

جایگیری و تحول باتولیت الوند در عمق کم پوسته، همدان، باختر ایران

حسین شهبازی^۱، حسن برجسته^۲، علی اصغر سپاهی^۳ و عاطفه متقی توانا^۴

^۱استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
^۲دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
^۳آستاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳

چکیده

باتولیت الوند در جنوب شهرستان همدان و بخش شمالی زون دگرگونی سنندج- سیرجان واقع شده است. گرانیت پورفیرویدی، کوارتز دیوریت و دیوریت، واحدهای سنگی گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند را تشکیل می‌دهند. گرانیت پورفیرویدی دانه‌درشت حجم اصلی باتولیت الوند را تشکیل می‌دهد. برای بررسی شیمی کانی و ترموبارومتري گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند آنالیز نقطه‌ای بر روی کانی‌های ارتوکلاز، پلاژیوکلاز و بیوتیت موجود در گرانیت‌های پورفیرویدی و بر روی کانی‌های آمفیبول، پلاژیوکلاز و بیوتیت در کوارتز دیوریت‌ها و دیوریت‌ها انجام پذیرفت. مطالعه شیمی کانی‌ها نشان می‌دهد که آمفیبول‌های موجود در کوارتز دیوریت‌ها بیشتر از نوع مگنزوهورنبلند و در دیوریت‌ها از نوع مگنزوهورنبلند و چرماکیت هستند. پلاژیوکلازهای موجود در گرانیت‌های پورفیرویدی از نوع آلیت و الیگوکلاز، در کوارتز دیوریت‌ها از نوع الیگوکلاز و در دیوریت‌ها از نوع آندزین هستند. بیوتیت‌های تشکیل دهنده این سنگ‌ها اولیه هستند و در محدوده آنتی قرار می‌گیرند. نتایج حاصل از مطالعه ترموبارومتري آمفیبول‌ها نشان می‌دهد که میانگین دمای تشکیل آمفیبول‌های موجود در گرانیتوئیدهای مزوکرات باتولیت الوند ۷۸۷± درجه سانتی‌گراد و فشار تشکیل آنها ۱/۴۶± کیلو بار است. نتایج حاصل از ترموبارومتري نشان می‌دهد که بیوتیت‌های موجود در گرانیت‌های پورفیرویدی مزوکرات باتولیت الوند ۶۷۹± درجه سانتی‌گراد و فشار تشکیل آنها ۱/۵۶± کیلو بار است. عمق تشکیل گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند با توجه به فشار تشکیل آنها (۱/۵± کیلو بار) ۴/۷± کیلومتری از سطح زمین است.

کلیدواژه‌ها: ترموبارومتري، الوند، همدان، زون سنندج- سیرجان.

***نویسنده مسئول:** حسین شهبازی

E-mail: shahbazi@basu.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

دانه‌درشت از بقیه واحدها بیشتر است. کوارتز دیوریت‌ها و دیوریت‌ها به علت داشتن کانی‌های آمفیبول، پلاژیوکلاز و بیوتیت برای بررسی شرایط دما، فشار و عمق تشکیل باتولیت الوند اهمیت زیادی دارند و در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۳- روش مطالعه

به منظور بررسی ترکیب شیمیایی کانی‌ها و ژئوترموبارومتري گرانیتوئیدهای باتولیت الوند، ۷۰ نمونه از سنگ‌های مختلف بخش مرکزی و غربی توده پلوتونیک الوند نمونه‌برداری شد. از تعداد ۵۰ نمونه، در دانشگاه بوعلی سینا همدان مقطع نازک تهیه شد و مورد مطالعه میکروسکوپی قرار گرفت. ۱۰ نقطه آنالیز شیمیایی بر روی کانی‌های بیوتیت، پلاژیوکلاز و ارتوکلاز موجود در گرانیت‌های پورفیرویدی و ۹ نقطه بر روی کانی‌های آمفیبول، پلاژیوکلاز و بیوتیت در کوارتز دیوریت‌ها در شرکت تحقیقاتی کانساران بینالود و ۶ نقطه بر روی کانی‌های آمفیبول، پلاژیوکلاز و بیوتیت موجود در دیوریت‌ها در مؤسسه زمین‌شناسی آکادمی علوم زمین چین انجام پذیرفت (شکل ۲ و جدول‌های ۲، ۳ و ۴). کانی‌های مورد نظر توسط دستگاه تجزیه گر (EPMA) در کانسار بینالود مورد تجزیه نقطه‌ای قرار گرفت. دستگاه مایکروپروب به کاربرده شده از نوع HORIBA-XGT 7200 است و شرایط آنالیز بر اساس ولتاژ شتاب‌دهنده 30 [kV]، جریان ریزکاو 1.000 [mA] و در زمان ۷۰ [s] انجام پذیرفت. سپس شیمی کانی‌های آمفیبول، پلاژیوکلاز، ارتوکلاز و بیوتیت بررسی و با بهره‌گیری از نمودارها و روش‌های ارائه شده، شرایط دما، فشار و عمق تشکیل سنگ‌های حاوی این کانی‌ها تعیین شد. کاتیون‌های موجود در آمفیبول برحسب ۱۳ کاتیون و ۲۳ اکسیژن، بیوتیت‌ها بر حسب ۲۲ اکسیژن و فلدسپارها برحسب ۸ اکسیژن محاسبه شده‌اند.

۴- سنگ‌نگاری

۴-۱. گرانیت پورفیرویدی

گرانیت‌های پورفیرویدی باتولیت الوند حجم اصلی سنگ‌های این توده را

مجموعه پلوتونیک الوند با وسعت حدود ۴۰۰ کیلومتر مربع در جنوب شهرستان همدان و در بین طول‌های جغرافیایی ۴۸° ۱۰' تا ۴۸° ۳۵' و عرض‌های جغرافیایی ۳۰° ۳۰' تا ۳۴° ۳۵' شمالی واقع شده است (شکل ۱). بخش‌های مختلف مجموعه پلوتونیک الوند از جنبه‌های مختلف توسط محقق متعدد مطالعه شده است (زرعیان و همکاران، ۱۳۵۰؛ ولی‌زاده، ۱۳۵۳؛ ایرانی، ۱۳۷۲؛ صادقیان، ۱۳۷۳؛ سپاهی گرو، ۱۳۷۸؛ سپاهی و همکاران، ۱۳۹۱؛ Ghalamghash et al., 2009; Shahbazi et al., 2010). تاکنون شرایط دما، فشار و عمق تشکیل باتولیت الوند به علت عدم حضور و یا حضور کم کانی‌های شاخص ترموبارومتري در بیشتر واحدهای مزوکرات این مجموعه مورد بررسی پژوهشگران واقع نشده است. در این پژوهش شرایط دما، فشار و عمق تشکیل گرانیتوئیدهای مزوکرات باتولیت الوند بر اساس شیمی کانی‌های آمفیبول، بیوتیت و فلدسپارهای موجود در واحدهای گرانیتی، کوارتز دیوریتی و دیوریتی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- زمین‌شناسی

مجموعه پلوتونیک الوند از واحدهای سنگ‌شناسی متنوعی از سنگ‌های مافیک، حدواسط تا فلسیک تشکیل شده است (شکل ۱). این مجموعه در بخش شمالی زون سنندج- سیرجان واقع شده است. بنا به عقیده برخی از محققان این زون بخشی از کمربند کوهزایی زاگرس است (Ricou et al., 1977; Berberian and King, 1982). بر اساس تحقیقات سپاهی (۱۳۷۸) واحدهای مختلف مجموعه پلوتونیک الوند طی ۵ مرحله تزریق ماگما تشکیل شده‌اند. بر اساس تحقیقات Shahbazi et al. (2010) واحدهای مختلف مجموعه پلوتونیک الوند از ۱۶۷± تا ۱۵۳± میلیون سال پیش تشکیل شده‌اند. گرانیتوئیدهای مزوکرات که حجم اصلی این مجموعه را تشکیل می‌دهند، در ۱۶۴± میلیون سال پیش تشکیل شده‌اند. در بیشتر مناطق الوند گرانیتوئیدهای مزوکرات کنتاکت مستقیم با هورنفلس‌های منطقه دارند. گرانیت‌های پورفیرویدی دانه‌درشت، کوارتز دیوریت‌ها و دیوریت‌ها واحدهای سنگی تشکیل دهنده بخش مزوکرات الوند هستند که حجم گرانیت‌های پورفیرویدی

باتولیتی الوند اهمیت ویژه‌ای دارند. این سنگ‌ها دانه‌درشت و مزوکرات و حاوی کانی‌های آمفیبول (۲۰ تا ۳۰ درصد)، پلاژیوکلاز (۵۰ تا ۶۰ درصد)، کوارتز (۵ تا ۱۰ درصد) و بیوتیت (۵~ درصد) هستند. بافت این سنگ‌ها بیشتر ساب‌هدرال گرانولار است. (شکل‌های ۳- پ و ت).

