

شیمی آمفیبول‌های آنکلاوها و دایک‌های توده نفوذی زرگلی، شمال غرب زاهدان

مهدی سراوانی فیروز^{۱*}، علی کنعانیان^۲ و مهدی رضایی کهخایی^۳

۱- دانشکده علوم زمین، دانشگاه تهران، تهران

۳- دانشکده علوم زمین، دانشگاه شاهرود، شاهرود

نویسنده مسئول: *saravani_mahdi@yahoo.com

دریافت: ۹۴/۶/۱۳ پذیرش: ۹۴/۱۱/۱۲

چکیده

توده‌ی نفوذی زرگلی در شمال غرب شهرستان زاهدان و در امتداد نوار گرانیتوئیدی زاهدان - سراوان قرار دارد. لیتولوژی اصلی سازنده این توده، سنگ‌های گرانودیوریتی از نوع I بوده و ماهیت ماگمای سازنده‌شان یک ماگمای گرانیتی کالک‌آلکان می‌باشد که در یک محیط فرورانشی کوهزایی تشکیل شده و تا حدی با سنگ‌های رسوبی پوسته فوقانی آرایش یافته است. ویژگی قابل توجه در مورد این گرانودیوریت‌ها، حضور فراوان آنکلاوهای متاسدیمتری در آن‌ها می‌باشد. کانی آمفیبول در سنگ‌های گرانیتوئیدی توده نفوذی زرگلی وجود ندارد اما در آنکلاوهای متاسدیمتری و دایک‌های دیوریتی موجود در این توده به عنوان کانی مافیک اصلی مشاهده می‌شود. آمفیبول‌های آنالیز شده از دایک‌های دیوریتی و آنکلاوهای متاسدیمتری توده زرگلی به ترتیب از نوع چرماکیت و منیزیه‌هورنبلند هستند که گاهاً به اکتینولیت تجزیه شده‌اند. آمفیبول‌های دایک‌های دیوریتی در فشار و دمای بالاتری نسبت به آمفیبول‌های آنکلاوهای متاسدیمتری تشکیل شده‌اند. آمفیبول‌های آنالیز شده از آنکلاو متاسدیمتری در دمای ۷۷۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار حدوداً ۲ کیلو بار متبلور شده‌اند در حالی که آمفیبول‌های آنالیز شده از دایک‌های دیوریتی در محدوده دمایی ۷۵۰ تا ۷۷۵ درجه سانتی‌گراد و فشار نسبتاً گسترده ۴ تا ۷ کیلو بار تشکیل شده‌اند. فشار محاسبه شده برای آمفیبول‌های آنالیز شده از آنکلاو متاسدیمتری نشان دهنده فشار تشکیل‌شان طی فرآیند دگرگونی است، پس فرآیند دگرگونی سنگ‌های رسوبی احتمالاً در فشار و عمقی مشابه با جایگیری توده نفوذی زرگلی که حدوداً ۲ کیلو بار و ۷ کیلومتر می‌باشد، رخ داده است.

واژه‌های کلیدی: شیمی آمفیبول، ژئوترموبارومتري، آنکلاو، زرگلی، زاهدان

۱- مقدمه

نمود.

برای اولین بار [۸] در سال ۱۹۸۶ یک ارتباط خطی بین مقدار آلومینیم آمفیبول‌ها و فشار تعادلی سنگ‌های آذرین مشاهده و به طور آزمایشگاهی معادله فشار را استخراج کردند:

$$P_{kbar} = -3.92 + 5.03Al^T$$

این معادله به صورت تجربی توسط [۱۰، ۱۲ و ۱۷] تکامل یافت و به صورت فرمول‌های جدیدی ارائه گردید. فرمول‌های ارائه شده توسط این محققین نیز به ترتیب عبارتند از:

$$P_{kbar} = -4.76 + 5.64Al^T$$

$$P_{kbar} = -3.46 + 4.23Al^T$$

$$P_{kbar} = -3.01 + 4.76Al^T$$

در تمامی این معادلات Al^T مقدار آلومینیم کل در هورنبلند بر حسب اتم در واحد فرمول است. همچنین چند پیش شرط برای کاربرد صحیح این بارومترها عنوان شده است [۱۹]:

آمفیبول‌ها از مفیدترین کانی‌ها برای تعیین دما و فشار هستند، این کانی‌ها در یک محدوده فشار/دما گسترده از ۱ تا ۲۳ کیلو بار و ۴۰۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد پایدار می‌باشند [۵]. ترکیب آمفیبول با توجه به ترکیب سنگ کل، فشار، دما و فوگاسیته اکسیژن تغییر می‌کند، در واقع فشار، دما، فوگاسیته اکسیژن، ترکیب سنگ کل و فازهای همزاد پارامترهایی هستند که مقدار آلومینیم هورنبلند را تعیین می‌کنند [۱۹] و در این بین فشار به عنوان فاکتور غالب برای اختلافات مشاهده شده در مقادیر آلومینیم آمفیبول‌های کلسیک در سنگ‌های نفوذی کالک‌آلکان به حساب می‌آید [۸]. مطالعات زیادی ثابت کرده که مقدار آلومینیم هورنبلند در سنگ‌های کالک‌آلکان با فشار تبلور به طور خطی انطباق دارد بنابراین می‌توان از آن به عنوان یک ابزار برای تعیین عمق تبلور استفاده

سنگ‌های توده نفوذی زرگلی در نمودار سه‌تایی کوارتز - پلاژیوکلاز-آلکالی‌فلدسپار عمدتاً در محدوده گرانودیوریت و تعداد کمی هم در محدوده مونوزوگرانیت واقع می‌شوند. به علت فراوانی بیوتیت در ترکیب این سنگ‌ها می‌توان آن‌ها را به عنوان بیوتیت‌گرانودیوریت/گرانیت نام‌گذاری کرد. دایک‌های تیره همراه این گرانیتوئیدها در نمودار سه‌تایی کوارتز-پلاژیوکلاز - آلکالی‌فلدسپار در محدوده دیوریت/گابرو واقع می‌شوند و با توجه به ترکیب کانی‌شناسی (و فور آمفیبول و نبود پیروکسن) می‌بایستی به عنوان دیوریت در نظر گرفته شوند. توده نفوذی زرگلی مانند دیگر توده‌های گرانیتوئیدی زاهدان میزبان آنکلاوهای فراوان است که براساس مطالعات صورت گرفته از نوع رسوبات دگرگون شده (متاسدیمتری) هستند.

در این مقاله شیمی کانی آمفیبول موجود در آنکلاوهای متاسدیمتری و دایک‌های دیوریتی موجود در توده گرانودیوریتی زرگلی بررسی خواهد شد تا هم بتوان شناخت بهتری از این کانی در لیتولوژی‌های مذکور به دست آورد و هم مشخص نمود که آیا ارتباطی بین دما و فشار به دست آمده از طریق کانی آمفیبول و دما و فشار تعیین شده از طریق آنالیز سنگ کل مشاهده می‌گردد.

ژئوشیمی سنگ کل

بر اساس آنالیزهای صورت گرفته گرانودیوریت زرگلی یک توده نفوذی نوع I، کالک‌آلکانل با پتاسیم بالا است که به طور خفیفی پرآلومین می‌باشد. ماگمای مادر گرانودیوریت زرگلی طی صعود با هضم رسوبات پوسته‌ای آلوده شده که موجب شده کمی پرآلومین گردد. این مطلب با حضور گسترده آنکلاوهای متاسدیمتری تأیید می‌شود. الگوهای ترکیبی عناصر اصلی و کمیاب نشان می‌دهد که گرانودیوریت زرگلی مشابه گرانیتوئیدهای پس از برخورد^۱ است. بر اساس شواهد ژئوشیمیایی گرانیت زرگلی احتمالاً از ذوب بدون آب سنگ‌های آذرین دگرگون شده کوارتز-فلدسپاتی یا گریوکی پوسته زیرین که طی برخورد و فرورانش لیتوسفر اقیانوسی سیستان به زیر بلوک افغان به وسیله اجزای فرورانشی کمی آلوده شده‌اند، تولید شده است [۱۵].

