کانی‌شناسی و دما- فشارسنجی آمفیبولیت‌های میزبان کانسار آهن گل گهر سیرجان، کرمان

گلاله اصغری*[۱]، حسن میرنژاد[۲] و جلیل قلمقاش[۳]

۱- کارشناس ارشد زمین شناسی اقتصادی، دانشگاه تهران
۲- هیئت علمی دانشگاه تهران
۳- مدیر زمین شناسی منطقه‌ای سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور

*asghary.golale@gmail.com

دریافت: ۹۱/۳/۱۷ پذیرش: ۹۱/۷/۳۰

چکیده

منطقه مورد مطالعه در جنوب غرب سیرجان در استان کرمان واقع شده است و از لحاظ ساختاری در بخش انتهای جنوب شرقی زون سنندج-سیرجان قرار می‌گیرد. سنگ‌های دگرگونی کمپلکس گل‌گهر به عنوان سنگ میزبان کانسار آهن شامل مرمر، کالک شیست، کوارتز میکاشیست، آمفیبول شیست و آمفیبولیت می‌باشد. از آنجایی که شرایط تشکیل سنگ میزبان کمک زیادی به تفسیر ژنز کانسار آهن می‌نماید. نتایج حاصل از مطالعات پتروگرافی آمفیبولیت‌های همراه با کانسنگ آهن و هم‌چنین آزمایشات الکترون میکروپروب بر روی کانی‌های این واحد سنگی نشان می‌دهد که آمفیبول‌ها از نوع کلسیک بوده و نتایج فشار سنجی حاصل از مقدار آلومینیوم در واحد فرمولی این آمفیبول‌ها ۵/۸۵ تا۷/۱۳ کیلوبار و دماسنجی آمفیبول- پلاژیوکلاز آن‌ها که به طور تقریبی ۶۸۲ تا ۷۲۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، بیانگر درجه دگرگونی احتمالی در حد رخساره آمفیبولیت برای واحد سنگی است. چنین تحولاتی قطعا برروی توده معدنی اثر گذار بوده است.

واژه‌های کلیدی: کانسار آهن گل گهر، کمپلکس گل گهر، آمفیبولیت، دما و فشارسنجی، رخساره دگرگونی

مقدمه

کانسار آهن گل‌گهر سیرجان با میزان ذخیره ۱۱۳۶ میلیون تن یکی از بزرگ‌ترین ذخایر آهن ایران می‌باشد که توسط سنگ‌های دگرگونی کمپلکس گل‌گهر در برگرفته شده است. از آن جایی که تعیین دما و فشار تشکیل سنگ‌ها در هر پهنه دگرگونی می‌تواند در تفسیر نتایج ژنز کانسار اثر گذار باشد و هم‌چنین در مطالعات قبلی در این منطقه به رخساره شیست سبز اشاره نموده اند [۱]، در این مطالعه سعی گردیده تا کانی‌شناسی و دما- فشار سنجی آمفیبولیت‌های کمپلکس گل گهر مورد بررسی قرار گیرد.

از آنجایی که لیتولوژی موجود در منطقه مورد مطالعه به ویژه کمپلکس گل‌گهر فاقد مجموعه کانی‌های آلومینوسیلیکات (سیلیمانیت، آندالوزیت و کیانیت) است، در نتیجه نمی‌توان از مجموعه کانی‌های مسکویت- آلومینوسیلیکات- سیلیمانیت (MABS) و یا گارنت- آلومینوسیلیکات-پلاژیوکلاز برای تعیین دما و فشار استفاده نمود. تنها روش‌های مناسب برای این سنگ‌ها فشارسنجی آلومینیم موجود در آمفیبول، دماسنجی آمفیبول-پلاژیوکلاز، گارنت- بیوتیت (GB) و مقدار Al در ساختار کلریت است که از روش اول و دوم Fe/Fe+Mg در آمفیبولیت‌ها استفاده شده است.

روش مطالعه

در ابتدا طی بررسی‌های صحرایی از رخنمون‌های کمپلکس گل گهر نمونه‌برداری شد. در راستای مطالعات کانی‌شناسی علاوه بر تهیه مقاطع نازک و نازک صیقلی از روش ریز پردازنده الکترونی (EMPA) جهت مطالعه شیمی کانی‌ها استفاده گردید. آنالیز نمونه‌ها به کمک دستگاه ریزپردازنده الکترونی Cameca Camebax که از انرژی و طول موج اشعه ایکس جهت پراش الکترونی و مطالعه کانی‌ها در مقاطع نازک- صیقلی استفاده می‌نماید در دپارتمان زمین‌شناسی دانشگاه کارلتون کانادا انجام گرفت.

موقعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در ۵۴ کیلومتری جنوب غرب سیرجان در استان کرمان واقع شده است که بر پایه

تقسیمات زمین‌ساختاری ایران [۲] در انتهای جنوب شرقی زون سنندج-سیرجان قرار می‌گیرد (شکل۱، الف). سنگ میزبان کانسار گل‌گهر سنگ‌های دگرگونی کمپلکس گل‌گهر با سن پالئوزوئیک [۳] هستند که از مجموعه سنگ‌های کالک شیست، مرمر، میکاشیست، کوارتز میکاشیست، کلریت شیست و آمفیبولیت تشکیل شده است (شکل۱، ب). کوارتز میکاشیست به عنوان سنگ پوش توده معدنی عمل نموده و آمفیبولیت و کلریت شیست به شکل نوارهایی در میان توده معدنی قابل مشاهده هستند.

سنگ‌شناسی توصیفی و کانی‌شناسی

آمفیبولیت در نمونه دستی برنگ سبز تیره بوده و خطوراگی واضحی را نشان می‌دهند (شکل۲). در لابلای کانسنگ در اثر پراش دگرگونی کانی‌های تیره و روشن از هم تفکیک یافته‌اند که این امر در آمفیبولیت‌های خارج از توده معدنی کمتر دیده می‌شود. آمفیبول، پلاژیوکلاز (آندزین-الیگوکلاز) به عنوان کانی‌های اصلی و آلکالی فلدسپار (ارتوکلاز)، کوارتز، مگنتیت، بیوتیت، اسفن و اپیدوت به عنوان کانی‌های فرعی مجموعه کانی‌های تشکیل دهنده آمفیبولیت‌های کمپلکس گل گهر می‌باشند (شکل۳).

