دوتایی $TiO_2-Al(Z)\%$ $Al(Z)\%$: درصد موقعیت‌های چاروجهی اشغال شده با آلومینیوم) نمونه‌ها در گستره‌ی وابسته به کمان قرار می‌گیرند (شکل ۱۳).

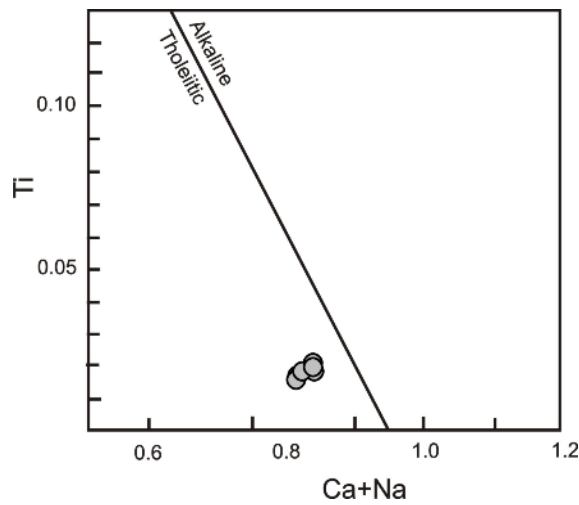
ترکیب Al^{VI} در کلینوپیروکسن‌های آذرین چنانکه بررسی‌های تجربی ذوب در بازالت‌ها نشان داده، وابسته به فشار است [۳۰]. مقادیر کم Al^{VI} در اوزیت‌های بازالت‌ها و دایک‌های دولریتی سازگار با فشارهای پایین تبلور است. نسبت Al^{VI}/Al^{IV} در این کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی بین ۰/۱۴ تا ۰/۳۰ متغیر بوده و در گستره‌ی کلینوپیروکسن‌های فشار واقع مرزی است برای آن دسته از پیروکسن‌هایی است که بین فشارهای پایین و متوسط (~ 5 Kbar) متبلور شده‌اند. بر این اساس فشار تبلور برای کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی با توجه به قرارگیری در مجاورت مرز یاد شده، بایستی حدود ۵ کیلوپار یا کمی بیشتر از آن باشد.



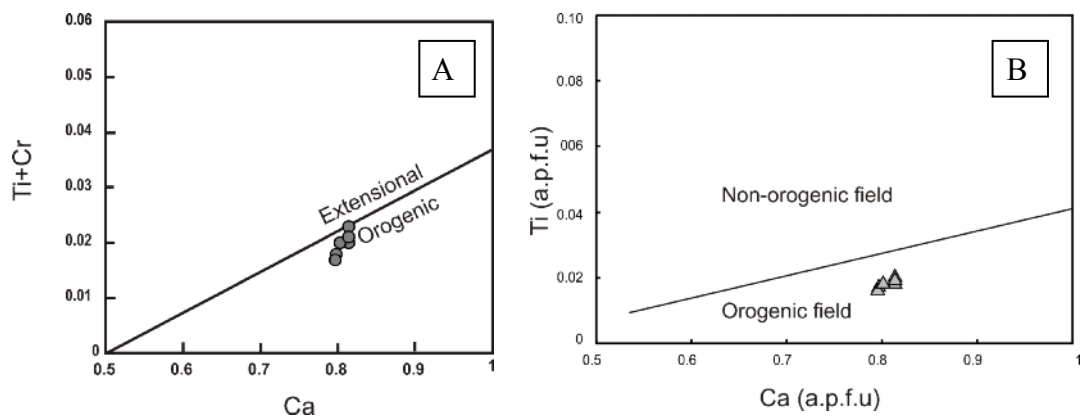
شکل ۹ نمودار تغییرات Al^{VI} نسبت به Al^{IV} [۳۱] برای برآورد فشارهای کلینوپیروکسن‌های توده‌ی نفوذی بغم HP = میدان فشار بالا، LP = میدان فشار پایین و MP = میدان فشار متوسط.



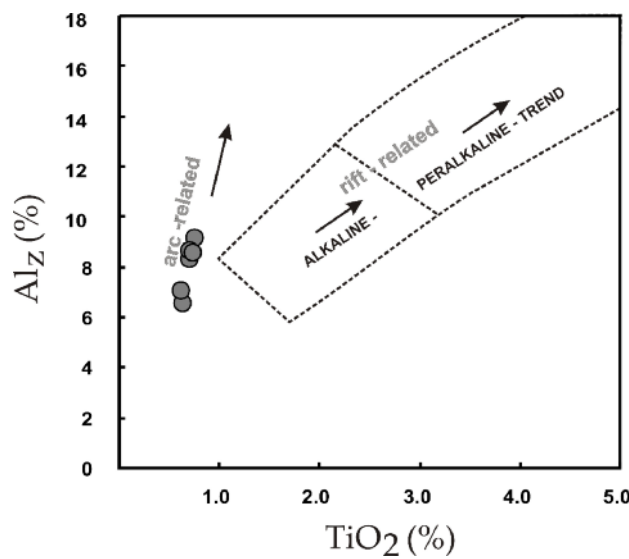
شکل ۱۰ نمودار SiO_2 نسبت به Al_2O_3 ماهیت نیمه‌قلیایی (تولییتی و آهکی-قلیایی) ماگمایی که کلینوپیروکسن‌ها از آن متبلور می‌شوند را نشان می‌دهند [۲۶].