[۱] با استفاده از نمودار سه‌تایی Q-Ab-Or فشار تقریبی

۱- مجموعه کوارتز، پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار، هورنبلند، بیوتیت، تیتانیت و مگنتیت/ایلمنیت بطور همزیست حضور داشته باشند.

۲- فشارسنج را می‌توان فقط برای سنگ‌هایی بکار برد که در یک محدوده فشار بین ۲ تا ۱۳ کیلو بار متبلور شده‌اند.

۳- پلاژیوکلاز همزیست با هورنبلند می‌بایستی محدود به آنورتیت ۲۵ تا ۳۵ باشد.

۳- هورنبلند باید نزدیک به سولیدوس گرانیتی متبلور شده باشد.

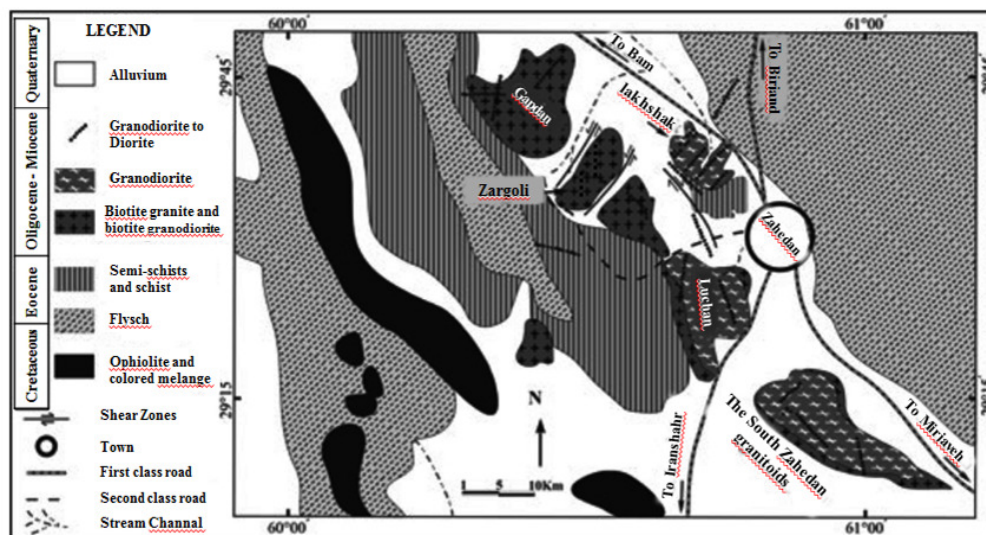
۴- اکتیویته سیلیسیم مذاب بایستی بزرگ‌تر مساوی یک باشد یعنی باید اشباع از سیلیس باشد زیرا مقدار آلومینیم هورنبلند مستقیماً با مقدار سیلیسیم آن و در نتیجه اکتیویته سیستم مرتبط است.

هم‌چنین برای تعیین فشار با استفاده از چهار بارومتر فوق نباید از آمفیبول‌های آلتره شده استفاده نمود. برای تفکیک آمفیبول‌های آلتره شده از آمفیبول‌های اولیه [۱۳] عنوان کرده که آمفیبول‌های اولیه دارای $Si \leq 7.5$ هستند.

توده‌ی نفوذی زرگلی در شمال‌غرب شهرستان زاهدان، بین طول‌های جغرافیایی $60^{\circ}27'$ تا $60^{\circ}35'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $29^{\circ}32'$ تا $29^{\circ}40'$ شمالی واقع گردیده و مساحتی حدود ۹۵ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد. این توده دارای روند شمال‌شرق - جنوب‌غرب بوده و بخشی از نوار گرانیتوئیدی زاهدان - سراوان محسوب می‌شود (شکل ۱). نوار گرانیتوئیدی زاهدان - سراوان دارای طول ۲۵۰ کیلومتر و عرض بین ۲ تا ۲۵ کیلومتر است و از شمال‌غرب زاهدان تا شهرستان سراوان برونزد دارد. اندازه توده‌های گرانیتوئیدی این نوار از باتولیت تا استوک متغیر بوده و عموماً هاله‌های دگرگونی به خوبی در اطراف آن‌ها توسعه پیدا نکرده‌اند. تمامی این توده‌ها در سنگ‌های رسوبی از جنس سیلت‌استون و ماسه‌سنگ نفوذ نموده‌اند و باعث دگرگونی درجه ضعیف آن‌ها در حد اسلیت، فیلیت و گاهاً گارنت آمفیبولیت شده‌اند. تعیین سن رادیومتریک به روش K-Ar بر روی بیوتیت‌های جدا شده از گرانیت‌های زاهدان سن ۳۱/۴ تا ۳۳/۶ میلیون سال را برای این توده‌ها به دست داده است. هم‌چنین این توده‌ها رسوبات فلیشی (ماسه‌سنگ و شیل) با سن ائوسن را قطع نموده‌اند [۱].

زیرکن محدوده دمایی ۷۶۷/۴ تا ۷۸۹/۳ را برای توده نفوذی زرگلی تعیین کرده‌اند.

۱/۵ تا ۲/۵ کیلومتر را برای این توده نفوذی پیشنهاد نموده است. [۱۵] نیز با استفاده از روش ترمومتری



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده شده از توده‌های گرانیتوئیدی زاهدان- سراوان که در آن موقعیت توده نفوذی زرگلی قابل مشاهده است [۱۵].

بیضی وجود دارند که در برخی موارد آثار لایه‌بندی اولیه را نشان می‌دهند. این آنکلاوها در نمونه دستی دانه ریز و تیره رنگ هستند و در زیر میکروسکوپ بافت میکروگرانولار تقریباً جهت یافته‌ای نشان می‌دهند و از نظر کانی‌شناسی عمدتاً از کوارتز، پلاژیوکلاز، آمفیبول و بیوتیت تشکیل شده‌اند (شکل ۲- ب، ج و ه). کانی‌های کوارتز اکثراً به صورت ریز بلور و بی‌شکل می‌باشند که فضای بین سایر کانی‌ها را پر کرده‌اند اگرچه در برخی موارد بلورهای درشت کوارتز نیز مشاهده می‌شود (عمدتاً در نزدیکی حاشیه آنکلاو). کانی‌های پلاژیوکلاز نیز به صورت ریز بلور، نیمه شکل‌دار و با داشتن ماکل پلی‌سنتتیک مشخص می‌گردند. مهم‌ترین کانی مافیک این سنگ‌ها آمفیبول است که به صورت ریز بلور، نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل و با داشتن دو دسته رخ در مقاطع عرضی مشخص می‌شود. کانی مافیک دیگر در این سنگ‌ها بیوتیت است که بیشتر در حاشیه آنکلاوها و در مرز آن‌ها با میزبان‌شان حضور دارد (شکل ۲- ج و ه). در مقیاس میکروسکوپی مرز این آنکلاوها با گرانودیوریت-های دربرگیرنده شان بصورت تدریجی است بطوریکه با افزایش بیوتیت و کاهش آمفیبول مشخص می‌گردد. هم‌چنین در این مرز بیوتیت‌ها یک آرایش تقریباً جهت‌دار را نشان می‌دهند که به سمت مرکز آنکلاو از

پتروگرافی دایک‌های دیوریتی و آنکلاوهای متاسدیمنتی

تعداد دایک‌های دیوریتی موجود در توده گرانیتوئیدی زاهدان در مقایسه با سایر توده‌های گرانیتوئیدی زاهدان کم است. این دایک‌ها در نمونه دستی به رنگ سبز تیره دیده می‌شوند که بیانگر فراوانی بلورهای آمفیبول در آن‌ها می‌باشد. کانی‌های سازنده اصلی و عمده این سنگ‌ها پلاژیوکلاز، آمفیبول و کوارتز هستند که با توجه به فزونی آمفیبول و نبود پیروکسن می‌توان این دایک‌ها را به عنوان دیوریت به حساب آورد. بافت غالب در این سنگ‌ها میکرولیتی پورفیریک است که حاصل قرار گرفتن بلورهای بزرگ‌تر پلاژیوکلاز و آمفیبول در بین تیغه‌های کوچک پلاژیوکلاز می‌باشد (شکل ۲- الف و د). کانی‌های آمفیبول موجود در این سنگ‌ها به صورت بلورهای شکل‌دار و نیمه شکل‌داری دیده می‌شوند که دو دسته رخ لوزوجهی (با زاویه حاده بین دو دسته رخ حدود ۵۶ درجه) در مقاطع قاعده‌ای نشان می‌دهند. پلاژیوکلازها نیز غالباً به صورت بلورهای کشیده و الوار مانند دیده می‌شوند و به مقدار نسبتاً زیادی به سرسیت و کلسیت تجزیه یافته‌اند.