فشارسنجی با آمفیبول

طبقه‌بندی عمومی آمفیبول‌ها

طبقه‌بندی آمفیبول‌ها بر اساس سازنده‌های شیمیایی موجود در فرمول استاندارد آمفیبول، یعنی $AB_2C_5^{VI}T_8^{IV}O_{22}(OH)_2$ استوار است که یون‌های حاضر در جایگاه‌های **A,B,C,T** عبارتند از : **K** فقط در **A**؛ **Na** در **A** یا **B**؛ **Ca** فقط در B؛ Fe^{2+},**Mg,Li,Mn** و بندرت یون‌های با اندازه مشابه مانند **Zn,Ni,Co** در**C** یا **B**؛ **یون های Al** وFe^{3+} و بندرت Mn^{3+} وCr^{3+} فقط در **C**؛ یون‌های دارای ظرفیت بالا شامل Ti^{4+} در C یا **T**، Zr^{4+} فقط در **C** و**Si** فقط در **T**.

در محاسبه فرمول استاندارد آمفیبول موارد زیر باید رعایت شود [۴]:

۱) مجموعه جایگاه **T** برابر ۸ است که این مقدار به ترتیب از **Al, Si** و یا **Ti** تامین می‌شود. به منظور سادگی در طبقه‌بندی، Fe^{3+} به سایت **T** اختصاص داده نمی‌شود. مقادیر عادی جانشینی برای **Si**، ۲ است اگرچه ممکن است مقدار آن از این حد تجاوز نماید.

۲) مجموعه جایگاه **C** برابر ۵ است که از مقادیر باقی مانده **Al** و **Ti** از مرحله یک و سپس بترتیب از $Zr,Cr^{3+},Fe^{3+},Mn^{3+},Mg,Fe^{2+},Mn^{2+}$ دیگر یون‌های دو بار مثبت و در نهایت **Li** تامین خواهد شد.

۳) مجموعه جایگاه **B** برابر ۲ است که از مقادیر باقیمانده Fe^{2+},Mn^{2+},Mg و**Li** از مرحله سه و سپس **Ca** و **Na** تامین می‌شود.

۴) مقدار باقی‌مانده از **Na** از مرحله سوم به جایگاه **A** منتقل شده سپس مقادیر **K** نیز اضافه می‌گردد. مقدار کل این جایگاه بین صفر تا یک است.

پس از محاسبه فرمول استاندارد و تبدیل اعداد از درصد اکسید به اتم در فرمول، می‌توان از آن جهت طبقه‌بندی آمفیبول‌ها و نیز سایر محاسبات نظیر فشار و دماسنجی استفاده نمود. [۴] آمفیبول‌ها را به ۴ دسته تقسیم نموده‌اند:

الف) **(Ca+Na)<1** و **(Mg, Fe, Mn, Li) ≥ 1** آمفیبول جزو گروه آمفیبول‌های منیزیم، آهن، منگنز و لیتیم خواهد بود.

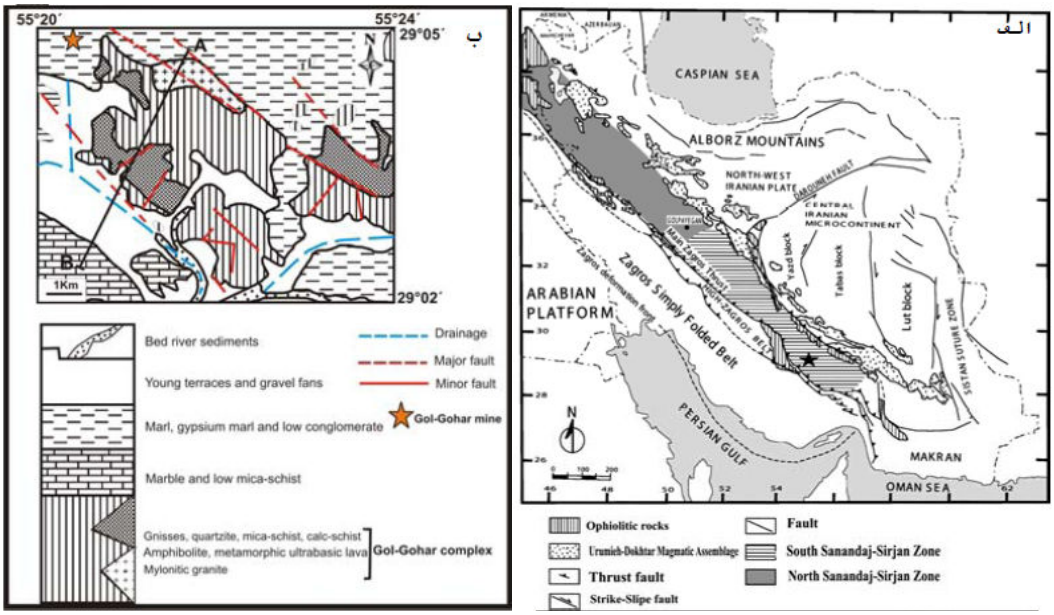
ب) **(Ca+Na)≥ 1** و Na^B**< 0.5** آنگاه آمفیبول جزو گروه آمفیبول‌های کلسیک خواهد بود. در این حالت، اغلب و نه همیشه Ca^B**>1** می باشد.

ج) $(Ca+Na)^B$**≥ 1** و مقدار Na^B بین ۰/۵ تا ۱/۵، آنگاه آمفیبول جزو گروه آمفیبول های سدیک – کلسیک خواهد بود.