شکل ۱۱ بر اساس نمودار Ti نسبت به $Ca + Na$ کلینوپیروکسن‌ها ماگما، ماهیت تولییتی نشان می‌دهد [۳۲].



شکل ۱۲ بر اساس نمودار Ca (A) در برابر $Ti + Cr$ (B) نسبت به Ti محیط تشکیل کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی کوهزایی است [۳۲].



شکل ۱۳ نمودار دوتایی $TiO_2-Al_{(Z)}\%$ (درصد موقعیت‌های چاروجهی اشغال شده به‌وسیله‌ی آلومینیوم) نمونه‌ها در گستره‌ی وابسته به کمان قرار می‌گیرند موقعیت کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی روی نمودار ترسیمی دمای تبلور کلینوپیروکسن‌ها [۳۳].

آمفیبول

(۹/۷۸، MgO (۱۷/۸۳-۱۸/۲۱٪) ، K_2O (۰/۵۰-۰/۵۶٪) و

X_{Mg} (۰/۹۴۸-۱/۰۰۰). میزان آهن آمفیبول‌ها با افزایش

Al_2O_3 و کاهش SiO_2 زیاد می‌شود.

براساس نمودار TiO_2 نسبت به Al_2O_3 ، Na_2O ، K_2O ،

MgO و Na_2O/K_2O ماهیت ماگما تمایل به نیمه‌قلیایی دارد

[۳۴] (شکل ۱۴).

۶ نقطه از بلورهای آمفیبول توده گابروی منطقه‌ی مورد

بررسی، تحت آنالیز ریزپردازش الکترونی قرار گرفتند که نتایج

این آنالیزها در جدول ۲ ارائه شده‌اند. تغییر ترکیب شیمیایی

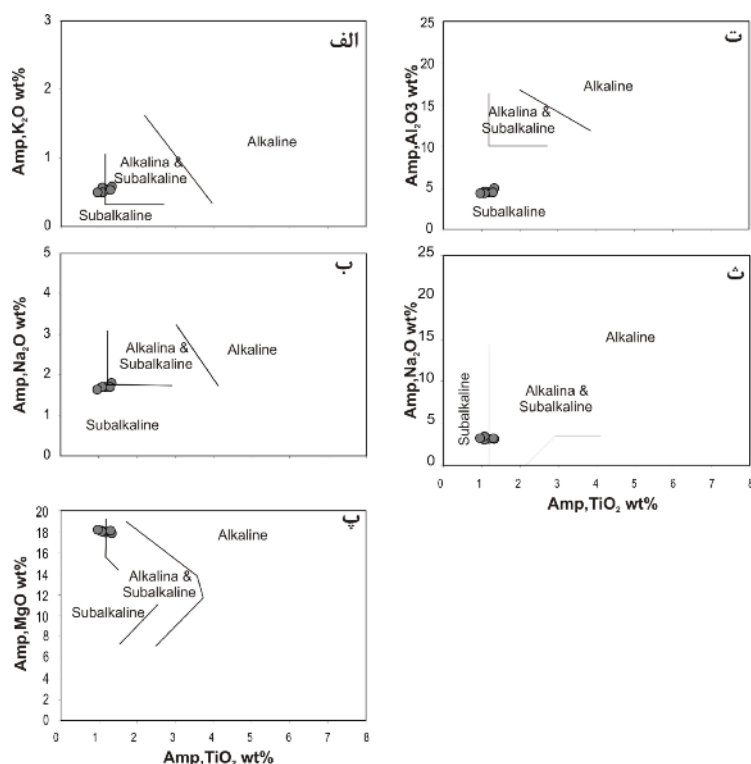
آمفیبول‌های مورد بررسی به صورت زیر است: SiO_2 (٪)

Al_2O_3 (٪) (۴/۳۲-۴/۸۹)، FeO (٪) (۵/۱۱-۵/۱۶-۱۰/۲۲)

جدول ۲ نتایج آنالیزهای ریزپردازشی آمفیبول‌های توده‌ی نفوذی مورد بررسی بر اساس ۲۳ اتم اکسیژن.