در توده گرانیتوئیدی زرگلی آنکلاوهای فراوانی در اندازه‌های بسیار متنوع و به صورت اشکالی عمدتاً کروی و

الکترون میکروپروپ، کانی تیتانیت نیز در آنکلاوها شناسایی شده است.

تعداد بیوتیت‌های آن کاسته شده و بجای آن‌ها آمفیبول جایگزین می‌گردد تا جائیکه بیوتیت بطور کامل محو می‌شود و تنها آمفیبول حضور دارد. طی مطالعات



وزنی مورد آنالیز قرار گرفت. سپس با استفاده از نرم‌افزار Minpet 2.02 فرمول ساختاری کانی آمفیبول محاسبه و نتایج به دست آمده بررسی گردید. داده‌های حاصل از آنالیز این آمفیبول‌ها بر اساس ۲۳ اکسیژن در جدول یک گزارش شده است.

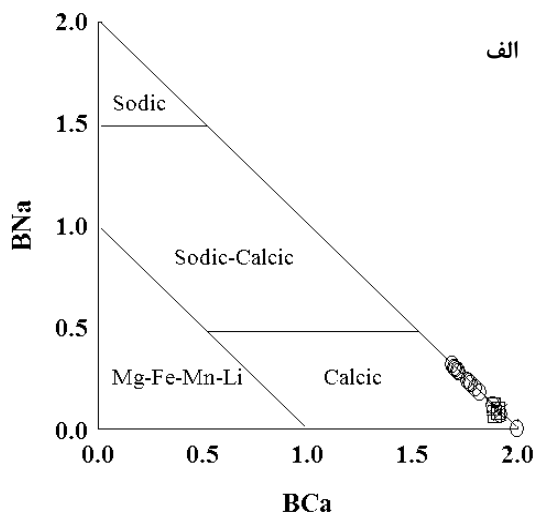
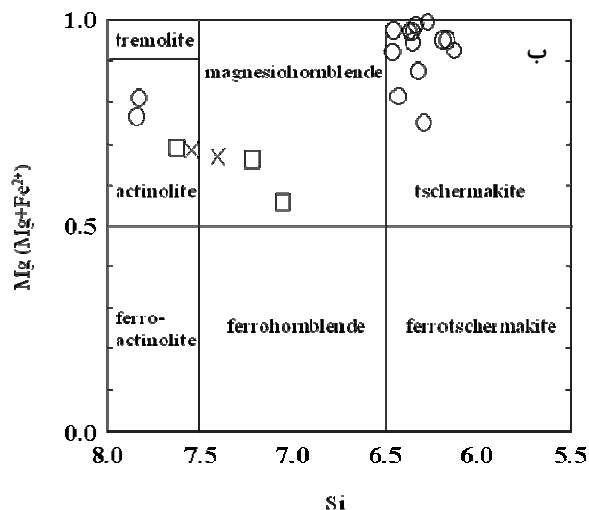
با توجه به اینکه مقدار $(Ca+Na)_B$ در نمونه‌های آنالیز شده از ۱/۹۵ تا ۲، مقدار Na_B از صفر تا حداکثر ۰/۳ و مقدار Ca_B از ۱/۶۸ تا ۲ می‌باشد در نتیجه تمامی

شیمی کانی آمفیبول

برای بررسی خصوصیات شیمیایی کانی آمفیبول تعداد ۱۵ نقطه از آمفیبول‌های موجود در دایک‌های دیوریتی و ۷ نقطه از آمفیبول‌های موجود در آنکلاوهای همراه توده اصلی در دانشکده علوم زمین دانشگاه اُسُلوی کشور نروژ توسط دستگاه الکترون میکروپروپ CAMECA-SX100 تحت ولتاژ شتاب دهنده ۱۵ کیلو ولت، شدت جریان ۲۰ نانو آمپر و زمان شمارش ۱۰ ثانیه با دقت ۰/۱ درصد

۰/۵۵ است در نتیجه این نمونه در محدوده $(Na+K)_A \geq 0.5$ قرار می‌گیرد و با توجه به نمودار مربوطه نام منیزیوهایستینگزیت را به خود اختصاص می‌دهد. مقادیر سیلیسیم و منیزیم در حاشیه در آمفیبول‌های آنالیز شده از آنکلاو متاسدیمتری نسبت به مرکز آن‌ها کمی بیش‌تر است در حالی که مقادیر تیتانیوم، سدیم، پتاسیم و منگنز تقریباً ثابت هستند. مقدار Al_2O_3 در آمفیبول‌های آنالیز شده از دایک از ۱۰/۱ تا ۱۲/۰۵ درصد وزنی (به استثناء دو نمونه اکتینولیت که دارای تنها ۱/۳ درصد وزنی Al_2O_3 هستند) در تغییر می‌باشد که از حد معمول و متداول برای آمفیبول‌های کلسیک (≤ 10 wt%) (مطابق با [۲۱]) کمی بیش‌تر است. این مقدار برای نمونه‌های مربوط به آنکلاو در حد متداول برای آمفیبول‌های کلسیک است (مطابق با [۲۱]). همچنین مقدار TiO_2 برای تمامی نمونه‌های آنالیز شده، مقداری متداول برای آمفیبول‌های کلسیک (< 2 wt%) (مطابق با [۲۱]) می‌باشد (جدول ۱).

آمفیبول‌های آنالیز شده در گروه کلسیک قرار می‌گیرند (شکل ۳ الف). آمفیبول‌های کلسیک را می‌توان به صورت جزئی‌تری تقسیم‌بندی کرد تا بتوان نام دقیقی برای آن‌ها تعیین نمود. در اینجا عناصر سازنده سایت A مد نظر قرار می‌گیرند به طوری که آمفیبول‌های کلسیک بر حسب مجموع سدیم و پتاسیم سایت A در دو نمودار مجزا (نمودارهای [۱۳]) برای آمفیبول‌های کلسیک) طبقه‌بندی می‌شوند. مقدار $(Na+K)_A$ در نمونه‌های آنالیز شده از توده نفوذی زرگلی از ۰/۰۲ تا ۰/۴۵ تغییر می‌کند، در نتیجه این نمونه‌ها در محدوده $(Na+K)_A < 0.5$ قرار می‌گیرند و مطابق با شکل ۳ ب نام‌گذاری می‌شوند. همان طوری که در این شکل نیز به خوبی مشخص است آمفیبول‌های آنالیز شده از دایک‌های دیوریتی توده گرانودیوریتی زرگلی از نوع چرماکیت می‌باشند و آمفیبول‌های آنالیز شده از آنکلاوهای متاسدیمتری از نوع منیزیوهورنبلند هستند. همچنین مقدار $(Na+K)_A$ تنها در یک آمفیبول آنالیز شده از دایک دیوریتی برابر



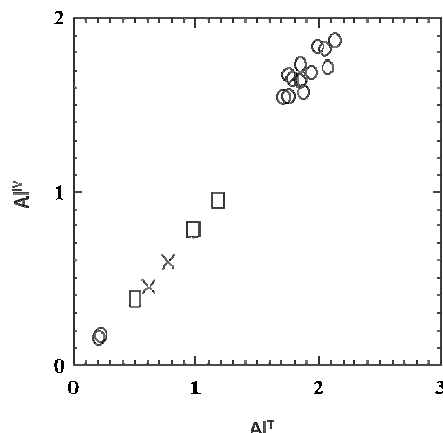
شکل ۳. الف) موقعیت نمونه‌های آنالیز شده در نمودار تفکیک کننده گروه‌های مختلف آمفیبول بر حسب عناصر اشغال کننده سایت B، دایره معرف آمفیبول‌های آنالیز شده از دایک دیوریتی و علائم مربع، ضریب و مثلث به ترتیب نشان دهنده مرکز، میانه و حاشیه آمفیبول‌های آنالیز شده از آنکلاو متاسدیمتری هستند. ب) طبقه‌بندی و نام‌گذاری آمفیبول‌های آنالیز شده از توده نفوذی زرگلی بر حسب عناصر اشغال کننده سایت A $(Na+K)_A < 0.5$ و نسبت $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ در برابر Si از [۱۳]، علائم مشابه شکل ۳ هستند.