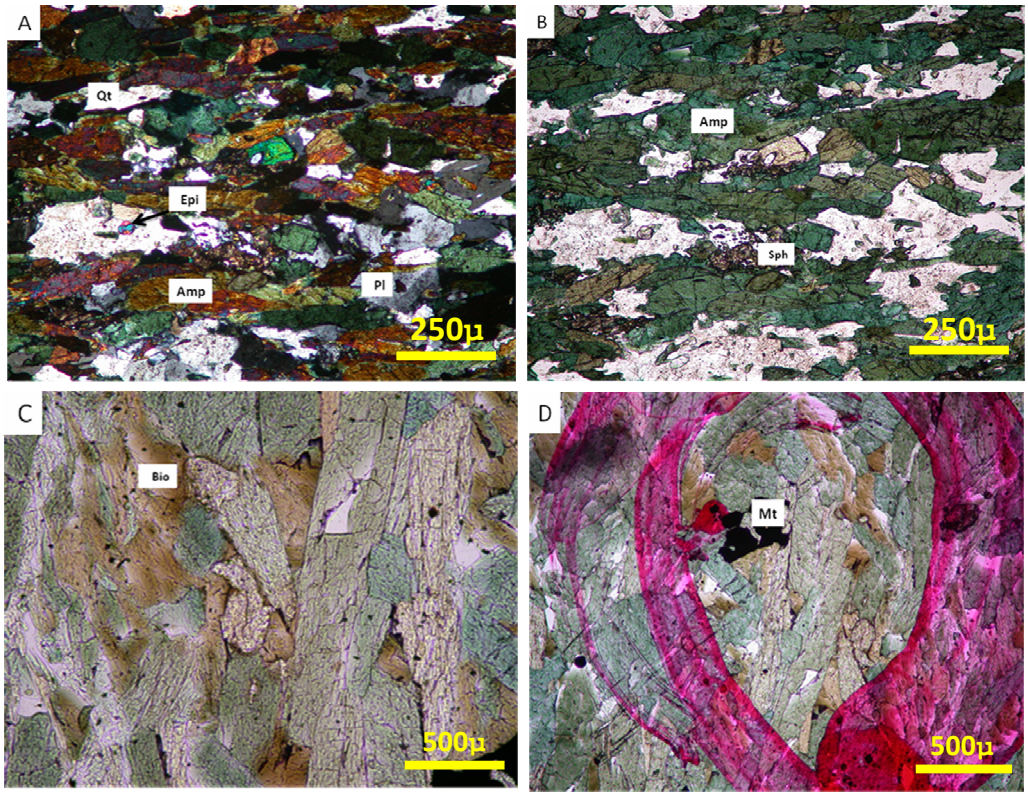
د) **Na≥ 1.5**، آنگاه آمفیبول جزو آمفیبول های گروه سدیک خواهد بود.

نکته مهم در این جا انتخاب روش مناسب برای نرمالیزه کردن آمفیبول‌هاست. [۵] نشان داد که نرمالیزه کردن بر اساس **Si + Ti + Al + Fe + Mn + Mg + Ca =** ۱۳کاتیون بهترین نتیجه را برای محاسبه فرمول ساختاری آمفیبول ارائه می‌دهد. بنابراین برای نرمالیزه کردن در این مطالعه از روش ۱۳ کاتیون استفاده شده است. لازم به یادآوری است که نرمالیزه کردن با سایر روش‌ها بر آلومینیوم کل آمفیبول (Al_{tot}) و نتیجه محاسبه فشار تأثیر

ندارد ولی بر مقادیر Al^{VI} و Al^{IV} موثر بوده و در نتیجه می‌تواند باعث تغییر در فشار محاسبه شده گردد.



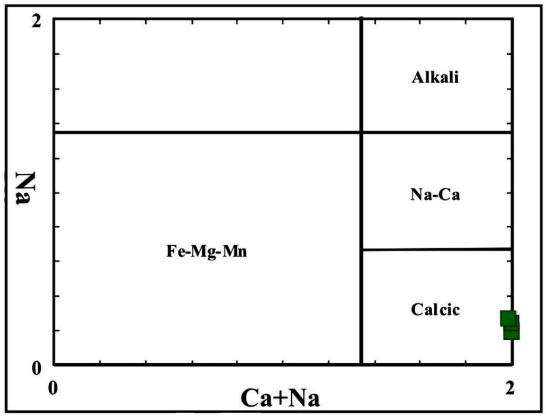
شکل ۱. الف) جایگاه تکتونیکی منطقه مورد مطالعه [۲] و ب) واحدهای پیمایش شده کمپلکس گل گهر و موقعیت آن نسبت به کانسار آهن گل گهر.



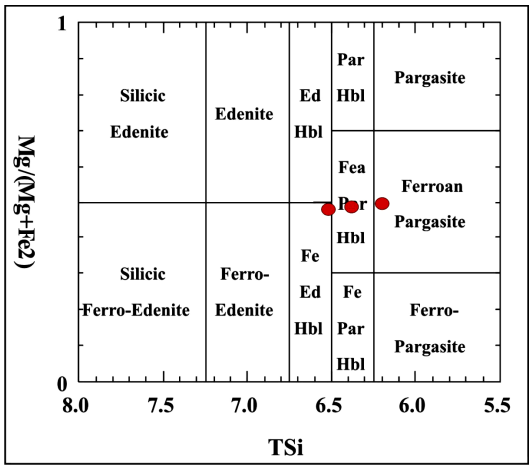
شکل ۲. تصاویرمیکروسکوپی کانی های تشکیل دهنده آمفیبولیت منطقه گل گهر کوارتز=Qt، آمفیبول=Amp، پلاژیوکلاز=Pl، اپیدوت=Epi، بیوتیت=Bio، مگنتیت=Mt، اسفن=Sph (همه تصاویر بجز A درحالت PPL).

نامگذاری آمفیبول‌ها

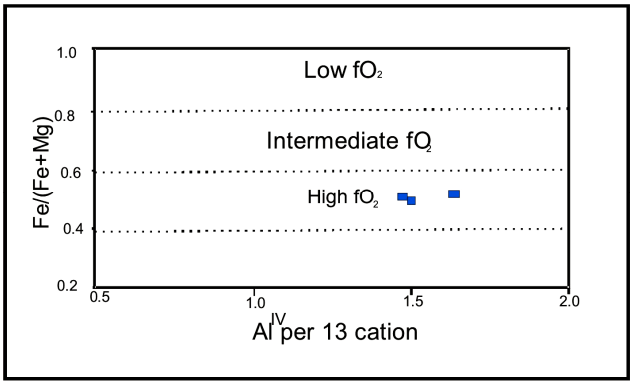
نتایج ۳ آنالیز میکروپروب برای آمفیبول‌های گل‌گهر در جدول ۱ آمده است. بر اساس روش محاسباتی و طبقه‌بندی که در بخش قبلی به آن پرداخته شد، آمفیبول‌های موجود در آمفیبولیت‌های گل‌گهر جزو گروه آمفیبول‌های کلسیک هستند (شکل۴) و فرو هورنبلند و فروپارگاسیت نامگذاری می‌شوند (شکل ۵).



شکل ۳. نمودار رده‌بندی آمفیبول‌های آنالیز شده از آمفیبولیت G3، براساس [۴].



شکل ۴. نمودار نامگذاری آمفیبول‌های آنالیز شده از آمفیبولیت G3، براساس [۴].



شکل ۵. مقادیر فوگاسیته اکسیژن آمفیبول در آمفیبولیت گل گهر براساس [۷].