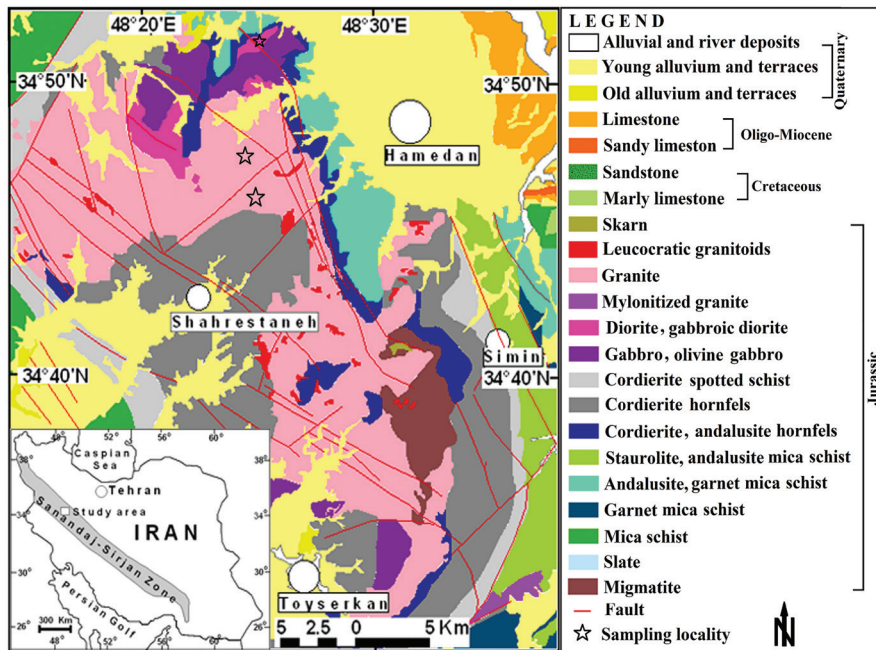
۴-۳. دیوریت

دیوریت‌ها بیشتر در باختر توده باتولیتی الوند رخمون دارند، در نمونه دستی به رنگ خاکستری دیده می‌شوند و از نظر دانه‌بندی دانه‌متوسط تا درشت‌دانه هستند. این سنگ‌ها حاوی کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز (۶۰ تا ۸۰ درصد)، هورنبلند (۱۵ تا ۲۰ درصد)، آلکالی‌فلدسپار (۱۵ تا ۲۰ درصد)، بیوتیت (۱۵ تا ۲۰ درصد)، کلینوپروکسن (۱۰ تا ۱۵ درصد) و کانی‌های فرعی اکتینولیت و کانی‌های اپاک هستند. بافت‌های موجود در این سنگ‌ها ساب‌هدرال گرانولار، اینتر گرانولار و بافت فرعی پوئیکلیتیک است (شکل‌های ۳- ب و ج).

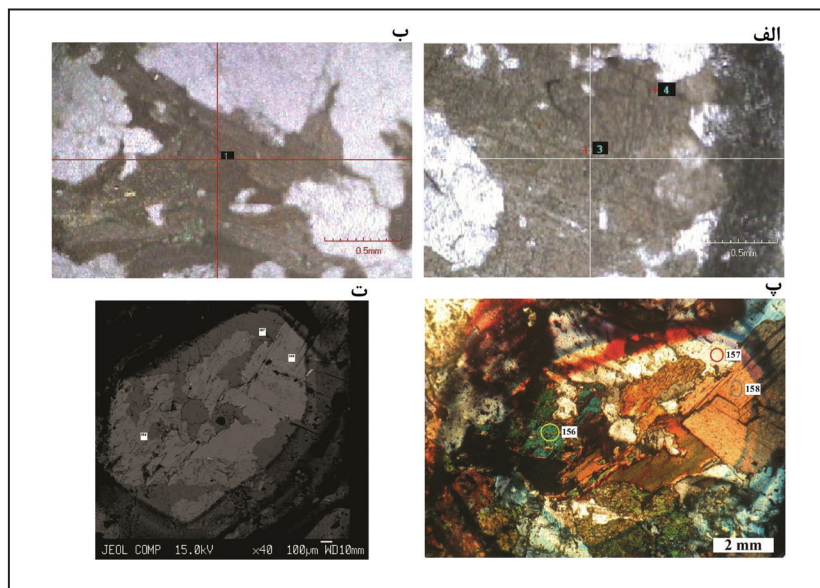
تشکیل می‌دهند. این سنگ‌ها به داخل سنگ‌های قدیم‌تر مثل متاپلِت‌ها و سنگ‌های مافیک نفوذ کرده‌اند. گرانیت‌های پرفیرویدی الوند دانه‌درشت هستند و از کانی‌های اصلی آلکالی‌فلدسپار بیشتر از نوع ارتوکلاز پرتیتی و به ندرت میکروکلین (۳۰ تا ۵۰ درصد)، کوارتز (۲۰ تا ۳۰ درصد)، پلاژیوکلاز (۱۰ تا ۱۵ درصد) تشکیل شده‌اند. کانی‌های فرعی این نوع گرانیت‌ها شامل بیوتیت (۱۰~ درصد)، مسکویت (۵~ درصد)، تورمالین، تیتانیت، آپاتیت، کانی‌های تیره و زیرکن است. بافت این سنگ‌ها انهدرال گرانولار و یا پرفیرویدی ناشی از رشد آلکالی‌فلدسپارهاست و فاقد آمفیبول هستند (شکل‌های ۳- الف و ث).

۴-۲. کوارتز دیوریت

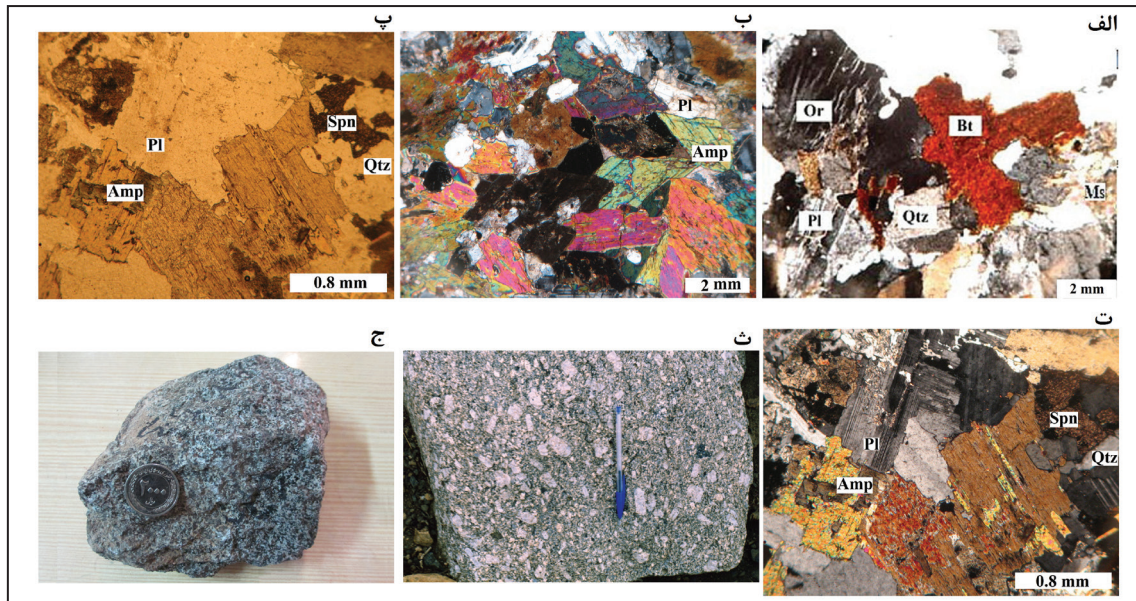
کوارتز دیوریت‌ها گسترش چندان در باتولیت الوند ندارند ولی به علت داشتن کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز، برای تعیین شرایط دما، فشار و عمق تشکیل توده



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی باتولیت الوند، اقتباس از Eshraghi and Mahmodi (2003) و اقلیمی (۱۳۷۹) با تغییرات.



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی برخی از نقاط آنالیز شده از گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند: الف) آمفیبول موجود در کوارتز دیوریت؛ ب) بیوتیت موجود در کوارتز دیوریت؛ پ) آمفیبول (نقطه ۱۵۶)، پلاژیوکلاز (نقطه ۱۵۷) و بیوتیت (نقطه ۱۵۸) موجود در دیوریت (نمونه Am-۳۳-۵)؛ ت) تصویر SEM از نقاط آنالیز شده کانی‌های آمفیبول (نقطه ۱۵۶)، پلاژیوکلاز (نقطه ۱۵۷) و بیوتیت (نقطه ۱۵۸) موجود در دیوریت (نمونه Am-۳۳-۵).