سیلیسیم و مقدار کل $Fe+Mg+Mn+Ca$ کاهش می‌یابد [۱۷]. همچنین مطابق با نظر [۸] هورنبلندهای فشار بالا همواره آلومینیم بالایی دارند و اکثر آمفیبول‌های غنی از آلومینیم در فشار بالا و یا دمای بالا یافت می‌شوند. این موارد برای آمفیبول‌های آنالیز شده از توده مورد مطالعه

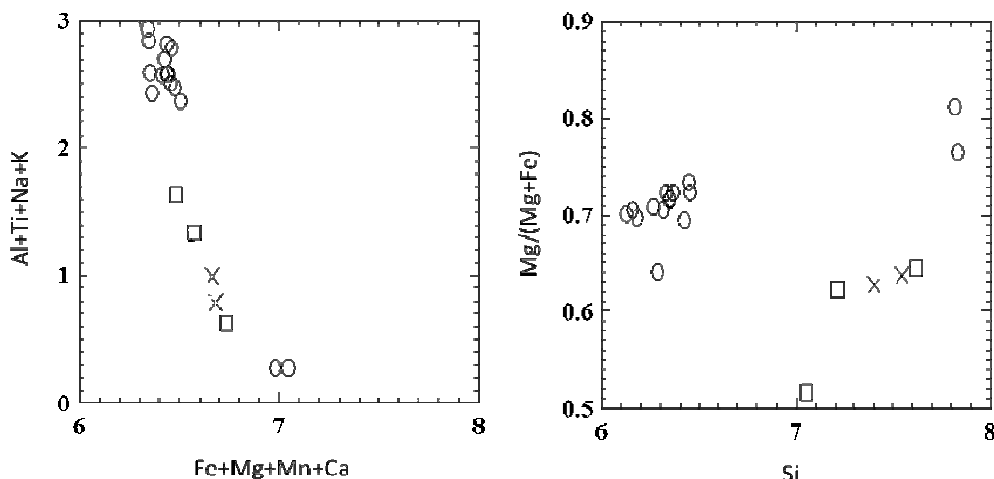
مطالعات زیادی به پتروژنز آمفیبول کلسیک در سنگ‌های آذرین و دگرگون شده پرداخته‌اند. این مطالعات مشخص نموده‌اند که با افزایش دما - فشار، نسبت $Mg/(Mg+Fe)$ و مقادیر پتاسیم، آلومینیم، سدیم و تیتانیوم در آمفیبول‌های کلسیک افزایش و متناسب با آن‌ها

چرماکیت‌های آنالیز شده از دایک‌های دیوریتی است. البته باید به این نکته توجه داشت که در سنگ‌های مافیک هورنبلند در تعادل با کوارتز نبوده و این مطلب موجب فزونی مقدار Al^T خواهد شد [۸]، ولی در کل می‌توان بیان داشت که آمفیبول‌های آنالیز شده از دایک دیوریتی (به استثناء دو نمونه اکتینولیت) قطعاً در فشار و دمای بالاتری نسبت به آمفیبول‌های آنالیز شده از آنکلاو متاسدیمنتی تشکیل شده‌اند و در نتیجه دایک‌های دیوریتی نسبت به آنکلاوهای متاسدیمنتی موجود در توده نفوذی زرگلی می‌بایستی در عمق و دمای بیشتری تشکیل شده باشند.

نیز به خوبی در شکل‌های ۴ و ۵ مشخص شده است. در این اشکال، آمفیبول‌های آنالیز شده در دو گروه کاملاً متمایز قرار گرفته‌اند. یک گروه که دارای نسبت $Mg/(Mg+Fe)$ و مقادیر پتاسیم، آلومینیم، سدیم و تیتانیوم کمتر و سیلیسیم و مقدار کل $Fe+Mg+Mn+Ca$ بیشتری است و به عنوان گروه فشار پایین/دمای پایین در نظر گرفته می‌شود شامل منیزوهورنبلندهای آنالیز شده از آنکلاوهای موجود در توده مورد مطالعه می‌باشد. گروه دیگر که دارای نسبت $Mg/(Mg+Fe)$ و مقادیر پتاسیم، آلومینیم، سدیم و تیتانیوم بیشتر و سیلیسیم و مقدار کل $Fe+Mg+Mn+Ca$ کمتری است و به عنوان گروه فشار بالا/دمای بالا در نظر گرفته می‌شود شامل



شکل ۴. نمودار Al^T در برابر Al^IV [۸] برای آمفیبول‌های آنالیز شده از توده نفوذی زرگلی، علائم مشابه شکل ۳ هستند. آمفیبول‌های آنالیز شده از دایک‌ها (نمونه‌های مدور) به استثناء دو نمونه اکتینولیت نسبت به آمفیبول‌های آنالیز شده از آنکلاوهای دارای آلومینیم بیشتری و غنی از آلومینیم هستند که در نتیجه مطابق با نظر [۸] نشان دهنده فشار و دمای بیشتر تشکیل آن‌ها است. مشابه این روند خطی در مطالعات [۸] وجود دارد.



شکل ۵. نمودارهای تغییرات عنصری وابسته به فشار و دما برای آمفیبول‌های آنالیز شده از توده نفوذی زرگلی، علائم مشابه شکل ۳ هستند. نسبت‌های بیشتر $Mg/(Mg+Fe)$ و مقادیر بالاتر مجموع $Al+Ti+Na+K$ نشان دهنده دما و فشار بالاتر، و مقادیر بیشتر Si و مقادیر بالاتر مجموع $Fe+Mg+Mn+Ca$ نشان دهنده دما و فشار پایین‌تر تشکیل آمفیبول هستند.

هم‌چنین با توجه به چرماکیت بودن نمونه‌های آنالیز شده از دایک دیوریتی (مطابق با [۱۰] جانشینی چرماکیت $(Si + R^{2+} = Al^{IV} + Al^{VI})$ به فشار حساس است و با افزایش فشار مقدار Al در شبکه آمفیبول افزایش می‌یابد) و دارا بودن شرایط مناسب برای محاسبه ژئوترموبارومتري به نظر می‌رسد که بتوان به نتایج قابل قبولی دست یافت. برای تعیین فشار نباید از آمفیبول‌های آلتره شده استفاده نمود. برای تفکیک آمفیبول‌های آلتره شده از آمفیبول‌های اولیه $Si \leq 7.5$ [۱۳] عنوان کرده که آمفیبول‌های اولیه دارای $Si \leq 7.5$ هستند. در بین آمفیبول‌های آنالیز شده از دایک دیوریتی دو نمونه و آنکلاو متاسدیمنتري تنها یک نمونه دارای سیلیسیمی بیش از ۷/۵ هستند و به همین دلیل حذف گردیده‌اند. هم‌چنین مطابق با نظر [۸] برای مقادیر $Al^T < 0.79$ مقدار فشار منفی محاسبه می‌شود که قابل قبول نیست. به همین دلیل برای نمونه‌های آنالیز شده مقادیر کمتر از این حد نیز لحاظ نشده‌اند. نهایتاً با استفاده از چهار فشارسنج فوق فشار تبلور برای آمفیبول‌های آنکلاوها و دایک‌های دیوریتی موجود در توده نفوذی زرگلی محاسبه گردید که نتایج حاصله در جدول ۲ ارائه شده است.

همان‌طوری که مشخص شده فشارهای محاسبه شده از آمفیبول‌های موجود در دایک‌های دیوریتی خیلی بیش‌تر و گسترده‌تر از فشارهای محاسبه شده برای آمفیبول‌های آنالیز شده از آنکلاوهای متاسدیمنتري است که احتمالاً به دلیل تبلور آمفیبول‌های دایک‌ها در اعماق مختلف است. در واقع زمانی که دایک‌ها در توده نفوذ کرده‌اند به سرعت سرد شده و کانی‌های آن‌ها فرصت کافی برای رسیدن به تعادل مجدد در این عمق را پیدا نکرده‌اند. لازم به ذکر است که تمامی پیش شرط‌های عنوان شده برای استفاده از بارومترهای فوق در این تحقیق قابل اعمال نیست اما نتایج به دست آمده منطقی و قابل قبول هستند.