label	Amph-1	Amph-2	Amph-2	Amph-3	Amph-4	Amph-5
SiO ₂	50/38	50/54	50/11	50/67	51/16	51/04
TiO ₂	1/18	1/08	1/33	1/30	1/08	0/96
P ₂ O ₅	0/00	0/03	0/03	0/00	0/03	0/02
Al ₂ O ₃	4/49	4/53	4/98	4/44	4/32	4/33
Cr ₂ O ₃	0/00	0/00	0/00	0/01	0/02	0/01
Fe ₂ O ₃	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00
FeO	9/92	9/91	10/22	9/88	10/12	9/78
MnO	0/29	0/25	0/23	0/21	0/29	0/25
MgO	17/91	18/07	17/83	18/06	18/05	18/21
NiO	0/00	0/03	0/01	0/01	0/02	0/02
CaO	11/09	11/07	10/91	11/11	10/99	11/03
Na ₂ O	1/71	1/71	1/80	1/71	1/70	1/64
K ₂ O	0/54	0/57	0/58	0/53	0/50	0/50
F	1/39	1/40	1/39	1/63	1/57	1/60
Total	98/32	98/60	98/84	98/87	99/19	98/72
Si	7/108	7/106	7/041	7/096	7/135	7/131
Ti	0/125	0/114	0/141	0/137	0/113	0/101
P	0/000	0/004	0/004	0/000	0/004	0/002
Al	0/747	0/751	0/825	0/733	0/710	0/713
Cr	0/000	0/000	0/000	0/001	0/002	0/001
Fe ³⁺	0/966	0/976	0/976	1/065	1/081	1/147
Fe ²⁺	0/205	0/189	0/225	0/092	0/100	0/000
Mn	0/035	0/030	0/027	0/025	0/034	0/030
Mg	3/767	3/787	3/735	3/771	3/753	3/793
Ni	0/000	0/003	0/001	0/001	0/002	0/002
Ca	1/676	1/668	1/642	1/667	1/642	1/651
Na	0/468	0/466	0/490	0/464	0/460	0/444
K	0/097	0/102	0/104	0/095	0/089	0/089
F	0/620	0/623	0/618	0/722	0/692	0/707
Sum	15/814	15/819	15/829	15/869	15/817	15/811
Al (IV)	0/747	0/751	0/825	0/733	0/710	0/713

Al (VI) 0/000 0/000 0/000 0/000 0/000 0/000



شکل ۱۴ در نمودارهای TiO₂ نسبت به الف) K₂O، ب) Na₂O، پ) MgO، ت) Al₂O₃، و ث) Na₂O/K₂O حاصل از آنالیز آمفیبول‌ها ماهیت ماگما به نیمه‌قلیایی تمایل دارد [۳۴].

می‌گیرند (شکل ۱۵). میزان MgO در این آمفیبول‌ها نسبت به FeO* بسیار بالا بوده و این بلورها به شدت غنی از Mg هستند. میزان Mg# ($Mg/Mg + Fe^{2+}$) از ۰٫۷۵ تا یک تغییر می‌کند.

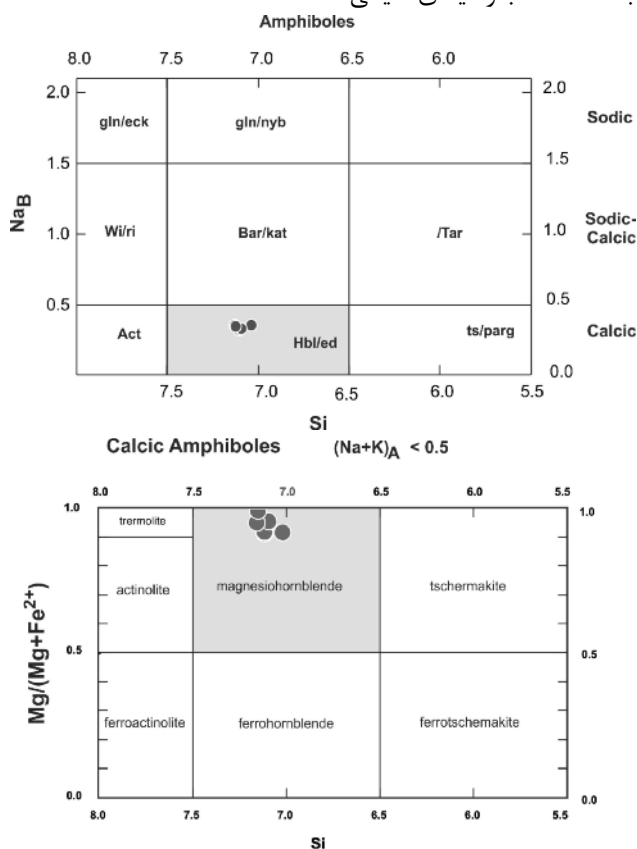
همبستگی مثبتی بین Ti و Al^{IV} وجود دارد، به طوری که با کاهش Al^{IV}، Ti نیز کم می‌شود که حاصل افزایش Si در ساختار بلور و پیشرفت تبلور ماگماست (شکل ۱۶، [۳۴]).

