

Geothermobarometry and determination type of metamorphism in the amphibolites of the north and north-west of Khoy on the basis of amphibole chemistry

H. Azizi¹, H. moinvaziri², K.Smaeili¹

1- Mining Dept., University of Kurdistan, Iran.

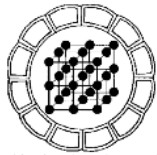
E-mail: hossien_azizi@uok.ac.ir

2- Geology Dept., University of Tarbiat e moalem, Iran.

(received: 30/5/2003, received in revised form: 20/7/2003)

Abstract: Amphiboles are one of the major minerals in metabasic rocks in greenschist to upper amphibolite facies. Amphiboles have variable chemical composition, therefore, various elements with different ionic charge and radius can intering into their structure that occupy special mineralogical sites. There are some elements in amphiboles which are sensitive to the changes of pressure and temperature. The important elements from this points of veiw are Al, Na, Ti and Ca. **Once that pressure and temperature of metamorphism is determined, the type of metamorphism can be distinguished.** On this basis, we studied metabasic rocks of north and northwest of khoy township in north-west (NW) Iran. Geothermobarometry estimation indicates that amphiboles have crystallized at temperatures between 550^oC and 680^oC and pressures between 4.5 and 7 kbars. Therefore, metamorphism in the Khoy area was low to medium grade.

Keywords: *Amphibole, Metabasite, Khoy, Geothermobarometry.*



محاسبه ژئوترموبارومتری و تعیین نوع دگرگونی آمفیبولیتهای شمال و شمال غرب خوی بر اساس ترکیب شیمیایی آمفیبولها

حسین عزیزی^۱، حسین معین وزیری^۲، کامران اسماعیلی^۱

۱- گروه معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کردستان.

پست الکترونیکی: hossien_azizi@uok.ac.ir

۲- گروه زمین شناسی، دانشگاه تربیت معلم تهران.

(دریافت مقاله ۱۳۸۲/۲/۱۰ ، دریافت نسخه نهایی ۱۳۸۲/۴/۲۹)

چکیده: آمفیبولها یکی از کانیهای اصلی متابازیتها، از رخساره شیست سبز تا آمفیبولیت فوقانی را تشکیل می‌دهند. این کانیها به دلیل فرمول شیمیایی متغیری که دارند از نظر بار الکتریکی و شعاع یونی، عناصر مختلفی را می‌توانند در ساختار خود جای دهند. بین اجزای تشکیل دهنده آمفیبولها عناصری وجود دارند که نسبت به تغییر فشار و دما حساسند و در واقع مقدار آنها در ساختار کانی تابع فشار و دماست. مهمترین این عناصر عبارتند از: Ti, Al, Na, و Ca. که علاوه بر مقدار، جایگاه فضایی بلورشناختی آنها نیز می‌تواند در تعیین دما و فشار در تشکیل آمفیبولها کمک کند. همچنین علاوه بر تعیین دما و فشار از ترکیب آنها می‌توان انواع دگرگونی را نیز مشخص کرد. بر این اساس متابازیتهای شمال و شمال غرب خوی از لحاظ ژئوترموبارومتری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. دما و فشار در تشکیل این سنگها با استفاده از ترکیب شیمیایی آمفیبولها محاسبه شده است. نتایج حاصل از محاسبات ژئوترموبارومتری نشان می‌دهد که این آمفیبولها در دمائی بین ۵۵۰ تا ۶۸۰ درجه سانتیگراد و فشاری بین ۴/۵ تا ۷ کیلو بار شکل گرفته‌اند که نشان می‌دهد دگرگونی این منطقه در فشار متوسط تا فشار پائین صورت گرفته است.

واژه‌های کلیدی: آمفیبول، متابازیت، خوی، ژئوترموبارومتري.

مقدمه

کانیهای خانواده آمفیبول به عنوان یکی از کانیهای اصلی سنگهای دگرگونی بازیک به حساب می‌آیند. در این سنگها، آمفیبولها از رخساره شیست سبز (با دمای حدود 350°C) شروع به تبلور می‌کنند، و به تدریج با افزایش درجه دگرگونی به وسیله پلاژیوکلاز غنی از کلسیم، گارنت، و پیروکسن همراهی می‌شوند [۱-۳]. درمرز بین رخساره شیست سبز و آمفیبولیت، هورنبلند شکل می‌گیرد که در مواردی به صورت تیغه‌هایی از اکتینولیت به صورت اکسلوشن در می‌آیند [۴]. در شروع رخساره آمفیبولیت این کانی در میکروسکوپ به صورت پلئوکروئیسیم سبز دیده می‌شود و به تدریج با افزایش دگرگونی به سمت قهوه‌ای متمایل می‌گردد. هورنبلند حتی تا رخساره گرانولیت پایین نیز می‌تواند پایدار باقی بماند. قابل توجه این که در بسیاری از متابازیت‌ها به دلیل حضور این کانیها از رخساره شیست سبز تا گرانولیت وعدم واکنشهای ناپیوسته و همراهی آن با پلاژیوکلاز، تشخیص درجات دگرگونی بر اساس خصوصیات میکروسکوپی آنها مشکل است. درچنین مواردی مجبوریم درجات دگرگونی را بر پایه واکنشهای پیوسته که از ترکیب شیمیایی کانیها استفاده می‌شود، محاسبه کنیم.

انتخاب نمونه و روش تجزیه

با توجه به این که هدف شناسائی نوع آمفیبولها و تعیین ترکیب شیمیایی آنها برای محاسبات ژئوترموبارومتري سنگهای دگرگونی است، لذا در این راستا پس از بررسی بیش از ۴۰۰ مقطع نازک از متابازیت‌های شمال خوی، دو نمونه از آمفیبولیتها به دلیل گسترش وسیعی که داشته‌اند برای مطالعه ترکیب شیمیایی آمفیبولها انتخاب شد، که عبارتند از:

- نمونه D ازسنگهای رخساره آمفیبولیت با مجموعه کانیایی هورنبلند + پلاژیوکلاز + دیوپسید + گارنت.

- نمونه E از سنگهای رخساره آمفیبولیت با مجموعه کانیایی هورنبلند + پلاژیوکلاز.

