

کاربرد شیمی کانی‌های بیوتیت و ارتوپروکسن در بررسی شرایط تکتونو-ماگمایی آنکلاوهای توده پلوتونیک الوند و سنگ میزبان آنها

سارا شکبیا^۱، علی اصغر سپاهی گرو^{۲*}، محمدرضا قاسمپور^۳ و کازو ناکاشیما^۴

^۱ دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۲ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۳ دانشجوی دکترا، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، شهرکرد، ایران

^۴ استاد، گروه علوم زمین و محیط زیست، دانشگاه یاماگاتا، یاماگاتا، ژاپن

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۱

چکیده

توده پلوتونیک الوند یکی از بزرگ‌ترین توده‌های نفوذی در بخش شمالی زون سنندج - سیرجان است که در جنوب شهر همدان واقع شده است. این توده متشکل از گرانیتویدهای پورفیری، لوکوکرات، سنگ‌های نفوذی بازیک و آنکلاوهای است که به اندازه‌های متفاوت و به اشکال مختلف دیده می‌شوند. بیوتیت‌های موجود در مونوزوگرانیت پورفیروید، دیوریت، آنکلاو میکروگرانولار فلسیک، آنکلاو میکروگرانولار مافیک و آنکلاو سورمیکاسه در قلمرو بیوتیت‌های منیزیم‌دار و بیوتیت‌های موجود در نوریت‌ها در قلمرو فلوگویت، واقع شده‌اند. ارتوپروکسن‌های نوریت در محدوده کلینوانستاتیت و ارتوپروکسن آنکلاو میکروگرانولار مافیک در محدوده کلینوفروسیلیت می‌باشند. بر پایه دماسنجی بر مبنای میزان Ti موجود در بیوتیت‌ها، مونوزوگرانیت ۶۶۲ تا ۷۳۴، نوریت ۶۸۸ تا ۷۷۶، دیوریت ۵۹۸ تا ۷۲۴، آنکلاو سورمیکاسه ۶۶۲ تا ۶۸۷، آنکلاو میکروگرانولار فلسیک ۶۹۴ تا ۷۱۲ و آنکلاو میکروگرانولار مافیک ۶۳۵ تا ۷۳۷ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهند. بر اساس ترکیب شیمیایی بیوتیت و ارتوپروکسن ماگمای سازنده آنکلاوهای توده پلوتونیک الوند و سنگ میزبان آنها در گستره آهکی - قلیایی قرار گرفته‌اند. ارتوپروکسن‌های نوریت و آنکلاو میکروگرانولار مافیک نشان می‌دهد مجموعه نفوذی الوند در رده سنگ‌هایی با فوگاسیته اکسیژن بالا جای می‌گیرند، که از صفات آهکی - قلیایی بودن توده می‌باشد، که با ویژگی‌های تکتونوماگمایی محیط‌های وابسته به فرورانش همخوانی دارد.

کلید واژه‌ها: شیمی کانی، بیوتیت، ارتوپروکسن، دماسنجی، آنکلاو، توده پلوتونیک الوند، پهنه سنندج - سیرجان.

E-mail: sephahi@basu.ac.ir

*نویسنده مسئول: علی اصغر سپاهی گرو

۱- پیش‌نوشتار

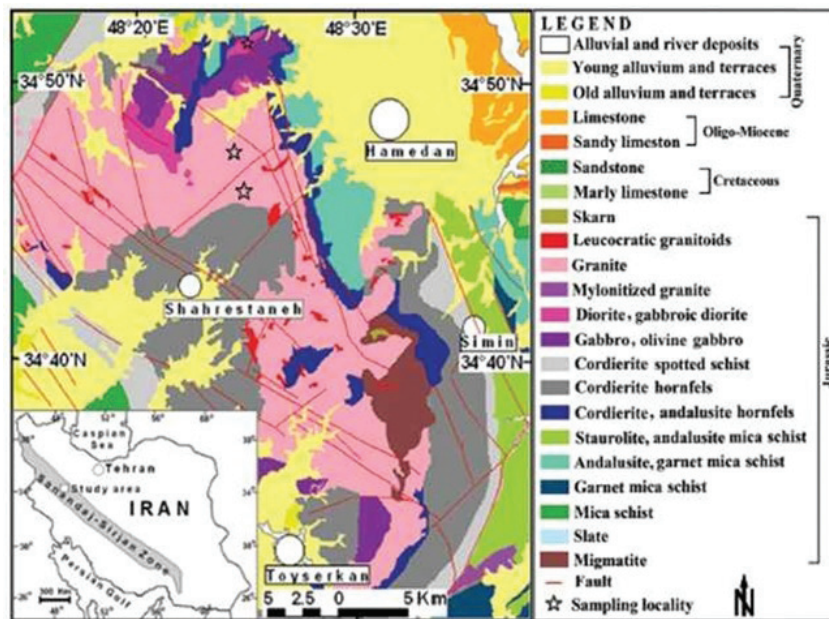
امروزه با مطالعه شیمی کانی‌های مختلف سنگ‌های تشکیل دهنده یک توده نفوذی می‌توان نوع ماگما، محیط زمین‌ساختی و شرایط تشکیل و دما و فشار (عمق) تشکیل آنها را تخمین زد. تاکنون مطالعات قابل توجهی درباره سنگ‌شناسی مجموعه نفوذی الوند انجام شده است. پژوهشگرانی همچون زرعیان و همکاران (۱۳۵۱، ۱۳۵۰)، ولی‌زاده (۱۳۵۳)، Valizadeh and Cantagrel (1975)، ایرانی (۱۳۷۲)، ترکیان (۱۳۷۴)، سپاهی گرو (۱۳۷۸) و شهبازی (۱۳۸۹) به بررسی سنگ‌نگاری، سنگ‌شناسی و سنگ‌زایی توده مورد نظر پرداخته‌اند. به‌رغم مطالعات گسترده زمین‌شناسی انجام شده در منطقه‌ی همدان، هنوز هم نکات مبهم بسیاری درباره تکوین زمین‌شناسی منطقه همدان وجود دارد. گرانیتویدها بخش عمده مجموعه پلوتونیک الوند را تشکیل می‌دهند و در داخل آنها، آنکلاوهای دانه ریز فراوانی وجود دارند، که دارای اندازه‌های بسیار متغیر از یک سانتی‌متر تا چند متر و به اشکال مدور، بیضی‌شکل، زاویه‌دار و کشیده می‌باشند. به‌رغم مطالعات فراوانی که در این منطقه صورت گرفته است، اما بررسی تحولات ماگمایی توده پلوتونیک الوند با استفاده از شیمی کانی‌ها به طور کامل انجام نشده است. بررسی ترکیب شیمی کانی بیوتیت به عنوان متداول‌ترین کانی فرومنیزین موجود در سنگ‌های گرانیتویدی به عنوان ابزاری در درک برخی از جنبه‌های پتروزنز و محیط تکتونیک این سنگ‌ها در ایران موضوعی است که در دهه اخیر توجه برخی از محققان را به خود جلب کرده است (به عنوان مثال Karimpour et al., 2006 و Shabani et al., 2010). بنابراین با توجه به اینکه بیوتیت و ارتوپروکسن از کانی‌هایی مهم موجود در سنگ‌های تشکیل دهنده توده پلوتونیک الوند هستند، در این مقاله سعی شده است براساس شیمی کانی بیوتیت و ارتوپروکسن به عنوان ابزار مهمی برای شناخت بیشتر فرایندهای تبلور و شکل‌گیری ماگمای سازنده این توده استفاده شود، که هدف این پژوهش نیز در همین راستاست.

۲- زمین‌شناسی منطقه

توده نفوذی الوند یکی از بزرگ‌ترین توده‌های نفوذی در زون سنندج - سیرجان است (Sepahi, 2008). این توده پلوتونیک با کشیدگی شمال باختری - جنوب خاوری با مساحتی حدود ۴۰۰ کیلومتر مربع بین طول‌های خاوری ۱۲' ۴۸° تا ۳۸' ۴۸° و عرض‌های شمالی ۳۰' ۳۴° تا ۵۲' ۳۴° در باختر ایران و در محدوده استان همدان و بین شهرهای همدان، تویسرکان و اسدآباد واقع شده است. توده پلوتونیک الوند از دیدگاه زمین‌شناختی ساختاری (Stoklin, 1968 و نبوی، ۱۳۵۵)، تماماً در بخش شمال باختری زون سنندج - سیرجان واقع است که به صورت نوار طویل شده‌ای در امتداد و به موازات روراندگی زاگرس، گسترش دارد. زون سنندج - سیرجان را جزئی از کوهرزاد زاگرس دانسته و آن را زون زاگرس فلس مانند نامیده‌اند. این منطقه شامل قله مرتفعی است که اغلب گرانیتی یا هورنفلسی هستند. همچنین در شمال خاور منطقه مورد مطالعه سنگ‌های مافیک رخمون دارند. توده پلوتونیک الوند در ژوراسیک میانی (بر اساس سن‌سنجی به روش اورانیم-سرب بر روی کانی زیرکن) در نوار دگرگونی - نفوذی زون سنندج - سیرجان جایگزین شده است، که این توده متشکل از سه دسته سنگ‌های اصلی شامل گابروها، گرانیت‌ها و گرانیتویدهای لوکوکرات است (شکل ۱)، که به ترتیب گابروها در ۱۶۵/۵±۱/۸، گرانیت‌ها در ۱۶۱/۷±۰/۶ تا ۱۶۳/۵±۰/۹ و گرانیتویدهای لوکوکرات بین ۱۵۳/۳±۲/۷ تا ۱۵۴/۴±۱/۳ میلیون سال قبل نفوذ کرده‌اند (Shahbazi et al., 2010). مطالعات کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی و ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که گرانیتویدهای پورفیروید الوند دارای ویژگی‌های نوع S هستند (Aliani et al., 2011). براساس ویژگی‌های ترکیبی سه دسته سنگ‌های اصلی، این توده متعلق به سه سری از ماگماهای مختلف است که منشأ آنها را می‌توان با فرایندهای پترولوژیکی متفاوتی توضیح داد. گابروها دارای منشأ گوشته‌ای هستند، منشأ گرانیت‌ها پوسته قاره‌ای است و گرانیتویدهای لوکوکرات، حاصل

حد آلیت- اپیدوت هورنفلس تا هورنبلند هورنفلس می‌باشد. سنگ‌های متاپلیتی مهم‌ترین سنگ‌های مجموعه دگرگونی هستند، اما میان لایه‌هایی از سنگ‌های متابازیت و متاکربنات هم قابل مشاهده است. اسلیت، فیلیت، شیست و میگماتیت حجم اصلی مجموعه دگرگونی ناحیه‌ای را شکل داده‌اند که در شیست‌ها کانی‌های فراوانی مانند میکاها، گارنت، آندالوزیت، سیلیمانیت، کیانیت و استارولیت یافت می‌شوند. سنگ‌های دگرگونی مجاورتی اغلب کردپریت-آندالوزیت هورنفلس هستند.

دوب پوسته‌ای غنی از پلاژیوکلاز، مانند تونالیت‌ها و رسوبات دگرگون شده‌اند (شهبازی، ۱۳۸۹). در مجموعه پلوتونیک الوند، ماگماتیسیم مافیک دوره زمانی طولانی‌تری دارد، ولی در برخی از دوره‌ها احتمال همپوشانی زمانی بین برخی فازهای فلسیک و مافیک وجود داشته است (Sepahi, 2008). همچنین در پیرامون توده پلوتونیک الوند دو گروه اصلی سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای یا دیناموترمال و سنگ‌های دگرگونی مجاورتی رخمون دارند. درجه دگرگونی سنگ‌های دگرگونی دیناموترمال در حد رخساره شیست سبز و آمفیبولیت است و دگرگونی مجاورتی در



شکل ۱- نقشه زمین شناسی باتولیت الوند (اقتباس از Eshraghi and Mohammadi (2003) و اقلیمی (۱۳۷۹) با تغییرات).