ترکیب شیمی بلورهای آمفیبول می‌تواند نشان دهنده‌ی شرایط گریزندگی اکسیژن ماگما باشد و بر مبنای [۴،۳] و نیز با توجه به میزان Fe# ($Fe = Fe/Mg + Fe$) و نسبت $Fe^{3+}/(Fe^{3+} + Fe^{2+})$ می‌توان گریزندگی اکسیژن را برآورد کرد. در این حالت اگر Fe# در گستره‌ی ۰ تا ۰٫۶ قرار گیرد نشان دهنده‌ی گریزندگی بالای اکسیژن بوده و اگر مقدار آن برابر با ۰٫۶ تا ۰٫۸ باشد گریزندگی متوسط است و در صورتیکه تا ۱ باشد، گریزندگی پایین خواهد بود. با توجه به ترکیب شیمیایی بلورهای آمفیبول توده‌ی مورد بررسی، میزان Fe# برابر با ۰٫۲

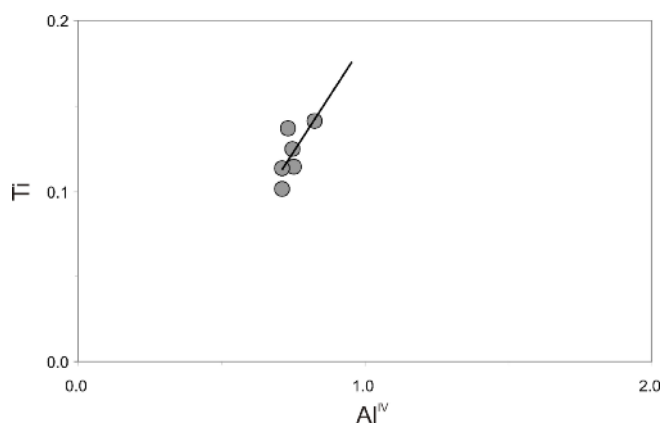
داده‌های شیمی کانی آمفیبول‌ها در تعیین نوع آنها و نیز محاسبات زمین-دماسنجی و زمین-فشارسنجی به منظور برآورد عمق نفوذ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. فرمول ساختاری آنها بر مبنای ۲۳ اتم اکسیژن محاسبه شده است. برای تعیین نام و تعیین فرمول بلورهای آمفیبول با استفاده از آنالیزهای نقطه‌ای ریزپردازنده‌ی الکترونی، روش [۳۵] و نیز نرم‌افزار PET بکار گرفته شده‌اند.

برای تمامی آمفیبول‌های مورد بررسی رابطه‌ی $(Ca + Na)B \geq 1.00$ برقرار است، بنابراین آمفیبول‌های آنالیز شده از این سنگ‌های گابرویی جزء آمفیبول‌های کلسیک هستند. با توجه به اینکه $Ca_B \geq 1.5$ و $(Na + K)_A < 0.50$ بوده و از طرف دیگر $Ti < 0.50$ است (جدول ۲)، آمفیبول‌های سنگ‌های مورد بررسی در نمودار رده‌بندی آمفیبول‌ها، در گستره‌ی کلسیک [۳۵] قرار می‌گیرند. در رده‌بندی آمفیبول‌های کلسیک بر مبنای نمودار Si نسبت به $Mg/(Mg + Fe^{2+})$ ، نقاط آنالیز شده در گستره‌ی منیزوهورنبلند قرار

تا حداکثر ۴/ بوده و بیانگر شرایط گریزندگی اکسیژن بالاست. کانی کلینوپیروکسن همخوانی دارد. این موضوع با گریزندگی اکسیژن بدست آمده به وسیله شیمی



شکل ۱۵ نمایش موقعیت بلورهای انتخابی آمفیبول از گابروهای توده‌ی بغم روی نمودار تقسیم بندی آمفیبول های کلسیک [۳۵].



شکل ۱۶ بین Ti و Al^{IV} همبستگی مثبت وجود دارد که نشان از افزایش Si در ساختار بلور و پیشرفت تبلور ماگماست.

