



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

ناهید شبانیان بروجنی^۱، علیرضا داویدیان دهکردی^۱، فرنوش سهیلیان^۲

۱- دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

۲- گروه زمین‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خواراسکان

(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 آتشفسانی 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 پلازیوکلاز. بررسی شیمی کانی‌ها نشان می‌دهد که کلینوپیروکسن‌های این توده‌ی نفوذی دارای ترکیب اوزیت 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 منیزیوهرنبلند قرار می‌گیرند. از نظر تکتونوماگمایی ترکیب آمفیبول‌ها نشانگر ماهیت نیمه‌قلایی برای این توده آذربین است. روش زمین-دماسنجی بر اساس جفت کانی‌های کلینوپیروکسن و آمفیبول همزیست، دماهای ۷۲۰ تا ۷۹۰ درجه سانتیگراد را بدست می‌دهد. پلازیوکلاز 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.

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 پلازیوکلاز 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

مقدمه

ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌های آذربین 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 گذازه‌ای که از آن تبلور یابد، کنترل می‌شود [۲]. هم‌چنین

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

طول ۱۷۰۰ کیلومتر و عرض تقریبی ۱۰۰ کیلومتر به موازات روراندگی زاگرس و در فاصله‌ی ۱۵۰-۲۰۰ کیلومتری از آن قرار دارد. فعالیت ماقمایی سنوزئیک، هم به صورت آتشفشاری 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 آتشفشاری 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 تاثیر گرمایی توده بر سنگ‌های آتشفشاری آشکار نیست. از طرف دیگر بررسی‌های میکروسکوپی بر روی سنگ‌های آتشفشاری میزان نیز شواهد روشنی از دگرگونی مجاورتی را نشان نداد. در جنوب شرقی این توده‌ی گابرووی مورد بررسی نیز یک توده‌ی میکرودیوریتی رخنمون دارد که تاثیر توده گابرووی بر سنگ‌های میکرودیوریتی تاحدودی به صورت تجدید تبلور بوده و بطورکلی آثار چشمگیری از یک دگرگونی مجاورتی را نشان نمی‌دهند. در برداشت‌های صحرایی که در منطقه صورت گرفت، مواردی از حضور زنولیت‌های از جنس آندزیت و سنگ‌های آتشفشاری دیگر در این توده مشاهده نشدند. از آنجاکه این توده در سنگ‌های آتشفشاری 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 ارستان، سن آن پیش از میوسن است. بدین جهت می‌توان آن را به آخرین حادثه‌ی بزرگ ماقماییسم نفوذی وابسته دانست که در ایران در اولیگو-میوسن رخداده 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 آتشفشاری 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 [۱۸، ۱۷].

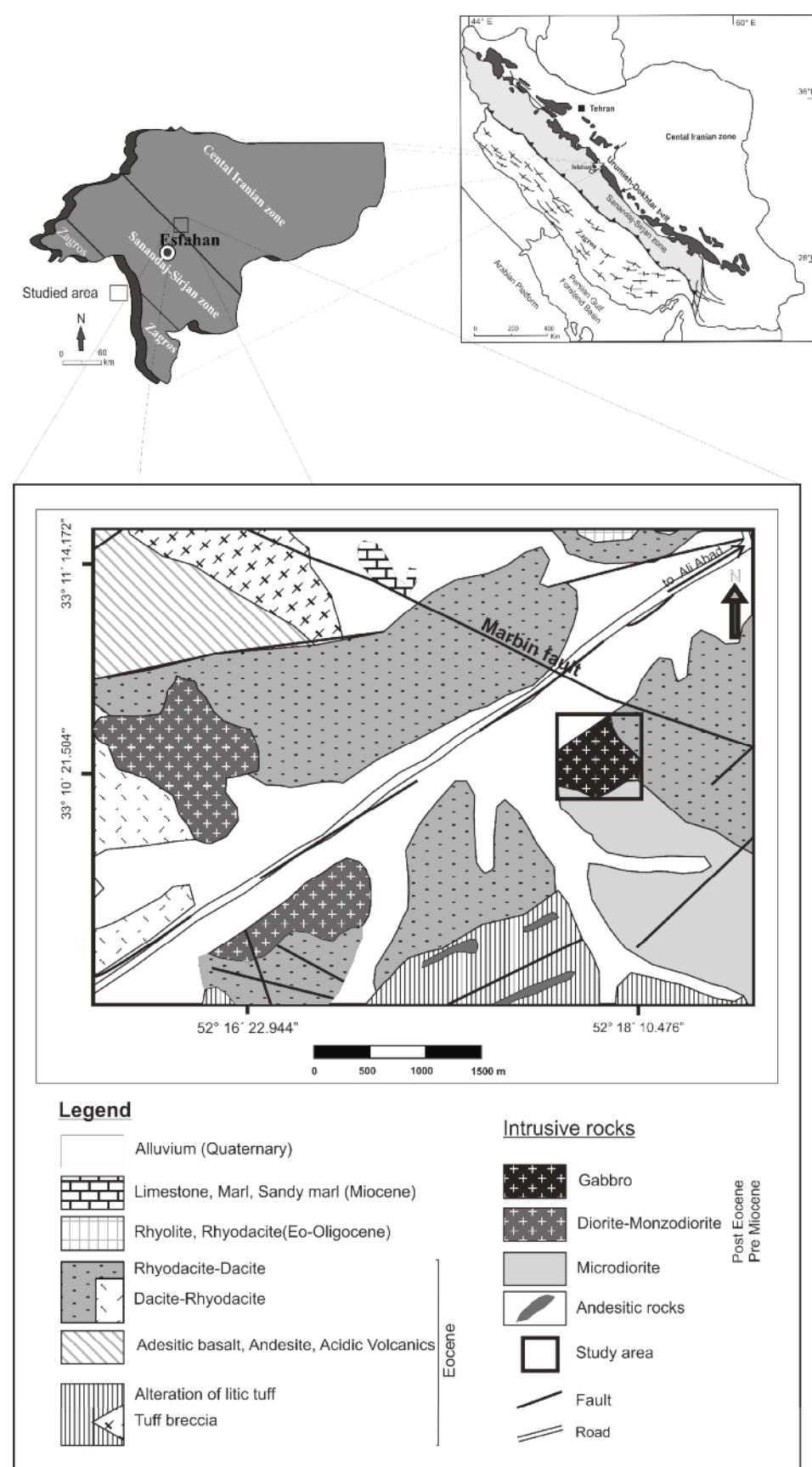
و به عنوان یک زمین فشارسنج بکار رفته است [۹-۵]، نمودار ترسیمی دمای کلینوپیروکسن‌ها [۱۰] و زمین دماسنجه جفت کانی‌های کلینوپیروکسن و آمفیبول همزیست [۱۲، ۱۱] به عنوان زمین دماسنجه کاربرد دارند.