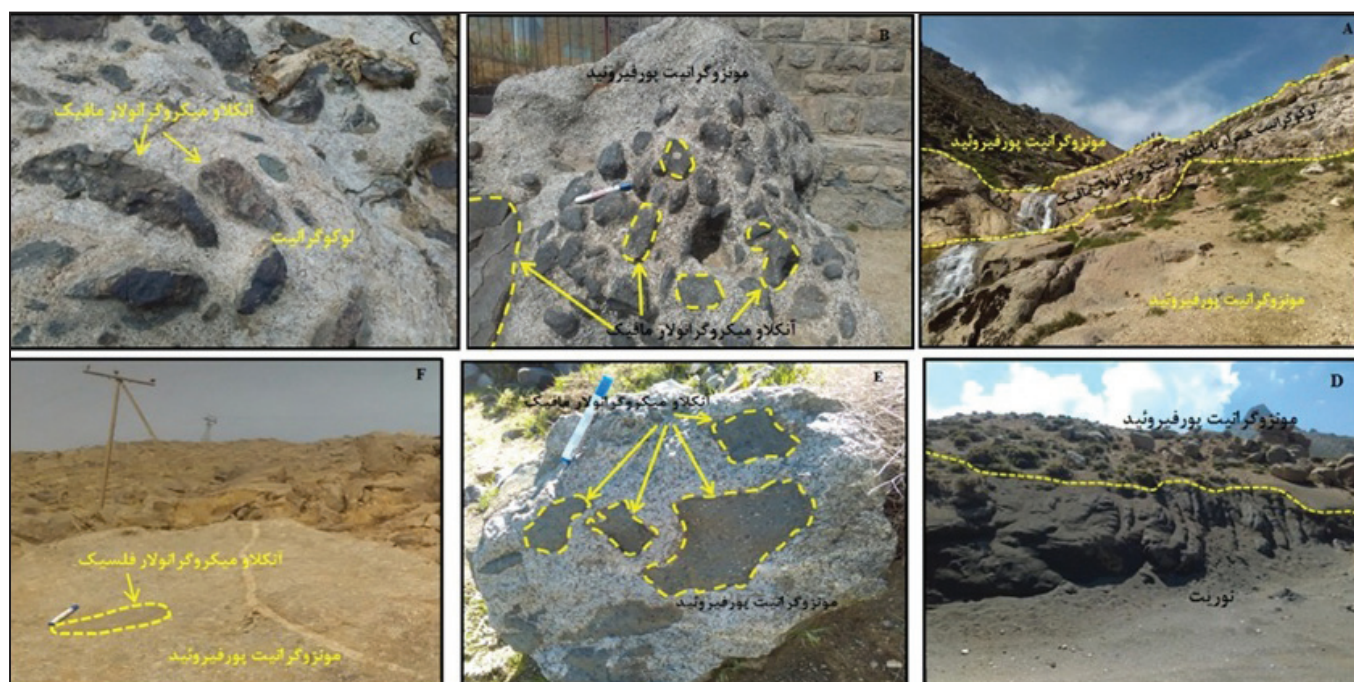
۳- روش انجام پژوهش

شد. شناسایی مشخصه‌های اصلی سنگ‌شناسی شامل خصوصیات بافتی و ترکیب کانی‌شناسی با تکیه بر روش‌های پتروگرافی بر روی ۱۰۰ مقطع نازک صورت گرفت. براساس این مطالعات، سنگ‌های منطقه از گرانیت‌های پورفیروید، گرانیتویدهای هولولوکوکرات، و سنگ‌های نفوذی بازیک و آنکلاوهای فلسیک، مافیک، سورمیکاسه و هورنفلسی تشکیل شده است. گرانیت‌های پورفیروید که بیشترین حجم توده پلوتونیک الوند را تشکیل می‌دهند (شکل ۲-۱A)، شامل آنکلاوهای مافیک (شکل ۲-۱B و شکل ۲-۱E)، فلسیک (شکل ۲-۱F)، هورنفلسی و رستیت‌های سورمیکاسه هستند، این آنکلاوها به شکل کروی، بیضوی و زاویه‌دار هستند. اندازه آنکلاوها از ابعاد سانتی متری تا ابعاد چند متری قابل مشاهده است. سنگ‌های نفوذی بازیک نیز بیشتر در باختر و شمال باختر توده الوند رخمون دارند و به داخل شیست‌های ژوراسیک پائینی نفوذ کرده‌اند. همبری این سنگ‌ها با گرانیت‌های پورفیروید (شکل ۲-۱D) و لوکوگرانیت‌ها واضح است (تدریجی نیست). گرانیتویدهای هولولوکوکرات غالباً به صورت رگه‌های کم ضخامت و پراکنده در میان گرانیتویدهای اصلی الوند در جنوب و باختر همدان رخمون دارند، که از نظر اندازه دانه‌ها به دو گروه پورفیروید و دانه‌ریز تقسیم می‌شوند. همبری گرانیتویدهای هولولوکوکرات با گرانیتویدهای اصلی الوند به خوبی دیده می‌شود و تدریجی نیست و نسبت به آنها جوان‌تر هستند و در داخل آنها آنکلاوهای میکروگرانولار مافیک به وفور مشاهده می‌شود (شکل ۲-۱C)، که بیانگر تشکیل لوکوگرانیت‌ها بعد از ماگمای مافیک است.

در این پژوهش، پس از انجام بررسی‌های کتابخانه‌ای، بازدید صحرایی و نمونه‌برداری دقیق از توده پلوتونیک الوند صورت گرفت. حدود ۱۰۰ مقطع نازک از این نمونه‌ها تهیه شدند و توسط میکروسکوپ پلاریزان مورد مطالعه قرار گرفتند. پس از ویژگی‌های کانی‌شناختی و سنگ‌شناسی، تعداد ۱۰ مقطع که نمونه‌هایی سالم و فاقد دگرسانی بودند، برای آنالیز نقطه‌ای انتخاب شدند. تجزیه‌های نقطه‌ای کانی‌های بیوتیت و ارتوپیروکسن با ریز پردازنده الکترونی مدل JEOL. JXA-8900M با ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ کیلو وات و جریان تابشی 2×10^{-8} amp در بخش علوم زمین و محیط زیست دانشگاه پاماکاتا در کشور ژاپن انجام شد و نتایج آنالیزها در نرم افزار Excel و Petrograph پردازش شدند. داده‌های حاصل از آنالیز بیوتیت‌های توده نفوذی الوند (۷۱ نقطه) و تعداد کاتیون‌های موجود در فرمول ساختاری آنها بر اساس ۲۲ اتم اکسیژن و ارتوپیروکسن‌ها (۱۷ نقطه) بر اساس ۶ اتم اکسیژن محاسبه شده‌اند.

۴- مشاهدات صحرایی و پتروگرافی

بررسی‌های سنگ‌شناسی به همراه مشاهدات صحرایی می‌تواند داده‌های ژئوشیمیایی را تا حد زیادی تفسیر کرده و تأیید کننده یا رد کننده نتیجه‌گیری‌های حاصل از آنها باشد. لذا در این پژوهش مطالعه آنکلاوها و سنگ‌های میزبان در توده گرانیتویدی الوند در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی صورت گرفته است. در بخش صحرایی با توجه به تغییرات سنگ‌شناسی تعداد ۲۰۰ نمونه از سنگ میزبان و آنکلاوها برداشت



شکل ۲- (A) رخنمون لوکو گرانیته همراه با آنکلاو میکرو گرانولار مافییک در توده مونزو گرانیته پورفیروید الوند (دید به سمت جنوب)، (B) مونزو گرانیته پورفیروید الوند همراه با آنکلاو میکرو گرانولار مافییک (دید به سمت شمال)، (C) رخنمون لوکو گرانیته الوند همراه با آنکلاو میکرو گرانولار مافییک (دید به سمت شمال)، (D) رخنمون مونزو گرانیته پورفیروید الوند و نوریت (دید به سمت خاور)، (E) مونزو گرانیته پورفیروید الوند همراه با آنکلاو میکرو گرانولار مافییک (دید به سمت خاور)، (F) مونزو گرانیته پورفیروید الوند همراه با آنکلاو میکرو گرانولار فلسیک (دید به سمت جنوب).

که ساب هدرال تا آنهدرال می باشند. کانی مافییک بیوتیت می باشد. کانی های فرعی آن زیرکن، اسفن، زوئیزیت، کانی اپاک و آپاتیت می باشد. کانی های ثانویه این سنگ ها بیوتیت، مسکوویت، سرسیت و کلریت می باشد. این توده جوان ترین توده های نفوذی پلوتونیک الوند می باشند.

— **گرانودیوریت:** این سنگ ها با ساخت پورفیروید تا توده ای، دانه ریز تا دانه متوسط بوده و به رنگ خاکستری تیره دیده می شوند. بافت اصلی شامل ساب هدرال گرانولار و بافت های فرعی چون میرمکیت، گرانوفیری، میکروپرتیت (شعله ای)، پورفیروید، پوئی کیلیتیک، زوئینگ، خلیجی، غربالی، میکرو گرافیک، و سمپلیکیت آندالوزیت و اسپینل می باشند. کانی های اصلی شامل پلاژیو کلاز به صورت بلورهای ساب هدرال (حدود ۴۰ تا ۴۵ درصد حجمی)، که دارای ماکل پلی سنتتیک است، و از خود زوئینگ نوسانی نشان می دهند. کوارتز به صورت بلورهای آنهدرال (حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد حجمی)، فلدسپات های آلکالن (ارتو کلاز و میکروکلین) و مسکوویت می باشند. کانی مافییک بیوتیت (حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد حجمی) می باشد که گاهی به صورت پراکنده و گاهی به صورت لخته هایی در سنگ پراکنده می باشد (شکل ۳- C). کانی های فرعی عبارتند از: زیرکن، آپاتیت، تورمالین، اسپینل، کانی های کدر و نیز زینوکریست هایی چون آندالوزیت، گارنت، سیلیمانیت (فیبرولیت)، و کوارتز نیز در آنها مشاهده می گردد. کانی های دگرسانی شامل سرسیت و کلریت است.

— **سینو گرانیته:** این سنگ ها با ساخت توده ای به رنگ خاکستری روشن و دانه درشت هستند، و در مقایسه با مونزو گرانیته ها از فراوانی کمتری برخوردارند. بافت اصلی این سنگ ها ساب هدرال و آنهدرال گرانولار است ولی بافت های میرمکیت، میکرو پرتیت، نیز در برخی از این سنگ ها دیده می شود. کانی های اصلی سنگ شامل کوارتز به صورت بلورهای آنهدرال (حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد حجمی)، فلدسپات آلکالن از نوع ارتو کلاز و میکروکلین به صورت آنهدرال (حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد حجمی)، پلاژیو کلاز به صورت ساب هدرال (حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد حجمی) می باشند. کانی مافییک در این نمونه بیوتیت می باشد که به شکل بلورهای آنهدرال

— **مونزو گرانیته پورفیروید:** مونزو گرانیته ها که بخش اعظم سنگ های پلوتونیک منطقه را تشکیل می دهند. دارای ساخت پورفیروید و رنگ خاکستری روشن هستند که دارای آنکلاوهای میکرو گرانولار مافییک، آنکلاوهای میکرو گرانولار فلسیک، آنکلاوهای سورمیکاسه و آنکلاوهای هورنفلسی می باشند (شکل ۲- A تا B و D تا F) بافت اصلی ساب هدرال گرانولار است، اما به دلیل فراوانی درشت بلورهای فلدسپات، بافت پورفیروید نیز در بسیاری از این سنگ ها قابل مشاهده است. بافت های فرعی همچون میکروپرتیت (شعله ای)، میرمکیت، زوئینگ، پوئی کیلیتی، گرافیک، خلیجی و غربالی می باشند. کانی های اصلی سنگ را کوارتز به صورت بلورهای آنهدرال (حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد حجمی)، پلاژیو کلاز به صورت آنهدرال تا ساب هدرال (حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد حجمی)، فلدسپات های آلکالن (ارتو کلاز و میکروکلین) به صورت آنهدرال تا ساب هدرال (حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد حجمی) و مسکوویت می باشند. کانی مافییک بیوتیت می باشد که به شکل بلورهای ساب هدرال (حدود ۱۵ درصد حجمی) مشاهده می شود. کانی های فرعی عبارتند از زیرکن، آپاتیت، تورمالین و کانی های کدر می باشند. از کانی های ثانویه می توان به سرسیت و کلریت اشاره کرد. زینوکریست های گارنت و آندالوزیت نیز در این سنگ ها دیده می شود. (شکل ۳- A).

— **گرانیتیویدهای هوللوکرات یا گرانیته های سفید:** این سنگ ها با ساخت توده ای و گاهی پورفیروید که در نمونه دستی به رنگ سفید شیری تا خاکستری روشن و گاهی صورتی رنگ (به دلیل حضور سوزن های روتیل)، دیده می شوند، دارای آنکلاوهای میکرو گرانولار مافییک می باشند (شکل ۲- A، C). بافت غالب در این نوع سنگ پورفیروید و گاهی آن هدرال گرانولار است. بافت های فرعی همچون میکروپرتیت، (شکل ۳- B)، و گرانوفیری نیز در این واحد مشاهده می شود. کانی های اصلی عبارتست از: کوارتز (۲۵-۲۰ درصد حجمی)، به صورت آنهدرال، پلاژیو کلاز سدیک (۶۰-۳۵ درصد حجمی)، به صورت یوهدرال تا ساب هدرال، ارتو کلاز با بافت پرتیتی و میکروکلین با ماکل شطرنجی (۲۵-۱۵ درصد حجمی)

ارتوپیروکسن، اسفن، آپاتیت، تورمالین و کانی‌های کدر می‌باشد. کانی‌های ثانویه شامل سرسیت و کلسیت می‌باشند. در بعضی از سنگ‌های دیوریتی مقدار کوارتز به بیش از پنج درصد افزایش می‌یابد که براساس رده‌بندی اشتريکایزن آنها را کوارتز دیوریت می‌نامیم (شکل ۳-۱).

– آنکلاوهای میکروگرانولار مافیک (MME): این آنکلاوها در نمونه دستی سبز تیره متمایل به سیاه یا خاکستری تیره هستند و به صورت آنکلاو، دایک و رگه‌های گسیخته در واحد مونزوگرانیت و لوکوگرانیت مشاهده می‌شوند (شکل ۲- A تا C و E). بافت اصلی میکروگرانولار و بافت‌های فرعی شامل پوئی کیلیتیک و غربالی می‌باشند. اکثر آنکلاوهای میکروگرانولار مافیک دارای ۵۰ تا ۷۰ درصد حجمی پلاژیو کلاز، ۲۵ تا ۴۰ درصد حجمی بیوتیت و ۵ تا ۱۰ درصد حجمی هورنبلند (شکل ۳- H) هستند. کانی‌های فرعی عبارتند از کوارتز، اورتو کلاز و میکروکلین، آپاتیت (گاهی به صورت سوزن‌های آپاتیت) زیرکن، اسفن، تورمالین و کانی‌های تیره می‌باشند.