فلدسپات‌ها

ترکیب شیمی کانی فلدسپات‌های سنگ‌های مورد بررسی در جدول ۳ ارایه شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود تمامی فلدسپات‌ها، پلاژیوکلاز بوده و معمولاً زونه‌اند و ترکیب آنها از An_{90.1}Ab_{10.2}Or_{0.1} در هسته تا An_{47.5}Ab_{51.6}Or_{0.7} در حاشیه متغیر است. چنانکه ملاحظه می‌شود محتوای Or

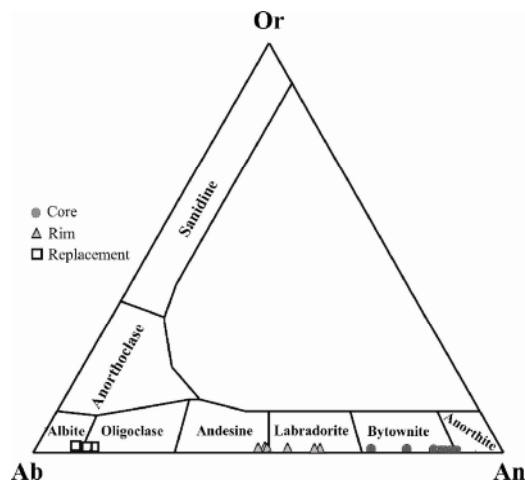
پلاژیوکلازها در هسته تقریباً ناچیز بوده و در حاشیه حداکثر به ۰/۷ درصد وزنی می‌رسد. با توجه به ترکیب شیمیایی هسته، پلاژیوکلازهای مورد بررسی بیشتر در گستره‌ی بیتونیت و در حاشیه در گستره‌ی لابرادوریت تا آندزین قرار می‌گیرند (شکل ۱۸). علاوه بر این پلاژیوکلازهای بازی اولیه (ماگمایی) گروه دیگری از پلاژیوکلازها نیز در این سنگهای گابرویی ملاحظه

می‌شوند که حاصل سوسوریتی شدن پلاژیوکلازهای بازی بوده متغیر است که بیشتر در گستره‌ی آلبیت قرار می‌گیرند (شکل و ترکیب آنها از $An_{12.9}Ab_{86.0}Or_{0.7}$ تا $An_{9.0}Ab_{90.4}Or_{1.0}$) (۱۷).

جدول ۳ نتایج آنالیزهای ریزپردازشی پلاژیوکلازهای توده‌ی نفوذی مورد بررسی بر اساس ۸ اتم اکسیژن.

Label	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	P-9	P-10	P-11	P-12
Remark	core	core	core	core	core	rim	rim	rim	rim	rep	rep	rep
SiO ₂	45/14	45/28	45/75	45/66	46/55	47/67	52/72	54/12	55/88	65/07	65/73	66/16
TiO ₂	0/01	0/04	0/03	0/01	0/04	0/03	0/08	0/05	0/06	0/00	0/00	0/00
P ₂ O ₅	0/00	0/00	0/00	0/01	0/01	0/00	0/01	0/03	0/02	0/02	0/00	0/01
Al ₂ O ₃	34/27	34/21	34/01	34/04	33/40	32/07	29/42	28/31	27/41	21/89	21/19	21/05
Cr ₂ O ₃	0/00	0/00	0/01	0/01	0/00	0/00	0/00	0/01	0/01	0/00	0/02	0/01
Fe ₂ O ₃	0/53	0/60	0/59	0/59	0/69	0/70	0/69	0/57	0/48	0/14	0/14	0/09
FeO	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00
MnO	0/02	0/00	0/00	0/03	0/00	0/01	0/00	0/00	0/03	0/00	0/02	0/00
MgO	0/02	0/04	0/03	0/02	0/04	0/04	0/06	0/04	0/07	0/01	0/01	0/01
NiO	0/01	0/00	0/00	0/00	0/02	0/00	0/00	0/01	0/00	0/01	0/00	0/00
CaO	18/07	17/97	17/46	17/71	17/12	15/88	12/48	11/05	9/82	2/73	2/36	1/91
Na ₂ O	1/13	1/17	1/39	1/29	1/66	2/30	4/40	5/16	5/90	10/08	10/11	10/62
K ₂ O	0/01	0/01	0/01	0/01	0/01	0/03	0/09	0/13	0/13	0/12	0/16	0/17
F	0/01	0/09	0/07	0/06	0/00	0/06	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00
Total	99/22	99/37	99/32	99/41	99/54	98/77	99/95	99/48	99/81	100/07	99/74	100/03
Si	2/100	2/103	2/122	2/118	2/152	2/215	2/394	2/459	2/521	2/863	2/896	2/906
Ti	0/000	0/001	0/001	0/000	0/001	0/001	0/003	0/002	0/002	0/000	0/000	0/000
P	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/001	0/001	0/001	0/000	0/000
Al	1/879	1/873	1/859	1/861	1/820	1/756	1/575	1/516	1/457	1/135	1/100	1/090
Cr	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/001	0/000
Fe ₃	0/019	0/021	0/021	0/021	0/024	0/024	0/024	0/019	0/016	0/005	0/005	0/003
Fe ₂	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000
Mn	0/001	0/000	0/000	0/001	0/000	0/000	0/000	0/000	0/001	0/000	0/001	0/000
Mg	0/001	0/003	0/002	0/001	0/003	0/003	0/004	0/003	0/005	0/001	0/001	0/001
Ni	0/000	0/000	0/000	0/000	0/001	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000
Ca	0/901	0/894	0/868	0/880	0/848	0/790	0/607	0/538	0/475	0/129	0/111	0/090
Na	0/102	0/105	0/125	0/116	0/149	0/207	0/387	0/455	0/516	0/860	0/864	0/904
K	0/001	0/001	0/001	0/001	0/001	0/002	0/005	0/008	0/007	0/007	0/009	0/010
F	0/001	0/013	0/010	0/009	0/000	0/009	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000
Sum	5/005	5/014	5/009	5/008	4/999	5/007	4/999	5/001	5/001	5/001	4/988	5/004
X _{An}	90/1	89/4	86/8	88/0	84/8	79/0	60/7	53/8	47/5	12/9	11/1	9/0
X _{Ab}	10/2	10/5	12/5	11/6	14/9	20/7	38/7	45/5	51/6	86/0	86/4	90/4
X _{Or}	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/2	0/5	0/8	0/7	0/7	0/9	1/0