بررسی‌های بسیاری در خصوص ژئوشیمی توده‌های نفوذی نوار ماقمایی 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 ماقمایی در گابروهای مورد بررسی برای دستیابی به شاخص پتروژنیکی مطمئن برای شناسایی نوع ماقما و محیط زمین‌ساختی است. نتایج به دست آمده آگاهی بهتری از فرآیندهای تبلور و شکل - گیری ماقما را فراهم می‌آورد.

زمین‌شناسی منطقه

توده‌ی نفوذی بغم در ۲۳ کیلومتری جنوب شرقی ارستان به صورت یک ارتفاع گنبدی شکل در منطقه دیده می‌شود و در مجاورت جاده‌ی اصلی آسفالتی اصفهان - ارستان قرار دارد و از دو سمت مورد بهره برداری معدنی گرفته است. از سنگ‌های این توده به عنوان سنگ‌نما استفاده می‌شود که بدلیل 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 "۱۵°۳۳'۰۱" تا "۳۷°۳۰'۱۰" شمالی و طول جغرافیایی "۵۲°۱۷'۵۲" تا "۲۰°۱۸'۵۲" 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 ماقمایی ارومیه - دختر است [۱۴، ۱۳] و در بخش مرکزی آن قرار دارد (شکل ۱) و روی نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ ارستان به عنوان دیوریت - مونزو دیوریت گزارش شده است.

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



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

گاه منطقه‌بندی نشان می‌دهد (شکل ۲ ب) و خرد شده‌اند که آثاری از تجزیه به کلریت در راستای شکستگی‌ها و خردشده‌گاه 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 شکل دار تا شکل دار بوده و مقاطع عرضی دو دسته رخ عمود برهم را نشان می‌دهند. آثار تجزیه اورلیتی (ترمولیت و اکتنیولیت) و تجزیه به کلسیت و اپیدوت و کلریت مشاهده می‌شوند که در راستای رخ‌ها تیتانیت آزاد شده است.

هورنبلند

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

روش بررسی

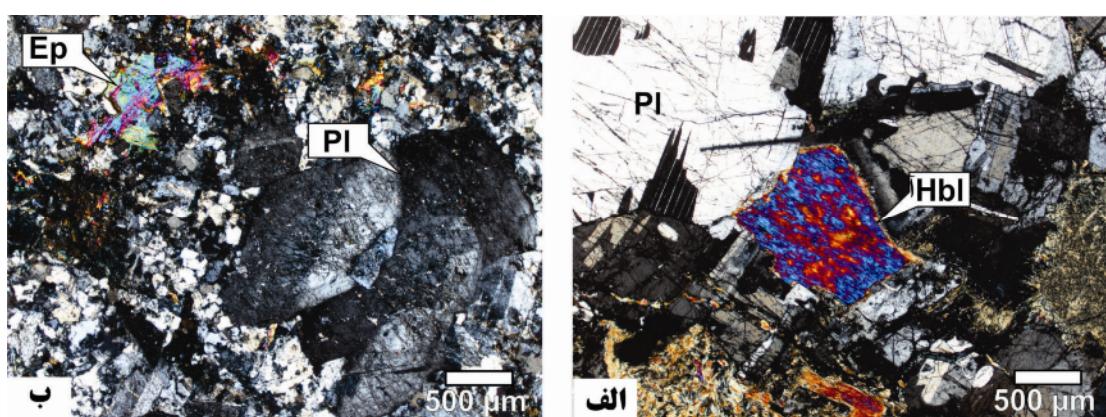
در این مقاله به منظور بررسی این توده از دیدگاه سنگ‌شناسی، نخست از آن به صورت سیستماتیک و با استفاده از GPS نمونه‌برداری شد و سپس به منظور بررسی شیمی کانی‌ها پس از تهیه‌ی مقاطع نازک و بررسی‌های میکروسکوپی، تعدادی از نمونه‌های با کمترین دگرسانی انتخاب و پس از تهیه‌ی مقاطع نازک صیقلی با استفاده از یک ریزپردازنده‌ی 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 کامپیوترا PET [۲۱] محاسبه شدند و محاسبه‌ی مقدار 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 پلازیوکلاز، پیروکسن، هورنبلند و کانی کدر تشکیل یافته‌اند. آثار تجزیه اورلیتی و سوسوریتی دیده می‌شوند.

پلازیوکلاز

این کانی از تشکیل دهنده‌های اصلی سنگ است که اندازه‌ی دانه‌ها غالباً متوسط بوده و از نظر فرم نیمه‌شکل دار تا بی‌شکل است و دارای ماکل تکراری (پلی‌سینتیک) و آلبیتی است.