کانیهای موجود در این نمونه‌ها با الکترون میکروپروپ (EMPA) مدل Cameca SX-50 در دانشگاه لیدز انگلستان مورد تجزیه نقطه‌ای قرار گرفتند که نتایج حاصل از آن در جدول ۱ آورده شده‌اند. محاسبه مقدار F و Cl به طور مستقیم و مقدار H_2O بر اساس مجموع آنیونها به روش غیرمستقیم محاسبه شدند، اما در حالت کلی و برای کنترل آنها به شیوه غیرمستقیم می‌توان از روش دیبر و همکاران [۵] استفاده کرد. محاسبه مقدار Fe^{+3} بر اساس روش شوماخر [۶] انجام گرفته است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آمفیبولها در آمفیبولیتهای شمال و شمال غرب خوی به روش الکترون میکروپروب (EMPA) با ولتاژ ۱۵ kV و جریان نمونه ۱۵ A. نمونه D: مجموعه کانیایی هورنبلند + پلاژیوکلاز + کلینوپیروکسن + گارنت + کوارتز. نمونه E: هورنبلند + پلاژیوکلاز. * = اکتینولیت ناشی از تجزیه هورنبلند که در محاسبات ژئوبارومتری مورد استفاده قرار نگرفته است.

oxide	D1	D2	D3	D4 core	* D4 rim	D5	D6	D7
SiO ₂	۴۲/۴۲	۳۸/۵۲	۴۱/۶۲	۴۳/۶۱	۵۴/۷۰	۴۲/۷۸	۳۸/۳۰	۴۲/۵۳
TiO ₂	۰/۶۹	۰/۹۷	۱/۵۰	۱/۷۸	۰/۰۰	۱/۳۸	۱/۰۲	۱/۲۳
Al ₂ O ₃	۱۱/۷۶	۱۶/۲۶	۱۳/۵۵	۱۱/۱۷	۱/۲۷	۱۲/۳۴	۱۶/۲۵	۱۲/۴
Cr ₂ O ₃	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۱۸	۰/۰۰	۰/۰۸
Fe ₂ O ₃	۳/۶۱	۳/۱۳	۱/۷۵	۱/۶۳	۰/۰۳	۱/۱۵	۳/۶۸	۱/۵۶
FeO	۱۵/۰۶	۱۶/۵۵	۱۴/۳۱	۱۴/۴۱	۱۲/۴۹	۱۴/۳۱	۱۶/۲۸	۱۴/۱۰
MnO	۰/۴۰	۰/۳۳	۰/۲۰	۰/۱۲	۰/۱۷	۰/۰۳	۰/۵۲	۰/۰۹
MgO	۹/۵۲	۶/۹۹	۹/۸۹	۱۰/۷۹	۱۵/۵۸	۱۰/۸۳	۷/۰۳	۱۰/۸۲
CaO	۱۱/۵۲	۱۱/۷۶	۱۱/۶۰	۱۱/۸۲	۱۲/۷۳	۱۱/۷۹	۱۱/۵۵	۱۱/۶۳
Na ₂ O	۱/۶۷	۱/۹۲	۱/۸۸	۱/۵۴	۰/۰۹	۱/۷۲	۱/۸۹	۱/۸۴
K ₂ O	۰/۷۳	۰/۷۹	۰/۵۵	۰/۷۵	۰/۰۱	۰/۸۹	۰/۸۳	۰/۷۹
H ₂ O	۱/۹۷	۱/۹۱	۱/۹۲	۱/۹۹	۲/۰۵	۱/۹۸	۱/۹۰	۱/۹۹
F	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۰۰
Cl	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۵
total	۹۹/۴۶	۹۹/۳۵	۹۹/۳۱	۹۹/۸۴	۹۹/۲۰	۹۹/۴۹	۹۹/۳۸	۹۹/۱۱
Fe as FeO	۱۸/۳۱	۱۹/۳۷	۱۵/۸۸	۱۵/۸۷	۱۲/۲	۱۵/۳۵	۱۹/۵۹	۱۵/۲۹

oxide	E1	E2 core	E2 rim	E3 core	E3 rim	E4 core	E4 rim	E5 core	E5 rim
SiO ₂	۸۸/۴۲	۸۳/۴۳	۲۶/۴۹	۶۳/۴۴	۴۶/۵۰	۶۰/۴۳	۵۵/۵۰	۵۴/۴۳	۶۹/۴۹
TiO ₂	۰/۲/۱	۶۳/۰	۵۸/۰	۷۶/۰	۴۶/۰	۹۸/۰	۴۱/۰	۹۷/۰	۴۶/۰
Al ₂ O ₃	۰/۵/۱۳	۴۳/۱۲	۱۳/۷	۴۱/۱۱	۶۷/۵	۰/۲/۱۳	۶۹/۵	۲۴/۱۳	۶۴/۶
Cr ₂ O ₃	۱۲/۰	۰/۰/۰	۰/۸/۰	۰/۳/۰	۰/۷/۰	۱۲/۰	۰/۰/۰	۰/۶/۰	۰/۳/۰
Fe ₂ O ₃	۸۰/۱	۵۰/۱	۶۷/۱	۶۳/۱	۳۷/۱	۲۵/۱	۴۹/۱	۰/۳/۲	۶۷/۱
FeO	۶۸/۱۳	۵۴/۱۳	۷۸/۱۱	۹۰/۱۳	۵۱/۱۲	۱۹/۱۴	۰/۸/۱۳	۶۱/۱۲	۵۹/۱۲
MnO	۳۸/۰	۳۷/۰	۳۷/۰	۱۳/۰	۳۲/۰	۳۶/۰	۳۴/۰	۰/۳/۱	۲۸/۰
MgO	۳۰/۱۰	۷۱/۱۰	۳۸/۱۳	۹۷/۱۰	۸۴/۱۳	۲۲/۱۰	۵۴/۱۳	۵۸/۱۰	۷۴/۱۳
CaO	۷۵/۱۱	۹۲/۱۱	۱۲	۸۵/۱۱	۹۶/۱۱	۸۰/۱۱	۹۶/۱۱	۷۳/۱۱	۱۱/۱۲
Na ₂ O	۱۶/۱	۲۰/۱	۶۳/۰	۰/۴/۱	۵۸/۰	۱۱/۱	۵۳/۰	۳۰/۱	۶۹/۰
K ₂ O	۸۹/۰	۹۱/۰	۳۲/۰	۷۳/۰	۲۰/۰	۹۴/۰	۱۷/۰	۰/۶/۱	۲۵/۰
H ₂ O	۹۵/۱	۹۵/۱	۰/۲/۲	۰/۰/۲	۰/۴/۲	۰/۰/۲	۰/۶/۲	۰/۱/۲	۰/۶/۲
F	۰/۹/۰	۰/۹/۰	۰/۷/۰	۰/۱/۰	۰/۲/۰	۰/۱/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰
Cl	۰/۵/۰	۰/۹/۰	۰/۳/۰	۰/۳/۰	۰/۲/۰	۰/۷/۰	۰/۳/۰	۰/۹/۰	۰/۳/۰
total	۱۱/۹۹	۳۸/۹۹	۳۱/۹۹	۱۳/۹۹	۴۹/۹۹	۶۷/۹۹	۸۵/۹۹	۷۸/۹۹	۱۸/۱۰۰
Fe as	۲۹/۱۵	۹۰/۱۴	۲۸/۱۳	۳۷/۱۵	۷۵/۱۳	۳۱/۱۵	۴۲/۱۴	۴۳/۱۴	۰/۹/۱۴