فشارسنجی براساس مقدار Al آمفیبول

روش‌های فشارسنجی موجود برای آمفیبول همگی مبتنی بر اندازه‌گیری مقدار **Al** موجود در آمفیبول می‌باشد. هر اندازه مقدار **Al** موجود در آمفیبول بالاتر باشد مقدار فشار محاسبه شده افزایش خواهد یافت. البته مقدار **Al** موجود در آمفیبول با شرایط محیط ارتباط نزدیکی دارد و مجموعه‌ی از عوامل می‌توانند بر آن و در نتیجه در میزان فشار محاسبه شده تأثیرگذار باشند. بدیهی است که در این صورت مقدار فشار محاسبه شده غیر واقعی خواهد بود. پس لازم است که عوامل محیطی مؤثر بر مقدار **Al** موجود در آمفیبول و نیز ویژگی‌های یک آمفیبول مناسب برای مطالعه دما و فشارسنجی شناسایی شوند تا با در نظر گرفتن آن‌ها، اندازه‌گیری‌های فشار و دما به واقعیت نزدیک‌تر باشند.

فاکتورهای مؤثر در مقدار Al موجود در آمفیبول

اولین خصوصیتی که برای یک آمفیبول در مطالعات فشار و دماسنجی پیشنهاد می‌شود، وجود مجموعه کانیهای زیر در سنگی است که آمفیبول از آن انتخاب شده است.

کوارتز+ فلدسپارآلکالن+ پلاژیوکلاز+ بیوتیت+ هورنبلند+ اکسیدهای آهن و تیتانیم + تیتانیت

عدم وجود کامل مجموعه فوق می تواند نقایصی در برآورد دقیق فشارایجاد نماید. اگرچه بنظر نمی‌رسد که فقدان فلدسپار پتاسیم وتیتانیت در برآورد فشار به روش **Al** موجود در هورنبلند تأثیر بسزایی داشته باشد[۶].

[۷] پیشنهاد می‌کنند که پلاژیوکلاز موجود در این مجموعه باید در محدوده An_{25-35} باشد چرا که مقادیر بیشتر و یا کمتر Ca می تواند باعث تغییر مقدار **Al** موجود در هورنبلند شده و بنابراین فشار بصورت کاذب محاسبه گردد. پارامترهای مؤثر دیگر شامل، دما، فوگاسیته اکسیژن، ترکیب سنگ کل و فازهای همزیست موجود همگی در مقدار این عنصر در هورنبلند نقش دارند. واکنش‌های کنترل کننده مقدار **Al** یک آمفیبول را می توان به دو دسته تقسیم نمود. دسته اول که حساس به فشارهستند و برای نخستین بار توسط[۸] مورد بررسی قرار گرفت:

$$2SiO_2 + 2CaAl_2Si_2O_8 + K(Mg,Fe)_3(Al\,Si_3O_{10})(OH)_2$$
کوارتز آنورتیت بیوتیت
$$= KAlSi_3O_4 + Ca_2(Mg,Fe)^{VI}Al_2Si_6^{IV}Al_2O_{22}(OH)$$
اورتوکلاز چرماکیت

در این واکنش، ترکیب آمفیبول ایجاد شده (چرماکیت) بعلت جانشینی آلومینیوم در جایگاه تترائدری تغییر می‌نماید.

$$Si + \square^{2+} = Al^{IV} + Al^{VI}$$

(معادله چرماک)

واکنش‌های دیگر که حساس به درجه حرارت می‌باشند و منجر به تولید ادنیت می‌شوند:

$$NaAlSi_3O_8 + Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2 = 4SiO_2$$
آلبیت ترمولیت کوارتز
$$+ NaCa_2Mg_5Si_4\,(Al^{IV}\,Si_3)O_{22}(OH)_2$$
ادنیت

در اینجا افزایش درجه حرارت سبب تغییر ترکیب آمفیبول به سمت ادنیت و افزایش مقدار **Al** موجود در هورنبلند می‌شود:

$$Si + \square^{A} = Al^{IV} + (K+Na)^{A}$$

از دیگر واکنش‌های حساس به درجه حرارت، واکنش‌هایی است که با جانشین شدن **Ti** در جایگاه تترائدری صورت می‌گیرد.

$$Ti + \square^{2+} = 2Al^{VI}$$
$$Ti + Al^{IV} = Al^{VI} + Si$$

در واکنش‌های فوق افزایش درجه حرارت سبب افزایش میزان جانشینی Al^{VI} به جای **Ti** شده و در نتیجه مقدار **Al** موجود در آمفیبول افزایش می‌یابد. این مسئله به نوبه خود سبب خواهد شد که مقدار فشار به دست آمده از آمفیبول فوق نسبت به فشار واقعی تشکیل آن متفاوت باشد. در کنار جانشینی‌های مهم، فوگاسیته اکسیژن نیز نقش مهمی در کنترل مقدار **Al** موجود در آمفیبول دارد. این پارامتر مستقیما مقادیر نسبت‌های **Fe/(Fe+Mg)** ونیز$Fe^{3+}/(Fe^{2+} + Fe^{3+})$ را کنترل می کند. [۹] و [۷] مقادیر**Fe/(Fe+Mg)** را از ۰ تا ۰/۶ به عنوان مقادیر بالا، از ۰/۶ تا ۰/۸ به عنوان متوسط و از ۰/۸ تا ۱ را به عنوان مقادیر پایین فوگاسیته اکسیژن در آمفیبول معرفی نمودند. ارتباط بین فوگاسیته اکسیژن و مقدار جانشینی **Al** در واکنش‌هایی که در بالا ذکر گردید، براین حقیقت استوار است که در فوگاسیته پایین اکسیژن، شرایط

مساعدی برای جانشینی Fe^{2+} وجود دارد. افزایش Fe^{2+} نسبت به Fe^{3+} ترجیحا سبب جانشینی Al^{VI} بجای **Mg** در فرمول چرماک می‌گردد. بنابراین فوگاسیته پایین اکسیژن سبب بالا رفتن مقدار Al_{tot} موجود در آمفیبول و لذا افزایش فشار محاسبه شده نسبت به مقدار واقعی می‌شود. به منظور دوری از چنین محاسبات غیر واقعی محققین فوق آمفیبول‌هایی با مقادیر **Fe/(Fe+Mg)** بین ۰/۴ تا ۰/۶ را برای فشارسنجی پیشنهاد نموده‌اند. از طرف دیگر مقادیر بالای فوگاسیته اکسیژن سبب تمرکز بیش‌تر Fe^{3+} در شبکه آمفیبول‌ها و جانشینی آن به جای Al^{VI} می‌گردد. این مسئله باعث پایین رفتن مقدار Al_{tot} در آمفیبول شده و در نتیجه مقدار فشاری که به دست می‌آید پایین‌تر از مقدار واقعی آن خواهد بود. بدین سبب محققین فوق مقدار ۰/۲۵و [۱۰] مقدار ۰/۲ را در$Fe^{3+}/(Fe^{2+} + Fe^{3+})$ برای مطالعات فشار و دماسنجی درآمفیبول‌ها مناسب می‌دانند. لازم به یادآوری است که اعداد فوق به تنهایی نمی‌توانند نشان‌دهنده فوگاسیته اکسیژن محیط باشند بلکه از پارامترهای کانی‌شناسی نیز باید استفاده نمود. به عنوان مثال وجود مگنتیت و یا ایلمنیت در سنگ بترتیب حاکی از تبلور در فوگاسیته اکسیژن بالاتر و پایین‌تر می‌باشد. مقایسه آمفیبول‌های متفاوتی که مورد آنالیزهای فشار و دماسنجی قرار گرفته‌اند نشان می‌دهد که عموما آمفیبول‌های تشکیل شده در شرایط فوگاسیته اکسیژن بالا نتایج مناسب‌تری نسبت به آن‌هایی که در شرایط فوگاسیته اکسیژن پایین تشکیل شده‌اند، ارائه می‌نماید [۶].