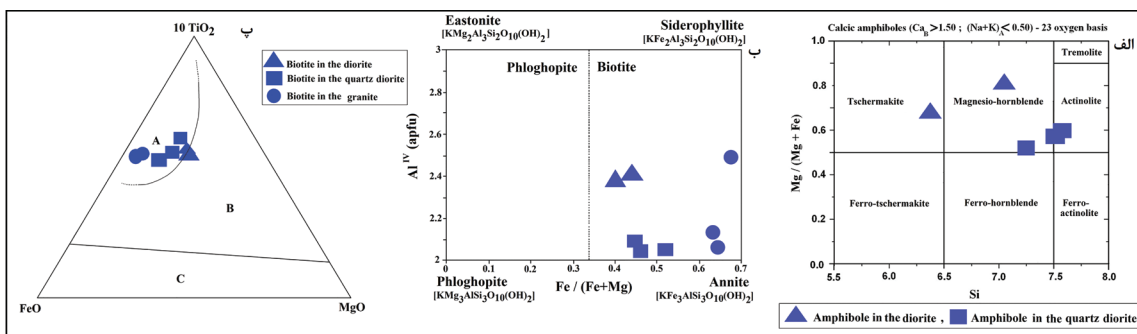
شکل ۳- الف) تصویر میکروسکوپی از گرانیت پورفیریویدی الوند در حالت XPL؛ ب) تصویر میکروسکوپی از دیوریت الوند در حالت XPL؛ پ) تصویر میکروسکوپی از کوارتز دیوریت الوند در حالت PPL؛ ت) تصویر میکروسکوپی از کوارتز دیوریت الوند در حالت XPL؛ ث) تصویر نمونه دستی از گرانیت پورفیریویدی الوند؛ ج) تصویر نمونه دستی از دیوریت الوند. Qz= ارتوکلاز، Pl= پلاژیوکلاز، Qtz= کوارتز، Bt= بیوتیت، Ms= مسکوویت، Amp= آمفیبول، Spn= اسفن.

۵- شیمی کانی‌ها

۵-۱. آمفیبول

کانی فرعی در کوارتز دیوریت‌های الوند وجود دارد و در گرانیت‌های پورفیریویدی دیده نمی‌شود. حضور آنها در برخی از گرانیتوئیدهای مزوکرات باتولیت الوند در بررسی ترموبارومتري این توده اهمیت ویژه‌ای دارد. این کانی‌ها در دیوریت‌های منطقه معمولاً شکل دار و به رنگ سبز دیده می‌شوند و در کوارتز دیوریت‌های منطقه بیشتر نیمه‌شکل دار هستند (شکل‌های ۳- ب و ت). ترکیب شیمیایی و نام هر کدام از آمفیبول‌های آنالیز شده موجود در دیوریت‌ها و کوارتز دیوریت‌های الوند در جدول ۲ آورده شده است. همان‌گونه که در این جدول دیده می‌شود، دامنه تغییرات عنصر $Mg \# = [Mg/(Mg+Fe)] = 0.51-0.81$ و $Si (6.39-7.55)$ در واحد فرمولی (apfu= atoms per formula unit) در دانه‌های آمفیبول است. مقدار بالای Si و پایین Mg # در آمفیبول‌های موجود در کوارتز دیوریت‌ها نسبت به دیوریت‌ها حاکی از درجه تفریق یافتگی بالاتر کوارتز دیوریت‌ها نسبت به دیوریت‌هاست. در نمودار رده‌بندی Si-Mg/(Mg+Fe) ارائه شده توسط Leake et al. (1997) آمفیبول‌ها در کوارتز دیوریت‌ها بیشتر از نوع مگنزیوهورنبلند و در دیوریت‌ها از نوع مگنزیو-هورنبلند و چرماکیت هستند (شکل ۴- الف).

آمفیبول‌ها به علت داشتن تنوع در ترکیب شیمیایی و ساختار بلوری، در دما و فشار گسترده‌ای (کمتر از ۱ کیلوپار تا ۲۳ کیلوپار و ۴۰۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) در سنگ‌های آذرین و دگرگونی تشکیل می‌شوند (Blundy and Holland, 1990). حداقل عمق تشکیل آمفیبول‌ها $0.4 \pm 3/6$ کیلومتر است که منطبق بر عمق زون زمین‌لرزه‌ای متداول زمین است (Ridolfi et al., 2010). در سنگ‌های گرانیتوئیدی در دمای زیر ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و میزان آب بالای ۳/۵ wt % به جای ارتوپروکسن، آمفیبول تشکیل می‌شود (Naney and Swanson, 1980; Naney, 1983). فرمول استاندارد آمفیبول به صورت $[A_{0-1}B_2C_5T_8O_{22}(OH)_2]$ است. اگر H_2O و هالوژن‌ها به صورت مشخص و پایدار در ترکیب شبکه بلوری آمفیبول شرکت کنند، فرمول آن به صورت $(O, OH, F, Cl)_2$ در غیر این صورت فرمول آمفیبول به صورت $(O)_{23}$ و $(OH, F, Cl)_2$ محاسبه می‌شود (Mogessie et al., 2001). نحوه آرایش عناصر در موقعیت‌های مختلف شبکه بلوری، در انواع آمفیبول‌ها به شرح جدول ۱ است. در منطقه مورد مطالعه، آمفیبول به صورت کانی اصلی در دیوریت‌ها و



شکل ۴- الف) در نمودار Si-Mg/(Mg+Fe) ارائه شده توسط Leake et al. (1997)، آمفیبول‌های موجود در کوارتز دیوریت‌های الوند در محدوده‌های مگنزیوهورنبلند و یک نمونه در مرز آکتینولیت و در دیوریت‌ها در محدوده‌های مگنزیوهورنبلند و چرماکیت قرار می‌گیرند؛ ب) بر اساس نمودار تغییرات Fe/Fe+Mg در مقابل Al^{IV} ارائه شده توسط Deer et al. (1986)، بیوتیت‌های موجود در گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند در نزدیکی قطب آیت قرار می‌گیرند؛ پ) بر اساس نمودار رده‌بندی مثلثی $FeO - TiO_2 \times 10 - MgO$ ، همه بیوتیت‌ها در محدوده بیوتیت‌های اولیه قرار می‌گیرند.

A= Primary magmatic biotites, B= Reequilibrated biotites, C= Neofomed biotites

جدول ۱- نحوه آرایش عناصر در موقعیت‌های مختلف شبکه بلوری آمفیبول، بیوتیت و فلدسپار.

Amphibole							
فرمول عمومی		مدل سایت اختصاص یافته برای آمفیبول					
$(\text{Na}, \text{V})_1(\text{Na}, \text{Ca})_2(\text{Fe}, \text{Mg})_3(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_2(\text{Al}, \text{Si})_4\text{Si}_4\text{O}_{22}(\text{OH})_2$		$\text{A}_{0-1}\text{M}_4\text{M}_2\text{M}_1\text{T}_3\text{T}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$					
Mineral	Formula	T1(4)	T2(4)	M2(2)	M13(3)	M4(2)	A(1)
Glaucophane	$\text{Na}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	Si, Si, Si, Si	Si, Si, Si, Si	Al, Al	Mg, Mg, Mg	Na, Na	V
Tremolite	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	Si, Si, Si, Si	Si, Si, Si, Si	Mg, Mg	Mg, Mg, Mg	Ca, Ca	V
Ferroactinolite	$\text{Ca}_2\text{Fe}_3(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	Si, Si, Si, Si	Si, Si, Si, Si	Fe, Fe	Fe, Fe, Fe	Ca, Ca	V
Tschemakite	$\text{Ca}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	Si, Si, Si, Si	Si, Si, Al, Al	Al, Al	Mg, Mg, Mg	Ca, Ca	V
Pargasite	$\text{NaCa}_2\text{Mg}_4\text{Al}(\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	Si, Si, Si, Si	Si, Si, Al, Al	Mg, Al	Mg, Mg, Mg	Ca, Ca	Na
عناصر قابل جایگزین در سایت		Si	Si, Al	Mg, Fe, Al, Ti	Fe, Mg, Mn	Ca, Na	Na, K
Biotite							
فرمول عمومی		مدل سایت اختصاص یافته برای بیوتیت					
$(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca})_1(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Al}, \text{Si})_2\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$		$\text{A}_1\text{M}_3\text{T}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$					
Mineral	Formula	T1 (2)	T2 (2)	M1 (1)	M2 (2)	A (1)	
Phlogopite	$\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Si, Si	Si, Al	Mg	Mg, Mg	K	
Annite	$\text{KFe}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Si, Si	Si, Al	Fe	Fe, Fe	K	
Eastonite	$\text{KMg}_2\text{Al}_3\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Si, Si	Si, Al	Al	Mg, Mg	K	
Siderophyllite	$\text{KFe}_2\text{Al}_3\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Si, Si	Si, Al	Al	Fe, Fe	K	
عناصر قابل جایگزین در سایت		Si	Si, Al	Al, Mg, Fe	Al, Ti, Mn, Mg, Fe	K, Na, Ca	
Feldspar							
فرمول عمومی		مدل سایت اختصاص یافته برای فلدسپار					
$(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca})_1(\text{Al}, \text{Si})_2\text{O}_8$		$\text{A}_1\text{T}_2\text{Si}_2\text{O}_8$					
Mineral	Formula	Si(2)	T2(2)	Al			
Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Si, Si	Si, Al	Na			
Anorthite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Si, Si	Al, Al	Ca			
Orthoclase	KAlSi_3O_8	Si, Si	Si, Al	K			
عناصر قابل جایگزین در سایت		Si	Si, Al, Fe ³	Na, K, Ca, Sr, Ba, Rb, Pb, Eu			

جدول ۲- نتایج آنالیز نقطه‌ای آمفیبول‌های موجود در گراتیتویدهای مزوکرات الوند.