– آنکلاوهای میکروگرانولار فلسیک (FME): این آنکلاوها، دانه‌ریز هستند و با همبری تدریجی به صورت آنکلاو درون گرانیت‌ها دیده می‌شوند (شکل ۲- F و شکل ۳- I). ترکیب کانی‌شناسی آنها مشابه مونزوگرانیت میزبان خود می‌باشند، اما دانه‌ریز ترند.

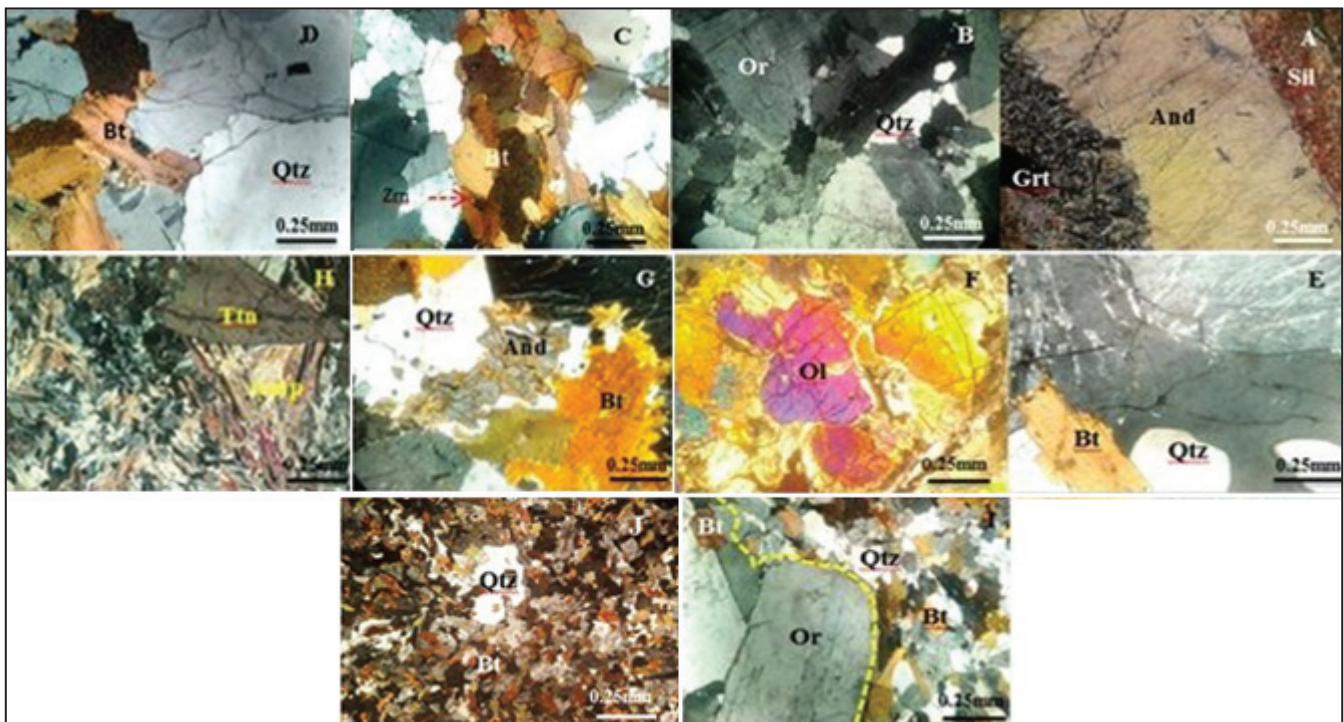
– آنکلاوهای سورمیکاسه (رستیتی): آنکلاوهای سورمیکاسه دارای بافت دگرگونی بارز، متورق و گاهی نیز چین خورده هستند. براحتی از گرانیتوید پورفیروید میزبان به دلیل داشتن پوسته بیوتیتی جدا می‌شوند. آنکلاوهای سورمیکاسه اساساً از بیوتیت تشکیل شده‌اند (شکل ۳- J)، بعلاوه حاوی مسکویت و گاهی دارای کانی‌های غنی از آلومینیم (سیلمانیت، آندالوزیت و گارنت) نیز می‌باشند. در واقع آنها از سازنده‌های گرانیتی (کوارتز، اورتو کلاز و پلاژیو کلاز) که به‌طور ثابت کمتر از ۳۰ درصد حجم آنکلاوها و گاهی کمتر از ۵ درصد حجم آنکلاوها را به خود اختصاص می‌دهند، فقیر گردیده‌اند. اما گاهی بلورهای درشتی از پلاژیو کلاز در این آنکلاوها مشاهده می‌شوند.

تا ساب‌هدرال (حدود ۵ تا ۱۰ درصد حجمی) می‌باشد و مسکویت نیز به صورت بلورهای آنهدرال (کمتر از ۵ درصد حجمی) می‌باشد. کانی‌های فرعی موجود در سنگ شامل زیرکن، آپاتیت، تورمالین و کانی‌های کدر هستند. سرسیت و کلریت نیز کانی ثانویه سنگ را تشکیل می‌دهند (شکل ۳- D).

– آلکالی فلدسپار گرانیت: این سنگ‌ها در نمونه دستی به رنگ خاکستری و از نظر کانی‌شناسی شبیه سینوگرانیت‌ها هستند ولی مقدار میکروکلین و مسکویت در آن بیشتر است. بافت اصلی در این سنگ‌ها ساب‌هدرال گرانولار و بافت‌های فرعی شامل میکرو پرتیتی، میرمکتی می‌باشند (شکل ۳- E). کانی‌های اصلی آنها کوارتز (۴۰-۳۰ درصد حجمی)، اورتو کلاز و میکروکلین (۷۰-۵۰ درصد حجمی)، و مقدار کمتری پلاژیو کلاز می‌باشند. کانی‌های فرعی آن آپاتیت، تورمالین، زیرکن، اپاک، بیوتیت و مسکویت می‌باشد. فلدسپارهای آنها به سرسیت و کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند.

– نوریت: این سنگ‌ها با ساخت توده‌ای، دانه درشت و به رنگ خاکستری مایل به سیاه می‌باشند (شکل ۲- D). بافت اصلی شامل ساب‌هدرال گرانولار، اینترگرانولار و پوئی کیلیتیک است. کانی‌های اصلی شامل: پلاژیو کلاز حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد حجمی، ارتوپیروکسن ۲۰ تا ۳۰ درصد حجمی، الیون حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد حجمی، بیوتیت ۱۰ تا ۱۵ درصد حجمی و هورنبلند با درصد کمتری در این سنگ‌ها دیده می‌شود. کانی‌های فرعی شامل آپاتیت، اسپینل و کانی‌های کدر می‌باشد (شکل ۳- F).

– دیوریت و کوارتز دیوریت: این سنگ‌ها با ساخت توده‌ای، به رنگ خاکستری روشن تا خاکستری تیره، دانه‌ریز تا دانه متوسط در مجاورت سنگ‌های فلسیک و مافیک و گاهی به صورت آنکلاو درون آنها مشاهده می‌شوند (شکل ۳- G). بافت اصلی شامل اینترگرانولار، ساب‌هدرال تا آنهدرال گرانولار است. کانی‌های اصلی شامل: پلاژیو کلاز به صورت آنهدرال تا ساب‌هدرال حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد حجمی، هورنبلند (سبز و قهوه‌ای) حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد حجمی و بیوتیت حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد حجمی می‌باشند. کانی‌های فرعی شامل: کوارتز، کلینوپیروکسن،



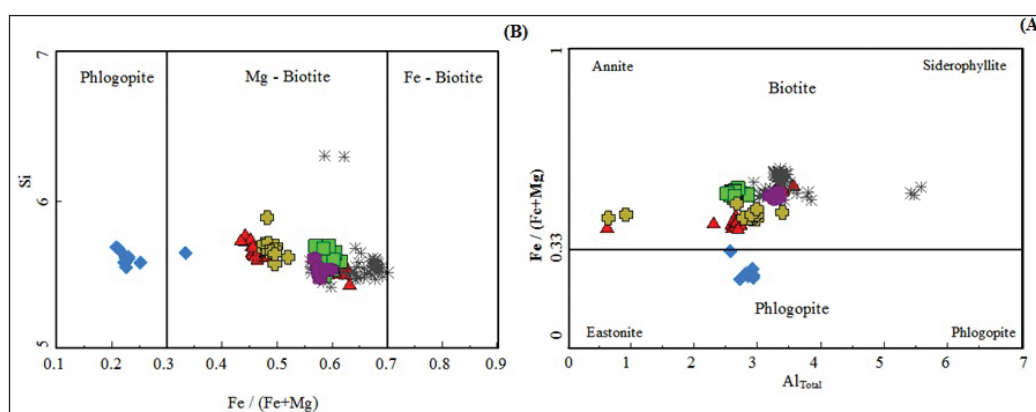
شکل ۳- (A) تصویر میکروسکوپی مونزوگرانیت پورفیروید (XPL)، (B) تصویر میکروسکوپی لوکوگرانیت (XPL)، (C) تصویر میکروسکوپی از لخته‌های بیوتیت در گرانودیوریت (XPL)، (D) تصویر میکروسکوپی سینوگرانیت (XPL)، (E) تصویر میکروسکوپی آلکالی فلدسپار گرانیت (XPL)، (F) تصویر میکروسکوپی نوریت (XPL)، (G) تصویر میکروسکوپی دیوریت (XPL)، (H) تصویر میکروسکوپی از آنکلاو میکروگرانولار مافیک (XPL)، (I) تصویر میکروسکوپی از مرز آنکلاو فلسیک و میزبان مونزوگرانیت پورفیروید (XPL)، (J) تصویر میکروسکوپی آنکلاو سورمیکاسه (XPL)، Ol: الیون؛ Pl: پلاژیو کلاز؛ Bt: بیوتیت؛ Px: پیروکسن؛ Qtz: کوارتز؛ And: آندالوزیت؛ Sil: سیلمانیت؛ Grt: گارنت؛ Ttn: تیتانیت؛ Amp: آمفیبول.

دیوریت، آنکلاو فلسیک، آنکلاو مافیک و سورمیکاسه در قلمرو بیوتیت (آنت - سیدروفیلیت)، و بیوتیت‌های موجود در نوریت‌ها در قلمرو فلوگوپیت (فلوگوپیت - استونیت) قرار گرفته‌اند (شکل ۴-۱). همچنین در نمودار $Si-Fe/(Fe+Mg)$ بیوتیت‌های موجود در مونزوگرانیت پورفیروید، دیوریت، آنکلاو فلسیک، آنکلاو مافیک و سورمیکاسه در قلمرو بیوتیت‌های منیزیم‌دار و بیوتیت‌های موجود در نوریت‌ها در قلمرو فلوگوپیت واقع شده‌اند (شکل ۴-۲). قرار گرفتن بیوتیت‌ها در گستره بیوتیت‌های منیزیم‌دار بیانگر تبلور اولیه اکسیدهای آهن در قالب مگنتیت و تیتانیم به صورت تیتانیت است. حضور این مجموعه کانی یعنی بیوتیت منیزیم‌دار، مگنتیت و تیتانیت دلالت بر گریزندگی نسبتاً بالای اکسیژن در ماگماست.

- آنکلاوهای هورنفلسی: این آنکلاوها زینولیت‌هایی از سنگ‌های رسوبی دگرگون‌شده هستند و معمولاً دارای اندازه درشت و توده‌ای هستند. این آنکلاوها اشکال زاویه‌دار نشان می‌دهند و به سختی از سنگ میزبان جدا می‌شوند که در منطقه مورد مطالعه دارای ترکیب هورنفلس فلدسپاتی و آندالوزیت-سیلیمانیت هورنفلس می‌باشند.

۵- شیمی کانی‌ها

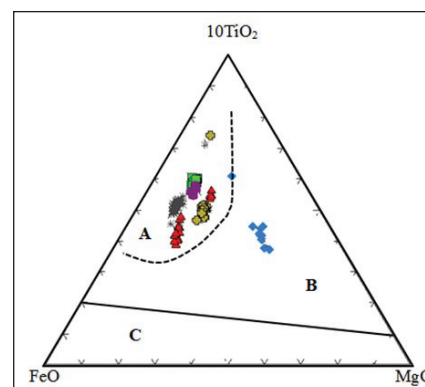
- شیمی کانی بیوتیت: ترکیب میکاهای مورد بررسی در نمودار $Al\ total - Fe/(Fe+Mg)$ در دو گروه قرار می‌گیرند. بیوتیت‌های موجود در مونزوگرانیت پورفیروید،



شکل ۴-۱) نمودار تفکیک بیوتیت از فلوگوپیت (Deer et al., 1991)، در چهارضلعی (ASPE). (B) رده‌بندی شیمیایی میکاهای گرانیتوئید الوند (Deer et al., 1991). آنکلاو میکروگرانولار مافیک، نوریت، آنکلاو سورمیکاسه، آنکلاو میکروگرانولار فلسیک، مونزوگرانیت، دیوریت.