بررسی آمفیبول و پلاژیوکلازهای موجود در آمفیبولیت‌های گل‌گهر به لحاظ داشتن شرایط لازم برای فشار و دماسنجی

در بخش قبل به شرایط مناسبی که یک آمفیبول می‌بایست برای استفاده در فشار و دماسنجی داشته باشد اشاره گردید. آمفیبولیت **G3** برای آنالیز آمفیبول استفاده شده است و حاوی کانی‌های آمفیبول، کوارتز، پلاژیوکلاز، بیوتیت، مگنتیت و اسفن می‌باشد. حضور مگنتیت معرف فوگاسیته اکسیژن بالا در زمان به تعادل رسیدن فازهای کانیایی می‌باشد و اسفن نشان می دهد که جانشینی‌های $Ti + Al^{IV} = Al^{VI} + Si$ و یا $Ti + \square^{2+} = 2Al^{VI}$ در آمفیبولیت بوقوع پیوسته است.

پلاژیوکلازهای همراه با آمفیبول در آمفیبولیت‌های منطقه گل‌گهر از الیگوکلاز تا آلبیت متغیر اند اما حجم عمده آنها را آلبیت به خود اختصاص داده است و پلاژیوکلاز با ترکیب الیگوکلاز تا آندزین در مقادیر کمتر وجود دارد که نه تنها شواهد کانی شناسی بلکه مطالعات قبلی [۱۱و۱۲] انجام شده بر روی این سنگ‌ها وجود الیگوکلاز-آندزین را در آمفیبولیت‌ها تایید می‌کنند. فاکتور مهم دیگر که می‌بایست قبل از انجام محاسبات مورد توجه قرار گیرد نسبت $Fe_{tot}/(Mg + Fe_{tot})$ در آمفیبول‌ها می‌باشد. محاسبات آنالیز میکروپروب نشان می‌دهد که این مقدار برای آمفیبول‌های مورد مطالعه بین ۰/۵ تا ۰/۵۲ می‌باشد که بخوبی در محدوده پیشنهادی ۰/۴ تا ۰/۶ توسط [۷] قرار دارند. بررسی آمفیبول‌های نمونه **G3** نشان می‌دهد که همگی آنها در محدوده فوگاسیته اکسیژن بالا قرار گرفته اند (شکل۶).

با توجه به همخوانی پارامترهای ذکر شده با مقادیر پیشنهاد شده، می‌توان از مقدار Al موجود در آمفیبول جهت فشارسنجی آمفیبولیت‌های منطقه استفاده نمود.

روش‌های فشارسنجی از طریق مقدارAl موجود در آمفیبول

[۱۳] اولین بار رابطه بین مقدار Al_{tot} در آمفیبول و فشار مؤثری که آمفیبول‌ها تحت آن متبلور شده‌اند را ارائه و فرمول زیر را برای محاسبه فشار از طریق مقدار **Al** موجود در آمفیبول در فشارهای بین ۲ تا ۸ کیلوبار معرفی نمودند.

$$P[\pm 3kbar] = -3.92 + 5.03Al_{tot}$$

[۸] ضمن تایید روش فوق، آن را به گرانیتوئیدهایی که در محدوده فشار ۴ تا ۶ کیلوبار متبلور شده‌اند گسترش و نیز مقدارخطای رابطه فوق را از ۳± به ۱± تقلیل دادند:

$$P[\pm 1\ kbar] = -4.76 + 5.64Al_{tot}$$

اولین کالیبریشن انجام شده تجربی توسط [۱۴] در دماهای ۷۲۰ تا ۷۸۰ درجه سانتیگراد و برای فشارهای ۲ تا ۸ کیلوبار ودر حضور فاز سیال با ترکیب‌های (CO_2/H_2O=50/50 and 75/25) در نظر گرفته شد:

P[±0/5kbar] = -3.46 + 4.23Altot

[۱۰] فشارسنج پیشنهادی خود را برای دماهای ۶۵۵ تا ۷۰۰ درجه و فشارهای ۲/۵ تا ۱۳ کیلوبار بصورت زیر ارائه نمود:

P[±0/6kbar] = -3.01 + 4.76Altot

جدول۲ نتایج بدست آمده از فشارسنجی با استفاده از روش‌های ذکر شده را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد میزان فشار نمونه G4-1 (۹-۱۰ کیلوبار) به علت دارا بودن میزان آلومینیوم بالاتر در آمفیبول بیشتر شده است. در نمونه G3-1 و G3-2 که به ترتیب از مرکز و حاشیه آمفیبول آنالیز انجام شده است چون در حاشیه مقدار Al افزایش یافته است فشار اندکی بیشتر از مرکز است.

جدول۱. نتایج آنالیز میکروپروب آمفیبول و فلدسپار در آمفیبولیت های منطقه گل‌گهر.