Core: هسته، rim: حاشیه، rep: جانیشینی



شکل ۱۷ ترکیب پلاژیوکلازهای مورد مطالعه در نمودار تقسیم‌بندی فلدسپات‌ها.

شرایط فشار - درجه حرارت تبلور توده

در این مقاله داده‌های حاصل از شیمی کانی، برای تعیین دما و فشار از تبلور توده‌ی مورد بررسی استفاده شده است. زمین-فشارسنجی به روش محتوای Al در هورنبلند بر مبنای درجه-بندی [۹] فشارهای حدود ۰/۴ تا ۰/۹ کیلو بار را بدست می‌دهد که با توجه به ویژگی‌های دیگر توده، به نظر می‌رسد که به میزان قابل توجهی کم است. روش‌های بر مبنای محتوای آلومینیوم در آمفیبول‌ها نیز فشار با مقادیر منفی را نشان می‌دهند. دلیل آن اینست که گستره‌ی تغییرات ترکیبی در بلورهای پلاژیوکلاز با توجه به منطقه بندی آنها، جزئی نبوده و از آندزین تا مرز آنورتیت-بیتونیت متغیر است (شکل ۱۷). این طیف گسترده ترکیبی از این جهت مهم است که در زمین-فشارسنجی بر مبنای محتوای آلومینیوم بلورهای آمفیبول، جزئی بودن تغییرات ترکیبی در پلاژیوکلازها یک موضوع ضروری تلقی می‌شود [۶]. یکی دیگر از دلایلی که این روش برای زمین-فشارسنجی این توده گابرویی قابل اطمینان نیست، فقدان حضور کانی‌های کوارتز و فلدسپات پتاسیم در آن است [۳]. بنابراین روش زمین-فشارسنجی محتوای Al در آمفیبول برای تعیین فشار این توده ماگمایی قابل کاربرد نیست. ولی با توجه به شکل ۱۰ ترکیب کلینوپیروکسن‌ها از سنگهای مورد بررسی در گستره‌ی فشار پایین تا متوسط قرار می‌گیرند. برای تعیین درجه‌ی تبلور توده‌ی ماگمایی بغم، می‌توان از نمودار نموداری دمای تبلور کلینوپیروکسن‌ها که توسط [۱۰] ارائه شده است، استفاده کرد. با توجه به نمودار دمای تبلور کلینوپیروکسن‌ها برای فشار ۵ کیلوبار، ترکیب این کانی‌ها گستره‌ای از ۸۴۰ تا ۹۲۰ درجه‌ی سانتیگراد را نشان می‌دهد (شکل ۱۸). با توجه به حضور همزیست و در حال تعادل دو کانی آمفیبول و کلینوپیروکسن، روش دیگر قابل استفاده برای تعیین دمای تبلور توده، بر مبنای روش زمین-فشارسنجی

جفت کانی کلینوپیروکسن و آمفیبول همزیست [۱۱، ۱۲] است که دمای تبلور جفت کانی‌های مورد بررسی در گستره‌ی ۷۳۰ تا ۷۹۰ درجه سانتیگراد قرار می‌گیرد (شکل ۱۹).