دما بوده و با $X_{FeO} = [(FeO^*+MnO)/(FeO^*+MnO+MgO)]$ سنگ میزبان تغییر می‌کند. مقدار X_{FeO}^* در بیوتیت‌های مورد بررسی از ۰/۳۲ تا ۰/۸۱ متغیر بوده و بیوتیت‌های سنگ‌های حدواسط (آنکلاو مافیک) و بازیک (نوریت) به طور چشمگیری با فازهای اکسیدی $Fe-Ti$ همزیست‌اند که احتمالاً این ویژگی توانسته تا حدودی مقدار Ti آنها را افزایش دهد. معمولاً مقدار Ti در بیوتیت‌های همزیست با فازهای اکسیدی اشباع از Ti افزایش نشان می‌دهد (Dymek, 1983). بررسی‌های کانی‌شناسی حضور کانی‌های تیتان‌دار (اسفن و ایلمنیت) را تایید می‌کند و میزان کانی‌های مگنتیت و ایلمنیت از گرانیت تا نوریت روند افزایشی از خود نشان می‌دهد (جدول‌های ۱ تا ۴).

- تفکیک بیوتیت‌های اولیه از بیوتیت‌های ثانویه: طبق نمودار $FeO^*-10TiO_2-MgO$ می‌توان بیوتیت‌های ثانویه، اولیه یا ماگمایی را از بیوتیت‌های اولیه‌ای که دستخوش تعادل مجدد شده‌اند جدا کرد. بر اساس این نمودار بیوتیت‌های مونزوگرانیت پورفیروید، دیوریت، آنکلاوهای فلسیک، مافیک و سورمیکاسه نسبتاً غنی از FeO و TiO_2 بوده و در قلمرو بیوتیت‌های اولیه یا ماگمایی و بیوتیت‌های موجود در نوریت‌ها در محدوده بیوتیت‌های اولیه‌ای که دستخوش تعادل مجدد گردیده‌اند، قرار گرفته‌اند (شکل ۵). بیوتیت‌های نمونه‌های نوریت مقادیر FeO و TiO_2 بالاتری نسبت به گرانیت‌ها دارند. مقدار میانگین TiO_2 از حدود ۰/۰۶ (گرانیت) تا ۴/۴۷ (نوریت) متغیر است. بنابر نظر Nachit et al. (2005)، مقدار Ti بیوتیت وابسته به



شکل ۵- نمودار سه تایی $MgO-10TiO_2-FeO^*$.

A: Primary Biotite, B: Primary Biotite Re-equilibrated, C: Secondary Biotite, (Nachit et al., 2005). این نمودار نشان می‌دهد بیوتیت‌های مورد مطالعه اغلب اولیه هستند. آنکلاو میکروگرانولار مافیک، نوریت، آنکلاو سورمیکاسه، آنکلاو میکروگرانولار فلسیک، مونزوگرانیت، دیوریت.

جدول ۱- داده‌های تجزیه ریز کاو الکترونی بیوتیت نوریت، آنکلاو سورمیکاسه و آنکلاو میکروگرانولار فلسیک الوند (بر حسب درصد وزنی) و مقدار کاتیون‌های به‌دست آمده بر پایه ۱۲۲ اکسیژن.

Biotite in the Norite							Biotite in the Surmicaceous Enclaves						Biotite in the Felsic Microgranular Enclaves			
Sample	BNS1		BNS2		BNS3		BESS4		BESS5		BESS6		BEFS1		BEFS2	
	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim
SiO ₂	37.1	38.3	37.6	39.2	38.1	38.3	25.3	38.2	37.1	40.4	36.3	33.3	35.4	35.3	35.7	35.6
TiO ₂	4.47	1.78	2.02	1.76	2.11	2.13	2.2	2.7	2.96	2.72	2.96	2.43	3.56	3.54	3.44	3.91
Al ₂ O ₃	14.7	16.8	16.8	16.4	16.6	16.9	16	17.3	16.5	16.4	16.4	15.3	18.8	18.4	18.3	17.9
Cr ₂ O ₃	0.19	0	0.03	0.03	0	0.02	0.01	0	0.01	0	0	0.02	0	0.02	0.01	0.05
V ₂ O ₃	0.13	0	0	0.06	0.04	0.08	0.17	0.12	0.06	0.06	0.06	0.03	0.03	0.1	0.12	0.15
FeO	13.5	9.97	10.3	9.53	10.2	10.2	13.6	18.4	18.4	18.8	18.4	18.3	20.5	20.3	20.2	20.2
MnO	0.1	0.03	0.03	0.06	0	0.06	0.13	0.18	0.17	0.15	0.24	0.1	0.24	0.12	0.12	0.18
MgO	15.1	19.4	19.6	20.3	19.1	18.9	7.43	11.3	10.9	11.3	10.7	9.44	8.39	7.63	8.36	8.12
NiO	0.02	0.01	0.05	0.09	0	0.09	0.04	0	0	0.03	0.03	0	0.02	0.01	0.03	0.11
CoO	0.01	0.07	0.06	0.02	0.06	0	0.03	0	0.03	0.03	0.06	0.04	0.07	0.02	0.05	0.1
CaO	0.01	0.05	0.06	0.12	0.02	0.09	12.7	0.09	0.16	0.05	0.02	0.43	0.11	0.1	0.05	0.07
Na ₂ O	0.2	0.74	0.82	0.79	0.84	0.84	0.14	0.23	0.22	0.13	0.21	0.22	0.09	0.17	0.12	0.12
K ₂ O	9.64	8.79	8.7	8.2	8.78	8.69	6.03	9.21	8.23	9.55	9.48	8.36	9.49	9.37	9.84	9.85
F	0.02	0.13	0.1	0.33	0.36	0.17	0.2	0.17	0.21	0.14	0.15	0.17	0	0	0.25	0.35
Cl	0.11	0.07	0.11	0.15	0.1	0.07	1.07	0.58	0.03	0.58	0.29	0.39	0.22	0.26	0.21	0.26
Total	95.2	96.2	96.3	97	96.3	96.5	85	98.4	94.9	100	95.3	88.5	96.9	95.3	96.8	96.9
Si	5.54	5.52	5.43	5.58	5.51	5.5	4.55	5.62	5.62	5.82	5.55	5.52	5.35	5.42	5.42	5.42
Al _{IV}	2.45	2.47	2.56	2.41	2.48	2.49	3.4	2.38	2.38	2.19	2.45	2.49	2.64	2.57	2.57	2.57
Al _{VI}	0.13	0.37	0.29	0.33	0.34	0.37	0	0.61	0.56	0.6	0.51	0.5	0.7	0.76	0.7	0.63
Ti	0.5	0.19	0.22	0.18	0.23	0.23	0.29	0.29	0.33	0.29	0.34	0.3	0.4	0.41	0.39	0.44
Fe(ii)	1.69	1.2	1.24	1.13	1.23	1.22	2.04	2.25	2.32	2.26	2.34	2.53	2.59	2.6	2.56	2.57
Mn	0.01	0	0	0	0	0	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02
Mg	3.36	4.16	4.22	4.31	4.1	4.06	1.99	2.48	2.47	2.42	2.43	2.33	1.89	1.74	1.89	1.84
Ca	0	0	0	0.01	0	0.01	2.44	0.01	0.02	0	0	0.07	0.01	0.01	0	0.01
Na	0.05	0.2	0.22	0.22	0.23	0.23	0.04	0.06	0.06	0.03	0.06	0.07	0.02	0.05	0.03	0.03
K	1.83	1.61	1.6	1.49	1.61	1.59	1.38	1.72	1.59	1.75	1.85	1.76	1.83	1.83	1.9	1.91

جدول ۲- داده‌های تجزیه ریز کاو الکترونی بیوتیت مونزوگرانیت الوند (بر حسب درصد وزنی)، و مقدار کاتیون‌های به‌دست آمده بر پایه ۱۲۲ اکسیژن.

Biotite in the Monzogranite													
Sample	BMS1		BMS2		BMS3		BMS4		BMS5		BMS6		BMS7
	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	0	Core	Rim
SiO ₂	34.9	35.4	35.2	35.4	35.5	35.5	34.8	34.7	35.2	34.8	33.9	47.9	47
TiO ₂	3.18	3.1	3.25	3.06	3.08	3.15	2.94	3.02	3.07	3.28	3.68	0.35	0.55
Al ₂ O ₃	18.5	18.4	18.2	18.5	18.8	18.5	18	18.2	17.9	18.1	17.8	34.8	34.8
Cr ₂ O ₃	0.04	0	0	0.04	0	0.05	0.01	0.04	0.01	0	0.03	0.02	0.02
V ₂ O ₃	0	0.22	0.14	0.13	0.01	0.08	0.06	0.11	0.1	0.07	0.16	0.11	0.05
FeO	23.7	21.5	22.4	23.1	23.3	23.4	23	22	22.6	22.8	19.3	1.61	1.63
MnO	0.34	0.41	0.27	0.43	0.53	0.45	0.43	0.42	0.42	0.28	0.13	0.01	0.04
MgO	5.62	5.79	5.85	6.04	6.01	6.24	6.09	5.96	6.05	6.04	7.83	0.62	0.65
NiO	0.02	0.04	0	0	0.02	0.04	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04	0	0.03
CoO	0.07	0.01	0.04	0.04	0.06	0.06	0.06	0	0	0.04	0.08	0.02	0.02

Sample	Biotite in the Monzogranite												
	BMS1		BMS2		BMS3		BMS4		BMS5		BMS6		BMS7
	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	0	Core	Rim
CaO	0.03	0	0	0	0.05	0.01	0	0	0	0	0.06	0.04	0.01
Na ₂ O	0.12	0.05	0.08	0.13	0.09	0.1	0.15	0.11	0.13	0.11	0.25	0.41	0.38
K ₂ O	10	9.95	9.66	9.82	9.65	9.5	9.82	9.76	9.69	9.99	9.66	8.56	8.68
F	0.61	0.54	0.83	0.52	0.78	0.72	0.65	1.09	0.98	0.56	0.07	0.54	0.29
Cl	0.3	0.24	0.26	0.23	0.29	0.3	0.24	0.33	0.29	0.31	0.16	0.01	0
Total	97.4	95.7	96.2	97.4	98.2	98.1	96.3	95.8	96.4	96.4	93.1	94.9	94.1
Si	5.4	5.51	5.48	5.45	5.43	5.43	5.44	5.45	5.48	5.42	5.36	5.35	6.28
Al _{IV}	2.61	2.49	2.52	2.56	2.57	2.57	2.56	2.55	2.52	2.58	2.64	1.66	1.72
Al _{VI}	0.77	0.89	0.81	0.79	0.81	0.76	0.74	0.82	0.77	0.74	0.67	3.78	3.76
Ti	0.37	0.36	0.38	0.35	0.35	0.36	0.35	0.36	0.36	0.38	0.44	0.04	0.06
Fe(ii)	3.06	2.79	2.92	2.97	2.97	3	3	2.89	2.95	2.97	2.55	0.18	0.18
Mn	0.05	0.05	0.04	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04	0.02	0	0
Mg	1.3	1.34	1.36	1.39	1.37	1.42	1.42	1.39	1.41	1.4	1.85	0.12	0.13
Ca	0.01	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0
Na	0.04	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03	0.05	0.03	0.04	0.03	0.08	0.11	0.1
K	1.97	1.98	1.92	1.93	1.88	1.85	1.96	1.95	1.93	1.98	1.95	1.45	1.48

جدول ۳- داده‌های تجزیه ریزکاو الکترونی بیوتیت آنکلاو میکروگرانولار مافییک الوند (بر حسب درصد وزنی)، و مقدار کاتیون‌های به‌دست آمده بر پایه ۲۲ اکسیژن.