نام کانی	آمفیبول			فلدسپار	بیوتیت
نمونه	G3-1	G3-2	G4-1	G3-3	G4
SiO_2	۴۲/۳۷	۴۲/۷۹	۴۰/۸۵	۶۹/۲۱	۳۶/۶
Al_2O_3	۱۲/۱۳	۱۲/۳۴	۱۴/۷۴	۱۹/۹	۱۶/۰۹
TiO_2	۰/۷۱	۰/۸۵	۰/۶۳	۰	۱/۹۷
Cr_2O_3	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۵	۰	۰/۰۳
FeO	۱۷/۶۷	۱۷/۷۵	۱۶/۱۶	۰/۱۳	۱۶/۹۲
MnO	۰/۱۲	۰/۱۷	۰/۱۲	۰	۰/۱۱
MgO	۹/۲۶	۹/۲۱	۸/۹۲	۰	۱۲/۸۱
NiO	۰	۰	۰	۰	۰
K_2O	۰/۷۲	۰/۷۳	۰/۶۴	۰/۰۷	۹
CaO	۱۱/۱۷	۱۱/۰۶	۱۰/۸۱	۰/۳۵	۰
Na_2O	۲/۰۷	۲/۲	۲/۵۲	۱۱/۶۲	۰/۲۳
Cl	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۴	۰	۰/۱۸
F	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۵	۰	۰/۱۵
Sum	۹۶/۶۶	۹۷/۱۹	۹۵/۵۳	۱۰۱/۲۸	۹۴/۳۱
Si	۶/۵۰	۶/۴۸	۶/۲۵	۵/۹۷	۵/۵۹
Al^{IV}	۱/۴۹	۱/۵۲	۱/۷۴	۰	۲/۴۱
Al^{VI}	۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۹۲	۰	۰/۴۸
Ti	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۷	۰	۰/۲۲
Cr	۰	۰	۰	۰	۰
Fe	۲/۲۴	۲/۲۴	۲/۰۷	۰	۲/۱۶
Mn	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰	۰/۰۱
Mg	۲/۱	۲/۰۸	۲/۰۳	۰	۲/۹۱
Ni	۰	۰	۰	۰	۰
K	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۲	۰	۱/۷۵
Ca	۱/۸۲	۱/۷۹	۱/۷۷	۰/۰۳	۰
Na	۰/۶۱	۰/۶۴	۰/۷۴	۱/۹۴	۰/۰۶
CL	۰/۰۱	۰	۰/۰۱	۰	۰/۰۴
F	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰	۰/۰۷
$Fe_{tot}/Fe_{tot}+Mg$	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۵۰	–	۰/۴۲
Al_{tot}	۲/۱۷	۲/۲۰	۲/۶۶	۲/۰۲	۲/۸۹
$Mg/Mg+Fe^{2+}$	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۴۹	–	۰/۵۷

دماسنجی با استفاده از روش آمفیبول- پلاژیوکلاز

دماسنجی در این بخش براساس مقدار Al^{IV} آمفیبول کلسیک همزیست با پلاژیوکلاز درسنگ های اشباع از سیلیس بنا شده است. فاکتور تبادلی اصلی وابسته به دما درآمفیبول به صورت زیر می باشد:

$$(Na\square-1)^{A}(Al\ Si\ -1)^{T}$$

لازمه استفاده از این دو کانی به عنوان دماسنج این است که در بررسی های سنگ شناسی، آمفیبول کلسیک وپلاژیوکلاز در حالت تعادل باشند. دماسنجی آمفیبول-پلاژیوکلاز بر پایه واکنش های زیر عمل می‌نماید [۱۵]:

edenite + 4 quartz = tremolite + albite

edenite + albite = richterite + anorthite

واکنش اول به شرایطی مربوط می شود که کوارتز در سنگ حضور دارد و واکنش دوم در شرایطی است که کوارتز در سنگ وجود ندارد. بدلیل وجود کانی کوارتز درنمونه ها از معادله اول استفاده می شود. رابطه زیر برای این معادله تعریف شده است :

$$K = \left(\frac{Si-4}{8-Si}\right) Xab$$

$$T = \frac{0.677\ P - 48.98 + Y}{-0.0429 - 0.008314\ LnK}$$

در این رابطه **Si** تعداد اتم های سیلیسیم در واحد فرمول آمفیبول، **P** فشار برحسب کیلوبار و **T** دما برحسب درجه کلوین است. در صورتی که **Xab> 0.5** باشد **Y=0** است و اگر **Xab<0.5** باشد

$\mathbf{Y= -8.06 + 25.5\ (1- Xab)^2}$ خواهد بود. با توجه به داده‌های میکروپروب فلدسپار که در جدول ۱ ارائه شده است، درصد آلبیت در نمونه آنالیز شده از ۵۰ بیشتر است در نتیجه **Y=0** می‌باشد. این معادله برای محدوده دمایی **۵۰۰ – ۱۱۰۰** درجه سانتیگراد کاربرد دارد که انحراف معیار آن $^{\circ}C$ ۳۸ ± می‌باشد. در مجموعه کانیهای همراه با آمفیبول، ترکیب پلاژیوکلاز باید $\mathbf{An_{92}}$> و مقدار **Si** در واحد فرمول آمفیبول از **۷/۸** کمتر باشد. چنین پارامترهایی، برای پلاژیوکلازهای موجود در آمفیبولیت‌های گل‌گهر منطقه صدق می‌کند. دمای اندازه‌گیری شده توسط این روش در جدول ۳ نشان داده شده است. نمونه G4-1 به علت دارا بودن مقادیر سدیم بالاتر، سیلسیم کمتر و همچنین فشار محاسبه شده بیشتر دمای بالاتر ۷۲۵ درجه سانتیگراد را نیز نشان می‌دهد. پس دما متأثر از میزان آلومینیوم، سیلسیم و سدیم خواهد بود. در نمونه G3-1 از مرکز به حاشیه (G3-2) مقدار SiO_2 کاهش و Al و Na افزایش یافته است در نتیجه فشار و دمای محاسبه شده افزایش یافته است. به منظور اطمینان از دمای بدست آمده از روش فوق دماسنجی بیوتیت آمفیبولیت ها نیز به روش زیر انجام گردید.