فرمول ساختاری و محاسبه اعضای نهائی آمفیبولها

آمفیبولها دارای فرمول عمومی $C_5^{IV}T_8O_{22}(OH)_2$ هستند [۷]. موقعیت‌های A، B، C و T توسط کاتیونهای مختلف اشغال می‌شوند. در حالت کلی، A یک جایگاه، B دو جایگاه (M_4) و C پنج جایگاه بلوری (M_1 ، M_2 ، M_3 و T) از هشت جایگاه موجود در واحد ساختاری آمفیبولها را اشغال می‌کنند. با توجه به اندازه کاتیونها، هر یک از عناصر بر اساس اندازه و شعاع یونی خود می‌توانند موقعیت‌های A، B، C و T را اشغال کنند. عناصر با شعاع یونی بزرگتر (مانند K) فقط جایگاه A را اشغال می‌کنند. بر همین اساس، اتمهای Na در جایگاه‌های A یا B، Ca فقط در جایگاه B، اتمهای Mg، Fe، Co، Ni و Mn ترجیحاً در جایگاه B و یونهای گروه نوع M (مانند Al) در جایگاه C یا T قرار می‌گیرند. با توجه به نوع عناصری که در جایگاه B قرار می‌گیرند لیک و همکاران [۷] آمفیبولها را به چهار گروه زیر تقسیم کردند:

- ۱- آمفیبولهای Mg-Fe-Mn-Li که در این گروه $B \geq 1$ (Mg, Fe, Mn, Li) و $B < 1$ (Ca+Na).
- ۲- گروه کلسیک که در آنها $NaB < 0.5$ و $CaB > 1.5$ ، $(Ca+Na)B \geq 1$.
- ۳- گروه سدیک-کلسیک که در آنها $0.5 - 1.5$ ، $NaB = 1$ ، $(Ca+Na)B \geq 1$.
- ۴- گروه سدیک که در آنها $NaB \geq 1.5$.

ما نیز از این روش برای رده‌بندی آمفیبول‌های موجود در متابازیت‌های شمال خوی استفاده کردیم. فرمول ساختاری آمفیبولها بر اساس ۲۳ اکسیژن با استفاده از نرم افزارهای ویژه این کار (مانند [۸] axwin) تعیین شد که نتایج آن در جدول ۲ آمده است. در نمونه D تمامی آمفیبولها دارای (Ca + Na) بین ۱٫۹ تا ۲ B، و (Ca) بین ۱٫۵۵۲ تا ۱٫۹۷۱ B هستند و مقدار (Na+K)A در آنها بسیار ناچیز است. در رده‌بندی لیک و همکاران [۷] آمفیبول‌های موجود در متابازیت‌های شمال خوی در محدوده آمفیبول‌های کلسیک (Calcic-Amphiboles) قرار می‌گیرند. آمفیبول‌های کلسیک نیز بر اساس (Ca)B و (Na+K)A به دو گروه زیر تقسیم می‌شوند:

گروه اول $(Ca)B > ۱٫۵$ و $(Na+K)A \geq ۰٫۵$.

گروه دوم $(Ca)B > ۱٫۵$ و $(Na+K)A < ۰٫۵$.

در رده‌بندی آمفیبولها [۷] که بر اساس تغییرات اتمهای سیلیسیم در واحد فرمول و مقادیر Ti, Ca و $Mg/(Mg+Fe^{+2})$ و عناصر آلکان تنظیم شده است، نمونه‌های آمفیبولی D در محدوده فروپارگازیت و منیزوهاستنگسیت و آمفیبول‌های E در محدوده گروه دوم آمفیبول‌های کلسیک قرار می‌گیرند (شکل ۱).

لازم به یادآوری است که بخش مرکزی بلورهای آمفیبول موجود در نمونه E غنی از مولکول چرماک و بخش حاشیه بلورها از نوع منیزیم هورنبلند است. در واقع بخش مرکزی از عناصری مانند آلومینیوم، کلسیم نسبت به حاشیه غنی تر و بر عکس عناصری مانند سیلیسیم، منیزیم در حاشیه تمرکز بیشتری پیدا کرده‌اند. ساختار منطقه‌ای بلورهای آمفیبول نشان تبلور و رشد این کانی در دو شرط دگرگونی متفاوت است.

جدول ۲ فرمول ساختمانی آمفیبولها بر اساس ۲۳ اکسیژن و محاسبه پارامترها و اعضای انتهایی این کانیها.

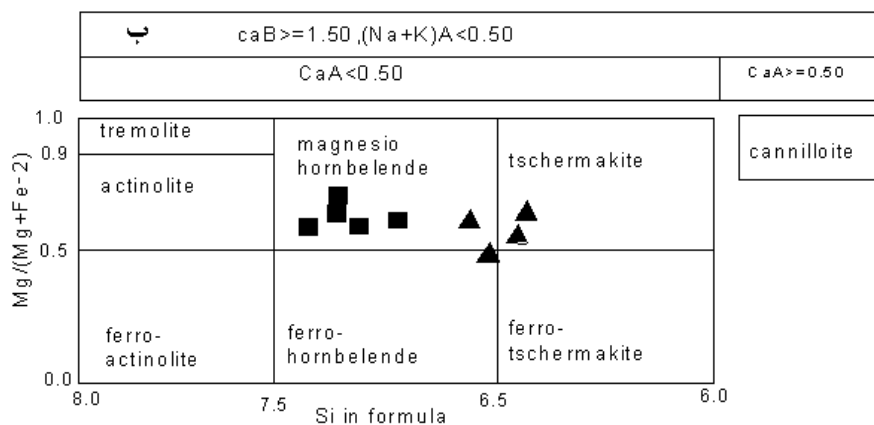
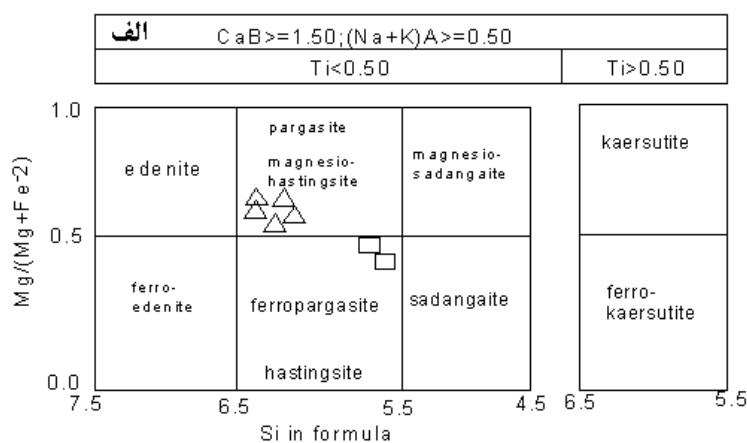
elements	D1	D2	D3	D4 core	D4 rim	D5	D6	D7
Si	۶٫۴۰۳	۵٫۸۹۱	۶٫۲۵۱	۶٫۴۹۱	۷٫۹۰۰	۶٫۳۹۰	۵٫۸۶۲	۶٫۷۳۵
Al	۱٫۵۹۷	۲٫۱۰۹	۱٫۷۴۹	۱٫۵۰۹	۰٫۱۰۰	۱٫۶۱۰	۲٫۱۳۸	۱٫۶۲۵
Sum T	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰	۸٫۰۰۰
Al	۰٫۵۰۰	۰٫۸۲۲	۰٫۶۴۹	۰٫۴۵۰	۰٫۱۱۶	۰٫۵۶۳	۰٫۷۹۳	۰٫۵۶۵
Ti	۰٫۰۷۸	۰٫۱۱۲	۰٫۱۷۰	۰٫۲۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۱۵۶	۰٫۱۱۷	۰٫۱۳۹
Cr	۰٫۰۰۴	۰٫۰۱۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۱۷	۰٫۰۰۳	۰٫۰۲۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۰
Fe ⁺³	۰٫۴۱	۰٫۳۶	۰٫۱۹۸	۰٫۱۸۲	۰٫۰۰۳	۰٫۱۳۰	۰٫۴۲۴	۰٫۱۷۶
Mg	۲٫۱۴۳	۱٫۵۹۵	۲٫۲۱۶	۲٫۳۹۴	۳٫۳۵۴	۲٫۴۱۱	۱٫۶۰۴	۲٫۴۱۹