نمونه‌ها	B-308-1 (Amph)	B-308-2 (Amph)	B-308-3 (Amph)	AM-33-5-1 (Amph)	AM-33-8-1 (Amph)
نوع سنگ	Quartz diorite			Diorite	
مختصات جغرافیایی	N34° 46' 40.50" E48° 24' 11.30"			N34° 51' 28.03" E48° 25' 02.60"	
SiO ₂	47.62	51.04	50.18	49.35	43.28
TiO ₂	1.68	1.76	1.84	0.63	1.97
Al ₂ O ₃	5.75	5.90	7.08	5.83	10.61
FeO	16.95	14.70	14.22	11.96	13.08
MnO	0.28	0.30	0.29	0.24	0.17
MgO	9.80	10.75	9.93	16.12	13.15
CaO	12.45	10.82	10.65	12.30	12.22
Na ₂ O	0.00	0.22	1.36	1.18	2.13
K ₂ O	0.86	0.74	0.81	0.36	0.82
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17
Total	95.39	96.23	96.36	97.97	97.60
No. of oxygens	23				
Si	7.311	7.550	7.512	7.056	6.388
Ti	0.194	0.196	0.207	0.068	0.219
Al	1.041	1.029	1.249	0.983	1.846
Fe	2.176	1.818	1.780	1.430	1.614
Mn	0.036	0.038	0.037	0.029	0.021
Mg	2.242	2.370	2.215	3.435	2.893
Ca	2.048	1.715	1.708	1.884	1.932
Na	0.000	0.063	0.395	0.327	0.609
K	0.168	0.140	0.155	0.066	0.154
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020
Total	15.216	14.917	15.257	15.277	15.696
T site					
Si	7.311	7.550	7.512	7.056	6.388
Al (IV)	0.689	0.450	0.488	0.944	1.612
T-Sum	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
C site					
Al (VI)	0.351	0.578	0.761	0.038	0.233
Ti	0.194	0.196	0.207	0.068	0.219
Fe ⁺³	0.000	0.000	0.000	0.610	0.294
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020
Mg	2.242	2.370	2.215	3.435	2.893
Fe ⁺²	2.176	1.818	1.780	0.820	1.321
Mn	0.036	0.038	0.037	0.029	0.021
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
C-Sum	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
B site					
Ca	2.000	1.715	1.708	1.884	1.932
Na	0.000	0.063	0.292	0.116	0.068
B-Sum	2.000	1.778	2.000	2.000	2.000
A site					
Ca	0.048	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.103	0.211	0.542
K	0.168	0.140	0.155	0.066	0.154
A-Sum	0.216	0.140	0.257	0.277	0.696
Mg/(Mg+Fe)	0.508	0.566	0.555	0.807	0.687
نامگذاری	Magnesiohornblende	Actinolite	Actinolite	Magnesiohornblende	Actinolite

۵-۲. بیوتیت

بیوتیت هم به صورت اولیه و هم به صورت ثانویه در سنگ‌های آذرین و دگرگونی تشکیل می‌شود. فرمول استاندارد بیوتیت به صورت $[X_1 Y_3 Z_4 O_{10} (OH)_2]$ است. کاتیون‌های فرمول بیوتیت براساس فاکتور ۱۱ اکسیژن $(O)_{11}$ و یا فاکتور ۱۲ اکسیژن $(O)_{22}$ محاسبه می‌شوند. نحوه آرایش عناصر در موقعیت‌های مختلف شبکه بلوری، در انواع بیوتیت‌ها به شرح جدول ۱ است. بیوتیت‌ها در گرانیتهای مزوکرات الوند به رنگ‌های قهوه‌ای روشن تا قهوه‌ای تیره، غالباً ساب‌هدرال و با پلئوکروسیسم مستقیم و قوی دیده می‌شوند (شکل‌های ۳- الف، پ و ت). تغییر رنگ بیوتیت‌ها از تغییر ترکیب شیمیایی آنها تبعیت می‌کند (Lalonde and Bernard, 1993). همان‌گونه که در جدول ۳ دیده می‌شود، مقدار Mg در واحد فرمولی (apfu=atoms per formula unit) بیوتیت‌های موجود در دیوریت‌ها، کوارتز دیوریت‌ها و گرانیتهای پرفیرویدی به ترتیب $Mg=(1.14-1.21)$ ، $Mg=(1.51-1.55)$ و $Mg=(0.64-0.71)$ است. مقدار $Fe\#=[Fe/(Fe+Mg)]$ بیوتیت‌های موجود در دیوریت‌ها، کوارتز دیوریت‌ها و گرانیتهای پرفیرویدی به ترتیب $Fe\#=(0.39-0.40)$ ، $Fe\#=(0.46-0.53)$ و $Fe\#=(0.64-0.71)$ است. بالا بودن مقدار Mg و پایین مقدار $Fe\#$ به ترتیب در دیوریت‌ها، کوارتز دیوریت‌ها و گرانیتهای پرفیرویدی ناشی از درجه تفریق یافتگی متفاوت نسبی آنها به همدیگر است. مقدار Si در واحد فرمولی (apfu) بیوتیت‌های موجود در دیوریت‌ها، کوارتز دیوریت‌ها و گرانیتهای پرفیرویدی به ترتیب $Si=(2.79-2.80)$ ، $Si=(2.97-3.03)$ و $Si=(2.75-2.97)$ است. فراوانی $Al^{(IV)}$ در واحد فرمولی (apfu) بیوتیت‌های موجود در دیوریت‌ها، کوارتز دیوریت‌ها و گرانیتهای پرفیرویدی به ترتیب $Al^{(IV)}=(0.97-1.03)$ ، $Al^{(IV)}=(1.20-1.21)$ و $Al^{(IV)}=(1.03-1.25)$ است. بالا بودن مقدار Si در کوارتز دیوریت‌ها نسبت به دیوریت‌ها ناشی از درجه تفریق یافتگی بیشتر کوارتز دیوریت‌ها نسبت به دیوریت‌هاست. بالا بودن مقدار Si در بیوتیت‌های موجود در کوارتز دیوریت‌ها و دیوریت‌ها نسبت به بیوتیت‌های موجود در گرانیتهای پرفیرویدی، ناشی از پرآلومین بودن ماگمای تشکیل‌دهنده گرانیتهای پرفیرویدی و جایگزین شدن $Al^{(IV)}$ به جای Si در موقعیتهای تتراندری شبکه بلوری بیوتیت‌های موجود در گرانیتهای پرفیرویدی است. بیوتیت‌های موجود در گرانیتهای مزوکرات الوند بر اساس نمودار تغییرات Fe/Fe+Mg در مقابل Al^{IV} ارائه شده توسط Deer et al. (1986) در نزدیکی قطب آیت قرار می‌گیرند (شکل ۴- ب). بر اساس رده بندی مثلثی $(MgO+MnO-10*TiO_2-MgO)$ ارائه شده توسط Nachit et al. (2005) همه بیوتیت‌ها در محدوده بیوتیت‌های اولیه قرار می‌گیرند (شکل ۴- پ). بیوتیت‌های اولیه و ماگمایی، همزمان با هورنبلند و پلاژیوکلاز با ترکیب حدواسط در مراحل میانی و انتهایی تبلور ماگمایی متبلور میشوند. ترکیب بیوتیت‌ها در سنگ‌های گرانیتهای پرفیرویدی تابع ترکیب ماگمای مادر و فوگاسیته اکسیژن (Partin et al., 1983; Wones 1989)، دمای مذاب (Abbot and Clark, 1979) و خاستگاه گرانیتهای پرفیرویدی (Abdelrahman, 1994; Nachit et al., 2005) است.