دماسنجی بیوتیت

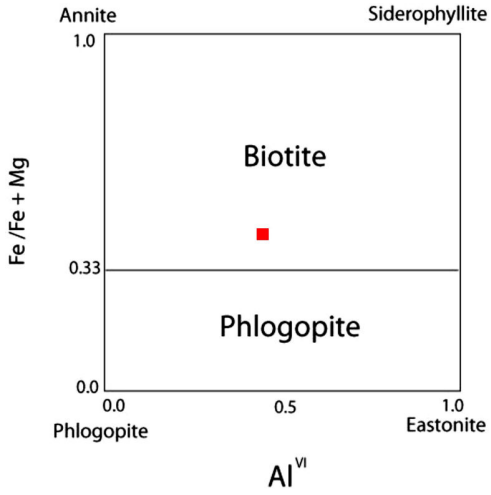
کانی اولیه بیوتیت به شکل پولک‌های ریز تا متوسط دانه با پلوکروئیسم قهوه‌ای در آمفیبولیت‌ها دیده می‌شود. فراوانی بیوتیت در سنگ کم می باشد (۱۰٪) و در مواردی به کلریت دگرسان شده است. نتایج حاصل از میکروپروب این کانی در جدول ۱ ارائه شده است. برای رده بندی شیمیایی این کانی از نمودارهای رده‌بندی [۱۶] استفاده شده است. در این نمودار که بر پایه‌ی مقادیر کاتیونی Al^{VI} و [Fe/Fe+Mg] است، نمونه مورد مطالعه که مربوط به سنگ آمفیبولیت است (G4) در گستره ترکیبی بیوتیت غنی ازمنیزیم واقع شده است. محتوای Ti در بیوتیت تابعی از دما، فشار و فوگاسیته‌ی اکسیژن است و مقادیر بالای Ti فقط در بیوتیت‌های با دمای بالا یافت می‌شود [۱۷] به طوری که غلظت Ti در بیوتیت با دما افزایش و با فشار کاهش می‌یابد [۱۸] همچنین در بیوتیت‌های آهن-منیزیم‌دار مقدار Ti با افزایش فوگاسیته اکسیژن افزایش می‌یابد [۱۹]. مقادیر پایین آلومینیم در بیوتیت‌ها نتیجه‌ای از پایداری پایین Al در بیوتیت با افزایش دماست [۲۰]. [۲۱] پیشنهاد می‌کنند که Ti و X_{Mg} موجود در واحد فرمولی بیوتیت‌ها به عنوان دماسنج به کارگرفته می‌شود. وی رابطه زیر را بدین منظور تعریف می‌نماید:

$$T = ([\ln(Ti) - a - c(X_{Mg})^3]/b)^{0.333}$$

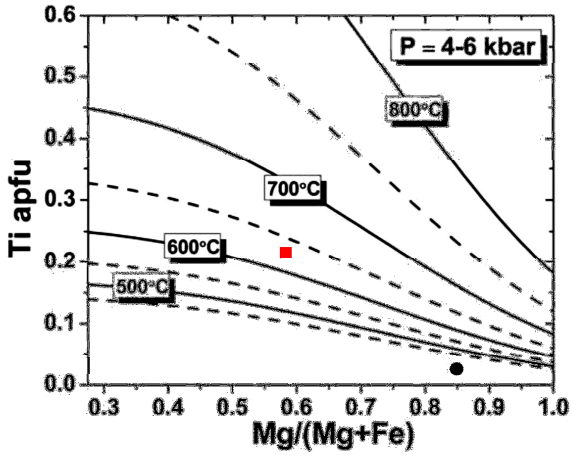
دراین رابطه T دما برحسب درجه سانتیگراد، X_{Mg} = Mg/Mg+Fe و Ti موجود در واحد فرمولی(apfu) بیوتیت است. ضرایب a, b وc در جدول ۴ آمده است. دماسنجی به کمک روش فوق باید در سنگی انجام شود

که پرآلومین یا متاآلومین باشد و همچنین کانی‌های تیتانیوم‌دار همچون تیتانیت یا ایلمنیت در سنگ حضور داشته باشد. فرمول بیوتیت باید براساس ۲۲ اتم اکسیژن نرمالیزه گردد و گستره‌ی $X_{Mg} = 0.275$ -1(apfu) و Ti= 0.04-0.6 (apfu) باشد.

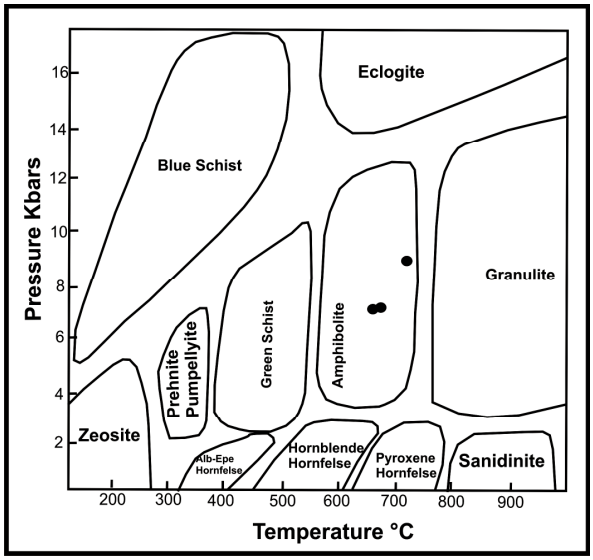
چنین شرایطی برای بیوتیت‌های مورد مطالعه صدق می‌نماید. دماسنج فوق برای محدوده فشار ۶-۴ کیلوبار و دمای ۴۵۰-۸۰۰ درجه سانتیگراد کاربرد دارد. با استفاده از این روش دمای تشکیل بیوتیت منیزیم دار همراه با سنگ آمفیبولیت حدود ۶۵۰- ۷۰۰ درجه سانتیگراد است (شکل ۷). همانطور که مشاهده می‌شود دماسنجی به کمک بیوتیت نیز دمای مشابه با دماسنجی به روش آمفیبول-پلاژیوکلاز را برای آمفیبولیت‌ها نشان می‌دهد. با توجه به فشار و دمای محاسبه شده (۵-۷ کیلوبار، ۶۰۰-۷۰۰ درجه سانتیگراد) و موقعیت نمونه‌ها در نمودار رخساره‌های دگرگونی [۲۲] می‌توان نتیجه‌گیری کرد که آمفیبولیت‌های کمپلکس گل‌گهر در اواسط رخساره آمفیبولیت دگرگون شده‌اند (شکل ۸).



شکل۶. طبقه بندی ژئوشیمیایی میکاهای مورد مطالعه به روش [۱۶].



شکل ۷. نمودار Ti دربرابر X_{Mg} در واحد فرمولی بیوتیت‌های منطقه گل‌گهر، بروش [۲۱].



شکل۸. رخساره‌های دگرگونی و موقعیت آمفیبولیت‌های همراه با کانسنگ آهن گل گهر، نمودار [۲۲].

جدول ۲. نتایج محاسبات فشارسنجی آمفیبول موجود در آمفیبولیت‌های کمپلکس گل‌گهر بر حسب کیلوبار.

شماره نمونه	P(±3kbar) [۱۳]	P(±1kbar) [۸]	P(±0.5kbar) [۱٤]	P(±0.6kbar) [۱۰]
G3-1	۷/۰۲	۷/۵۱	۵/۷۴	۷/۳۴
G3-2	۷/۱۵	۷/۶۵	۵/۸۵	۷/۴۷
G4-1	۹/۴۶	۱۰/۲۵	۷/۸۰	۹/۶۶

جدول۳. نتایج محاسبات دماسنجی آمفیبول موجود در آمفیبولیت‌های کمپلکس گل‌گهر به روش [۱۵].