مطابق با شکل ۶ الف می‌توان با استفاده از مقدار Na_B موجود در ساختمان آمفیبول فشار تبلور این کانی را تخمین زد [۶]. این روش توسط [۶] برای آمفیبول‌های دگرگونی به کار رفته، هم‌چنین [۱۴] عنوان داشته‌اند که با استفاده از این روش برای آمفیبول‌های آذرین نیز به نتایج قابل قبولی دست یافته‌اند. بر این اساس آمفیبول‌های آنالیز شده از دایک‌ها و آنکلاوهای توده

بررسی شرایط آمفیبول‌های آنالیز شده برای ژئوترموبارومتري و تعیین فوگاسیته اکسیژن برای دایک دیوریتی و آنکلاو متاسدیمنتري

با توجه به نسبت $Mg/(Mg+Fe)$ بالای تمامی آمفیبول‌های آنالیز شده (۰/۵ تا ۰/۸ اتم در واحد فرمول) به نظر می‌رسد که تمامی نمونه‌ها غنی از منیزیم بوده و یک شرایط اکسیدان در محیط تشکیل‌شان وجود داشته است، زیرا مطابق با نظر [۲۰ و ۱۶] آمفیبول‌هایی با مقادیر بالای منیزیم در شرایطی اکسیدان و آمفیبول‌های کم منیزیم در شرایط احیایی متبلور می‌شوند. علاوه بر این [۱۸ و ۳] با استفاده از $Fe\#^1$ کانی آمفیبول، فوگاسیته اکسیژن را تقسیم بندی کرده‌اند، بدین ترتیب که محدوده ۰ تا ۰/۶ نشان دهنده فوگاسیته اکسیژن بالا، ۰/۶ تا ۰/۸ متوسط و بیش از ۱ نشان‌دهنده یک فوگاسیته اکسیژن پایین است [۱۹]. بنابراین با توجه به اینکه نسبت $Fe/(Fe+Mg)$ آمفیبول‌های آنالیز شده از ۰/۱۸ تا ۰/۳۵ برای نمونه‌های دایک و ۰/۳۵ تا ۰/۴۸ برای نمونه‌های آنکلاو تغییر می‌کند در نتیجه فوگاسیته اکسیژن در محیط تشکیل این آمفیبول‌ها بالا بوده است. [۴] توصیه می‌کند که تنها آمفیبول‌هایی که دارای $Fe\# \leq 0.65$ برای ژئوبارومتري استفاده شوند. از طرف دیگر، یک فوگاسیته اکسیژن بالا منجر به جایگیری بالای Fe^{3+} در شبکه می‌شود که عمدتاً جانشین آلومینیم می‌گردد، و در نتیجه می‌تواند مقدار آلومینیم هورنبلند را پایین نگه دارد. هم‌چنین [۳] توصیه کرده‌اند که تنها آمفیبول‌هایی با یک نسبت $Fe^{3+}/(Fe^{2+}+Fe^{3+}) \geq 0.25$ برای آنالیزهای بارومتري استفاده شوند.

در مورد آمفیبول‌های آنالیز شده در این تحقیق فوگاسیته اکسیژن بالا بوده، در تمامی نمونه‌ها $Fe\# \leq 0.65$ می‌باشد، از طرفی نسبت $Fe^{3+}/(Fe^{2+}+Fe^{3+})$ در تمامی نمونه‌های آنالیز شده دایک مافیک بیش از ۰/۲۵ است (۰/۳۹-۰/۹۶) و اگرچه در آمفیبول‌های آنالیز شده از آنکلاو نسبت $Fe^{3+}/(Fe^{2+}+Fe^{3+})$ از ۰/۰۷ تا ۰/۲۶ می‌باشد حضور کانی تیتانیت ($CaTiSiO_5$) در این سنگ‌ها نشان‌دهنده فوگاسیته نسبتاً بالای اکسیژن است [۱۱]. بر این اساس همه آمفیبول‌های آنالیز شده دارای شرایط مناسبی برای محاسبه ژئوترموبارومتري هستند.

¹ $Fe/(Fe+Mg)$

فراوانی در بین محققان در زمینه ترمومتری برخوردار است و عمدتاً صحیح‌ترین نتایج را بدست می‌دهد. برای استفاده از این ترمومتر علاوه بر مشخص بودن ترکیب آمفیبول به ترکیب پلاژیوکلاز نیز نیاز است. به همین دلیل تعداد ۶ نقطه از پلاژیوکلازهای موجود در آنکلاوهای متاسدیمتری نیز در دانشکده علوم زمین دانشگاه آسلوی نروژ توسط دستگاه الکترون میکروپروب CAMECA-SX100 مشابه آمفیبول‌ها آنالیز گردید. نتایج حاصل از آنالیز این پلاژیوکلازها بر اساس ۸ اکسیژن در جدول ۳ آورده شده است.

برای ترمومتری آمفیبول-پلاژیوکلاز موجود در آنکلاوهای متاسدیمتری توده مورد مطالعه از سومین فرمول ارائه شده توسط [۹] استفاده گردید. این فرمول از اهمیت بسزایی برخوردار است زیرا برای پلاژیوکلازهای دیگر بوده و قابل کاربرد برای سنگ‌های آذرین و دگرگونی کوارتز دار و فاقد کوارتز می‌باشد، از طرفی مقدار آنورتیت پلاژیوکلاز نیز در آن لحاظ شده و پارامترهای بیش‌تری از ترکیب آمفیبول را شامل می‌شود. این فرمول که بر اساس واکنش ادنیت - ریچریت استوار است به صورت زیر می‌باشد [۹]:

$$T = \left\{ 78.44 + Y_{Ab-An} - 33.6 X_{Na}^{M4} - (66.8 - 2.92 P [Kbar]) \left(X_{Al}^{M2} + 78.5 X_{Al}^{T1} + 9.4 X_{Na}^A \right) / \left(0.0721 - R \ln \left[\frac{(27 X_{Na}^{M4} X_{Si}^{T1} X_{An}^{Plag})}{(64 X_{Ca}^{M4} X_{Al}^{T1} X_{Ab}^{Plag})} \right] \right) \right\}$$

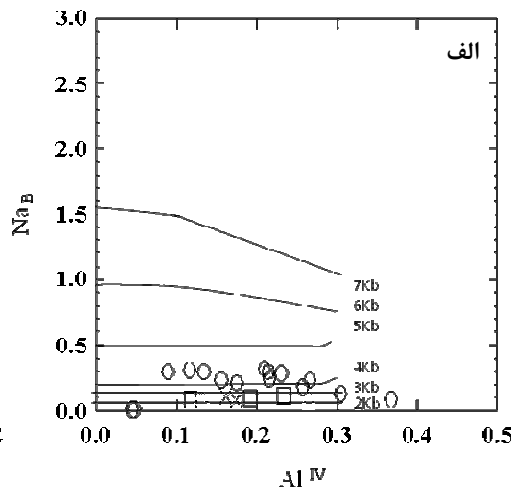
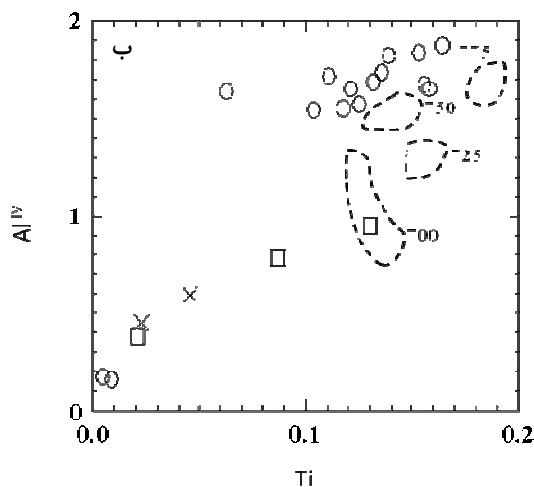
با استفاده از فرمول فوق در فشار ۲ کیلو بار یک محدوده دمایی ۷۲۶ تا ۸۱۲ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید که میانگین آن ۷۷۲ درجه سانتی‌گراد است.