۵-۳. فلدسپار

به منظور بررسی ترکیب شیمیایی و شرایط فیزیکی و شیمیایی حاکم بر تشکیل فلدسپارها در گرانیتهای مزوکرات الوند این کانی‌ها مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفته‌اند. کاتیون‌های فلدسپارها برحسب ۸ اکسیژن محاسبه شده‌اند و نحوه آرایش عناصر در موقعیت‌های مختلف شبکه بلوری فلدسپارها در جدول ۱ ارائه شده است. ترکیب شیمیایی و نام هر کدام از فلدسپارهای آنالیز شده در جدول ۴ آورده شده است. پلاژیوکلازهای موجود در دیوریت‌ها از نوع آندزین، در کوارتز دیوریت‌ها از نوع الیگو کلاز و در گرانیتهای پرفیرویدی از نوع آلیت و الیگو کلاز هستند. آلکالی فلدسپارهای موجود در گرانیتهای پرفیرویدی بافت پرتیتی دارند و حاوی مقادیر (Or (42-44%) و Ab (56-58%) و از نوع ارتوکلاز هستند (جدول ۴).

۶-۱. ترموبارومتري آمفیبول

مقدار حضور Al^{tot} در ترکیب آمفیبول‌ها اساس ترموبارومتري آمفیبول‌ها را تشکیل می‌دهد. با افزایش فشار، مقدار Al^{tot} در ترکیب آمفیبول افزایش می‌یابد (Hammarstrom and Zen, 1986). معادلات متعدد توسط تعدادی از محققین بر مبنای مقدار Al^{tot} در ترکیب آمفیبول‌ها برای تعیین دما و فشار حاکم بر محیط تشکیل سنگ‌های آذرین ارائه شده است (e. g. Hammarstrom and Zen, 1986; Hollister et al., 1987; Johnson and Rutherford, 1989; Blundy and Holland, 1990; Vynhal et al., 1991; Schmidt, 1992; Holland and Blundy, 1994; Anderson and Smith, 1995; Anderson, 1996; Ridolfi et al., 2010; Putirka, 2016). در این پژوهش از تعدادی از آنها برای تعیین شرایط فشار و دمای تشکیل آمفیبول‌های نوع هورنبلند و چرماکیت موجود در گرانیتهای مزوکرات الوند استفاده شده است.

۶-۲. بارومتري آمفیبول

بررسی شرایط فشار حاکم بر تشکیل آمفیبول‌ها توسط تعدادی از پژوهشگران انجام پذیرفته است. در این پژوهش از معادله ارائه شده توسط Ridolfi et al. (2010) استفاده شده است (معادله ۱). نتایج حاصل از بارومتري آمفیبول نشان می‌دهد که فشار حاکم بر تشکیل آمفیبول‌های موجود در کوارتز دیوریت‌های الوند ۸۶/۰ کیلو بار و میانگین آن در دیوریت‌ها ۱/۷۶ کیلو بار است (جدول ۵).

$$P(\text{Mpa}) = 19.209e^{(1.438Al^{tot})}, R^2=0.99 \quad (1)$$

۶-۳. ترمومتري آمفیبول

برای تعیین دمای تشکیل آمفیبول‌های موجود در گرانیتهای مزوکرات الوند از معادلات ارائه شده توسط Ridolfi et al. (2010) و Putirka (2016) به شرح زیر استفاده شده است.

$$T(oC) = -151.487Si^* + 2 \quad (2)$$

$$Si^* = \frac{Si + [Al]/15 - 2[Al]Ti/[6]Al/2 - [6]Ti/1.8 + Fe^{3+}/9 + Fe^{+2}/3.3 + Mg/26 + [Ca]/5 + [Na]/1.3 - [Na]/15 + [Al]/2.3}{(Ridolfi et al., 2010)} \quad (3)$$

$$(A): P(\pm 30oC) = 1781 - 132.74Si + 116.6Ti - 69.41Fe + 101.62Na$$

$$(B): P(\pm 30oC) = 1687 - 118.7Si + 131.56Ti - 71.41Fe$$

$$+ 86.132Na + 22.44[P(\text{GPa})]$$

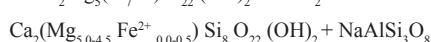
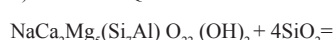
(Putirka, 2016)

نتایج حاصل از ترمومتري روش‌های فوق نشان می‌دهد که میانگین دمای تشکیل آمفیبول‌های موجود در کوارتز دیوریت‌های الوند ۷۰۱ درجه سانتی‌گراد و در دیوریت‌ها ۸۴۷ درجه سانتی‌گراد است (جدول ۵).

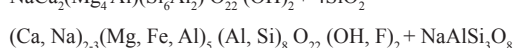
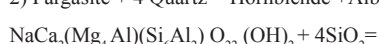
۶-۴. ترمومتري آمفیبول - پلاژیوکلاز

Blundy and Holland (1990) برای دماسنجی پلاژیوکلاز-هورنبلند همزیست در سنگ‌های آذرین اشباع از سیلیس از معادله مشروح زیر (معادله ۴) استفاده می‌شود. این معادله بر اساس واکنش‌های مشروح زیر (۱ و ۲) برای دماهای ۵۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است.

$$1) \text{Edenite} + 4 \text{Quartz} = \text{Termolite} + \text{Albite}$$



$$2) \text{Pargasite} + 4 \text{Quartz} = \text{Hornblende} + \text{Albite} \quad (4)$$



$$T[^\circ K] = \frac{0.677P(\text{kb}) - 48.98 + Y}{-0.0429 - 0.008314LnK}, K = \left(\frac{Si-4}{8-Si}\right)X_{Ab}^{Plg}$$

جدول ۳- نتایج آنالیز نقطه‌ای بیوتیت در گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند.

نمونه‌ها	B-308-1 (Bt)	B-308-2 (Bt)	B-308-3 (Bt)	B-310-1 (Bt)	B-310-2 (Bt)	B-310-3 (Bt)	AM-33-5-1 (Bt)	AM-33-5-2 (Bt)
نوع سنگ	Quartz diorite			granite Porphyroid			Diorite	
مختصات جغرافیایی	N34° 46' 40.50" , E48° 24' 11.30"			N34° 46' 01.40" , E48° 24' 04.20"			N34° 51' 28.03" , E48° 25' 02.60"	
Si ₂ O	38.52	40.18	39.82	38.12	38.72	34.06	36.88	37.07
TiO ₂	3.51	3.53	4.52	3.22	3.14	3.62	3.95	3.83
Al ₂ O ₃	12.24	12.94	13.82	16.42	16.94	16.18	14.57	14.51
FeO	19.5	16.86	16.85	19.29	19.06	23.63	15.9	15.61
MnO	0.17	0.17	0.16	0.23	0.31	0.29	0.05	0.04
MgO	9.8	10.61	10.88	6.19	5.76	5.35	13.35	13.8
CaO	0	0.28	1.79	0.15	0.16	0	0.01	0
Na ₂ O	0	1.23	0.27	1.33	1.12	0	0.3	0.34
K ₂ O	10.25	8.75	6.35	8.93	8.53	9.85	9.7	9.57
Total	93.99	94.55	94.46	93.88	93.74	92.98	94.71	94.77
No. of oxygens	11	11	11	11	11	11	11	11
Si	2.993	3.034	2.969	2.936	2.966	2.746	2.794	2.800
Ti	0.205	0.200	0.253	0.186	0.181	0.219	0.225	0.218
Al	1.121	1.152	1.214	1.491	1.530	1.538	1.301	1.292
Fe	1.267	1.065	1.050	1.242	1.221	1.593	1.007	0.986
Mn	0.011	0.011	0.010	0.015	0.020	0.020	0.003	0.003
Mg	1.135	1.194	1.209	0.711	0.658	0.643	1.508	1.553
Ca	0.000	0.023	0.143	0.012	0.013	0.000	0.001	0.000
Na	0.000	0.180	0.039	0.199	0.166	0.000	0.044	0.050
K	1.016	0.843	0.604	0.877	0.834	1.013	0.937	0.922
Total	7.749	7.701	7.492	7.670	7.588	7.772	7.821	7.823
T1 site (tet)								
Si	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
T2 site (tet)								
Si	0.993	1.034	0.969	0.936	0.966	0.746	0.794	0.800
Al (IV)	1.007	0.966	1.031	1.064	1.034	1.254	1.206	1.200
Sum-T2	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
M2 site (oct)								
Al (VI):	0.115	0.186	0.183	0.427	0.496	0.284	0.095	0.092
Ti	0.205	0.200	0.253	0.186	0.181	0.219	0.225	0.218
Fe	0.534	0.409	0.344	0.661	0.646	0.834	0.169	0.135
Mn	0.011	0.011	0.010	0.015	0.020	0.020	0.003	0.003
Mg	1.135	1.194	1.209	0.711	0.658	0.643	1.508	1.553
Sum-M2 site (oct)	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
M1 site								
Fe	0.733	0.656	0.706	0.582	0.575	0.759	0.839	0.851
Vacancy	0.267	0.344	0.294	0.418	0.425	0.241	0.161	0.149
Sum-M1 site	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
A site								
Ca:	0.000	0.023	0.143	0.012	0.013	0.000	0.001	0.000
Na	0.000	0.180	0.039	0.199	0.166	0.000	0.044	0.050
K	1.016	0.843	0.604	0.877	0.834	1.013	0.937	0.922
Sum-A	1.016	1.045	0.786	1.088	1.013	1.013	0.982	0.972
Fe/(Fe+Mg)	0.53	0.47	0.46	0.64	0.65	0.71	0.40	0.39
نامگذاری	Annite	Annite	Annite	Annite	Annite	Annite	Annite	Annite

جدول ۴- نتایج آنالیز نقطه‌ای فلزهای موجود در گرانیت‌های موزوکرات الوند.