Fe ⁺²	۱,۸۶۶	۲,۱۰۱	۱,۷۶۷	۱,۷۵۷	۱,۵۰۹	۱,۷۱۹	۲,۰۶۳	۱,۶۹۱
Mn	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۱۶	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰
Sum C	۵,۰۰۰	۵,۰۰۰	۵,۰۰۰	۵,۰۰۰	۵,۰۰۰	۵,۰۰۰	۵,۰۰۰	۵,۰۰۰
Fe ⁺²	۰,۳۵۰	۰,۰۱۵	۰,۰۳۰	۰,۰۳۷	۰,۰۰۰	۰,۰۶۸	۰,۰۲۱	۰,۰۷۶
Mn	۰,۰۵۱	۰,۰۴۳	۰,۰۲۵	۰,۰۱۵	۰,۰۰۵	۰,۰۰۴	۰,۰۶۷	۰,۰۱۲
Ca	۱,۸۶۲	۱,۹۲۷	۱,۸۶۷	۱,۸۸۵	۱,۹۷۱	۱,۸۸۷	۱,۸۹۴	۱,۸۶۸
Na	۰,۰۵۲	۰,۰۱۵	۰,۰۷۷	۰,۰۶۴	۰,۰۲۵	۰,۰۴۱	۰,۰۱۸	۰,۰۴۴
Sum B	۲,۰۰۰	۲,۰۰۰	۲,۰۰۰	۲,۰۰۰	۲,۰۰۰	۲,۰۰۰	۲,۰۰۰	۲,۰۰۰
Na	۰,۴۳۹	۰,۵۵۵	۰,۴۷۰	۰,۳۸۲	۰,۰۰۱	۰,۴۵۶	۰,۵۴۳	۰,۴۹۰
K	۰,۱۴۰	۰,۱۵۳	۰,۱۶۹	۰,۱۴۲	۰,۰۰۲	۰,۱۶۸	۰,۱۶۲	۰,۱۵۱
total	۱۵,۵۷۹	۱۵,۷۰۹	۱۵,۶۳۹	۱۵,۵۲۳	۱۵,۰۰۳	۱۵,۶۲۶	۱۵,۷۰۵	۱۵,۶۴۰
Ca+Na on B	۱,۹۱۴	۱,۹۴۲	۱,۹۴۴	۱,۹۴۸	۱,۹۹۵	۱,۹۲۸	۱,۹۱۲	۱,۹۱۲
Ca on B	۱,۸۶۲	۱,۹۲۷	۱,۸۶۷	۱,۸۸۵	۱,۹۷۱	۱,۸۸۷	۱,۸۹۴	۱,۸۶۸
Na on B	۰,۰۵۲	۰,۰۱۵	۰,۰۷۷	۰,۰۶۴	۰,۰۲۵	۰,۰۴۱	۰,۰۱۸	۰,۰۴۴
Na+K on A	۰,۵۷۹	۰,۷۰۹	۰,۶۳۹	۰,۵۲۳	۰,۰۰۳	۰,۶۲۶	۰,۷۰۵	۰,۶۴۰
Sum L	۴,۰۹۳	۳,۷۵۰	۴,۰۳۲	۴,۲۰۰	۴,۸۸۱	۴,۲۰۰	۳,۷۴۹	۴,۱۹۷
Al ^{vi}	۰,۵۰۰	۰,۸۲۲	۰,۶۴۹	۰,۴۵۰	۰,۱۱۶	۰,۵۶۳	۰,۷۹۳	۰,۵۶۵
Mg/(Mg+Fe ⁺²)	۰,۵۳۰	۰,۴۳۰	۰,۵۵۲	۰,۵۷۲	۰,۶۹۰	۰,۵۷۵	۰,۶۳۵	۰,۵۷۸
name	pargasite	Ferroparg- asite	pargasite	pargasite	actinolite	pargasite	Ferroparg- asite	pargasite