برداشت

توده‌ی بغم یکی از مجموعه توده‌های نفوذی نوار ماگمایی ارومیه-دختر است. کانی‌های اصلی این توده شامل پیروکسن، آمفیبول و پلاژیوکلاز است. کلینوپیروکسن‌ها دارای ترکیب اوزیت بوده و در گستره‌ی کلینوپیروکسن‌های کلسیم-منیزیم-آهن‌دار قرار می‌گیرند. نسبت Al^{VI}/Al^{IV} در این کلینوپیروکسن‌ها بین ۰/۱۴ تا ۰/۳۰ متغیر بوده و در گستره‌ی کلینوپیروکسن‌های با فشار متوسط تا فشار پایین قرار می‌گیرند. از طرف دیگر دمای تبلور این کلینوپیروکسن‌ها که معادل با دمای توده‌ی نفوذی است، بین ۸۴۰ تا ۹۲۰ درجه سانتیگراد را برای فشارهایی در حدود ۵ کیلوبار به دست می‌دهد. همچنین گریزندگی اکسیژن ماگما نسبتاً بالا بوده است. از نظر تکتونوماگمایی شیمی کانی پیروکسن‌ها نشان می‌دهد که این توده آذرین دارای ماهیت ساب‌آلکان (تولئیتی) بوده که در یک محیط تکتونیکی وابسته به کمان ماگمایی تشکیل شده است.

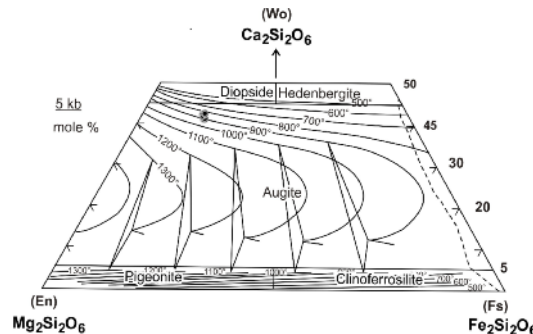
آمفیبول‌ها در این گابروها جزء آمفیبول‌های کلسیک هستند که در گستره‌ی منیزیوهورنبلند قرار گرفته و از نظر تکتونوماگمایی نشانگر ماهیت نیمه قلیایی این توده‌ی آذرین هستند.

بر اساس روش دمای تبلور، جفت کانی‌های کلینوپیروکسن و آمفیبول همزیست، دما در گستره‌ی ۷۳۰ تا ۷۹۰ درجه سانتیگراد قرار می‌گیرد.

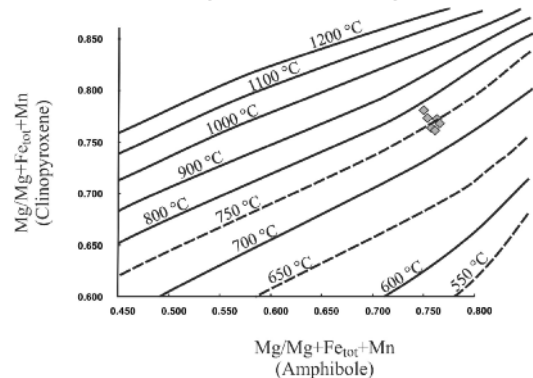
پلاژیوکلاز فراوانترین کانی فلسیک این سنگ‌های گابرویی است. براساس آنالیزهای ریزپردازشی انجام گرفته روی

دارند حاصل سوسوریتی شدن پلاژیوکلازهای بازی اولیه است.

پلاژیوکلازها، هسته ترکیب بیتونیت و حاشیه ترکیب لابرادوریت تا آندزین را نشان می‌دهد. بخشی ترکیب آلبیتی



شکل ۱۸ موقعیت کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی روی نمودار ترسیمی دمای تبلور کلینوپیروکسن‌ها در فشار ۵ کیلو بار [۱۰].



شکل ۱۹ استفاده از زمین-دماسنجی جفت کانی‌های کلینوپیروکسن و آمفیبول همزیست [۱۱] برای تعیین دمای تبلور.

[6] Hollister L. S., Grissom G. C., Peters E. K., Stowell H. H., Sisson V. B., "Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons", American Mineralogist 72 (1987) 231-239.

[7] 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.

[8] Blundy J. D., Holland T. J. B., "Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer", Contributions to Mineralogy and Petrology 104 (1990) 208-224.

[9] 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.

[10] Lindsley I., "Pyroxene thermometry", American Mineralogist 68 (1983) 477-493.

مراجع

[1] Nisbet E. G., Pearce J. A., "Clinopyroxene composition of mafic lavas from different tectonic settings", Contributions to Mineralogy and Petrology 63 (1977) 161-173.

[2] Beccaluva L., Macciotta G., Piccardo G. B., Zeda O., "Clinopyroxene composition of ophiolite basalts as petrogenetic indicator", Chemical Geology 77 (1989) 165-182.

[3] Anderson J. L., Smith D. R., "The effect of temperature and oxygen fugacity on Al-in-hornblende barometry", American Mineralogist 80 (1995) 549-559.

[4] Spear F. S., "Amphibole-plagioclase equilibria: an empirical model for the reaction albite + tremolite = edenite + 4 quartz", Contribution to Mineralogy and Petrology 77 (1981) 355-364.

[5] Hammarstrom J. M., Zen E., "Aluminum in hornblende: An empirical ionic geobarometer. American Mineralogist", 71(1986) 1297-1313.