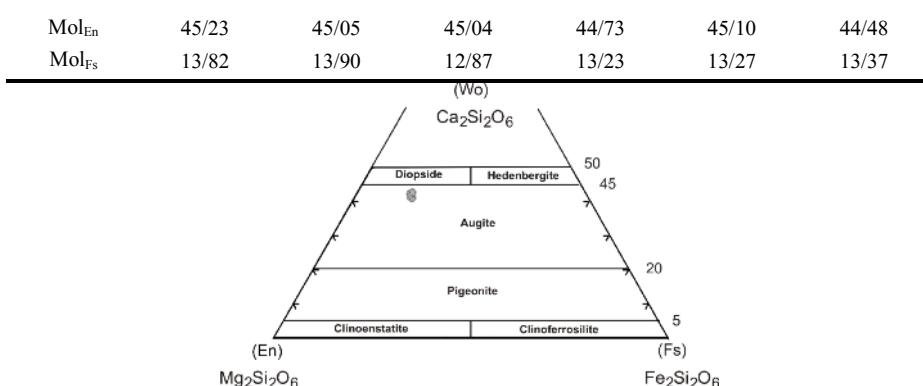
شکل ۲ (الف) بافت دانه‌ای هم بعد در سنگ گابرو توده‌ی نفوذی بغم، (ب) منطقه‌بندی آشکار در یک بلور درشت پلازیوکلاز همراه با بلورهای ریز پلازیوکلاز و اپیدوت. نور پلاریزه XPL

شیمی کانی‌ها
پیروکسن

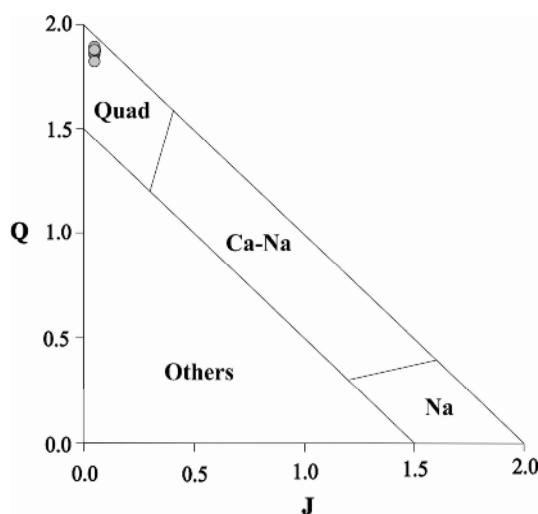
نتایج آنالیزهای ریزپردازش الکترونی از کلینوپیروکسن‌های توده‌ی نفوذی مورد بررسی در جدول ۱ ارایه شده‌اند. چنان‌که در این جدول مشاهده می‌شود ترکیب اعضای انتهایی $\text{En}_{44.48-45.23}$ - $\text{Wo}_{40.96-42.15}$ و $\text{Fs}_{12.87-13.90}$ است. ترکیب کلینوپیروکسن‌ها یکسان بوده و همه‌ی آن‌ها در میدان اوژیت [۲۳] قرار می‌گیرند (شکل ۳). در نمودار $\text{Q}-\text{J}$ ($\text{J} = 2\text{Na}$, $\text{Q} = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Fe}^{2+}$) نیز از Al^{VI} و Al^{IV} (a.p.f.u) متفاوت است.

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

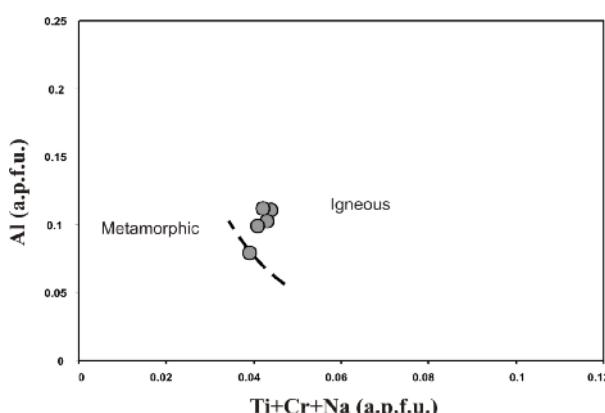
Label	Cpx-1	Cpx-2	Cpx-3	Cpx-4	Cpx-5	Cpx-6
SiO_2	52/29	52/11	51/47	51/80	51/92	51/57
TiO_2	0/63	0/61	0/74	0/70	0/69	0/73
P_2O_5	0/04	0/04	0/01	0/02	0/01	0/00
Al_2O_3	1/84	1/85	2/54	2/36	2/31	2/56
Cr_2O_3	0/00	0/00	0/08	0/02	0/03	0/04
Fe_2O_3	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00
FeO	8/40	8/43	7/80	8/07	8/08	8/12
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_2O	0/29	0/28	0/29	0/32	0/30	0/29
K_2O	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 $Q-J$ ($J = 2\text{Na}$, $Q = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Fe}^{2+}$) گستره‌ی کلینوپیروکسن‌های کلسیم-منیزیم-آهن‌دار قرار می‌گیرند [۲۳].



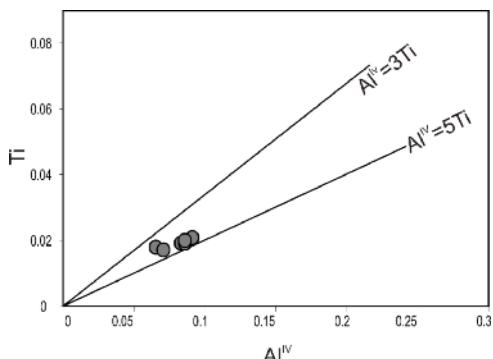
شکل ۵ در نمودار $\text{Ti} + \text{Na} + \text{Cr}$ نسبت به Al بیشتر کلینوپیروکسن‌ها ماهیت آدرین نشان می‌دهند [۲۴].

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

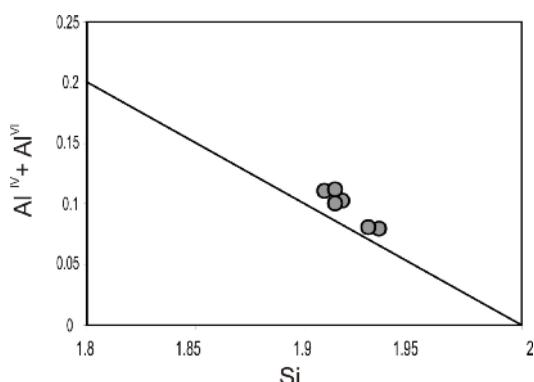
محتوای Ti و Al کلینوپیروکسن‌ها به فعالیت سیلیس مذابی که از آن متبلور شده‌اند و به نسبت این عناصر که به ترتیب در انواع مagmaهای توله‌ایتی، قلیابی و پرآلکالن افزایش

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 موقعه‌ها در بالای خط اشباع جایگاه چار رخی قرار می‌گیرند [۲۸، ۲۷]. بنابراین موقعیت چار رخی این کلینوپیروکسن‌ها به بودن گریزندگی اکسیژن است (شکل ۸) و با توجه به فاصله‌ی نمونه‌ها با خط $0 = \text{Fe}^{3+} = \text{Al}^{3+}$ گریزندگی محیط تبلور نسبتاً بالاست.