ادامه جدول ۲

elements	E1	E2 core	E2 rim	E3 core	E3 rim	E4 core	E4 rim	E5 core	E5 rim
Si	۶,۴۰۳	۶,۵۱۶	۷,۱۸۱	۶,۶۳۴	۷,۳۴۲	۶,۴۷	۷,۳۳	۶,۴۲۸	۷,۲۰۰
Al	۱,۵۹۳	۱,۴۸۴	۰,۸۱۹	۱,۳۶۶	۰,۶۵۸	۱,۵۳	۰,۶۵۶	۱,۵۷۲	۰,۸۰۰
Sum T	۸,۰۰۰	۸,۰۰۰	۸,۰۰۰	۸,۰۰۰	۸,۰۰۰	۸,۰۰۰	۸,۰۰۰	۸,۰۰۰	۸,۰۰۰
Al	۰,۷۰۵	۰,۶۹۴	۰,۴۰۶	۰,۶۳۴	۰,۳۰۹	۰,۷۴۷	۰,۳۱۸	۰,۷۲۲	۰,۳۳۴
Ti	۰,۱۱۴	۰,۰۹۳	۰,۰۶۴	۰,۰۸۵	۰,۰۵۰	۰,۱۱۰	۰,۰۴۵	۰,۱۰۷	۰,۰۵۰
Cr	۰,۰۱۴	۰,۰۰۰	۰,۰۱۰	۰,۰۰۴	۰,۰۰۸	۰,۰۱۰۴	۰,۰۰۰	۰,۰۰۷	۰,۰۰۳
Fe ³	۰,۲۰۲	۰,۱۶۸	۰,۱۸۲	۰,۱۸۳	۰,۱۵۰	۰,۱۳۹	۰,۱۶۳	۰,۲۲۵	۰,۱۸۲
Mg	۲,۲۹۴	۲,۳۷۴	۲,۹۰۸	۲,۴۳۱	۳,۰۰۲	۲,۲۶۱	۲,۹۳۳	۲,۳۸۹	۲,۹۶۹
Fe ⁺²	۱,۶۷۱	۱,۶۷۰	۱,۴۳۰	۱,۶۶۳	۱,۴۸۰	۱,۷۲۹	۱,۵۴۱	۱,۵۴۰	۱,۴۶۱
Mn	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰
Sum C	۵,۰۰۰	۵,۰۰۰	۵,۰۰۰	۵,۰۰۰	۵,۰۰۰	۵,۰۰۰	۵,۰۰۰	۵,۰۰۰	۵,۰۰۰
Fe ⁺²	۰,۰۳۸	۰,۰۱۴	۰,۰۰۶	۰,۰۶۵	۰,۰۴۲	۰,۰۳۳	۰,۰۴۸	۰,۰۱۷	۰,۰۶۴
Mn	۰,۰۴۸	۰,۰۴۷	۰,۰۴۶	۰,۰۱۶	۰,۰۳۹	۰,۰۴۸	۰,۴۲۰	۰,۰۳۸	۰,۰۳۴
Ca	۱,۸۸۲	۱,۸۹۸	۱,۸۴۷	۱,۸۸۷	۱,۸۶۴	۱,۸۷۶	۱,۸۶۲	۱,۸۵۶	۱,۸۸۰

Na	۰.۳۲	۰.۴۲	۰.۷۴	۰.۳۲	۰.۵۵	۰.۴۴	۰.۴۸	۰.۸۹	۰.۲۲
SumB	۲.۰۰۰	۲.۰۰۰	۲.۰۰۰	۲.۰۰۰	۲.۰۰۰	۲.۰۰۰	۲.۰۰۰	۲.۰۰۰	۲.۰۰۰
Na	۰.۳۰۵	۰.۳۰۳	۰.۱۰۶	۰.۲۶۸	۰.۱۰۹	۰.۲۷۶	۰.۱۰۱	۰.۲۸۳	۰.۱۵۷
K	۰.۱۷۰	۰.۱۷۳	۰.۰۶۰	۰.۲۳۸	۰.۳۶۰	۰.۱۷۷	۰.۰۳۲	۰.۱۹۹	۰.۰۴۵
total	۱۵.۴۷۵	۱۵.۴۷۷	۱۵.۱۶۵	۱۵.۴۰۷	۱۵.۱۴۶	۱۵.۴۵۲	۱۵.۱۳۳	۱۵.۴۸۲	۱۵.۲۰۲
Ca+Na on B	۱.۹۱۴	۱.۹۴۰	۱.۹۴۸	۱.۹۱۹.	۱.۹۱۹	۱.۹۱۹	۱.۹۱۰	۱.۹۴۵	۱.۹۰۱
Ca on B	۱.۵۵۲	۱.۸۹۷	۱.۸۷۴	۱.۸۸۷	۱.۸۶۴	۱.۸۷۶	۱.۸۶۲	۱.۸۵۶	۱.۸۸۰
Na on B	۰.۳۶۲	۰.۰۴۲	۰.۰۷۴	۰.۰۳۲	۰.۰۵۵	۰.۰۴۴	۰.۰۴۶	۰.۰۸۹	۰.۰۲۲
Na+K on A	۰.۴۷۵	۰.۴۷۷	۰.۱۶۵	۰.۴۰۷	۰.۱۴۶	۰.۴۵۴	۰.۱۳۳	۰.۴۸۲	۰.۲۰۲
Sum L	۴.۰۴۶	۴.۰۹۹	۴.۳۸۴	۴.۱۷۴	۴.۵۶۲	۴.۰۶۹	۴.۵۶۷	۳.۹۸۲	۴.۵۲۸
Al ^{vi}	۰.۷۰۵	۰.۶۹۴	۰.۴۰۶	۰.۶۳۴	۰.۳۰۹	۰.۷۴۷	۰.۳۱۸	۰.۷۳۲	۰.۳۳۴
Mg(Mg+Fe ²⁺)	۰.۵۷۳	۰.۵۸۵	۰.۶۶۹	۰.۵۸۵	۰.۶۶۹	۰.۵۶۲	۰.۶۴۹	۰.۶۰۵	۰.۶۶۱
name	Tschermakite	Mg-hbl	Mg-hbl	Mg-hbl	Mg-hbl	Tschermakite	Mg-hbl	Tschermakite	Mg-hbl



شکل ۱ رده‌بندی آمفیبولهای کلسیک [۷]. a: علامت مربوط به آمفیبولهای موجود در متابازیت‌های شمال خوی است که دارای مجموعه کانیایی $\text{Cpx} + \text{Grt} + \text{Pl} + \text{Hbl}$ هستند (نمونه‌های D). مثلثها مربوط به هورنبلندها و مربعات مربوط به هورنبلندهای در تماس با گارنت‌اند. b: علامت معرف آمفیبولهای نمونه E است به طوریکه مثلثها نمایانگر بخش مرکزی و مربعات مربوط به حاشیه هستند. (آمفیبولیت E دارای مجموعه کانیایی $\text{Pl} + \text{Hbl} \pm \text{Chl}$ است).