Sample	Biotite in the Mafic Microgranular Enclaves													
	BEMS1		BEMS2		BEMS3		BEMS4	BEMS5	BEMS6		BEMS7		BEMS8	
	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	0	0	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim
SiO ₂	35.4	34.6	36.2	35.9	35.3	36.1	37.1	35.4	36.2	36.3	35.8	35.2	35.9	35.9
TiO ₂	4.49	4.49	4.57	4.5	4.62	4.36	1.83	4.07	4.65	4.37	4.42	4.73	4.39	4.48
Al ₂ O ₃	15.1	15.6	14.4	14.4	14.8	14.3	16.8	13.9	14.5	14.5	14.6	14.7	14.6	14.5
Cr ₂ O ₃	0	0.01	0.02	0.02	0	0.02	0.06	0	0	0	0	0	0.02	0
V ₂ O ₃	0.23	0.18	0.15	0.17	0.03	0.22	0	0.2	0.25	0.23	0.02	0.1	0.22	0.21
FeO	22	22.2	22.6	23.9	23.9	22.3	15.5	22.6	22.7	21.5	22.9	23.1	23.1	21.6
MnO	0.14	0.17	0.03	0.19	0.1	0.09	0.06	0.2	0.21	0.15	0.1	0.11	0.13	0.07
MgO	8.55	8.78	8.98	8.8	8.87	8.68	13.8	8.84	8.64	9.05	8.58	8.04	8.4	8.61
NiO	0	0.08	0	0.01	0.07	0	0.02	0	0	0	0	0	0.03	0.04
CoO	0.07	0.02	0.06	0.09	0.09	0.04	0.06	0.05	0.07	0.07	0.01	0.03	0.03	0.02
CaO	0.07	0.09	0	0	0	0.05	0.06	0.06	0	0.01	0	0.05	0.03	0.03
Na ₂ O	0.24	0.12	0.14	0.14	0.26	0.14	0.22	0.09	0.1	0.09	0.14	0.09	0.21	0.06
K ₂ O	9.54	9.39	9.83	9.75	9.56	9.45	7.97	9.8	9.61	9.7	9.64	9.78	9.28	9.72
F	0.36	0.2	0.11	0.43	0.29	0.45	0.39	0.31	0.12	0.34	0.05	0.11	0.17	0.2
Cl	0.3	0.22	0.2	0.2	0.15	0.26	0.33	0.24	0.22	0.22	0.2	0.17	0.19	0.12
Total	96.6	96.2	97.3	98.6	98	96.4	94.3	95.8	97.2	96.6	96.4	96.3	96.6	95.5
Si	5.49	5.37	5.55	5.5	5.42	5.6	5.61	5.55	5.56	5.6	5.53	5.48	5.55	5.58
Al _{IV}	2.52	2.63	2.45	2.5	2.58	2.4	2.4	2.45	2.44	2.4	2.47	2.52	2.45	2.42
Al _{VI}	0.25	0.24	0.16	0.1	0.1	0.2	0.6	0.13	0.18	0.23	0.19	0.18	0.2	0.24
Ti	0.52	0.53	0.53	0.52	0.53	0.51	0.21	0.48	0.54	0.51	0.51	0.55	0.51	0.53
Fe(ii)	2.86	2.89	2.9	3.06	3.06	2.89	1.95	2.97	2.92	2.77	2.96	3.01	2.99	2.81
Mn	0.02	0.02	0	0.03	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01

	Biotite in the Mafic Microgranular Enclaves													
Sample	BEMS1		BEMS2		BEMS3		BEMS4	BEMS5	BEMS6		BEMS7		BEMS8	
	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	0	0	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim
Mg	1.98	2.03	2.05	2.01	2.03	2.01	3.11	2.07	1.98	2.08	1.98	1.87	1.94	2
Ca	0.01	0.02	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0.01	0.01	0.01
Na	0.07	0.04	0.04	0.04	0.08	0.04	0.06	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.06	0.02
K	1.89	1.86	1.92	1.9	1.87	1.87	1.53	1.96	1.89	1.91	1.9	1.94	1.83	1.93

جدول ۴- داده‌های تجزیه ریزکاو الکترونی بیوتیت دیوریت الوند (بر حسب درصد وزنی)، و مقدار کاتیون‌های به دست آمده بر پایه ۲۲ اکسیژن.

Sample	Biotite in the Diorite									
	BDS1		BDS2		BDS3		BDS4		BDS5	
	Core	Rim	Core	Rim	core	0	Core	Rim	Core	Rim
SiO ₂	35.7	35.21	35.81	34.87	35.16	34.64	37.5	35.27	37.35	32.85
TiO ₂	2.07	2.02	2.26	2.17	2.61	2.18	3.74	3.62	3.65	3.53
Al ₂ O ₃	18.12	18.89	18.68	19.92	18.35	18.6	15.23	14.9	15.39	13.52
Cr ₂ O ₃	0.02	0	0.02	0.02	0.01	0	0	0.03	0	0.03
V ₂ O ₃	0.19	0.27	0.03	0.08	0.1	0.12	0.06	0.12	0.13	0.07
FeO	21.79	22.36	21.85	22.52	21.86	21.89	18.64	18.04	18.3	18.1
MnO	0.43	0.3	0.32	0.38	0.52	0.42	0.09	0.09	0.09	0.08
MgO	7.95	7.71	7.96	7.35	7.32	7.38	12.08	11.69	12.15	10.25
NiO	0	0	0	0	0.02	0.02	0	0.07	0.07	0.05
CoO	0.04	0.03	0	0.02	0.08	0.04	0.02	0.03	0.06	0.04
CaO	0.02	0.01	0.01	0.04	0	0.05	0.02	0.07	0.05	0.23
Na ₂ O	0.33	0.29	0.35	0.37	0.14	0.11	0.14	0.17	0.2	0.18
K ₂ O	9.03	9.09	9.02	9.08	9.5	9.65	9.51	9.21	9.63	9.08
F	0.6	0.63	0.65	0.64	0.47	0.55	0	0	0.05	0.21
Cl	0.5	0.54	0.45	0.36	0.64	0.62	0.13	0.18	0.2	0.24
Total	96.79	97.35	97.4	97.8	96.77	96.28	97.17	93.49	97.31	88.46
Si	5.48	5.4	5.45	5.3	5.42	5.38	5.59	5.5	5.57	5.49
Al _{IV}	2.51	2.59	2.54	2.69	2.57	2.61	2.4	2.49	2.42	2.5
Al _{VI}	0.77	0.81	0.8	0.88	0.76	0.79	0.27	0.24	0.28	0.15
Ti	0.23	0.23	0.25	0.24	0.3	0.25	0.42	0.42	0.41	0.44
Fe(ii)	2.8	2.86	2.78	2.86	2.82	2.84	2.32	2.35	2.28	2.53
Mn	0.05	0.03	0.04	0.04	0.06	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	1.82	1.76	1.8	1.66	1.68	1.71	2.68	2.71	2.7	2.55
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0.04
Na	0.09	0.08	0.1	0.11	0.04	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05
K	1.77	1.78	1.75	1.76	1.87	1.91	1.81	1.83	1.83	1.93

تشکیل بیوتیت‌ها کاربرد دارد. دما بیشترین تاثیر را بر روی کنترل مقدار بیوتیت دارد و افزایش فشار تاثیر متضادی دارد به این معنی که مقدار Ti جایگزین شده، با افزایش فشار کاهش می‌یابد (Henry et al., 2005). هنری و همکاران فرمول این دماسنج را به صورت معادله زیر ارائه می‌کنند.

$$T(^{\circ}\text{C}) = \{(\text{Ln}(\text{Ti}) + 2.3594 + 1.7283 (\text{XMg})^3) / (4.6482 * 10^{-9})\}$$

این معادله برای $T=480-800^{\circ}\text{C}$, $\text{Ti}=0.04-0.60$ و $\text{XMg}=0.275-1.00$ معتبر می‌باشد (Henry et al., 2005). مقدار تیتانیم موجود در بیوتیت‌های سنگ‌های دیوریتی مورد مطالعه بین ۰/۲۲ تا ۰/۴۴ و میزان XMg در این سنگ‌ها برابر ۰/۳۶ تا ۰/۵۶ و دمای محاسبه شده ۵۹۸ تا ۷۲۴ درجه سانتی گراد می‌باشد. مقدار تیتانیم در نمونه‌های نوریتی ۰/۱۸ تا ۰/۵۰ و میزان XMg ۰/۶۶ تا ۰/۷۹ و دمای محاسبه شده ۶۸۸ تا ۷۷۶ می‌باشد. مقدار تیتانیم در آنکلاو میکروگرانولار مافیک ۰/۴۸ تا ۰/۵۵ و XMg در این سنگ‌ها ۰/۳۸ تا ۰/۴۲ و دمای محاسبه شده ۶۳۵ تا ۷۳۷ درجه سانتی گراد می‌باشد، مقدار تیتانیم در آنکلاو سورمیکاسه ۰/۲۹ تا ۰/۳۴ و میزان XMg ۰/۴۷ تا ۰/۵۲ و دمای محاسبه شده ۶۶۲ تا ۶۸۷ درجه سانتی گراد می‌باشد، مقدار تیتانیم در آنکلاو میکروگرانولار فلیسیک ۰/۳۹ تا ۰/۴۴، میزان XMg ۰/۴ تا ۰/۴۲ و دمای محاسبه شده ۶۹۴ تا ۷۱۲ درجه سانتی گراد می‌باشد و میزان تیتانیم در مونزوگرانیت پورفیروئید ۰/۰۳ تا ۰/۵۳ و میزان XMg ۰/۲۹ تا ۰/۴۲ و دمای محاسبه شده ۶۶۲ تا ۷۳۴ درجه سانتی گراد می‌باشد، که با مقادیر تعریف شده توسط Henry et al. (2005) مطابقت دارد. دمای حاصل از روش دماسنجی Ti در تک کانی بیوتیت در جدول ۶ ارائه شده است.

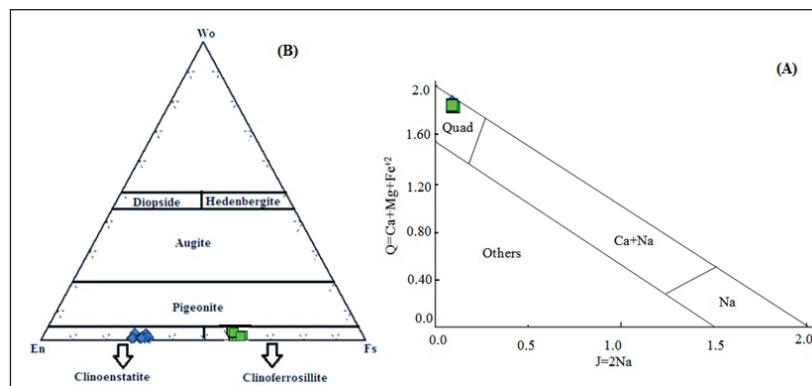
— **شیمی کانی ارتوپروکسن:** طبقه‌بندی پروکسن‌ها با توجه به قرارگیری کاتیون‌ها در مکان M1 و M2 صورت می‌گیرد و در طبقه‌بندی گسترده‌ای به ۴ گروه ۱- پروکسن‌های (Ca-Mg-Fe) Quad، ۲- پروکسن‌های Ca-Na، ۳- پروکسن‌های Na و ۴- دیگر پروکسن‌ها (Other) تقسیم‌بندی می‌شوند (Morimoto et al., 1988). با توجه به نمودار شکل ۶-A، پروکسن‌های مورد مطالعه در نمودار Q-J در محدوده آهن- منیزیم- کلسیم (Quad) قرار گرفته‌اند. در این نمودار شاخص‌های J و Q مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$Q = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Fe}^{2+} \quad J = 2\text{Na} + \text{R} (\text{R}: \text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Cr}^{3+}, \text{Sc}^{3+})$$

برای تفکیک پروکسن‌های گروه Ca-Mg-Fe نمونه‌ها از نمودار شکل ۶-B استفاده شد. چنانچه در نمودار Wo-En-Fs (Morimoto et al., 1988)، ملاحظه می‌شود پروکسن‌های نمونه نوریت دارای ترکیب ارتوپروکسن (کلینوانستاتیت)، و پروکسن‌های نمونه‌های آنکلاو میکروگرانولار مافیک ترکیب کلینوفروسلیت دارند که نتایج ریز کاو الکترونی در جدول ۵ ارائه شده است.

۶- ارزیابی و سنجش شرایط تبلور ماگما

— **دماسنجی با استفاده از تک کانی بیوتیت:** از ترکیب کانی‌های معین و فازهای کانی‌های همراه در تعیین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی (دما و فشار تبلور و فوگاسیته اکسیژن) حاکم در حین تبلور ماگما استفاده می‌شود. کانی بیوتیت از میزبان‌های مهم Ti در سنگ‌های آذرین به‌شمار می‌رود. از این رو دماسنج Ti در بیوتیت برای دمای



شکل ۶- (A) طبقه‌بندی پروکسن‌های نوریت و آنکلاو میکروگرانولار مافیک در نمودار Q-J (Morimoto et al., 1988).

(B) نمایش ترکیب پروکسن‌های نوریت و آنکلاو میکروگرانولار مافیک در نمودار Wo-En-Fs (Morimoto et al., 1988).

■ آنکلاو میکروگرانولار مافیک، ◆ نوریت.

جدول ۵- داده‌های تجزیه ریز کاو الکترونی ارتوپروکسن‌های نوریت و آنکلاو میکروگرانولار مافیک الوند (بر حسب درصد وزنی)، و مقدار کاتیون‌های به‌دست آمده بر پایه ۱۶ اکسیژن.