نفوذی زرگلی یک محدوده فشار کمتر از ۵ کیلو بار را نشان می‌دهند. به طور دقیق آمفیبول‌های آنالیز شده از دایک یک محدوده فشار ۴ تا ۴/۵ کیلو بار و آمفیبول‌های آنالیز شده از آنکلاو یک محدوده فشار ۲ تا ۲/۵ کیلو بار را نشان می‌دهند.

تعیین دمای تبلور آمفیبول‌های آنالیز شده

مقدار تیتانیوم موجود در آمفیبول با افزایش دما و غلظت تیتانیوم در سیستم افزایش می‌یابد، هم‌چنین مقدار Al^{IV} نیز با افزایش دما افزایش پیدا می‌کند [۸]. مطابق با شکل ۶ ب در نمونه‌های آنالیز شده از دایک بازیک و آنکلاو متاسدیمتری موجود در توده نفوذی مورد مطالعه مقدار Al^{IV} و تیتانیوم یک روند افزایشی را از سمت آنکلاو به دایک نشان می‌دهند که مشخص کننده تبلور آمفیبول‌های سازنده دایک‌ها در دما بیش‌تری نسبت به آمفیبول‌های آنکلاو می‌باشد. هم‌چنین بر اساس محدوده‌های دمایی تعیین شده در نمودار تغییرات Ti برابر Al^{IV} ، آمفیبول‌های آنالیز شده از دایک مشخص کننده محدوده دمایی ۷۵۰ تا ۷۷۵ درجه سانتی‌گراد هستند و یک نمونه از آمفیبول‌های موجود در آنکلاو متاسدیمتری دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد (شکل ۶ ب). البته باید توجه داشت که این روش برای آمفیبول‌های موجود در سنگ‌های دگرگونی معرفی نشده است.

هم‌چنین از ترمومتر آمفیبول-پلاژیوکلاز برای تعیین دمای تبلور آمفیبول‌های آنالیز شده از آنکلاوهای متاسدیمتری استفاده گردید. این روش از مقبولیت



شکل ۶ الف) تخمین فشار تبلور آمفیبول‌های موجود در دایک‌ها و آنکلاوهای توده نفوذی زرگلی بر اساس مقدار Na_B در برابر Al^{IV} آمفیبول‌ها [۶]، علائم مشابه شکل ۳ هستند. ب) نمودار تغییرات Ti در برابر Al^{IV} برای آمفیبول‌های آنالیز شده از دایک‌های بازیک و آنکلاوهای متاسدیمتری موجود در توده نفوذی مورد مطالعه و موقعیت آن‌ها نسبت به محدوده‌های حرارتی (برگرفته از [۲])، علائم مشابه شکل ۳ هستند.

جدول ۱. نتایج آنالیز مایکروپروب آمفیبول‌های موجود در دایک‌های دیوریتی (dike) و آنکلاوهای متاسدیمنتري (enc) توده زرگلی

Sample	dike	dike	dike	dike	dike	dike	dike	dike	dike	dike	dike
SiO ₂	43.7646	45.0168	45.4937	55.1948	43.901	44.6784	44.2195	42.761	42.2527	42.1872	44.0945
TiO ₂	1.259	0.9656	1.1027	0.0813	1.1322	1.4639	1.4658	1.2807	1.3931	1.497	1.1179
Al ₂ O ₃	10.9749	10.1729	10.5562	1.2362	10.8987	10.5417	10.562	12.0503	11.6057	12.5056	10.9643
FeO	11.4939	10.8442	10.4615	9.7748	11.3355	11.0515	11.0972	11.549	11.285	11.17	10.9221
Cr ₂ O ₃	0.0036	0.0925	0	0.0018	0.0416	0.029	0.0018	0	0	0	0
MnO	0.2146	0.2273	0.1439	0.1834	0.2085	0.2551	0.2673	0.2331	0.2131	0.2147	0.1979
MgO	15.6666	15.8066	16.1254	17.77	14.436	16.135	15.6077	14.8685	15.1273	14.7159	15.4964
CaO	11.0577	11.7057	11.2083	13.3926	11.9977	11.2374	11.1358	11.1074	11.3255	11.4143	10.9331
Na ₂ O	1.7873	1.555	1.6074	0.1527	1.4856	1.8063	1.8662	1.8373	1.8071	1.7943	1.834
K ₂ O	0.5534	0.5867	0.5631	0.0428	0.8232	0.515	0.6015	0.7048	0.6521	0.7002	0.5204
Total	96.7758	96.9731	97.2566	97.8304	96.26	97.7133	96.8249	96.3923	95.6453	96.1774	96.0572
Number of ions on the basis of 23O											
T Si	6.267	6.458	6.452	7.839	6.427	6.332	6.349	6.181	6.162	6.128	6.351
T Al	1.733	1.542	1.548	0.161	1.573	1.668	1.651	1.819	1.838	1.872	1.649
T Fe ³⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SUM_T	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
C Al	0.117	0.176	0.215	0.046	0.306	0.091	0.135	0.232	0.156	0.267	0.211
C Cr	0	0.01	0	0	0.005	0.003	0	0	0	0	0
C Fe ³⁺	1.354	1.009	1.148	0	0.673	1.259	1.142	1.223	1.205	1.091	1.212
C Ti	0.136	0.104	0.118	0.009	0.125	0.156	0.158	0.139	0.153	0.164	0.121
C Mg	3.344	3.38	3.409	3.762	3.151	3.409	3.341	3.204	3.289	3.186	3.328
C Fe ²⁺	0.022	0.292	0.093	1.161	0.715	0.051	0.19	0.173	0.172	0.266	0.103
C Mn	0.026	0.028	0.017	0.022	0.026	0.031	0.033	0.029	0.026	0.026	0.024
C Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SUM_C	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
B Mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B Fe ²⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B Mn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B Ca	1.696	1.799	1.703	2	1.882	1.706	1.713	1.72	1.77	1.776	1.687
B Na	0.304	0.201	0.297	0	0.118	0.294	0.287	0.28	0.23	0.224	0.313
SUM_B	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
A Ca	0	0	0	0.038	0	0	0	0	0	0	0
A Na	0.193	0.232	0.145	0.042	0.304	0.203	0.233	0.235	0.281	0.282	0.2
A K	0.101	0.107	0.102	0.008	0.154	0.093	0.11	0.13	0.121	0.13	0.096
SUM_A	0.294	0.339	0.247	0.088	0.457	0.296	0.343	0.365	0.402	0.411	0.295
SUM_CAT	15.294	15.339	15.247	15.088	15.457	15.296	15.343	15.365	15.402	15.411	15.295
Mg#	0.7084	0.7220	0.7331	0.7641	0.6942	0.7223	0.7149	0.6965	0.7048	0.7012	0.7167