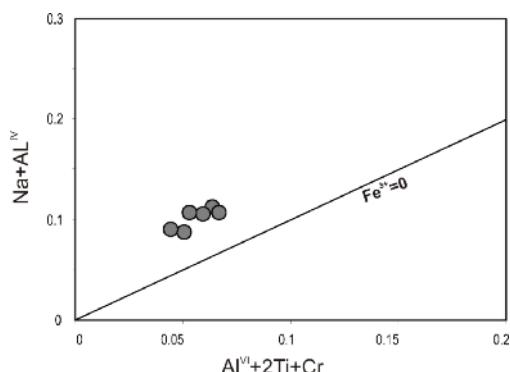
تیتانومگنتیت) در سنگ است (شکل ۶) که با احاطه شدن کانی‌های کدر به وسیله‌ی تیتانیت تایید می‌شود. در نمودار توزیع Al و Si پیروکسن‌های توده مورد بررسی، نمونه‌ها در بالای خط اشباع جایگاه چار رخی قرار می‌گیرند (شکل ۷). بنابراین موقعیت چار رخی این کلینوپیروکسن‌ها به صورت کامل با Si و به صورت بخشی با $(\text{Al})^{\text{IV}}$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



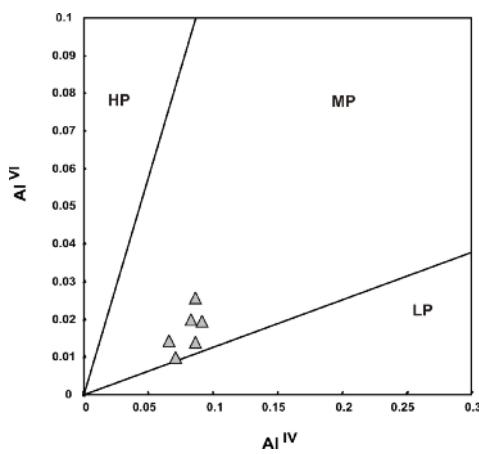
شکل ۷ پیروکسن‌های توده‌ی مورد بررسی در نمودار توزیع Al و Si در بالای خط اشباع جایگاه چار وجهی قرار می‌گیرند [۲۸].



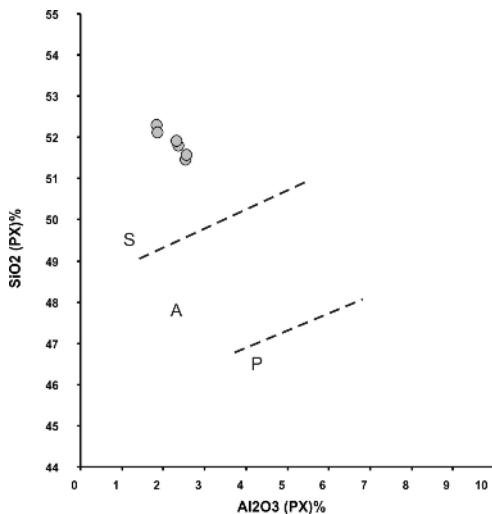
شکل ۸ قرارگیری نمونه‌ها در بالای خط $\text{Fe}^{3+} = 0$ در نمودار $\text{Na} + \text{Al}^{\text{IV}} + 2\text{Ti} + \text{Cr} = \text{Fe}^{3+}$ گویای بالا بودن گریزندگی اکسیژن است و با توجه به فاصله نمونه‌ها با خط $\text{Fe}^{3+} = 0$ گریزندگی محیط تبلور نسبتاً بالاست [۲۸].

بنابر نمودار SiO_2 نسبت به Al_2O_3 ، ماهیت ماقمایی که کلینوپیروکسن‌ها از آن متبلور می‌شوند، نیمه‌قلیایی (تولیئتی و آهکی-قلیایی) است (شکل ۱۰). نمودار $\text{Ca} + \text{Na}$ نسبت به Ti و نمودار TiO_2 نسبت به Al_2O_3 ماهیت تولیئتی نشان می‌دهند (شکل ۱۱). در نمودار تفکیکی $\text{Ca}-\text{Ti}$ و $\text{Ca}-\text{Ti} + \text{Cr}$ تمامی کلینوپیروکسن‌ها در میدان کوهزاوی قرار می‌گیرند (شکل ۱۲A,B) که در توافق با تشکیل آنها در یک موقعیت زمین‌ساختی وابسته به کمان است. هم چنین در نمودار دوتایی $\text{TiO}_2-\text{Al}_{(\text{Z})}\%$ درصد موقعیت‌های چاروچهی اشغال شده با آلومینیوم (نمونه‌ها در گستره‌ی وابسته به کمان قرار می‌گیرند (شکل ۱۳).