نوع سنگ	Quartz diorite			granite Porphyroid						Diorite		
نمونه	B-308-1 (Pl)	B-308-2 (Pl)	B-308-3 (Pl)	B-310-1 (Pl)	B-310-2 (Pl)	B-310-3 (Pl)	B-310-4 (Pl)	B-310-1 (Or)	B-310-2 (Or)	B-310-3 (Or)	AM-33-5-1 (Pl)	AM-33-5-2 (Pl)
مختصات جغرافیایی	N34° 46' 40.50" , E48° 24' 11.30"			N34° 46' 01.40" , E48° 24' 04.20"						N34° 51' 28.03" , E48° 25' 02.60"		
SiO ₂	61.03	60.84	62.78	61.41	63.02	70.5	72.51	69.78	69.67	69.62	56.56	56.96
TiO ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02
Al ₂ O ₃	22.56	22.83	21.19	22.65	21.4	16.56	16.15	16.27	15.05	15.53	26.94	26.44
FeO	0.07	0.07	0.33	0.14	0.15	0.09	0.05	0.01	0.07	0.04	0	0
MnO	0.06	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0.06	0.13
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0.13	0.02	0	0.01	0.05
CaO	9.16	9.35	9.15	9.11	7.2	5.2	3.91	0.19	0.27	0.35	0	0.02
Na ₂ O	6.4	6.17	5.78	5.78	7.07	6.41	6.63	2.11	2.54	2.76	10.25	9.87
K ₂ O	0.25	0.24	0.27	0.4	0.66	0.68	0.28	11.43	12.24	11.48	5.35	5.8
Total	99.53	99.50	99.51	99.49	99.50	99.44	99.53	99.92	99.86	99.78	99.17	99.29
No. of oxygens	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Si	2.739	2.730	2.807	2.751	2.817	3.089	3.146	3.135	3.156	3.145	2.598	2.616
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Al	1.194	1.208	1.117	1.196	1.127	0.855	0.826	0.862	0.804	0.827	1.459	1.432
Fe	0.003	0.003	0.012	0.005	0.006	0.003	0.002	0.000	0.003	0.002	0.000	0.000
Mn	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.005
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.001	0.000	0.001	0.003
Ca	0.441	0.450	0.438	0.437	0.345	0.244	0.182	0.009	0.013	0.017	0.000	0.001
Na	0.557	0.537	0.501	0.502	0.613	0.545	0.558	0.184	0.223	0.242	0.913	0.879
K	0.014	0.014	0.015	0.023	0.038	0.038	0.015	0.655	0.707	0.662	0.313	0.340
Total	4.950	4.941	4.892	4.914	4.945	4.774	4.728	4.854	4.907	4.893	5.286	5.277
ab	0.72	0.70	0.79	0.70	0.79	0.94	0.97	0.56	0.57	0.58	0.59	0.59
an	0.26	0.28	0.19	0.27	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.24
Or	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.06	0.03	0.44	0.43	0.42	0.15	0.16
Total	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
نوع سنگ	Oligoclase	Oligoclase	Oligoclase	Oligoclase	Oligoclase	Albite	Albite	Orthoclase	Orthoclase	Orthoclase	Andesine	Andesine

جدول ۵ آورده شده است. دمای تشکیل پلاژیوکلاز- هورنبلند همزیست در کوارتز دیوریت‌های الوند ۶۶۶ درجه سانتی‌گراد و میانگین آن در دیوریت‌ها ۷۹۳ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است (جدول ۵). در مجموع میانگین کل دمای تشکیل آمفیبول‌های موجود در گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند ۷۸۷ ~ درجه سانتی‌گراد و فشار تشکیل آنها ۱/۵ ~ کیلوبار است.

در معادله ۴، برای مقادیر $X_{Ab} > 0.5$ مقدار $Y = 0$ و برای مقادیر $X_{Ab} < 0.5$ مقدار $Y = -8.06 + 25.5(1 - X_{Ab})_2$ است، دمای (T) تعادل برحسب کلونین، فشار (P) بر حسب کیلوبار، Si تعداد کاتیون‌های سیلیس در فرمول ساختاری آمفیبول و X_{Ab}^{Plg} میزان درصد آلپیت در پلاژیوکلاز است. نتایج حاصل از دماسنجی پلاژیوکلاز- هورنبلند همزیست در کوارتز دیوریت‌ها و دیوریت‌های الوند در

جدول ۵- نتایج حاصل از ترموبارومتري آمفیبول‌ها و پلاژیوکلازهای موجود در سنگ‌های مزوکرات باتولیت الوند.

(نقاط نمونه‌ها)	B-308-1 (Amph)	AM-33-5-1 (Amph)	AM-33-8-1 (Amph)
اسامی	Magnesio hornblende	Magnesio hornblende	Tschermakite
نوع سنگ	Quartz diorite	Diorite	
مختصات جغرافیایی	N34° 46' 40.5" , E48° 24' 11.3"		N34° 15' 28.03" , E48° 25' 02.6"
برآورد فشار بر اساس تک‌کانی آمفیبول به روش کالیراسیون (Ridolfi et al., 2010)			
P (Kb) (Ridolfi et al., 2010)	0.858	0.789	2.730
برآورد دما بر اساس تک‌کانی آمفیبول به روش تعدادی از کالیراسیون‌های مختلف			
T(°C) (Ridolfi et al., 2010)	730.073	782.858	919.572
T(°C) (Putirka 2016) A	682.151	786.307	908.485
برآورد دما بر اساس تک‌کانی آمفیبول و با استفاده از فشار حاصل از کالیراسیون (Ridolfi et al., 2010)			
T(°C) (Putirka 2016) B	691.268	786.228	900.896
برآورد دما بر اساس زوج کانی آمفیبول-پلاژیوکلاز و با استفاده از فشار حاصل از کالیراسیون (Ridolfi et al., 2010)			
T(°C) (Blundy and Holland, 1990)	665.534	730.344	855.014
میانگین کل فشار در گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند	~ 1.46 kb		
میانگین کل دما در گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند	~ 787 °C		
عمق جایگیری گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند	~ 4.7 Km		

الوند در فشار با میانگین کل ۱/۵۶ ~ کیلوبار تشکیل شده‌اند (جدول ۶). با توجه به اینکه گرادیان فشار در پوسته زمین معادل ۰/۲۸ بار بر متر (۳/۶ ~ کیلومتر بر کیلوبار) و در گوشته فوقانی معادل ۰/۳۳ بار بر متر (۳ ~ کیلومتر بر کیلوبار) است (Ghent et al., 1991)، بنابراین عمق تشکیل گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند با توجه به فشار تشکیل آنها (۱/۵ ~ کیلوبار) ۴/۷ ~ کیلومتری از سطح زمین است.

۶-۵. ترمومتری بیوتیت

برای تعیین دمای تشکیل بیوتیت در گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند از رابطه مشروح زیر (رابطه ۵) استفاده شده است. این رابطه توسط Henry et al. (2005) بر اساس مقدار Ti موجود در ترکیب بیوتیت ارائه شده است:

$$T[\pm(12-24)oC] = \{[\ln(Ti) - a - c(X_{Mg})^3] / b\}^{0.333} \quad (5)$$

در این رابطه $T = 480 - 800$ بر حسب درجه سانتی‌گراد، $a = -2.3594$ ، $b = 4.6482$ ، $c = -1.7283$ ، $X_{Mg} = (0.275 - 1.00) = Mg / (Mg + Fe)$ و $Ti = 0.04 - 0.6$ است. نتایج حاصل از این ترمومتری نشان می‌دهد که بیوتیت‌های موجود در گرانیت‌های پرفیروئیدی مزوکرات الوند در دمای ۶۶۸ ~ درجه سانتی‌گراد، در کوارتز دیوریت‌ها در دمای ۶۸۶ ~ درجه سانتی‌گراد، در دیوریت‌ها در دمای ۶۹۱ ~ درجه سانتی‌گراد و در مجموع بیوتیت‌های موجود در گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند در دمای با میانگین کل ۶۷۹ ~ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده‌اند (جدول ۶).