Orthopyroxene in the Norite									Orthopyroxene in the Mafic Microgranular Enclaves								
Sample	ONS1		ONS2		ONS3		ONS4		OEMS1		OEMS2		OEMS3		OEMS4	OEMS5	
	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	0	Core	Rim
SiO ₂	54.8	54.2	54.3	54.4	54.4	55.3	55	54.1	50.5	50.8	50.9	51.3	49.8	50.9	51.2	50.8	50.9
TiO ₂	0.04	0.03	0.18	0.01	0.12	0.02	0.02	0	0.18	0.04	0.1	0.02	0.18	0.31	0.18	0.02	0.02
Al ₂ O ₃	0.17	0.21	0.97	0.46	1.24	0.4	0.18	1.01	0.36	0.27	0.2	0.22	0.45	0.42	0.34	0.17	0.34
Cr ₂ O ₃	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01

ادامه جدول ۵

Sample	Orthopyroxene in the Norite								Orthopyroxene in the Mafic Microgranular Enclaves								
	ONS1		ONS2		ONS3		ONS4		OEMS1		OEMS2		OEMS3		OEMS4	OEMS5	
	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	0	Core	Rim
V ₂ O ₃	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.07	0.03	0.00	0.00	0.00	0.1	0.05	0.08	0.00	0.03
FeO	20	20	20.2	21.3	18.2	18.6	19.6	19.6	35.6	35.3	35.3	36.3	33.8	35.4	35.2	36.5	36.8
MnO	0.49	0.34	0.45	0.52	0.49	0.5	0.53	0.49	1.15	1.53	1.71	1.53	1.55	1.3	1.75	1.68	1.48
MgO	25.9	25.6	24.6	24.8	26.6	27.5	25.8	25	12.9	13.2	13	12.9	12.8	13.2	13.0	12.2	12.5
NiO	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.06	0.01	0.05
CoO	0.07	0.01	0	0.03	0.06	0.02	0.03	0.11	0.04	0.07	0.06	0.04	0.03	0.02	0.12	0.06	0.08
CaO	0.14	0.09	0.79	0.19	1.00	0.16	0.12	0.21	1.41	0.54	0.6	0.51	1.47	1.31	1.09	0.7	0.54
Na ₂ O	0.03	0.01	0.03	0.05	0.05	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.01	0.09	0.00	0.01	0.00	0.01
K ₂ O	0.03	0.03	0.04	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.01	0.02	0.01	0.02	0.04	0.00	0.04	0.04
F	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.08	0.00	0.00	0.22	0.12
Cl	0.01	0.04	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.04	0.01	0.01
Total	102	101	102	102	102	103	101	101	102	102	102	103	100	103	103	102	103
Si	1.98	1.98	1.97	1.98	1.95	1.97	1.99	1.98	1.98	1.99	1.99	1.99	1.98	1.97	1.99	2.0	1.99
Ti	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Al	0.01	0.01	0.04	0.02	0.05	0.02	0.01	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.05	0.06	0.05	0.05	0.04	0.06	0.06	0.05
Mg	1.4	1.4	1.33	1.35	1.42	1.46	1.39	1.36	0.75	0.77	0.76	0.75	0.76	0.76	0.75	0.71	0.73
Ca	0.01	0	0.03	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.06	0.02	0.03	0.02	0.06	0.05	0.05	0.03	0.02
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe(ii)	0.56	0.57	0.59	0.6	0.47	0.48	0.58	0.59	1.12	1.15	1.15	1.17	1.1	1.12	1.14	1.2	1.18
Fe(iii)	0.04	0.04	0.02	0.05	0.08	0.07	0.02	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.00	0.00	0.02
Wo	0.27	0.16	1.55	0.37	1.9	0.29	0.23	0.41	2.94	1.13	1.26	1.06	3.12	2.72	2.28	1.47	1.12
En	69.1	69.1	66.9	66.8	70.4	71.8	69.4	68.6	37.4	38.4	38	37.5	37.9	38	37.6	35.7	36.5
Fs	30.6	30.7	31.5	32.7	27.6	27.8	30.4	30.4	59.6	60.4	60.6	61.4	58.7	59.3	60.1	62.9	62.4
Ac	0.1	0.03	0.11	0.16	0.16	0.08	0.00	0.00	0.03	0.00	0.12	0.03	0.34	0.00	0.03	0.00	0.05

جدول ۶- نتایج ترمومتري محاسبه شده با استفاده از تک کانی بیوتیت برای سنگ‌های توده پلوتونیک الوند.

sample	Norite						Surmicaceous Enclaves			
	N1	N1-2	N2	N2-2	N3	N3-2	S1	S1-2	S2	S2-2
Ti	0.503	0.192	0.22	0.189	0.23	0.231	0.297	0.298	0.338	0.294
Xmg	0.665	0.775	0.772	0.791	0.768	0.768	0.493	0.523	0.514	0.517
T(°C)	776	688	706	693	711	712	662	669	687	666
Ti Xmg T(°C)	Surmicaceous Enclaves		Felsic Microgranular Enclaves				Monzogranite			
	S3	S3-2	F1	F1-2	F2	F2-2	M1	M1-2	M2	M2-2
	0.341	0.304	0.405	0.41	0.393	0.449	0.37	0.363	0.381	0.354
	0.508	0.479	0.421	0.401	0.425	0.418	0.297	0.324	0.317	0.318
T(°C)	687	663	698	697	694	712	671	671	678	666
Ti Xmg T(°C)	Monzogranite									
	M3	M3-2	M4	M4-2	M5	M5-2	M6	M7-2	M8	M8-2
	0.353	0.362	0.345	0.357	0.36	0.384	0.438	0.523	0.525	0.527
	0.315	0.321	0.32	0.325	0.323	0.32	0.42	0.408	0.413	0.414
T(°C)	665	670	662	668	669	679	709	732	733	734
Ti Xmg T(°C)	Monzogranite				Mafic Microgranular Enclaves					
	M9	M9-2	Ma1	Ma1-2	Ma2	Ma2-2	Ma3	Ma3-2	Ma4	Ma4-2
	0.518	0.533	0.509	0.208	0.48	0.538	0.506	0.514	0.554	0.511
	0.396	0.398	0.409	0.614	0.41	0.404	0.428	0.4	0.382	0.392
T(°C)	730	734	729	635	721	735	730	729	737	727
Ti Xmg T(°C)	Mafic Microgranular Enclaves			Diorite						
	Ma5	D1	D1-2	D2	D2-2	D3	D3-2	D4	D4-2	D5
	0.525	0.239	0.233	0.258	0.248	0.303	0.256	0.42	0.424	0.41
	0.415	0.394	0.38	0.393	0.367	0.373	0.375	0.535	0.535	0.541
T(°C)	734	605	598	620	609	646	616	723	724	721
Ti Xmg T(°C)	Diorite									
	D5-2									
	0.444									
	0.502									
T(°C)	724									

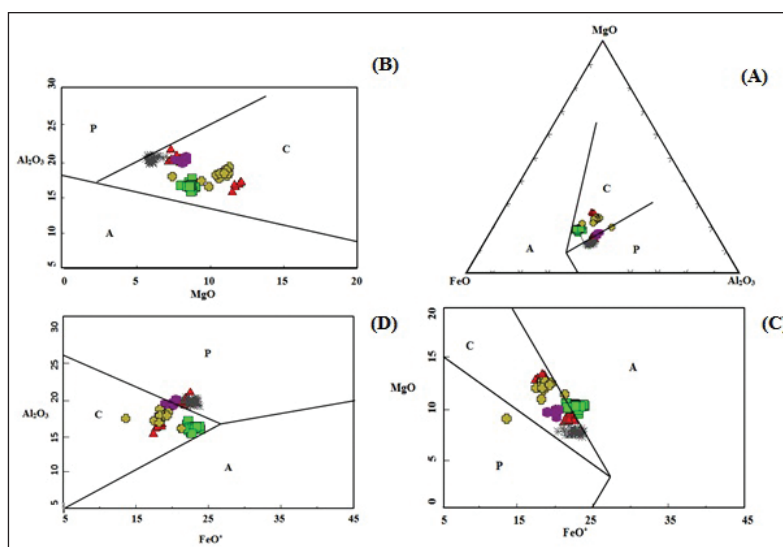
۷- تعیین سری ماگمایی و محیط زمین‌ساختاری

فرورانشی وابسته‌اند. این یافته خاستگاه ماگمایی وابسته به فرورانش گرانیتی الوند را تأکید می‌کند. در نمودار Al_2O_3 نسبت به FeO^* که در شکل ۷ نشان داده شده دو گروه C و P از لحاظ داشتن FeO تقریباً مشابه‌اند و در مقدار ثابت FeO^* افزایش Al_2O_3 باعث جدایش بین این دو گروه می‌شود. در گروه A، روند افزایش FeO^* با کاهش Al_2O_3 همراه بوده که این ناهمخوانی با جایگزینی Al و Fe^{2+} در جایگاه هشت وجهی صورت می‌گیرد. بر همین اساس نمونه‌های گرانیتی الوند در گستره آهکی - قلیایی قرار می‌گیرند. در نمودار Al_2O_3 نسبت به MgO دو گروه C, P عموماً روند روند افزایش MgO با کاهش Al_2O_3 نشان می‌دهد که این ناهمخوانی به جایگزینی منیزیم و آلومینیم در جایگاه هشت وجهی بین بیوتیت‌ها مربوط می‌شود (Abdel-Rahman, 1994). بر اساس این نمودار هم بیوتیت‌های مورد بررسی در گستره آهکی - قلیایی قرار می‌گیرند (شکل ۷). بر اساس نتایج نمودار FeO^* نسبت به MgO (Abdel-Rahman, 1994) نیز سنگ‌های گروه C غنی از منیزیم بوده و به طور مشابه مقدار FeO^* در هر دو گروه P, C تقریباً ثابت است و میزان MgO باعث جدایی این دو گروه می‌شود. بین دو گروه A و C یک جایگزینی $FeO-MgO$ کنترل شده در ترکیبات

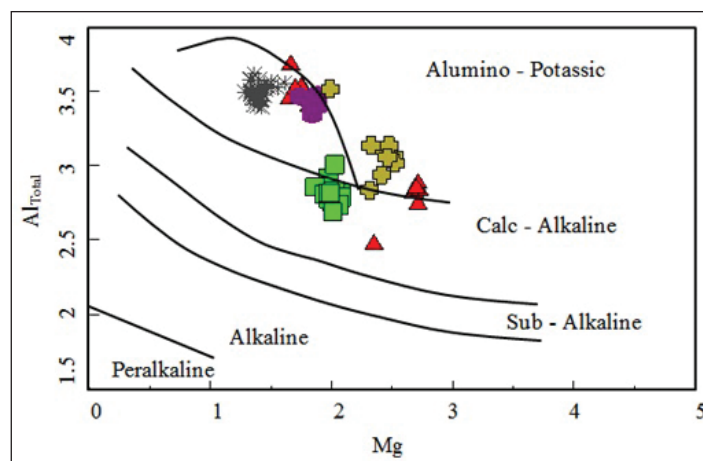
با توجه به اینکه بیوتیت‌ها ماهیت و شرایط فیزیکوشیمیایی ماگما را نشان می‌دهند و ترکیب بیوتیت در مجموع تابع ترکیب و شرایط تبلور ماگمایی است که از آن متبلور شده است بنابراین می‌توان از آن به عنوان یک معیار مناسب برای شناسایی محیط زمین‌ساختی گرانیت‌ها استفاده کرد. (Abdel-Rahman 1994) با استفاده از آنالیزهای سه اکسید MgO , Al_2O_3 و FeO^* در کانی بیوتیت یک نمودار مثلثی ارائه داد که سنگ‌های گرانیتی را در سه گروه دسته‌بندی می‌کند: سنگ‌های قلیایی و ناکوهرایی (A)، سنگ‌های پرآلومین که بیوتیت‌های آنها از آلومینیم غنی و به سوی قطب سیدروفیلیتیک تمایل دارند و معمولاً همراه با مسکوویت و یا دیگر کانی‌های آلومینوسیلیکات مثل گارنت، کردیریت و یا آندالوزیت هستند و شامل گرانیت‌های برخوردی نوع S می‌شوند (P) و گرانیت‌های کوهزایی آهکی - قلیایی از نوع I که به طور متوسط غنی از منیزیم بوده و معمولاً همراه با آمفیبول کلسیم‌دار و یا پیروکسن کلسیم‌دار و وابسته به فرورانش هستند (C). در شکل ۷ (A-D) موقعیت نمونه‌ها نشان داده شده است. اکثر نمونه‌های بیوتیت گرانیتی الوند از نوع گرانیت‌های نوع I هستند و در پهنه C قرار می‌گیرند که به قلمرو بیوتیت در گرانیتی‌های آهکی - قلیایی

سنگ‌های گستره مورد بررسی در گستره منیزیم بالا و آهکی - قلیایی قرار می‌گیرند (شکل ۸) که با نتایج روش Abdel-Rahman (1994) کاملاً همخوانی دارد. همچنین بر اساس ترکیب شیمیایی ارتوپروکسن، نمونه‌های نوریت و آنکلاو میکروگرانولار مافیک طبق شکل A-9 (Le Bas., 1962)، در محدوده ساب آلکالن و طبق شکل B-9 به دلیل پایین بودن میزان TiO_2 در محدوده کالک آلکالن قرار گرفته‌اند، که پایین بودن میزان Ti در فرمول ساختمانی پروکسن‌های مورد مطالعه، ویژگی پروکسن‌های موجود در سنگ‌های آذرین کمان آتشفشانی را تداعی می‌کند.