شماره نمونه	T °k	T °C
G3-1	۹۵۵/۳۹	۶۸۲/۲۴
G3-2	۹۵۹/۷۹	۶۸۶/۶۵
G4-1	۱۰۰۱/۱	۷۲۸/۰۲

جدول ۴ مقادیر ضرایب تعریف شده در فرمول [۲۱].

ضرایب	مقادیر
a	-۲/۳۵۹۴
b	$۴/۶۴۸۲e^{-۹}$
c	-۱/۷۲۸۳

نتیجه‌گیری

اگرچه شواهد کانی‌شناسی آمفیبولیت‌ها همچون حضور آمفیبول، پلاژیوکلاز، بیوتیت، اپیدوت رخداد رخساره آمفیبولیت را تأیید می‌نماید ولی مقدار دما و فشار به دست آمده از روش‌های نوین فشار و دماسنجی به کمک مقادیر آلومینیوم موجود در کانی آمفیبول با شرایط خاص که در متن بحث گردید به این رخداد قطعیت می‌دهد. وجود فولیاسیون واضح در این نمونه‌ها، تفکیک نسبی کانی‌های فلسیک از کانی‌های مافیک و تبلور مجدد از دلایل بافتی اعمال فشار و دما نسبتا بالا بر این سنگ هاست. اگرچه کلریتی شدن آمفیبول و دگرسانی پلاژیوکلازها به اپیدوت و کلسیت می‌تواند بیانگر رخداد دگرگونی پسرونده در این سنگ‌ها باشد اما آنچه که مسلم است دگرگونی درجات پایین قادر به از بین بردن شواهد کانی‌شناسی و بافتی دگرگونی درجات بالا نبوده و رخساره آمفیبولیت بالاترین درجه دگرگونی می‌باشد که در منطقه گل‌گهر اتفاق افتاده است.

منابع

[۱] بابکی. آ (۱۳۸۳) بررسی الگوی کانسار سازی آهن در کانسار گل‌گهر سیرجان، کرمان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ص ۳۲۰.

[۲] یعقوبی. ع (۱۳۷۸) بررسی ژئوشیمی و ژنز کانسار شماره ۲ گل گهر، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شیراز، ص ۱۹۱.

[3] Anderson. J. L., Smith. D (1995) The effects of temperature and oxygen fugacity on the Al-in-hornblende barometer, American Mineralogist, Vol:80, p:549-559.

[4] Blundy. J. D., Holland.T. J. B (1990) Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer, Contributions to Mineralogy and Petrology, Vol:104, p:208-224.

[5] Cosca.M. A., Essene. E. J., Bowman. J. R (1991) Complete chemical analyses of metamorphic hornblendes: implications for normalizations, calculated H2O activities, and thermobarometry ,Contribution to mineralogy and petrology, Vol:108, p:472-484.

[6] Dietl. C (2000) Structural and petrologica aspects of the emplacement of granitoid plutons", Case studies from the Western margin of the Joshua Flat-Beer Creek pluton (Whit-Inyo mountains, California) and the flaser granitoid zone (Odenwald, Germany), Unpublished PhD thesis, Heidelberg University Germany.

[7] Ghasemi. A., Talbot. C. J (2006) A new tectonic scenario for the Sanadaj-Sirjan zone (Iran)", Journal of Asian Earth Sciences, Vol:26, p:683-693.

[8] Hammarstrom. J. M., Zen. E (1986) Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer, American mineralogist, Vol:71, p:1297-1313.

[9] Hollister. L. S., Grissom. G. C., Peters. E. K., Stowell. H. H., Sisson.V. B (1987) Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons, American Mineralogist, Vol:72, p:231-239.

[10] Johnson. M. C., Rutherford. M. J (1989) Experimental calibration of the aluminum-in- hornblende geobarometer with application to Long Vally caldera (California) volcanic rocks, Geology, Vol:17, p:837-841.

[11] Leake. B. E., Woolley. A. R., Arps. C. E. S., Birch.W. D., Gilbert. M. C., Grice. J. D., Hawthorne. F. C., Kato. A., Kisch. H. J., Krivovichev. V. G., Linthout. K., Laird. J., Madarino. 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., Youzhi. G (1997) Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Name, American Mineralogist, Vol:82, p:1019-1037.

[12] Ljung. S (1976) Geologycal report of Gol-Gohar iron ore project, Int. Rep, NISCOGEG.

[13] Schmidt. M. W (1991) Amphibole composition in tonalite as a function for pressure: An experimental calibration of the Al in hornblende barometer, Contribution mineralogy and petrology, Vol:110, p:304-410.

[14] Sheikholeslami. R., Bellon. H., Emami. H., Sabzehei. M., Pique. A (2003) Nouvelles donnees structurales et datations 40K-40Ar surles roches metamorphiques de la region de Neyriz (Zone de Sanandaj-Sirjan, Iran meridional) Leur interet dans le cadre du domaine neo- tethysien du Moyen-Orient C. R, Geoscience, Vol:335, p:981-991.

[15] Spear. F. S., Cheney. J. T (1981) A petrogenetic grid for pelitic schists in the system SiO_2-Al_2O_3- FeO-MgO-K_2O-H_2O,

Contributions to Mineralogy and Petrology, Vol:101, p:149-164.

[16] Deer. W. A., Howie. R. A., Zussman. J (1965) An introduction to rock-forming mineral, Longman, 528.

[17] Henry. D. J (1981) Sulfide- silicate relations of the staurolite grade politic schists, Rangeley quadrangle. Maine. Ph. D. Thesis, University of Wisconsin-Madison Madison Wisconsin.

[18] Tronnes. R. G., Edgar. A. D., Arima. M (1981) A high pressure-high temperature study of TiO2 solubility in Mg-rich phlogopite: Implication to phlogopite chemistry, Geochim, Cosmochim, Vol:49, p:2323-2329.

[19] Arima. M., Edgar. A. D (1981) Substitution mechanisms and solubility of titanium in phelogopite from rock of probable mantle origin, Contrib. Mineral. Petrol, Vol:77, p:288-295.

[20] Patino Douce. A. E (1993) Titanium substitution in biotite: an empirical model with application to thermometry, O_2 and H_2O barometries, and consequences form biotite stability, Chemic. Geol, Vol:108, p:133-162.

[21] Henry. D. J., Guiditti. C. V., Thomson. J. A (2005) The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotite: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms, Journal of American Mineralogist, Vol:90, p:316-328.

[22] Yardley. B. W. D (1989) An introduction to metamorphic petrology, Longman, London 248.