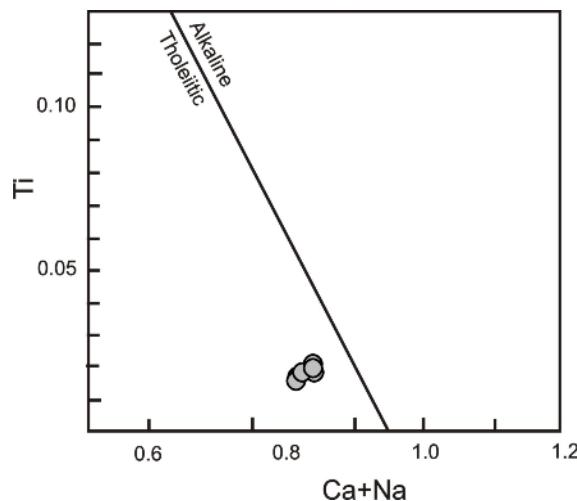
ترکیب Al^{VI} در کلینوپیروکسن‌های آذرین چنانکه بررسی-های تجربی ذوب در بازالت‌ها نشان داده، وابسته به فشار است [۳۰]. مقادیر کم Al^{VI} در اوژیت‌های بازالت‌ها و دایک‌های دولریتی سازگار با فشار‌های پایین تبلور است. نسبت $\text{Al}^{\text{VI}}/\text{Al}^{\text{IV}}$ در این کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی بین ۰/۱۴ تا ۰/۳۰ متغیر بوده و در گستره‌ی کلینوپیروکسن‌های فشار متوسط تا فشار پایین قرار می‌گیرند (شکل ۹). نسبت ۰/۲۵ در واقع مرزی است برای آن دسته از پیروکسن‌هایی است که بین فشارهای پایین و متوسط (~5 Kbar) متابولور شده‌اند. بر این اساس فشار تبلور برای کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی با توجه به قرار گیری در مجاورت مرز یاد شده، بایستی حدود ۵ کیلوبار یا کمی بیشتر از آن باشد.



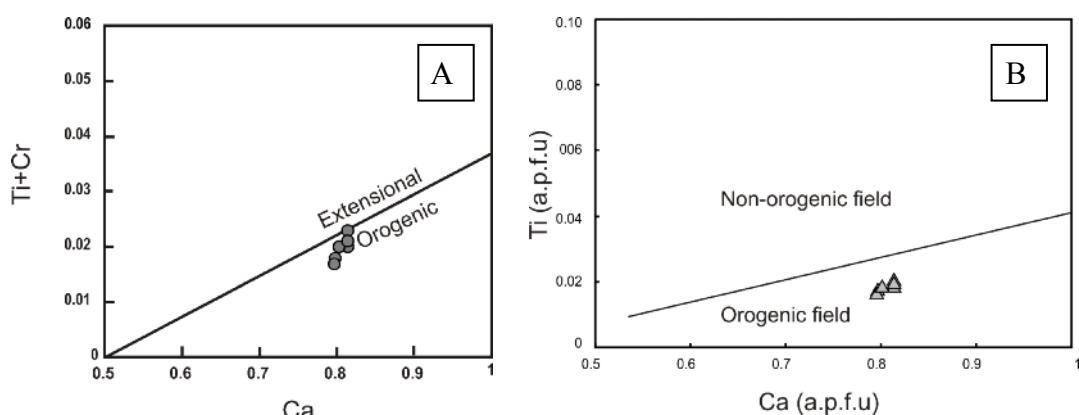
شکل ۹ نمودار تغییرات Al^{VI} نسبت به Al^{IV} [۳۱] برای برآورد فشارهای کلینوپیروکسن‌های توده‌ی نفوذی بغم = LP = میدان فشار بالا، میدان فشار پایین و MP = میدان فشار متوسط.



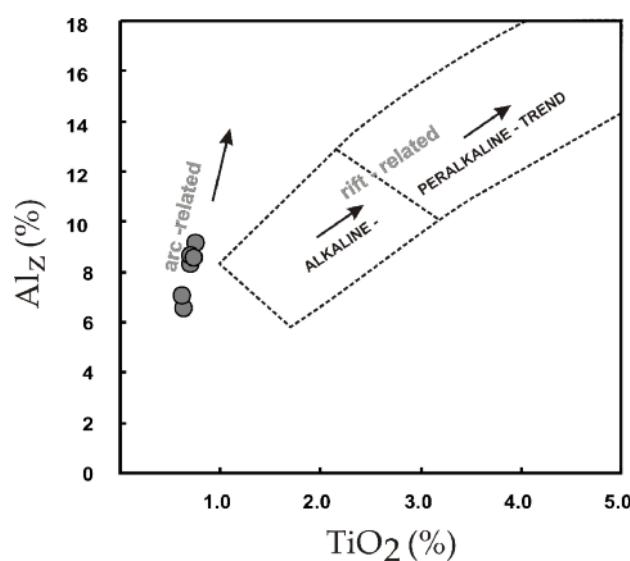
شکل ۱۰ نمودار SiO_2 نسبت به Al_2O_3 ماهیت نیمه‌قلیایی (تولیئتی و آهکی-قلیایی) ماقمایی که کلینوپیروکسن‌ها از آن متبلور می‌شوند را نشان می‌دهند [۲۶].



شکل ۱۱ بر اساس نمودار Ti نسبت به $\text{Ca} + \text{Na}$ کلینوپیروکسن‌ها ماقما، ماهیت تولیئتی نشان می‌دهد [۳۲].



شکل ۱۲ براساس نمودار (A) در برابر Ca (B) $\text{Ti} + \text{Cr}$ نسبت به Ti محیط تشکیل کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی کوهزایی است [۳۲].



شکل ۱۳ نمودار دوتایی $\text{TiO}_2\text{-Al}_{(Z)}\%$: درصد موقعیت‌های چاروچهی اشغال شده به‌وسیله‌ی آلومینیوم) نمونه‌ها در گستره‌ی وابسته به کمان قرار می‌گیرند موقعیت کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی روی نمودار ترسیمی دمای تبلور کلینوپیروکسن‌ها [۳۳].

آمفیبول

نقطه از بلورهای آمفیبول توده گابروی منطقه‌ی مورد بررسی، تحت آنالیز ریزپردازش الکترونی قرار گرفتند که نتایج