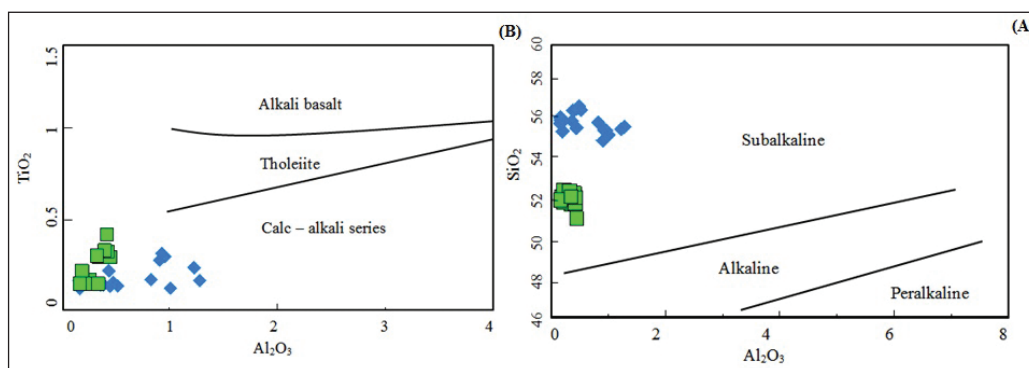
بیوتیت وجود دارد. براساس این نمودار نمونه‌های بیوتیت گرانیتوئید الوند نسبت به منیزیم غنی شدگی نشان می‌دهند و در گستره آهکی - قلیایی قرار می‌گیرند (شکل ۷). به طور کلی بیوتیت‌های آهکی - قلیایی با افزایش MgO، کاهش نسبی در مقدار Al_2O_3 نشان می‌دهند که می‌تواند در اثر فرایندهای تبلور بیوتیت‌های غنی از Al در گدازه‌های آلومینیم‌دار باشد و نیز ناهمخوانی Al_2O_3 و FeO را می‌توان ناشی از رفتار مشابه بین آهن و منیزیم دانست. در نمودارهای مورد بررسی با افزایش Al_2O_3 میزان MgO و FeO^* کاهش می‌یابد. در نمودار $Al_{(tot)}$ -Mg (Nachit et al., 2005) نیز



شکل ۷- تعیین سری ماگمایی توده‌های مورد بررسی براساس ترکیب شیمیایی بیوتیت در نمودارهای جداکننده محیط زمین‌ساختی گرانیت‌ها (Abdel-Rahman, 1994)، (A) نمودار سه تایی $MgO-FeO^*-Al_2O_3$ ، (B) نمودار دوتایی $MgO-Al_2O_3$ ، (C) نمودار دوتایی $FeO^*-Al_2O_3$ ، (D) نمودار دوتایی FeO^*-MgO ، سنگ‌های قلیایی و غیرکوهزایی، P: سنگ‌های پرآلومین، C: سنگ‌های آهکی - قلیایی. ■ آنکلاو میکروگرانولار مافیک، ■ آنکلاو سورمیکاسه، ● آنکلاو میکروگرانولار فلسیک، * مونزوگرانیت، ▲ دیوریت.



شکل ۸- تعیین سری ماگمایی گرانیتوئیدهای مورد مطالعه بر اساس ترکیب شیمیایی بیوتیت (Nachit, 1985). ■ آنکلاو میکروگرانولار مافیک، ■ آنکلاو سورمیکاسه، ● آنکلاو میکروگرانولار فلسیک، * مونزوگرانیت، ▲ دیوریت.

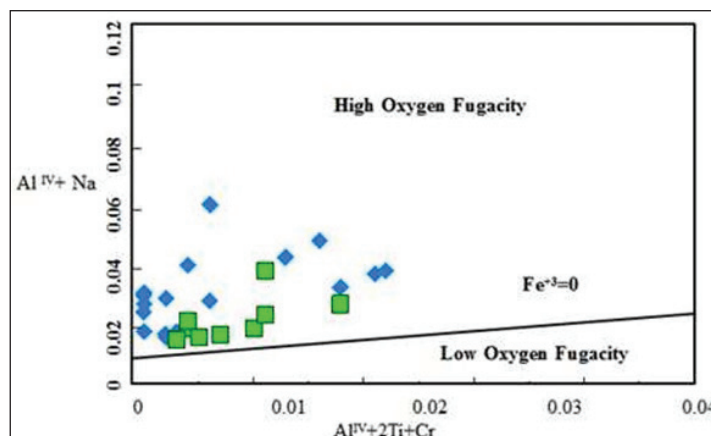


شکل ۹- تعیین سری ماگمایی و موقعیت تکتونیکی نمونه‌ها با استفاده از ترکیب شیمیایی پیروکسن، (A) نمودار $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ (Le Bas., 1962)، (B) نمودار $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ (Le Bas., 1962). $\blacklozenge$ نوریت، $\blacksquare$ آنکلاو میکروگرانولار مافیک

۸- تخمین فوگاسیته اکسیژن با استفاده از ترکیب ارتوپروکسن

سه ظرفیتی دیگر به جز آلومینیم، مانند Fe^{3+} به موقعیت هشت وجهی فراهم تر می‌شود. بدین صورت که نمونه‌هایی که در بالای خط $\text{Fe}^{3+}=0$ قرار گرفته‌اند، پیروکسن‌هایی هستند که در فوگاسیته اکسیژن بالا متبلور شده‌اند و نمونه‌هایی که در پایین این خط قرار گرفته‌اند نشانگر فوگاسیته اکسیژن پایین هستند و در عین حال (Cameron and Papike, 1981) به فاصله نمونه‌ها از خط Fe^{3+} اشاره کرده و یادآور شده‌اند که هر چه فاصله نمونه‌ها از این خط بیشتر باشد مقدار فوگاسیته اکسیژن در محیط تشکیل آنها بیشتر بوده است. همانطور که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود، ارتوپروکسن‌ها در بالای خط $\text{Fe}^{3+}=0$ قرار گرفته‌اند. این وضعیت نشان می‌دهد که ارتوپروکسن‌های نمونه نوریت و آنکلاو میکروگرانولار مافیک در محدوده فوگاسیته اکسیژن بالا متبلور شده‌اند، که از صفات آهکی-قلیایی بودن توده می‌باشد که با ویژگی‌های تکتونوماگمایی محیط‌های وابسته به فروانش همخوانی دارد.

فوگاسیته اکسیژن تأثیر ویژه‌ای در تغییر دمای لیکیدوس و ترکیب مذاب و بلور دارد (France et al., 2010) و عامل موثری در کنترل فرایندهای ماگمایی است (Kilinc et al., 1983; Kress and Carmichael, 1991; Ottonello et al., 2001; Moretti, 2009; Botcharnikov et al., 2005) و بر توالی تبلور و نوع کانی‌های تبلور یافته تأثیر گذار است. به کمک نمودار مجموع $2\text{Ti}+\text{Cr}+\text{Al}^{\text{VI}}$ در برابر $\text{Na}+\text{Al}^{\text{IV}}$ (Schweitzer et al., 1978) که خود تابعی از میزان آهن سه ظرفیتی پیروکسن‌هاست، می‌توان میزان فوگاسیته اکسیژن را به دست آورد. این نمودار بر اساس موازنه Al موجود در موقعیت تتراهدری با Al و Cr^{3+} در موقعیت اکتاهدری تنظیم شده است. در ترکیب پیروکسن‌ها عنصر Fe^{3+} می‌تواند جانشین عناصر ۳ ظرفیتی مانند Al^{VI} , Ti و Cr در موقعیت هشت وجهی شود، بنابراین فراوانی Fe^{3+} در پیروکسن‌ها بستگی به میزان Al^{VI} دارد و به عبارت دیگر، تابع موازنه آلومینیم در موقعیت چهاروجهی است. بنابراین هر چه Al بیشتری وارد موقعیت چهاروجهی شود، امکان ورود عناصر



شکل ۱۰- تخمین فوگاسیته اکسیژن نمونه نوریت و آنکلاو میکروگرانولار مافیک با استفاده از ترکیب شیمیایی ارتوپروکسن (Schweitzer et al., 1978). $\blacklozenge$ نوریت، $\blacksquare$ آنکلاو میکروگرانولار مافیک

۹- بحث

در دمای بین ۵۹۸ تا ۷۷۶ درجه سانتی گراد متبلور شده‌اند. ارتوپیروکسن نیز از کانی‌های اصلی در نمونه‌های نوریت و آنکلاو میکروگرانولار مافیک است که پیروکسن‌های نمونه نوریت دارای ترکیب ارتوپیروکسن (کلینواستاتیت)، و پیروکسن‌های نمونه‌های آنکلاو میکروگرانولار مافیک ترکیب کلینوفروسیلیت دارند. بنابراین از این کانی نیز برای تعیین سری ماگمایی و موقعیت تکتونوماگمایی سنگ میزانش نیز استفاده می‌شود که طبق نمودارها ماگماتسم الوند از نوع کالک آلکالن می‌باشد. همچنین از ارتوپیروکسن‌ها به عنوان ابزار مهمی برای تعیین میزان فوگاسیته اکسیژن ماگما استفاده می‌شود، بنابراین طبق نمودار (Schweitzer et al. 1978) نمونه‌های ارتوپیروکسن موجود در نوریت و آنکلاو میکروگرانولار مافیک در محدوده فوگاسیته اکسیژن بالا قرار گرفته‌اند، که از صفات آهکی - قلیایی بودن ماگمای سازنده توده می‌باشد، که با ویژگی‌های تکتونوماگمایی محیط‌های وابسته به فروانش همخوانی دارد.

۱۰- نتیجه‌گیری

سنگ‌های منطقه شامل گرانیتویدهای پورفیری، لوکوکرات، سنگ‌های نفوذی بازیک، آنکلاوهای فلسیک، مافیک، سورمیکاسه و هورنفلسی تشکیل شده است. بر پایه مطالعات شیمی بیوتیت‌های موجود در مونزوگرنایت پورفیروید، گرانودیوریت، آنکلاو فلسیک، مافیک و سورمیکاسه در قلمرو بیوتیت (آنتیت - سیدروفیلیت)، و بیوتیت‌های موجود در نوریت‌ها در قلمرو فلوگوپیت (فلوگوپیت - استونیت) قرار گرفته‌اند. همچنین در نمودار Si-Fe/(Fe+Mg) بیوتیت‌های موجود در مونزوگرنایت پورفیروید، گرانودیوریت، آنکلاو فلسیک، مافیک و سورمیکاسه در قلمرو بیوتیت‌های منیزیم‌دار و بیوتیت‌های موجود در نوریت‌ها در قلمرو فلوگوپیت واقع شده‌اند. حضور این مجموعه کانی یعنی بیوتیت منیزیم‌دار، مگنتیت و تیتانیت دلالت بر گریزندگی نسبتاً بالای اکسیژن در ماگماست. بیوتیت‌های مونزوگرنایت پورفیروید، گرانودیوریت، آنکلاو فلسیک، مافیک و سورمیکاسه نسبتاً غنی از FeO و TiO_2 بوده و در قلمرو بیوتیت‌های اولیه یا ماگمایی و بیوتیت‌های موجود در نوریت‌ها در محدوده بیوتیت‌های اولیه‌ای که دستخوش تعادل مجدد قرار گرفته‌اند. براساس نمودارها نمونه‌های بیوتیت گرانیتوید الوند نسبت به منیزیم غنی‌شدگی نشان می‌دهند و در گستره آهکی - قلیایی قرار می‌گیرند. پیروکسن‌ها ترکیب ارتوپیروکسن (کلینواستاتیت) دارند. دماسنجی بر مبنای Ti موجود در بیوتیت برای توده الوند، نمونه‌های مونزوگرنایت پورفیروید دمای ۶۶۲ تا ۷۳۴، نمونه نوریت دمای ۶۸۸ تا ۷۷۶، نمونه دیوریت ۵۹۸ تا ۷۲۴، آنکلاو سورمیکاسه دمای ۶۶۲ تا ۶۸۷، آنکلاو میکروگرانولار فلسیک دمای ۶۹۴ تا ۷۱۲ و آنکلاو میکروگرانولار مافیک دمای ۶۳۵ تا ۷۳۷ درجه سانتی گراد را نشان می‌دهند. بر اساس ترکیب شیمیایی کانی بیوتیت و ارتوپیروکسن ماگمای سازنده آنکلاوها و توده پلوتونیک الوند در گستره آهکی - قلیایی قرار می‌گیرند. نتایج حاصل از سنجش فوگاسیته اکسیژن بر مبنای ترکیب شیمیایی ارتوپیروکسن‌های نمونه نوریت و آنکلاو میکروگرانولار مافیک نشان می‌دهند مجموعه نفوذی الوند در رده سنگ‌هایی با فوگاسیته اکسیژن بالا جای می‌گیرند که از صفات آهکی - قلیایی بودن توده می‌باشد که با ویژگی‌های تکتونوماگمایی محیط‌های وابسته به فروانش همخوانی دارد.