ادامه جدول ۱

Sample	dike	dike	dike	dike	enc	enc	enc	enc	enc	enc	enc
Location					core	rim	core	core	middle	core	rim
SiO ₂	54.3366	42.2403	44.4837	43.8337	47.3305	49.1819	52.123	52.8468	51.0769	49.4713	51.893
TiO ₂	0.0436	0.9879	0.5833	1.2144	1.156	0.8327	0.209	0.1932	0.4236	0.7912	0.4646
Al ₂ O ₃	1.3295	11.8581	10.9837	11.4291	6.7236	5.7213	3.6055	2.9342	4.5017	5.6811	3.9959
FeO	7.7188	12.9482	10.9022	11.2067	17.493	17.0072	14.1163	14.044	14.3586	14.1726	13.9416
Cr ₂ O ₃	0	0.0234	0.0109	0.038	0.3137	0.258	0.1376	0.1538	0.2977	0.5265	0.19
MnO	0.1139	0.2171	0.1825	0.2209	0.7224	0.7308	0.6528	0.5887	0.5575	0.7674	0.75
MgO	18.6493	12.9661	15.8992	15.0206	10.4803	10.9798	13.9419	14.3139	13.5858	13.0478	14.1529
CaO	13.6371	12.0671	11.4893	11.8052	11.8218	12.1435	12.1257	12.2617	12.3559	12.2325	11.9629
Na ₂ O	0.1334	1.4827	1.6585	1.7114	0.7289	0.5575	0.3923	0.2654	0.4203	0.6504	0.4097
K ₂ O	0.035	1.0351	0.5568	0.7796	0.6229	0.4488	0.2188	0.1565	0.3194	0.4806	0.2787
Total	95.9934	95.8259	96.7501	97.2596	97.3931	97.8615	97.5229	97.7582	97.8974	97.8214	98.0393
Number of ions on the basis of 23O											
T Si	7.824	6.289	6.366	6.318	7.054	7.269	7.548	7.621	7.405	7.216	7.455
T Al	0.176	1.711	1.634	1.682	0.946	0.731	0.452	0.379	0.595	0.784	0.545
T Fe ³⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SUM_T	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
C Al	0.049	0.369	0.217	0.258	0.234	0.265	0.162	0.119	0.174	0.192	0.131
C Cr	0	0.003	0.001	0.004	0.037	0.03	0.016	0.018	0.034	0.061	0.022
C Fe ³⁺	0	0.643	1.205	0.888	0.312	0.161	0.316	0.309	0.278	0.261	0.444
C Ti	0.005	0.111	0.063	0.132	0.13	0.093	0.023	0.021	0.046	0.087	0.05
C Mg	4.003	2.878	3.392	3.228	2.328	2.419	3.01	3.077	2.936	2.837	3.031
C Fe ²⁺	0.929	0.969	0.1	0.463	1.868	1.941	1.394	1.384	1.463	1.467	1.231
C Mn	0.014	0.027	0.022	0.027	0.091	0.091	0.08	0.072	0.068	0.095	0.091
C Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SUM_C	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
B Mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B Fe ²⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B Mn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B Ca	2	1.925	1.762	1.823	1.888	1.923	1.881	1.894	1.919	1.912	1.841
B Na	0	0.075	0.238	0.177	0.112	0.077	0.11	0.074	0.081	0.088	0.114
SUM_B	2	2	2	2	2	2	1.991	1.969	2	2	1.955
A Ca	0.104	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A Na	0.037	0.353	0.222	0.302	0.098	0.083	0	0	0.038	0.096	0
A K	0.006	0.197	0.102	0.143	0.118	0.085	0.04	0.029	0.059	0.089	0.051
SUM_A	0.147	0.55	0.324	0.445	0.217	0.167	0.04	0.029	0.097	0.185	0.051
SUM_CAT	15.147	15.55	15.324	15.445	15.217	15.167	15.032	14.997	15.097	15.185	15.007
Mg#	0.81163	0.6409	0.722	0.7049	0.5164	0.5350	0.6377	0.6450	0.6277	0.6214	0.64407

جدول ۲. فشارهای به دست آمده بر حسب کیلوپار برای دایک دیوریتی و آنکلاو متاسدیمنتی با استفاده از آمفیبول

Method	Sample	dike	dike	dike	dike	dike	dike	dike	dike	
	Hammarstrom & Zen, 1986	4.72	4.93	4.95	5.06	5.39	5.39	5.44		
	Hollister et al., 1987	4.93	5.16	5.18	5.31	5.67	5.68	5.73		
	Johnson and Rutherford, 1989	3.81	3.98	4.00	4.09	4.37	4.37	4.41		
	Schmidt, 1992	5.17	5.36	5.38	5.49	5.80	5.80	5.84		
dike	dike	dike	dike	dike	dike	average	enclave	enclave	enclave	average
5.53	5.84	6.11	6.40	6.54	6.84	5.63	2.02	1.09	0.99	1.36
5.84	6.18	6.49	6.81	6.97	7.30	5.94	1.90	0.86	0.74	1.17
4.49	4.75	4.97	5.22	5.34	5.59	4.57	1.53	0.75	0.67	0.98
5.93	6.22	6.48	6.75	6.89	7.17	6.02	2.61	1.73	1.64	1.99

جدول ۳. نتایج آنالیز مایکروپروب پلازموکلازهای موجود در آنکلاوهای متاسدیمنتی

Sample	enc	enc	enc	enc	enc	enc
SiO ₂	47.12	50.73	50.53	49.01	45.86	46.60
TiO ₂	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02
Al ₂ O ₃	33.21	30.90	30.74	32.26	34.47	33.57
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02
FeO	0.04	0.13	0.10	0.16	0.04	0.08
MnO	0.00	0.02	0.03	0.01	0.00	0.03
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	17.48	14.36	14.29	16.09	18.78	17.88
Na ₂ O	1.82	3.46	3.56	2.67	1.14	1.69
K ₂ O	0.03	0.07	0.07	0.07	0.03	0.02
Total	99.7089	99.6982	99.3399	100.2914	100.3382	99.9013
Number of ions on the basis of 80						
Si	8.69	9.27	9.27	8.96	8.44	8.59
Al	7.21	6.65	6.65	6.94	7.47	7.29
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
Mn	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	3.45	2.81	2.81	3.15	3.70	3.53
Na	0.65	1.23	1.27	0.95	0.41	0.61
K	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00
CATIONS	20.02	20.01	20.04	20.04	20.03	20.05
Ab	15.80	30.20	31.00	23.00	9.90	14.60
An	84.00	69.40	68.60	76.60	89.90	85.30
Or	0.20	0.40	0.40	0.40	0.20	0.10

نتیجه‌گیری

توده نفوذی زرگلی یک توده گرانیتوئیدی است که لیتولوژی عمده آن گرانودیوریتی متشکل از مقادیر بالایی بیوتیت می‌باشد و به همین دلیل می‌توان آن را به عنوان یک بیوتیت‌گرانودیوریت در نظر گرفت. کانی آمفیبول در توده گرانودیوریتی زرگلی حضور ندارد ولی در آنکلاوهای متاسدیمتری و دایک‌های دیوریتی موجود در این توده به عنوان کانی مافیک اصلی دیده می‌شود. آمفیبول‌های هر دو لیتولوژی، از نوع کلسیک هستند. آمفیبول‌های موجود در آنکلاوهای متاسدیمتری عمدتاً از نوع منیزیهورنبلند و آمفیبول‌های موجود در دایک‌های دیوریتی عموماً از نوع چرماکیت هستند. به طور کلی آمفیبول‌های آنکلاوهای متاسدیمتری در مقایسه با آمفیبول‌های دایک‌های دیوریتی معرف فشار و دمای کمتری هستند و در نتیجه آمفیبول‌های موجود در دایک‌های دیوریتی می‌بایستی در اعماق بیشتری شروع به تبلور نموده باشند. هم‌چنین آمفیبول‌های موجود در هر دو لیتولوژی یک فوگاسیته اکسیژن بالا را برای محیط تشکیل‌شان مشخص می‌کند.

نتایج به دست آمده از ترمومتری آمفیبول‌های آنالیز شده مربوط به آنکلاو متاسدیمتری نشان می‌دهد که این آمفیبول‌ها در یک دمای ۷۷۰ درجه سانتی‌گرادی طی فرآیند دگرگونی تشکیل شده‌اند. تشابه این دما با دمای بدست آمده از روش ترمومتری زیرکن (۷۶۷/۴ تا ۷۸۹/۳) برای توده نفوذی زرگلی [۱۵] احتمالاً نشان دهنده شرایط محیطی یکسان حاکم بر این آنکلاوها و توده میزبان‌شان یا ایجاد یک تعادل حرارتی جدید بین آنکلاو و میزبان‌شان است.

محدوده دمایی آمفیبول‌های آنالیز شده از دایک دیوریتی و در واقع دمای دایک در زمان نفوذ در توده گرانیتوئیدی احتمالاً دمایی بیش از ۷۵۰ تا ۷۷۵ درجه سانتی‌گراد بوده است.