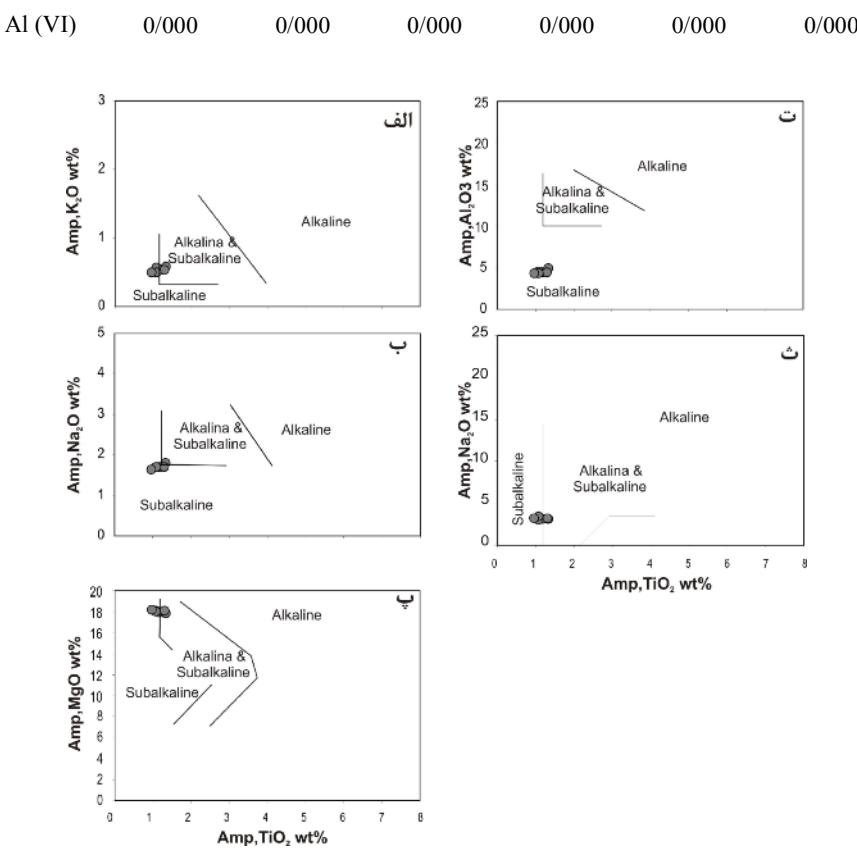
براساس نمودار TiO_2 نسبت به K_2O , Na_2O , Al_2O_3 , MgO و X_{Mg} میزان آهن آمفیبول‌ها با افزایش SiO_2 و کاهش Al_2O_3 زیاد می‌شود.

براساس نمودار TiO_2 نسبت به K_2O , Na_2O , Al_2O_3 , MgO و X_{Mg} ماهیت مagma تمایل به نیمه‌قلیایی دارد (شکل ۱۴).

این آنالیزها در جدول ۲ ارایه شده‌اند. تغییر ترکیب شیمیایی آمفیبول‌های مورد بررسی به صورت زیر است: SiO_2 (%) SiO_2 (%) FeO (%) Al_2O_3 (%) MgO (%) K_2O (%) Na_2O (%) CaO (%) MnO (%) NiO (%) Cr_2O_3 (%) Fe_2O_3 (%) FeO (%) MnO (%) MgO (%) Na_2O (%) K_2O (%) F (%) Total (%) Si (%) Ti (%) P (%) Al (%) Cr (%) Fe^{3+} (%) Fe^{2+} (%) Mn (%) Mg (%) Ni (%) Ca (%) Na (%) K (%) F (%) Sum (%) Al (IV) (%)

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

label	Amph-1	Amph-2	Amph-3	Amph-4	Amph-5
SiO_2	50/38	50/54	50/11	50/67	51/16
TiO_2	1/18	1/08	1/33	1/30	1/08
P_2O_5	0/00	0/03	0/03	0/00	0/03
Al_2O_3	4/49	4/53	4/98	4/44	4/32
Cr_2O_3	0/00	0/00	0/00	0/01	0/02
Fe_2O_3	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00
FeO	9/92	9/91	10/22	9/88	10/12
MnO	0/29	0/25	0/23	0/21	0/29
MgO	17/91	18/07	17/83	18/06	18/05
NiO	0/00	0/03	0/01	0/01	0/02
CaO	11/09	11/07	10/91	11/11	10/99
Na_2O	1/71	1/71	1/80	1/71	1/70
K_2O	0/54	0/57	0/58	0/53	0/50
F	1/39	1/40	1/39	1/63	1/57
Total	98/32	98/60	98/84	98/87	99/19
					98/72
Si	7/108	7/106	7/041	7/096	7/135
Ti	0/125	0/114	0/141	0/137	0/113
P	0/000	0/004	0/004	0/000	0/004
Al	0/747	0/751	0/825	0/733	0/710
Cr	0/000	0/000	0/000	0/001	0/002
Fe^{3+}	0/966	0/976	0/976	1/065	1/081
Fe^{2+}	0/205	0/189	0/225	0/092	0/100
Mn	0/035	0/030	0/027	0/025	0/034
Mg	3/767	3/787	3/735	3/771	3/753
Ni	0/000	0/003	0/001	0/001	0/002
Ca	1/676	1/668	1/642	1/667	1/642
Na	0/468	0/466	0/490	0/464	0/460
K	0/097	0/102	0/104	0/095	0/089
F	0/620	0/623	0/618	0/722	0/692
Sum	15/814	15/819	15/829	15/869	15/817
Al (IV)	0/747	0/751	0/825	0/733	0/710



شکل ۱۴ در نمودارهای TiO_2 نسبت به (الف) K_2O ، (ب) Na_2O ، (پ) Al_2O_3 ، (ت) MgO و (ث) $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ حاصل از آنالیز آمفیبول‌ها ماهیت ماقما 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 $\text{Mg} \# (\text{Mg/Mg} + \text{Fe}^{2+})$ از ۰.۷۵ تا ۰.۷۰ تغییر می‌کند.