ژئوتروبارومتری براساس ترکیب شیمیایی آمفیبول‌ها

به دلیل فرمول شیمیایی گسترده آمفیبولها، عناصر زیادی می‌توانند در ساختار این کانیها شرکت کنند. مقدار بعضی از این عناصر (Na, Ca, Ti, Al) تابع فشار، دما و فوگاسیته اکسیژن است. بنابراین مقدار و جابجایی این عناصر می‌تواند در ژئوترومتری و ژئوبارومتری آمفیبولها مورد استفاده قرار گیرد [۹]. در جدول ۳ رابطه مثبت و یا منفی عناصر شاخص نسبت به تغییرات فشار، دما، فوگاسیته اکسیژن و فراوانی عنصر (غلظت) در آمفیبولها نشان داده شده است. با توجه به جدول ۳ مشخص می‌شود که $\text{Al}^{(iv)}$ ، $\text{Al}^{(T)}$ ، $\text{Al}^{(iv)} = \text{Al}^{(iv)} + \text{Al}^{(vi)}$ و Ti برای ژئوترومتری و ژئوبارومتری آمفیبولها مناسب هستند زیرا مقدار $\text{Al}^{(iv)}$ با افزایش دما افزایش یافته و تغییرات فشار بر آن بی‌اثر است. مقدار $\text{Al}^{(vi)}$ در آمفیبولها با بالا رفتن فشار افزایش می‌یابد. مقدار Ti نیز تابع دما است و با افزایش دما در آمفیبولها مقدار آن افزایش می‌یابد. بنابراین مقدار تیتانیم موجود در آمفیبولها می‌تواند به عنوان یک ژئوترومتر، دمای تشکیل آمفیبولها را بیان کند [۹]. همچنین $\text{Al}^{(T)}$ و $\text{Al}^{(vi)}$ نیز مبنای بارومتری در آمفیبولها محسوب می‌شوند، زیرا مقدار $\text{Al}^{(T)}$ در آمفیبولها تابع غلظت اولیه (غلظت Al در سنگ مادر) نیست، بلکه تابع فشار حاکم در طول تشکیل آمفیبولهاست (جدول ۳). به طور کلی آمفیبولهایی که در فشارهای بالا به وجود می‌آیند نسبت $(\text{Mg} / \text{Mg} + \text{Fe}^{+2})$ کمتری از آمفیبولهای فشار پایین دارند. همچنین مقدار SiO_2 در آمفیبولها (به ویژه در سنگهای آذرین) تابع مقدار SiO_2 در ماگماست نه دما و فشار. در حالیکه افزایش Al در آمفیبولها ناشی از کاهش SiO_2 در محیط نیست، بلکه ناشی از افزایش فشار است، زیرا غالباً در آمفیبولها ادخالهای کوارتز وجود دارد. مقدار $\text{Al}^{(iv)}$ تابع دماست به طوریکه به ازای هر صد درجه سانتیگراد دما، تقریباً ۰٫۳ کاتیونی $\text{Al}^{(iv)}$ اضافه می‌شود [۹]. با در نظر گرفتن این پارامترها به ویژه مقدار $\text{Al}^{(T)}$ در آمفیبولها، ژوهانسن، رتروفورد و هارکر [۹، ۱۵ و ۱۶] برای محاسبه فشار رابطه خاصی ارائه کردند که از آنها برای تعیین فشار حاکم بر محیط تبلور آمفیبولها استفاده کرده‌ایم (جدول ۴):

$$P \pm 0.5 \text{ Kbar} = -3.92 + 4.23 \text{ Al}^{(T)}$$

منظور از $\text{Al}^{(T)}$ کل آلومینیوم موجود در آمفیبول است.

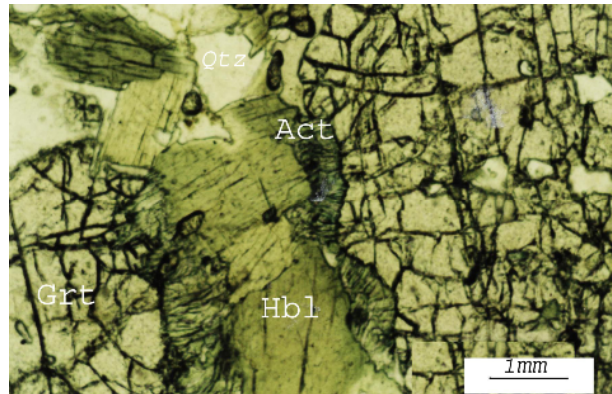
جدول ۳ تغییرات عناصر شاخص در آمفیبول ها متناسب با فشار، دما، فوگاسیته اکسیژن و غلظت عنصر [۹]. +: افزایش، -: کاهش، مکانهای خالی: بی تأثیر.

منابع	غلظت فوگاسیته اکسیژن	فشار	دما	عنصر
[۹ و ۱۰]	+			Si
[۱۱]			+	Al ^(iv)
[۱۱]		+	-	Al ^(vi)
[۱۰ و ۱۱]	+		+	Ti
[۱۲]			-	Mn
[۱۱]			-	Fe ⁺³ /(Fe ⁺³ +Fe ⁺²)
[۱۳]	+	+	+	Mg/(Mg+Fe ⁺²)
[۱۳]			+	مکان A
[۱۱]	+			عناصر آلکان
[۱۱ و ۱۲]		+		Al ^(T)

چنانکه در بخشهای قبلی نیز اشاره شد، آمفیبولهای شمال خوی بسیار متفاوتند. مثلاً در آمفیبولیت نمونه E که بیشتر از هورنبلند + پلاژیوکلاز ± کلریت تشکیل شده است (منطقه غرب جاده خوی-عسگرآباد)، بین مرکز و حاشیه آمفیبولها از لحاظ ترکیب شیمیایی اختلاف وجود دارد (جدول ۱). در آمفیبولیت نمونه D که آمفیبولها با گارنت+کلینوپیروکسن(دیوپسید) + پلاژیوکلاز همراهند نیز دو نوع آمفیبول دیده شد، یک نوع در تماس با گارنت و دیگری بدون تماس با آن. آمفیبولهایی که در تماس با گارنت هستند (نمونههای D7, D2)، فشاری در حدود ۸/۹ کیلو بار ولی آمفیبولهای بدون تماس با گارنت در همان سنگ فشاری بین ۵/۹ تا ۷ کیلو بار را نشان می دهند (جدول ۴). بنابراین در این نمونهها، اختلاف فشار بین آمفیبولهای بدون تماس با گارنت و آمفیبولهای در تماس با گارنت کاملاً محسوس است. حال این سوال مطرح می شود که آیا در این منطقه افزایش فشار باعث افزایش Al^(T) در آمفیبولهای در تماس با گارنت شده و یا فرایندهای دیگری دخالت داشته اند. با توجه به این که بین گارنت و آمفیبول یک حاشیه سمپلکتیکی (شکل ۲) متشکل از اکتینولیت + کوارتز حاصل شده است، بنابراین این مکان وجود دارد که در حین تحول هورنبلند به اکتینولیت، مقدار Mg در هورنبلند کاهش و Al آن تمرکز یافته باشد. در چنین حالتی افزایش Al در آمفیبولها نمی تواند با افزایش فشار نسبتی داشته باشد. ضمناً یاد آور می شود که ژئوبارومتر بالا وقتی از اطمینان کافی برخوردار است که آمفیبول با پلاژیوکلاز در تعادل باشد نه با گارنت.

در نمونه آمفیبولیت E که متشکل از آمفیبول + پلاژیوکلاز است، آمفیبولها دارای ساختار منطقه ای هستند و بین مرکز و حاشیه بلورها اختلاف ترکیب کاملاً واضح است. محاسبه

بارومتری نشان می‌دهد که بخش مرکزی این آمفیبولها در فشاری بین ۵ تا ۶٫۲۵ کیلو بار و بخش حاشیهای آنها در فشارهای کمتر (حدود ۰٫۵ الی ۲٫۷ کیلو بار) متبلور شده است.