پژوهش‌های صحرایی و سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که توده پلوتونیک الوند شامل طیف وسیعی از سنگ‌ها شامل مونزوگرنایت پورفیروید، لوکوکرنایت، گرانودیوریت، سینوگرنایت، آلکالی فلدسپار گرنایت، دیوریت، نوریت و آنکلاوها شامل میکروگرانولار مافیک، میکروگرانولار فلسیک، سورمیکاسه و هورنفلسی می‌باشند، که در همه آنها کانی بیوتیت به صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار مشاهده می‌گردد. این کانی در برخی قسمت‌ها به صورت لخته‌هایی تجمع یافته و در جاهایی به صورت پراکنده یافت می‌شود. با توجه به اینکه بیوتیت بیشتر وابسته به ماهیت ماگمایی است که از آن متبلور می‌شود، بنابراین پتانسیل خوبی برای استفاده از ترکیب شیمیایی این کانی برای بازتاب طبیعت تشکیل و پی‌بردن به شرایط فیزیکوشیمیایی ماگمای تشکیل دهنده آن دارد. بنابراین اساس انتخاب بیوتیت به عنوان شاخص پتروژنتیک و تکتونوماگمایی آن است که این کانی مهم‌ترین میزان آلومینیم اضافی در گرنایت‌هایی است که فاقد کانی‌های آلومینوسیلیکات و کلدیریت است، بنابراین به طور مستقیم پیرآلومین بودن ماگمای میزان را منعکس می‌کند. طبق یافته‌های حاصل از این پژوهش بیوتیت‌های نمونه‌های مونزوگرنایت پورفیروید، دیوریت، آنکلاو فلسیک، آنکلاو مافیک و سورمیکاسه در قلمرو بیوتیت (آنتیت - سیدروفیلیت) که غنی از منیزیم هستند، و بیوتیت‌های موجود در نوریت‌ها در قلمرو فلوگوپیت (فلوگوپیت - استونیت) قرار گرفته‌اند. قرار گرفتن بیوتیت‌ها در گستره بیوتیت‌های منیزیم‌دار بیانگر تبلور اولیه اکسیدهای آهن در قالب مگنتیت و تیتانیم به صورت تیتانیت است. حضور این مجموعه کانی یعنی بیوتیت منیزیم‌دار، مگنتیت و تیتانیت دلالت بر گریزندگی نسبتاً بالای اکسیژن در ماگماست. بنابراین با توجه به این که بیوتیت‌های ماگمایی در مراحل میانی و نهایی انجماد ماگما، متبلور می‌شوند در نمودار (Nachit 1986) بیوتیت‌های مورد مطالعه (به‌جز بیوتیت نوریت)، از نوع بیوتیت‌های اولیه، حاصل تبلور ماگمایی هستند که به صورت خودشکل در مقاطع دیده می‌شوند. همچنین برای تعیین ترکیب شیمیایی و محیط تشکیل ماگمای سازنده میکاها از دو تقسیم‌بندی (Nachit 1986) و (Abdel-Rahman 1994) استفاده شد، که طبق تقسیم‌بندی (Nachit 1986)، بیوتیت‌های منطقه در قلمرو نیمه قلیایی قرار می‌گیرند، و طبق تقسیم‌بندی (Abdel-Rahman 1994)، که تا حدی بیوتیت ماگمای پیرآلومینیمی را از بیوتیت ماگماهای شبه آلومینیمی جدا می‌کند. در این رده بندی تمامی بیوتیت‌ها غنی از Al با نسبت بالای Fe/Mg وابسته به ماگمای پیرآلومینیمی در نظر گرفته شده‌اند و مقدار Al بیوتیت متبلور شده، مشخص کننده ماهیت پیرآلومینیمی آنگون است. همچنین طبق این نمودار، بیوتیت‌ها در گستره بیوتیت‌های کالک آلکالن مناطق کوهزایی قرار می‌گیرند. همچنین مقادیر آهن فرو و فریک آن نشانگر شرایط اکسیداسیون - احیا در حین تبلور می‌باشد. زیرا کانی‌های تیتانومگنتیت در شرایط ساب سالدوس دچار تعادل مجدد و فاقد کارایی در تعیین فوگاسیته اکسیژن در سنگ‌های گرانیتی می‌شود. بنابراین با تعیین مقادیر کاتیون‌های آهن فرو و فریک بیوتیت‌های ماگمایی می‌توان فشار بخشی اکسیژن به‌نگام تبلور بیوتیت را ارزیابی نمود. همچنین کانی بیوتیت از میزبان‌های مهم Ti به‌شمار می‌رود. میزان Ti موجود در بیوتیت وابسته به تغییرات دما، فشار، شیمی بلور بیوتیت و مجموعه کانی‌های همزیست است. دما بیشترین تأثیر را بر میزان Ti در بیوتیت دارد و با افزایش این پارامتر، میزان Ti افزایش می‌یابد. طبق نتایج حاصل از دماسنجی Ti بیوتیت‌های سنگ‌های مختلف توده پلوتونیک الوند

اقلیمی، ب.، ۱۳۷۹- نقشه زمین‌شناسی، مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ همدان و گزارش حاشیه آن، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

ایرانی، م.، ۱۳۷۲- بررسی پترولوژی توده گرانیتیبدی الوند و واله دگرگونی آن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی.

ترکیان، ا.، ۱۳۷۴- مطالعه پتروگرافی و پترولوژیکی پگماتیت‌های الوند همدان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گرایش پترولوژی، دانشگاه تهران، ۱۷۲ صفحه.

زرعیان، س.، فرغانی، ع.، فیاض، ه.، ۱۳۵۰- توده گرانیته الوند و واله دگرگونی آن، قسمت اول، نشریه دانشکده علوم دانشگاه تهران، جلد ۳، شماره ۴، ص ۳۷-۴۷.

زرعیان، س.، فرغانی، ع.، فیاض، ه.، ۱۳۵۱- توده گرانیته الوند و واله دگرگونی آن، قسمت دوم، نشریه دانشکده علوم دانشگاه تهران، جلد ۴، شماره ۱، ص ۲۳-۲۸.

سیاهی گرو، ع.، ا.، ۱۳۷۸- پترولوژی مجموعه بلوتونیک الوند با نگرشی ویژه بر گرانیتوئیدها. پایان نامه دکتری، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت معلم.

شهبازی، ح.، ۱۳۸۹- پترولوژی مجموعه سنگ‌های آذرین و میگماتیت‌های کمپلکس الوند و توده نفوذی آلومولاغ همدان و ارتباط ژنتیکی بین آنها، رساله دکتری، دانشگاه شهید بهشتی.

نبوی، م.ح.، ۱۳۵۵- مقدمه‌ای بر زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی ایران، ۱۰۹ص.

ولی‌زاده، م.و.، ۱۳۵۳- بررسی سنگ‌شناسی و شیمی کانی‌شناسی کمپلکس الوند (همدان)، نشریه علوم دانشگاه تهران، جلد ششم، شماره اول، ص. ۱۴-۳۰.

Abdel-Rahman, A.M., 1994 - Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline and peraluminous Magmas- *Journal of Petrology* 35 (2) 525-541. <https://doi.org/10.1093/petrology/35.2.525>.

Aliani, F., Sabouri, Z. and Maanijou, M., 2011- Petrography and Geochemistry of Porphyroid Granitoid Rocks in the Alvand Intrusive Complex- Hamadan (Iran), *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 5, No. 12, pp. 2192-2199.

Botcharnikov, R. E., Koepke, J., Holtz, F., McCammon, C. and Wilke, M., 2005 -The effect of water activity on the oxidation and structural state of Fe in a ferro-basaltic melt- *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69-5071-5085. DOI: 10.1016/j.gca.2005.04.023.

Cameron, M. and Papike, J., 1981- Structural and chemical variations in Pyroxenes- *American Mineralogist* 66: 1-50.

Deer, W.A., Howie, R. A. and Zussman, J., 1991 - An introduction to the Rock Forming Minerals- 17th edition, Longman, London. DOI: 10.3749/canmin.51.4.663.

Dymek, R.F., 1983- Titanium and interlayer cation substitutions in biotite from high grade Gneisses, west Greenland- *American mineralogist* 68 (9-10) 880-889.<https://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article/titanium-aluminu>.

Eshraghi, S. A. and Mohammadi Gharai, M., 2003 - Geological Map of Tuyserkan 1/100000, Geological Survey and Mineral exploration of Iran, Tehran.

France, L., Koepke, J., Ildefonse, B., Cichy, S. B. and Deschamps, F., 2010- Hydrous partial melting in the sheeted dike complex at fast spreading ridges: Experimental and natural observations.(DOI:10.1007/s00410-010-0502-6).

Henry, D. J. and Guidotti, C. V. and Thomson, J. A., 2005- The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms- *American Mineralogist*, 90 316-328.DOI:10.2138/am.2005.1498.

Karimpour, M. H., Farmer L., Ashouri C. and Saadat S., 2006 - Major, Trace and REE geochemistry of Paleo-Tethys Collision-Related Granitoids from Mashhad, Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 17(2): 127-145.

Kilinc, A., Carmichael, I. S. E., Rivers, M. L. and Sark, R. O., 1983 -The ferric-ferrous ratio of natural silicate liquids equilibrated in air- *Contributions to Mineralogy and Petrology* 83: 136-140.DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00373086>.

Kress, V. C. and Carmichael, I. S. E., 1991 - The compressibility of silicate Liquids containing Fe₂O₃ and the effect of composition, temperature, oxygen fugacity and pressure on their redox states.*Contributions to Mineralogy and Petrology*, Volume 108, Issue 1-2, pp. 82-92 DOI:10.1007/BF00307328.

Le Bas, N. J., 1962 -The role of aluminium in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *American Journal of Science* 260: 267-288.

Moretti, R., 2009- Polymerization, basicity, oxidation state and their role in ionic modeling of silicate melts- *Geophysics* 48: 583-608. DOI: 10.4401/ag-3221.

Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A. K., Ginzburg, I. V., Ross, M., Seifer, F. A., Zussman, J., Aloi, K., Gottard, G., 1988- Nomenclature of pyroxenes- *Mineralogical Magazine*. 52:535-550. DOI:10.1180/minmag.1988.052.367.15.

Nachit, H., 1986- Contribution à l'étude analytique et expérimentale des biotites des granitoïdes. These de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest (France).

Nachit, H., Ibhi, A., Abia, E.H. and Ohoud, M.B., 2005- Discrimination between Primary magmatic biotites, re-equilibrated biotites and neoformed biotites, *Comptes Rendus Geoscience* 337: 1415-1420. DOI: 10.1016/j.crte.2005.09.002.

Nachit, H., Rezfimahefa, N., Stussi, J.M., Carron, J.P., 1985 - Composition chimique des biotites et typologie magmatique des granitoïdes- *Comptes Rendus Hebdomadaires de l'Académie des Sciences* 301(11) 813-818.

Ottoneo, G. Moretti, R. Marini, L. and Zuccolini, M. V., 2001 - Oxidation state of iron in silicate glasses and melts: a thermochemical model- *Chemical Geology* 174: 157-179.DOI:10.1016/S0009-2541(00)00314-4.

- Schweitzer, E.L., Papike, J.J. and Bence, A.E., 1978 - Clinopyroxenes from deep sea basalts: A statistical analysis. *Geophysical Research Letters*, Volume 5, Issue 7, p. 573-577. DOI:10.1029/GL005i007p00573.
- Sepahi, A.A., 2008 - Typology and Petrogenesis of Granitic Rocks in the Sanandaj-Sirjan Metamorphic Belt, Iran, with Emphasis on the Alvandplutonic Complex- N, Jb, Geol. Palaont, Abh, Stuttgart, Vol. 247, No.3, pp: 295-312. DOI: 10.1127/0077-7749/2008/0247-0295.
- Shahbazi, H., Siebel, W., Pourmoafae, M., Ghorbani, M., Sepahi, A.A., Vousoughi-Abedini, M., Shang, C.K., 2010-Geochemistry and U-Pb Zircon Geochronology of the Alvand Plutonic Complex in Sanandaj-Sirjan Zone (Iran)- New Evidence For Jurassic Magmatism, *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 39, No. 6, pp: 668-683. DOI: 10.1016/j.jseaes.2010.04.014.
- Shabani, A.A.T., Masoudi, F. and Tecce, F., 2010 - An investigation on biotite composition from Mashhad granitoid rocks, NW Iran, *Journal of Science of Islamic Republic of Iran*, 21(4) 321-331.
- Stöcklin, J., 1968 - Structural history and tectonics of Iran: a review- *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52: 1229-1258. <https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>.
- Valizadeh, M.V., Cantagrel, J.M., 1975- Premieres donnees radiometriques (K-Ar et Rb-Sr) sur les Micas du complexe magmatique du mont Alvand, presd Hamadan (Iran occidental)-*Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de paris, Serie D* 281 p: 1083-1086.

Application of mineral chemistry of biotite and orthopyroxene in investigation of tectono-magmatic condition of enclaves of Alvand plutonic body and their host rocks

S. Shakiba¹, A. A. Sepahi-Gero^{2*}, M. R. Ghasempour³ and K. Nakashima³

¹Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran

²Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran

³ Ph.D. Student, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

⁴Professor, Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Yamagata University, Yamagata, Japan

Received: 2019 December 30

Accepted: 2020 August 22

Abstract

Alvand plutonic body is one of the largest intrusive plutons in northern part of Sanandaj-Sirjan zone which is located in south of Hamadan city. It is composed of porphyroid and leucocratic granitoids, basic intrusive rocks, and abundant enclaves in various sizes and in a variety of forms. Biotites of porphyroid monzogranite, diorite, felsic microgranular enclave, mafic microgranular enclave and surmicaceous enclaves are located in magnesian biotites and biotites of norites in phlogopite field. Orthopyroxenes of norite are clinoenstatite and orthopyroxenes of mafic microgranular enclaves are clinofrosilite. Based on the Ti-in-biotite thermometer, temperature of monzogranite porphyroid is 662 to 734 °C, norite is 688 to 776 °C, diorite is 598 to 724 °C, surmicaceous enclaves temperature is 662 to 687 °C, felsic microgranular enclaves is 694 to 712 °C and mafic microgranular enclaves is 635 to 737 °C. the enclaves of the Alvand plutonic body and their host rocks are located in the field of calc-alkaline suite. Orthopyroxenes in the norite and mafic microgranular enclaves indicate that rocks of the Alvand intrusive complex are located in the field of high oxygen fugacity rocks. It is in accordance with calc-alkaline property of rocks and is consistent with the subduction-related tectono-magmatic environment.

Keywords: Mineral chemistry, Biotite, Orthopyroxene, Thermometry, Enclave, Alvand Plutonic complex, Sanandaj-Sirjan Zone

For Persian Version see pages 225 to 240

*Corresponding author: A. A. Sepahi-Gero; E-mail: sepahi@basu.ac.ir