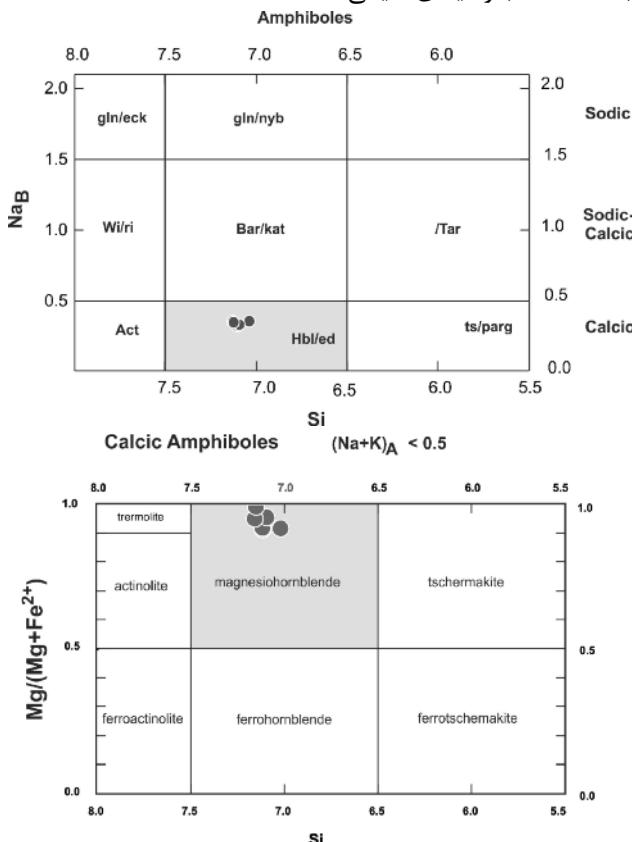
همبستگی مشبّتی بین Ti^{IV} و Al^{IV} وجود دارد، به طوری که با کاهش Al^{IV} ، Ti^{IV} نیز کم می‌شود که حاصل افزایش Si در ساختار بلور و پیشرفت تبلور ماقماست (شکل ۱۶، [۳۴]).

ترکیب شیمی بلورهای آمفیبول می‌تواند نشان دهندهٔ شرایط گریزندگی اکسیژن ماقما باشد و بر مبنای [۴، ۳] و نیز با توجه به میزان $\text{Fe} \# = (\text{Fe/Mg} + \text{Fe})/\text{Fe}$ می‌توان گریزندگی اکسیژن را برآورد کرد. در این حالت اگر $\text{Fe} \# < 0.6$ در گستره‌ی ۰ تا ۰.۶ قرار گیرد نشان دهندهٔ گریزندگی بالای اکسیژن بوده و اگر مقدار آن برابر با ۰.۶ تا ۰.۸ باشد گریزندگی متوسط است و در صورتیکه تا ۰.۸ باشد، گریزندگی پایین خواهد بود. با توجه به ترکیب شیمیایی بلورهای آمفیبول توده‌ی موردنظر برسی، میزان $\text{Fe} \#$ برابر با ۰.۲

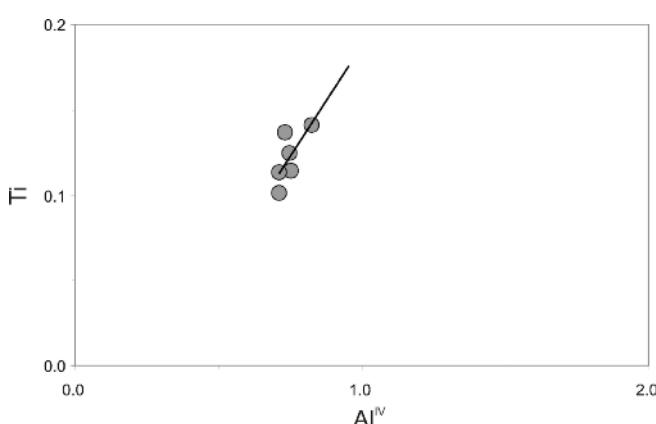
داده‌های شیمی کانی آمفیبول‌ها در تعیین نوع آنها و نیز محاسبات زمین- دما‌سنجی و زمین- فشارسنجی به منظور برآورد عمق نفوذ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. فرمول ساختاری آنها بر مبنای ۲۳ اتم اکسیژن محاسبه شده است. برای تعیین نام و تعیین فرمول بلورهای آمفیبول با استفاده از آنالیزهای نقطه‌ای ریزپردازندۀ الکترونی،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

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

کانی کلینوپیروکسن همخوانی دارد. تا حداقل ۴٪ بوده و بیانگر شرایط گریزندگی اکسیژن بالاست. این موضوع با گریزندگی اکسیژن بدست آمده به وسیله‌ی شیمی



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



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

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

فلدسبات‌ها

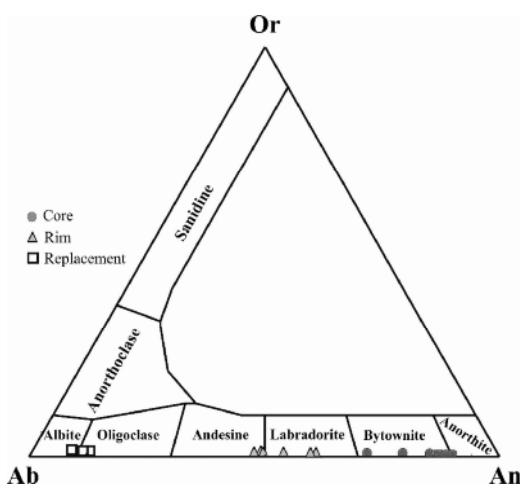
ترکیب شیمی کانی فلدسبات‌های سنگ‌های مورد بررسی در جدول ۳ ارایه شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود تمامی فلدسبات‌ها، پلازیوکلاز بوده و عموماً زونهاند و ترکیب آنها از $An_{90.1}Ab_{10.2}Or_{0.1}$ در هسته تا $An_{47.5}Ab_{51.6}Or_{0.7}$ در Or حاشیه متغیر است. چنانکه ملاحظه می‌شود محتوای

می‌شوند که حاصل سوسوریتی شدن پلازیوکلارهای بازی بوده و ترکیب آنها از $\text{An}_{9.0}\text{Ab}_{90.4}\text{Or}_{1.0}$ تا $\text{An}_{12.9}\text{Ab}_{86.0}\text{Or}_{0.7}$ است.

جدول ۳ نتایج آنالیزهای ریزپردازشی پلازیوکلارهای 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	rep	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_2O_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_2O_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_2O_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_2O_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_2O	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_2O	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
Fe3	0/019	0/021	0/021	0/021	0/024	0/024	0/024	0/019	0/016	0/005	0/005	0/003
Fe2	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	0/002	0/005	0/008	0/007	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: جانشینی، rim: حاشیه، rep: هسته



شکل ۱۷ ترکیب پلاژیوکلازهای مورد مطالعه در نمودار تقسیم‌بندی فلدسپات‌ها.