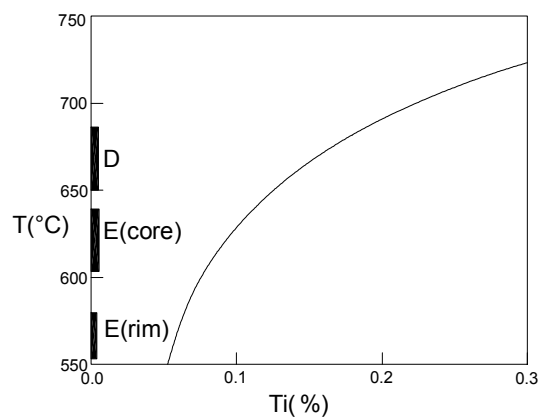
شکل ۲ ایجاد حاشیه سمپلکتیک متشکل از کوارتز و اکتینولیت [Act] در حدفاصل گارنت [Grt] و هورنبلند [Hbl] در متابازیت‌های شمال خوی. جدول ۴ محاسبه $Al^{(T)}$ و فشار (برحسب کیلو بار) به روش ژوهانسن و رتروفورد [۱۶]. به اختلاف فشار بین مرکز و حاشیه بلورهای آمفیبول در نمونه های E همچنین اختلاف فشار بین آمفیبول های در تماس با گارنت (D2 و D7) و آمفیبول های بدون تماس با گارنت توجه شود.

نمونه آمفیبول	$Al^{(T)}$	ژوهانسن و رتروفورد $P \pm 0.5 \text{ Kb}$
D1	۲٫۰۹۷	۵٫۴۱
D2	۲٫۹۳۱	۸٫۹۷۱
D3 مرکز بلور	۲٫۳۹۸	۶٫۶۷
D4 حاشیه بلور	۱٫۹۵۹	۴٫۸۳
D5	۰٫۲۱۵	---
D6	۲٫۷۱۳	۵٫۷۳۱
D7	۲٫۹۳۷	۸٫۹۶۳
D8	۲٫۱۹	۵٫۸۰۳
E1	۲٫۲۹۹	۶٫۲۶۴
E2 مرکز بلور	۲٫۱۷۸	۵٫۷۵۲
E2 حاشیه بلور	۱٫۲۲۵	۱٫۷۲۱
E3 مرکز بلور	۲٫۰۰	۵٫۰۰
E3 حاشیه بلور	۰٫۹۶۷	۰٫۶۳۰

E4 مرکز بلور	۲,۲۷۷	۶,۲۱
E4 حاشیه بلور	۰,۹۵۴	۰,۵۷۵
E5 مرکز بلور	۲,۳۰۴	۶,۲۸
E5 حاشیه بلور	۱,۱۳۴	۱,۳۳۶

ژئوترمومتری بر اساس مقدار تیتانیم در کلینو آمفیبولها

حلالیت تیتانیم در کانیهای سیلیکاتی بویژه آمفیبولها، میکاها و پیروکسینها تابع دماست. نمودار تغییرات Ti-دما برای اولین بار توسط راس در سال ۱۹۷۴ میلادی بکار گرفته شد که بعداً توسط رابینسون کالیبره و توسط هولوچر تکمیل شد [۱۳، ۱۷ و ۱۸]. ما نیز برای تعیین دمای تشکیل آمفیبولها در متابازیت‌های شمال خوی از نمودار راس و هولوچر [۱۳ و ۱۸] استفاده کرده‌ایم. نمودار به کار برده شده در شکل ۳ نشان داده شده است. در این نمودار مقدار تیتانیم در کلینو آمفیبولها با افزایش فشار رابطه مستقیم دارد. مطابق این نمودار آمفیبول موجود در آمفیبولیت‌های دارای گارنت و کلینوپيروكسن (نمونه D) دماهایی بین ۶۵۰ الی ۶۸۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهند. این دما به روشهای دیگر نیز تأیید شد [۱۹]. ولی آمفیبول موجود در آمفیبولیت‌هایی فاقد گارنت و پیروکسن (نمونه E) نسبت به آمفیبولیت‌های گارنت و پیروکسن دار (نمونه D) دمای کمتری را نشان می‌دهند، به علاوه مقدار دمای اندازه‌گیری شده برای بخش مرکزی بلورهای آمفیبول (۶۰۰ الی ۶۴۰ درجه سانتیگراد) نسبت به حاشیه آنها (۵۵۰ تا ۵۸۰ درجه سانتیگراد) کمی بیشتر است. با توجه به این که در بخش حاشیه این آمفیبولها هم افت فشار و هم افت دما وجود دارد، بنابراین چنین حالتی از یک مسیر P-T-t نرمال حکایت می‌کند [۱۹ و ۲۰].

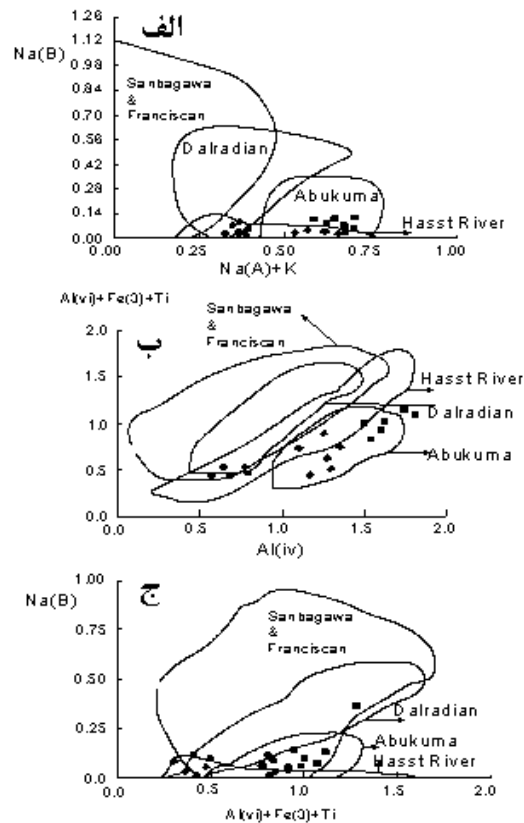


شکل ۳ نمودار ژئوترمو متر Ti در کلینوآمفیبولها [۱۸]. خطوط پر رنگ دمای تشکیل آمفیبولهای موجود در متابازیت‌های شمال خوی را نشان می دهند.

نوع دگرگونی

با توجه به اینکه ترکیب آمفیبولها با فشار و دما تغییر می کند، لارد و آلبی بر اساس این تغییرات، درجه دگرگونی و انواع آن را مشخص کرده اند [۲۱] که در شکل ۴ نشان داده شده است. به کمک این نمودارها، سنگ‌های دگرگونه فشار بالا (رخساره شیست آبی) از دگرگونه فشار متوسط متمایز می شوند. همانگونه که سنگهای دگرگونه سانباگاواای ژاپن و فرانسیسکن کالیفرنیا از سنگهای فشار متوسط دالرادیان اسکاتلند و هاست ریور نیوزیلند متمایز شده اند. همچنین سنگهای دگرگونه فشار پائین، مثل آبوکومای ژاپن، از سنگهای دگرگونه فشار متوسط قابل تمیزند. در واقع اختلاف در ترکیب آمفیبولها می تواند به خوبی نوع دگرگونی را مشخص کند.