- [23] Morimoto N., "The nomenclature of pyroxenes", Mineralogical Magazine 52 (1988) 535-50.
- [24] Berger J., Féménias O., Mercier J. C. C., Demaiffe D., "Ocean-floor hydrothermal metamorphism in the Limousin ophiolites (western French Massif Central): evidence of a rare preserved Variscan oceanic marker", Journal of Metamorphic Geology. 23b(2005) 795-812.
- [25] Kushiro I., "Si-Al relation in clinopyroxenes from igneous rocks", American Journal of Science 258 (1960) 548-554.
- [26] Le Bas M. J., "The role of aluminium in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage", American Journal of Science 260 (1962) 267-288.
- [27] Bence A. E., Papike J. J., Ayuso R. A., "Petrology of Atlantic island arcs", Bulletin of Volcanology 32 (1975) 189-206.
- [28] Schweitzer E. L., Papike, J. J., Bence E., "Statistical analysis of clinopyroxenes from deep-sea basalts", American Mineralogist 64 (1979) 501-513.
- [29] Gamble R. P., Taylor L. A., "Crystal/liquid partitioning augite: effects of cooling rate", Earth and Planetary Science Letters 47 (1980) 21-33.
- [30] Mahood G. A., Baker D. R., "Experimental constraints on depths of fractionation of mildly alkalic basalts and associated felsic rocks: Pantelleria, strait of Sicily", Contribution to Mineralogy and Petrology 93 (1986) 251-264.
- [31] Aoki K., Shiba I., "Pyroxene from lherzolite inclusions of Itinomegata Japan", Lithos 6 (1973) 41-51.
- [32] Letterrier J., Maury R. C., Thonon P., Girard D., Marchal M., "Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series", Earth and Planetary Science Letters 59 (1982) 139-54.
- [33] Loucks, R. R., "Discrimination of ophiolitic from nonophiolitic ultramafic-mafic allochthons in orogenic belts by the Al/Ti ratio in clinopyroxene", Geology 18 (1990) 346-349.
- [34] Molina J. F., Scarrow J.H., Montero P.G., "High-Ti amphibole as a petrogenetic indicator of magma chemistry: evidence for mildly alkalic-hybrid melts during evolution of Variscan basic-ultrabasic magmatism of Central Iberia", Contribution to Mineralogy and Petrology 158 (2009) 69-98
- [11] Ulrych J., Cimbalnikova A., Fiala L., Kaspar P., Lang M., Minarik L., Palivcova M., Pivec E., "Petrology of the Petrovice melagabbro", Rozpr Cs Akad Ved R Mat Prir Ved, Academia, Praha (1976) 57.
- [12] Abu Anbar M., "Petrogenesis of the Nesryin gabbroic intrusion in SW Sinai. Egypt: new contributions from mineralogy, geochemistry, Nd and Sr isotopes", Mineralogy and Petrology 95 (2009) 87-103.
- [13] Stocklin J., "Possible ancient continental margin in Iran .In: Burk C.A. and Drak C. L. (Eds).The Geology of Continental Margines", Springer, New York (1974) 873-887.
- [۱۴] نبوی م. ح.، "دییاجه‌ایی بر زمین‌شناسی ایران"، سازمان زمین‌شناسی ایران، (۱۳۵۵) ۱۰۹ ص.
- [۱۵] درویش‌زاده ع.، زمین‌شناسی ایران. انتشارات امیر کبیر (۱۳۷۰)، ۹۰۱ ص
- [16] Pourhosseini F., "Petrogenesis of Iranian plutons: a study of the Natanz and Bazman intrusive complexes", PhD thesis, University of Cambridge (1981) 315p.
- [17] Amidi S. M., "Contribution à l'étude stratigraphique, pétrologique et pétrographique des roches magmatiques de la region Natanz-Nain-Surk (Iran central)", Thèse Ph.D., Univ. Grénoble, France (1975) 316pp.
- [18] Amidi S. M., "Étude géologique de la région de Natanz-Surk (Iran Central), stratigraphie et pétrologie", Geology Survey of Iran 42 (1977) 316 p.
- [19] Reyre D., Mohafez S., "Une première contribution des accords NIOC-ERAP à la connaissance géologique de l'Iran", Revue de l'Institut Français du Pétrole 25 (1981) 979-1014.
- [۲۰] رادفر ج.، "نقشه چهارگوش زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۸.
- [21] Dachs E., "PET: Petrological elementary tools for mathematica: an update", Computers and Geoscience 30 (1981) 173-182.
- [22] Droop G.T.R., "A general equation for estimating Fe+3 concentrations. in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria", Mineralogical Magazine 51(1987) 431-435.

minerals and mineral names", European Journal of Mineralogy 9 (1997) 623-651.

[35] Leake B. E., "Nomenclature of amphiboles, Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association on new