۶-۶. بارومتري بیوتیت

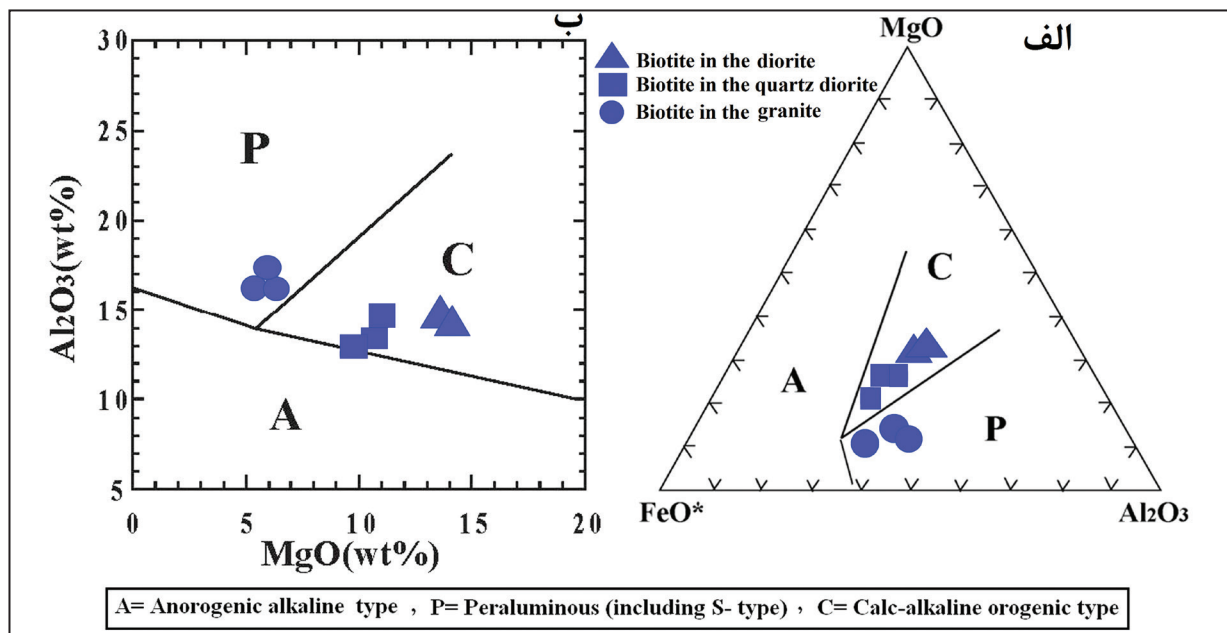
Uchida et al. (2007) بر اساس مقدار $Al^{(tot)}$ در شبکه بلوری بیوتیت رابطه مشروح زیر (رابطه ۶) را برای تعیین فشار حاکم بر محیط تشکیل بیوتیت ارائه کرده‌اند:

$$P(kb) = 3.03 \times Al_{(tot)} - 6.53 (\pm 0.33) \quad (6)$$

نتایج حاصل از این بارومتري نشان می‌دهد که بیوتیت‌های موجود در گرانیت‌های پرفیروئیدی مزوکرات الوند در فشار ۲/۶۸ ~ کیلوبار، بیوتیت‌های موجود در کوارتز دیوریت‌ها در فشار ۰/۵۱ ~ کیلوبار، بیوتیت‌های موجود در دیوریت‌ها در فشار ۱/۳۶ ~ کیلوبار و در مجموع بیوتیت‌های موجود در گرانیتوئیدهای مزوکرات

۷- تعیین سری ماکمایی و محیط زمین‌ساختی

Abdel-Rahman (1994) بر مبنای عناصر اصلی FeO، MgO و Al_2O_3 نمودارهای تفکیک بیوتیت‌های حاصل از تبلور در انواع ماگماها را ارائه داده است. در این رده‌بندی بیوتیت‌ها به ۳ گروه زیر تقسیم می‌شوند: (۱) بیوتیت‌های متبلور در ماگماهای غیرکوهزایی آلکالن (A) که در آنها مقدار متوسط FeO/MgO برابر ۷/۰۴ است؛ (۲) بیوتیت‌های متبلور در ماگماهای پرآلومینیم (P) که شامل ماگماهای تیپ S هم می‌شوند و در آنها مقدار متوسط FeO/MgO برابر ۳/۴۸ است؛ (۳) بیوتیت‌های متبلور در ماگماهای کالک-آلکالن کوهزایی (C) که نسبتاً از Mg غنی هستند و در آنها مقدار متوسط FeO/MgO برابر ۱/۷۶ است. با توجه به مقدار متوسط $FeO/MgO = 1/16$ در بیوتیت‌های موجود در دیوریت‌ها، مقدار متوسط $FeO/MgO = 1/71$ در بیوتیت‌های موجود در کوارتز دیوریت‌ها، مقدار متوسط $FeO/MgO = 3/62$ در بیوتیت‌های موجود در گرانیت‌های پرفیروئیدی الوند (جدول ۳) و با عنایت به نمودارهای شکل ۵، بیوتیت‌های موجود در دیوریت‌ها و کوارتز دیوریت‌های الوند متعلق به ماگماهای کالک-آلکالن کوهزایی (C) و بیوتیت‌های موجود در گرانیت‌های پرفیروئیدی از نوع ماگماهای پرآلومینیم (P) هستند.



شکل ۵- نمودارهای تفکیک بیوتیت‌های موجود در گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند بر اساس نمودار رده‌بندی بیوتیت‌ها، ارائه شده توسط (Abdel-rahman, 1994). الف) نمودار مثلثی تفکیک بیوتیت‌ها بر مبنای (FeO-MgO-Al₂O₃؛ ب) نمودار تفکیک بیوتیت‌ها بر مبنای (MgO-Al₂O₃).

جدول ۶- نتایج حاصل از ترموبارومتری بیوتیت‌های موجود در گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند.

نقاط نمونه‌ها	B-308-Bt(1)	B-308-Bt(2)	B-308-Bt(3)	B-310-Bt(1)	B-310-Bt(2)	B-310-Bt(3)	AM-33-5-Bt(1)
اسامی	Annite	Annite	Annite	Annite	Annite	Annite	Annite
نوع سنگ	Quartz diorite			granite Porphyroid			Diorite
مختصات جغرافیایی	N34° 46' 40.5" , E48° 24' 11.3"			N34° 46' 01.4" , E48° 24' 04.2"			N34° 15' 28.03" , E48° 25' 02.6"
T (°C) (Henry et al. 2005)	676.62	673.06	707.62	661.70	656.74	686.85	690.56
P (Kb) (Uchida et al. 2007)	0.26	0.45	0.83	2.50	2.74	2.79	1.36
میانگین دما در گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند	~ 686 °C			~ 668 °C			~ 691 °C
میانگین فشار در گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند	~ 0.51 Kb			~ 2.68 Kb			~ 1.36 Kb
میانگین کل فشار در گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند	~ 1.56 Kb						
میانگین کل دما در گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند	~ 679 °C						
عمق جایگیری گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند	~ 4.7 Km						

۸- نتیجه‌گیری

الوند از نوع آلپیت و الیگوکلاز، در کوارتزیدوریت‌ها از نوع الیگوکلاز و در دیوریت‌ها از نوع آندزین هستند. نتایج حاصل از مطالعه ترموبارومتری آمفیبول‌ها نشان می‌دهد که میانگین دمای تشکیل آمفیبول‌های موجود در گرانیتوئیدهای مزوکرات باتولیت الوند ۷۸۷- درجه سانتی‌گراد و فشار تشکیل آنها ۱/۴۶~ کیلو بار است. نتایج حاصل از ترموبارومتری نشان می‌دهد که بیوتیت‌های موجود در گرانیت‌های پرفیروئیدی مزوکرات باتولیت الوند ۶۷۹~ درجه سانتی‌گراد و فشار تشکیل آنها ۵۶~ کیلو بار است. عمق تشکیل گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند با توجه به فشار تشکیل آنها (۱/۵~ کیلو بار) ۴/۷~ کیلومتری از سطح زمین است.