در شکل ۴ تغییرات Na(B) در مقابل (Na+K)A، $Al^{(iv)}$ در مقابل $Fe^{+3} + Ti + Al^{vi}$ و Na(B) در مقابل $Al^{(vi)} + Fe^{+3} + Ti$ تصویر شده اند. مقدار Na(B) جزء گلوکوفان را در ساختار آمفیبولها مشخص می کند که برای اندازه گیری فشار دگرگونی حائز اهمیت است. مطابق شکل ۴ آمفیبولهایی که در مناطق با فشار بالا به وجود آمده اند دارای Na(B) بیشتری نسبت به آمفیبولهای سایر مناطقند، و آمفیبولهای مناطق فشار متوسط دارای Na(B) بیشتری نسبت به آمفیبولهای فشار پایین هستند.



شکل ۴ ترکیب شیمیای آمفیبولهای شمال خوی در نمودارهای لاردوالی [۲۱].

■ : نمونه های D ◆ : مرکز نمونه های E ● : حاشیه نمونه های E

مقدار $(Na+K)A$ می تواند منعکس کننده دمای دگرگونی باشد، زیرا تغییر در جزء ادنیت آمفیبولها (یعنی $O(A)Si^{iv} = Na(A)Al^{iv}$ ، جایگزینی) به شدت تابع دماست و آمفیبولهای موجود در سنگهای دگرگونه فشار بالا دارای مقدار $(Na+k)A$ کمتری بوده و بنابراین در دماهای پایین تری متبلور شده اند.

همچنین مقدار Al^{iv} به عنوان اندازه گیری مقدار تغییرات ادنیت + تغییرات چرماک $Al^{iv} Al^{vi} = Mg^{vi} Si^{iv}$ و مقدار Al^{vi} بیانگر تغییرات چرماک و گلوکوفان $Na(M4)Al^{vi} = Ca(M4)Si^{iv}$ در ساختمان آمفیبولهاست. در فشار پایین، Al ترجیحاً جایگاه چهاروجهی و در فشار بالا بیشتر جایگاه هشت وجهی (Al^{iv}) را اشغال می کند. به همین دلیل است که نوع آلومینیوم می تواند در محاسبات ژئوترموبارومتری حائز اهمیت باشد. با توجه به مطالب ذکر شده و نمودارهای شکل ۴، بیشتر آمفیبولهای موجود در متابازیت های شمال خوی در محدوده دگرگونی نوع فشار متوسط (باروین) تا فشار پائین (هاست ریور) قرار می گیرند.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تجزیه نقطه‌ای آمفیبولها نشان می‌دهد که آمفیبولیتهای شمال و شمال غرب خوی در دمای بین ۵۵۰ تا ۶۸۰ درجه و فشاری بین ۴/۵ تا ۷ کیلو بار متبلور شده‌اند. محاسبات نشان می‌دهد که نوع دگرگونی این سنگها از نوع فشار متوسط تا فشار پائین است. بنابراین با توجه به اینکه این روش به روشهای دیگری مانند هورنبلند-پلاژیوکلاز، گروسولر-آنورتیت-کوارتز-سیلیمانیت [۱۹ و ۲۰] نیز تایید شده است، لذا ترکیب شیمیای آمفیبولها و کانیهای در حال تعادل با آنها می‌توانند در تعیین ژئومتروربارومتری متابازیتها مفید باشند. اما با توجه به محاسبات انجام شده مشکلاتی که وجود دارد این است که بسیاری از آمفیبولها ممکن است در حاشیه و یا در امتداد رخها تجزیه شده باشند که در چنین حالتی این روش مناسب نخواهد بود. لذا لازم است همواره در تعیین محاسبه دما و فشار تشکیل کانیها از کانیهای سالم و در حال تعادل با کانیهای دیگر و نیز از روشهای مختلف دیگر نیز استفاده کرد.

مراجع

- [1] Bucher K., Frey M., *Petrogenesis of metamorphic rocks*, Springer Verlag, (1994) p. 318.
- [2] Kretz R., *Metamorphic Crystallization*, John Wiley & Sons, (1994) p. 507.
- [3] Miyashiro A., *Metamorphic petrology*, UCL, (1994) p. 404.
- [4] Miyashiro A., *Metamorphism and Metamorphic Belts*, George Allen and Unwin, (1974) p. 492.
- [5] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., *An introduction to the rock forming minerals*, Longman, UK, (1992) p. 528.
- [6] Schumacher J.C., *Canadian Mineralogist*, **35** (1997) pp. 238-246.
- [7] Leake E., Woolley A.R., Birch W.D., *Canadian Mineralogist*, **35** (1997) pp. 219-246.
- [8] Powell R., Holland T., *Axwin program software*, university of Cambridge (1998).
- [9] Hammarstrom J.M., Zen E.A., *American Mineralogist*, **71** (1986) pp. 1297-1313.
- [10] Cawthorn R.G., *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **40** (1976) pp. 1319-1328.
- [11] Spear F.S., *American Journal of Science*, **281** (1981) pp. 697-734.
- [12] Stephenson N.C.N., *Lithos*, **10** (1977) pp. 9-27.
- [13] Rasse P., *Contributions to mineralogy and petrology*, **45** (1974) pp. 231-236.
- [14] Helz R.T., *Mineralogical Society of American*, **9** (1982) pp. 279-346.

- [15] Harker B.R., *Igneous, sedimentary and metamorphic petrology*, John Wiley & Sons, (1997) p. 529.
- [16] Johnson M.C., Rutherford M.J., *Geology*, **17** (1989) pp. 837-841.
- [17] Robinson P., Spear F.S., Schumacher J.C., Laird J., Kelin C., Evans B.W., Doolan B.L., Mineralogical Society of America, *Reviews in Mineralogy*, **9B** (1981) pp. 1-228.
- [18] Hollocher K.T., *PhD thesis*, Departement of Geology and Geography, University of Massachusetts, (1985) p. 275.
- ۱۹ - عزیزی حسین، پایان نامه دکتري، دانشگاه تربيت معلم تهران (۱۳۸۰) ص. ۲۵۲.
- ۲۰ - عزیزی ح.، معین وزیری ح.، محجل م.، نقره ثیان م.، مجله علوم پایه دانشگاه اصفهان، (۱۳۸۲)، زیر چاپ.
- [21] Laird J., Albee A.L., *American Journal of Science*, **281** (1981) pp. 97-126.