برای آمفیبول‌های آنکلاوهای متاسدیمتری محدوده فشار بین ۲ تا ۲/۵ کیلوپار مشخص گردیده که می‌توان به عنوان فشار تشکیل این آمفیبول‌ها طی فرآیند دگرگونی معرفی نمود. از طرفی از آنجائی که آنکلاوهای متاسدیمتری به مقدار فراوانی در توده گرانیتوئیدی اصلی حضور دارند و فشار محاسبه شده برای آمفیبول‌های آن‌ها با محدوده فشار تقریبی ۱/۵ تا ۲/۵

کیلوپار تعیین شده با استفاده از نمودار سه‌تایی Q-Ab-Or توسط [۱] از هماهنگی بالایی برخوردار است می‌توان فشار محاسبه شده برای آمفیبول را مشابه با فشار جایگیری توده نفوذی در نظر گرفت. این فشار به خوبی می‌تواند بیانگر فشار و عمق دگرگونی و تثبیت توده باشد. بنابراین ماگمای تشکیل‌دهنده توده نفوذی زرگلی تا عمق حدود ۷ کیلومتری سطح زمین صعود کرده و در این عمق که محل دگرگون شدگی سنگ‌های رسوبی نیز می‌باشد به طور کامل تبلور یافته است.

مشاهده محدوده فشار نسبتاً گسترده برای نمونه‌های آنالیز شده از دایک نیز احتمالاً بیانگر شروع تبلور این آمفیبول‌ها در اعماق بیش‌تر و قبل از جایگزینی در توده نفوذی زرگلی است.

منابع

- [۱] کشتگر، ش (۱۳۸۳) پترولوژی، ژئوشیمی و تحلیل ساختاری گرانیت‌های زرگلی (شمال‌غرب زاهدان)، پایان نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تهران، ۱۶۱ ص.
- [۲] معین‌وزیری، ح و احمدی، ع (۱۳۸۰) پتروگرافی و پترولوژی سنگ‌های آذرین، انتشارات دانشگاه تربیت معلم، ۵۴۷ ص.
- [3] Anderson, J. L. and Smith, D. R (1995) The effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer. *American Mineralogist*, 80 : 549-559.
- [4] Anderson, J. L. (1997) Status of thermobarometry in granitic batholiths. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 87 : 125-138.
- [5] Blundy, J. D., Holland T. J. B (1990) Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 104 : 208-224.
- [6] Brown, E. H (1977) The crossite content of Ca-amphiboles as a guide to pressure of metamorphism, in Moazzen M. and Droop G. T. R., 2005: Application of thermometers and barometers to granitoid igneous rocks: the Etive Complex, W Scotland. *Mineralogy and Petrology*, 83 : 27-53.
- [7] Femenias, O., Mercier J. C. C., Nkono C., Diot H., Berza T., Tatu M., and Demaiffe D (2006) Calcic amphibole growth and compositions in calc-alkaline magmas: Evidence from the Motru Dike Swarm (Southern Carpathians, Romania). *American Mineralogist*, 91 : 73-81.
- [8] Hammarstrom, J. M., Zen E (1986) Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist*, 71 :

- condition of A-type granitoids. *Eur. J. Mineral.*, 23 : 45-61.
- [17] Schmidt, M. W. (1992) Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer, in Jarrar G., 1998: Mineral chemistry in dioritic hornblendites from Wadi Araba, southwest Jordan. *Journal of African Earth Sciences*, 26 : 285-295.
- [18] Spear, F. S. (1981) Amphibole-plagioclase equilibria: an empirical model for the reaction albite + tremolite = edenite + 4 quartz, in Stein E. and Dietl C. 2001: Hornblende thermobarometry of granitoids from the Central Odenwald (Germany) and their implications for the geotectonic development of the Odenwald. *Mineralogy and Petrology*, 72 : 185-207.
- [19] Stein, E. and Dietl C. (2001) Hornblende thermobarometry of granitoids from the Central Odenwald (Germany) and their implications for the geotectonic development of the Odenwald. *Mineralogy and Petrology*, 72 : 185-207.
- [20] Wones, D. R. (1989) Significance of the assemblage titanite + magnetite + quartz in granitic rocks, in Shellnutt J. G. and Iizuka Y., 2011: Mineralogy from three peralkaline granitic plutons of the Late Permian Emeishan large igneous province (SW China): evidence for contrasting magmatic condition of A-type granitoids. *Eur. J. Mineral.*, 23 : 45-61.
- [21] Yang, X. M., Lentz D. R. (2005) Chemical composition of rock-forming minerals in gold-related granitoid intrusions, southwestern New Brunswick, Canada: implications for crystallization conditions, volatile exsolution, and fluorine-chlorine activity. *Contrib Mineral Petrol*, 150 : 287-305.
- 1297-1313.
- [9] Holland T., Blundy J. (1994) Non-ideal interaction in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116 : 443-447.
- [10] Hollister, L. S., Grissom G. C., Peters E. K., Stowell H. H. and Sisson V. B. (1987) Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with product of solidification in calc-alkaline plutons, in Jarrar G., 1998: Mineral chemistry in dioritic hornblendites from Wadi Araba, southwest Jordan. *Journal of African Earth Sciences*, 26 : 285-295.
- [11] Ishihara, S. (1977) The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks, in Anderson J. L. and Smith D. R., 1995: The effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer. *American Mineralogist*, 80 : 549-559.
- [12] Johnson, M. C. and Rutherford M. J. (1989) Experimental calibration of the Al-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks, in Jarrar G., 1998: Mineral chemistry in dioritic hornblendites from Wadi Araba, southwest Jordan. *Journal of African Earth Sciences*, 26 : 285-295.
- [13] Leake, B. E., Woolley A. R., Arps C. E. S., Birch W. D., Gilbert M. C., Grice J. D., Hawthorne F. C., Kato A., Kisch H. J., Krivovichev V. G., Linthout K., Laird J., Mandarino J., Maresch W. V., Nickel E. H., Schumacher J. C., Smith D. C., Stephenson N. C. N., Ungaretti L., Whittaker E. J. W., Youzhi G. (1997) Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Mineralogical Magazine*, 61 : 295-321.
- [14] Moazzen, M. and Droop G. T. R. (2005) Application of thermometers and barometers to granitoid igneous rocks: the Etive Complex, W. Scotland. *Mineralogy and Petrology*, 83 : 27-53.
- [15] Rezaei-Kahkhaei, M., Kananian A., Esmaily D. and Asiabanha A. (2010) Geochemistry of the Zargoli granite: Implications for development of the Sistan Suture Zone, southeastern Iran. *Island Arc*, 19 : 18 pages.
- [16] Scaillet, B. and Macdonald R. (2003) Experimental constraints on the relationships between peralkaline rhyolites of the Kenya rift valley, in Shellnutt J. G. and Iizuka Y., 2011: Mineralogy from three peralkaline granitic plutons of the Late Permian Emeishan large igneous province (SW China): evidence for contrasting magmatic

Amphiboles chemistry of enclaves and dikes of Zargoli intrusive pluton, North West of Zahedan

M. Saravani Firouz¹, A. Kananian², M. Rezaie Kahkhaie³

1, 2- College of Science, University of Tehran, Tehran

3-College of Science, University of Shahrood, Shahrood

* saravani_mahdi@yahoo.com

Received: 2015/9/3 Accepted: 2016/1/31

Abstract

Zargoli intrusive pluton is located in the North West of Zahedan city and along Zahedan-Saravan granitoidic band. Main lithology of the pluton is I-type granodiorite rocks and nature of their magma is a calc-alkaline granitic magma which formed in orogenic subduction environment and partially contaminated with sedimentary rocks of the upper crust. Notable feature of this granodiorites, is abundance presence of metasedimentary enclaves in them. There is not amphibole mineral in granodiorite rocks of Zargoli intrusive pluton but it is observed as major mafic mineral in metasedimentary enclaves and diorite dikes which presence in the pluton. Respectively, amphiboles analyzed from diorite dikes and metasedimentary enclaves of Zargoli pluton are tschermakite and magnesio-hornblende which sometimes have been altered into actinolite. Amphiboles of diorite dikes formed at higher pressure and temperature than amphiboles of metasedimentary enclaves. Amphiboles analyzed from metasedimentary enclaves have been crystallized at 770°C temperature and about 2Kbar pressure while amphiboles analyzed from diorite dikes formed in the temperature range 750 to 775°C and relatively wide pressure of 4 to 7Kbar. Calculated pressure for amphiboles analyzed from metasedimentary enclave is indicator their formation pressure during metamorphism, then metamorphic process of metasedimentary rocks may be occurred at about 2Kbar pressure and 7 kilometer depth that is same with emplacement of Zargoli intrusive pluton.

Keywords: amphibole chemistry, geothermobarometry, enclave, zargoli, zahedan