برای بررسی شیمی کانی و ترموبارومتری گرانیتوئیدهای مزوکرات الوند، آنالیز نقطه‌ای بر روی کانی‌های ارتوکلاز، پلاژیوکلاز و بیوتیت موجود در گرانیت‌های پرفیروئیدی و بر روی کانی‌های آمفیبول، پلاژیوکلاز و بیوتیت در کوارتزیدوریت‌ها و دیوریت انجام شده است. نتایج حاصل از بررسی سنگ‌نگاری و شیمی کانی‌ها نشان می‌دهد که گرانیت‌های پرفیروئیدی الوند آمفیبول ندارند و آمفیبول‌های موجود در کوارتزیدوریت‌ها بیشتر از نوع مگنزیوهورنبلند و در دیوریت‌ها از نوع مگنزیوهورنبلند و چرماکیت هستند. بیوتیت‌های تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها اولیه هستند و در محدوده آیت قرار می‌گیرند. پلاژیوکلازهای موجود در گرانیت‌های پرفیروئیدی

کتابنگاری

- 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 گرانیتی الوند و هاله دگرگونی آن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، (گرایش پترولوژی)، ۲۲۱ ص.
- زرعیان، س.، فرقانی، ع.، فیاض، ه.، ۱۳۵۰- توده گرانیتی الوند و هاله دگرگونی آن، نشریه دانشکده علوم دانشگاه تهران، جلد سوم، شماره ۴، صص. ۳۷ تا ۴۷.
- سیاهی گروه، ع. ا.، ۱۳۷۸- پترولوژی مجموعه پلوتونیک الوند با نگرش ویژه بر گرانیتوئیدها، پایان‌نامه دکتری (پترولوژی)، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت معلم تهران، ۳۲۲ ص.
- سیاهی، ع. ا.، برزویی، ک. و سلامی، ص.، ۱۳۹۱- مطالعه شیمی کانی، دما- فشارسنجی و جایگاه تکنونیک سنگ‌های نفوذی منطقه سرابی تویسرکان (استان همدان)، مجله پترولوژی، سال ۳، شماره ۱۱، صص. ۳۹ تا ۵۸.
- صادقیان، م.، ۱۳۷۳- بررسی پترولوژی سنگ‌های آذرین و دگرگونی منطقه چشمه قصابان همدان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد (پترولوژی)، دانشگاه تهران، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی، ۲۶۷ ص.
- ولی‌زاده، م.، ۱۳۵۳- بررسی سنگ‌شناسی و شیمی- کانی شناسی کمپلکس الوند (همدان)، نشریه دانشکده علوم دانشگاه تهران، جلد ۶، شماره ۱، صص. ۱۴ تا ۲۹.

References

- Abbote, R. N. and Clarke, D. B., 1979- Hypothetical liquids relationships in the subsystem Al₂O₃-FeO-MgO projected from quartz, alkali feldspar and plagioclase for (H₂O)<1. Canadian Mineralogist 17: 549-560.
- Abdel-Rahman, A., 1994- Nature of Biotite from Alkaline, Calc-alkaline, and Peraluminous Magmas. Journal of Petrology, 35: 525-541.
- Anderson, J. L. and Smith D. R., 1995- The effects of temperature and fO₂ on the Al-in hornblende barometer. American Mineralogist 80: 549-559.
- Anderson, J. L., 1996- Status of thermobarometry in granitic batholiths. Trans R Soc Edinb 87: 125-138.
- Berberian, M. and King, G. C. P., 1982- Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Can. J. Earth Sci. 18: 210 – 265.
- Blundy, J. D. and Holland, T. J. B., 1990- Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. Contributions to Mineralogy and Petrology 104: 208-224.
- Deer, W. A., Howie, A. and Sussman, J., 1986- An introduction to rock-forming Minerals. 17th edition, Longman Ltd, UK, 528p.
- Eshraghi, S. A. and Mohammadi Gharai, M., 2003- Geological Map of Tuyserkhan 1/100000, Geological Survey and Mineral exploration of Iran, Tehran.
- Ghalamghash, J., Mirnejad, H. and Rashid, H., 2009- Mixing and mingling of mafic and felsic magmas along the Neo-Tethys continental margin, Sanandaj-Sirjan zone, NW Iran: A case study from the Alvand pluton. Journal of mineralogy and geochemistry 15: 79-83.
- Ghent, E. D., Nicholls, J., Simony, P. S., Sevigny, J. H. and Stout, M. Z., 1991- Hornblende barometry of the Nelson batholith, southeastern British Columbia: Tectonic implications. Canadian Journal of Earth Science 28: 1982-1991.
- Hammarstrom, J. M. and Zen, E., 1986- Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer. American Mineralogist 71: 1297-1313.
- Henry, D. J., 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.
- Holland, T. J. B. and Blundy, J. D., 1994- Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. Contrib Mineral Petrol 116: 433 – 447.
- 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 pressure of solidification of calc-alkaline plutons. American Mineralogist 72: 231-239.
- Johnson, M. C. and Rutherford, M. J., 1989- Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks. Geology 17: 837-841.
- Lalonde, A. E. and Bernard, P., 1993- Composition and color of biotite from granites: two useful properties in the characterization of plutonic suites from the Hepburn internal zone of Wopmay orogen, Northwest Territories. Canadian Mineralogist 31: 203-217.
- Leake, B. E., Woolley A. R., Arps, Ch. E. S., Birch, W. D., Gilbert, M. Ch., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kato, A., Kisch, H. J., Krivovichev, V. G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J. A., Maresch, W. V., Nickel, E. H., Rock, N., M. S., Schumacher, J. C., Smith, D. C., Stephenson, N. C. N., Ungaretti, L., Whittaker, E. J. W. and Youzhi, G., 1997- Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Mineral Names. Canadian Mineralogist 35: 219-46.
- Mogessie, A., Ettinger, K., Leake, B. E. and Tessadri, K., 2001- A hypercard program to determine the name of an amphibole from electron microprobe and wet chemical analyses, Computers & Geosciences 27:1169-1178.
- Nachit, H., Ibbi, A., Abia, E. H. and Ben Ohoud, M., 2005- Discrimination between Primary magmatic biotites, reequilibrated biotites and neofomed biotites. Comptes Rendus Geoscience 337: 1415-1420.

- Naney, M. T. and Swanson, S., 1980- The effect of Fe and Mg on crystallization in granitic systems. *American Mineralogist*, 65: 639-653.
- Naney, M. T., 1983- Phase equilibria of rock-forming ferromagnesian silicates in granitic systems. *American journal of science*, 283: 993-1033.
- Partin, E., Hewitt, D. A. and Wones, D. R., 1983- Quantification of ferric iron in biotite. *Geological Society American* 15, 659.
- Putirka, K., 2016- Amphibole thermometers and barometers for igneous systems and barometers for igneous systems and some implications for eruption mechanisms of felsic magmas at arc volcanoes. *American Mineralogist* 101: 841–858.
- Ricou, L. E., Braud, J. and Brunn, J. A., 1977- *Le Zagros Memoire Societe Geologique de France. Hors-Serie* 8: 33–52.
- Ridolfi, F., Renzulli, A. and Puerini, M., 2010- Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contr Mineral Petrol* 160: 45–66.
- Schmidt, M. W., 1992- Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 110: 304–310.
- Shahbazi, H., Siebel, W., Pourmoafee, M., Ghorbani, M., Sepahi, A. A., Shang, C. K. and Vousoughi Abedini, M., 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* 39: 668–683.
- Uchida, E., Endo, Sh. and Makino, M., 2007- Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits. *Resource Geology* 57: 47–56.
- Vyhnal, C. R., McSween, H. Y. Jr. and Alexander, J. S., 1991- Hornblende chemistry in southern Appalachian granitoids Implications for aluminum hornblende thermobarometry and magmatic epidote stability. *American Mineralogist*: 76, 176-188.
- Wones, D. R., 1989- Significance of the assemblage titanite+magnetite +quartz in granitic rocks. *American Mineralogist* 74: 744– 749.

Emplacement and evolution of the Alvand batholith in the shallow level of crust, Hamedan, West of Iran

H. Shahbazi^{1*}, H. Barjasteh², A. A. Sepahi³ and A. Mottaghi Tavana²

¹Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

²M. Sc. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

³Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Received: 2017 August 26

Accepted: 2017 December 04

Abstract

The Alvand batholith is located in the south of the Hamedan city and in the northern part of the Sanandaj-Sirjan metamorphic zone. Porphyroid granite, quartz diorite and diorite are formed rock members of the mesocratic granitoids in the Alvand plutonic complex. Porphyroid coarse-grained granites make up the main volume of the Alvand batholith. For study of minerals chemistry and thermobarometry of the mesocratic granitoids of the Alvand batholith, microprobe analyses were carried out on the orthoclase, plagioclase and biotite in the porphyroid granites and were carried out on the amphibole, plagioclase and biotite in the quartz diorites and diorite. Mineral chemistry study shows that amphiboles in the quartz diorites are often of the magnesio-hornblende type and in the diorite are magnesio-hornblende and tschermakite type. Plagioclases in the porphyroid granite are albite and oligoclase type, in the quartz diorites are oligoclase and in the diorite are andesine type. Biotites in the mesocratic granitoids of these rocks are primary type and they are filled in the annite area. Results of thermobarometric study show that average of P-T conditions of amphibole crystallization in the mesocratic granitoids of the Alvand batholith are ~787 °C and ~1.46 Kb. Results of biotite thermobarometric study estimate that average of temperature and pressure of biotite solidification in mesocratic granitoids of the Alvand batholith are ~679 °C and 1.56 Kb. According to the pressure formation (~1.5 Kb) of the Alvand batholith, depth of its emplacement is estimated ~4.7 Km.

Keywords: Thermobarometry, Alvand, Hamedan, Sanandaj-Sirjan zone

For Persian Version see pages 67 to 78

*Corresponding author: H. Shahbazi; E-mail: shahbazi.h@gmail.com