جفت کانی کلینوپیروکسن و آمفیبیول 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 ماقمایی ارومیه-دختراست. کانی‌های اصلی این توده شامل پیروکسن، آمفیبیول و پلاژیوکلاز است. کلینوپیروکسن‌ها دارای ترکیب اوژیت بوده و در گستره‌ی کلینوپیروکسن‌های کلسیم-منزیم-آهن‌دار قرار می‌گیرند. نسبت $\text{Al}^{\text{VI}}/\text{Al}^{\text{IV}}$ 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 اکسیزن ماقما نسبتاً بالا بوده است. از نظر تکتونوماقمایی شیمی کانی پیروکسن‌ها نشان می‌دهد که این توده آذرین دارای ماهیت ساب‌آلکالن (تولئیتی) بوده که در یک محیط تکتونیکی وابسته به کمان ماقمایی تشکیل شده است.

آمفیبیول‌ها در این گابروها جزء آمفیبیول‌های کلسیک هستند که در گستره‌ی منزیوهوونبلند قرار گرفته و از نظر تکتونوماقمایی نشانگر ماهیت نیمه قلیایی این توده‌ی آذرین هستند.

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

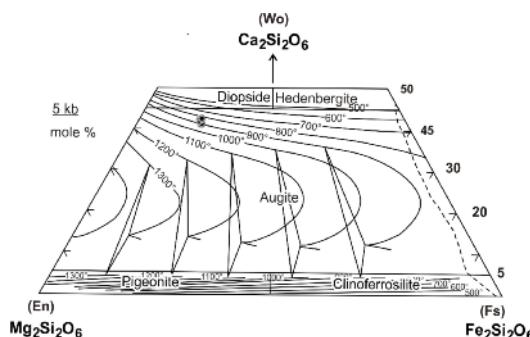
پلاژیوکلاز فراواترین کانی فلزیک این سنگ‌های گابرویی است. بر اساس آنالیزهای ریزپردازشی انجام گرفته روی

شرایط فشار - درجه حرارت تبلور توده

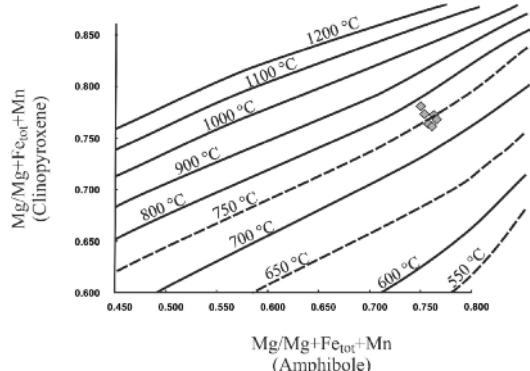
در این مقاله داده‌های حاصل از شیمی کانی، برای تعیین دما و فشار از تبلور توده‌ی مورد بررسی استفاده شده است. زمین-فشارسنجی به روش محتوای Al در هورنبلند بر مبنای درجه-بندي [۹] فشارهای حدود ۰/۴ تا ۰/۹ کیلو بار را بدست می‌دهد که با توجه به ویژگی‌های دیگر توده، به نظر می‌رسد که به میزان قابل توجهی کم است. روش‌های برمبنا محتوای آلومینیوم در آمفیبیول‌ها نیز فشار با مقدار منفی را نشان می‌دهند. دلیل آن اینست که گستره‌ی تغییرات ترکیبی در بلورهای پلاژیوکلاز با توجه به منطقه بندی آنها، جزی نبوده و از آن‌زین تا مرز آنورتیت-بیتونیت متغیر است (شکل ۱۷). این طیف گستره‌ی ترکیبی از این جهت مهم است که در زمین-فشار سنجی بر مبنای محتوای آلومینیوم بلورهای آمفیبیول، جزی 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 پتانسیم در آن است [۳]. بنابراین روش زمین-فشارسنجی محتوای Al در آمفیبیول، برای تعیین فشار این توده ماقمایی 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 ماقمایی بغم، می‌توان از نمودار نموداری دمای تبلور کلینوپیروکسن‌ها که توسط [۱۰] ارایه 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 آمفیبیول و کلینوپیروکسن، روش دیگر قابل استفاده برای تعیین دمای تبلور توده، بر مبنای روش زمین-فشارسنجی

دارند حاصل سوسوریتی شدن پلازیوکلазهای بازی اولیه است.

پلازیوکلازها، هسته ترکیب بیتونیت و حاشیه ترکیب لبرادریت تا آندزین را نشان می‌دهد. بخشی ترکیب آلبیتی



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



شکل ۱۹ استفاده از زمین- دماسنگی 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

- Nisbet E. G., Pearce J. A., "Clinopyroxene composition of mafic lavas from different tectonic settings", Contributions to Mineralogy and Petrology 63 (1977) 161-173.
- Beccaluva L., Macchiotta G., Piccardo G. B., Zeda O., "Clinopyroxene composition of ophiolite basalts as petrogenetic indicator", Chemical Geology 77 (1989) 165-182.
- Anderson J. L., Smith D. R., "The effect of temperature and oxygen fugacity on Al-in-hornblende barometry", American Mineralogist 80 (1995) 549-559.
- 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.
- Hammarstrom J. M., Zen E., "Aluminum in hornblende: An empirical igneous 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., Cimbalkova 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 Margins", Springer, New York (1974) 873-887.
- [۱۴] نبوی م. ح، "دیباچه‌ایی بر زمین‌شناسی ایران"، سازمان زمین‌شناسی ایران، (۱۳۵۵) ۱۰۹ ص.
- [۱۵] درویش‌زاده ع.، زمین‌شناسی ایران. انتشارات امیر کبیر (۱۳۷۰)، ۹۰ 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, petrologique et petrographique des roches magmatiques de la région Natanz-Nain-Surk (Iran central)", Thèse Ph.D., Univ. Grenoble, 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 اردستان"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱:۱۰۰۰۰۰، 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 Fe³⁺ 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