

ژئوترموبارومتری سنگهای رسی دگرگون شده در جنوب غرب ماهنشان با استفاده از منحنی‌های تعادلی چندگانه و برنامه ترموکالک

عادل ساکی، محسن مؤذن، محسن مؤید

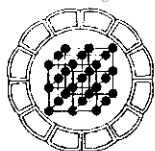
گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تبریز

پست الکترونیکی: moazzen@tabrizu.ac.ir

(دریافت مقاله ۱۳۸۲/۱۱/۳۰ ، دریافت نسخه نهایی ۱۳۸۳/۵/۱۴)

چکیده: به منظور مطالعه سنگهای دگرگون جنوب غرب ماهنشان و تعیین نوع دگرگونی و محیط زمین‌ساختی تشکیل سنگها، فشار و دمای اوج دگرگونی سنگها محاسبه شده است. کانیهای گارنت-پلاژیوکلاز-مسکویت-بیوتیت-کوارتز، آندالوزیت و استارولیت ترازمند، با هم در سنگهای رسی دگرگونی جنوب غرب ماهنشان متبلور شده‌اند. شیمی کانیهای همزیست با استفاده از آنالیز میکروپروپ مشخص شد. با استفاده از برنامه ترموکالک، فشار تشکیل این سنگها در حدود ۳ کیلوبار و دمای تشکیل آنها در حدود ۵۲۰ درجه سانتیگراد محاسبه شد. دما و فشار محاسبه شده با دما و فشاری که با دماسنج تبادل گارنت - بیوتیت و شبکه پتروژنتیک به دست آمده مشابه‌اند. با استفاده از این داده‌ها، گرادیان دمایی ۶۰ درجه سانتیگراد بر کیلومتر برای پوسته ماهنشان به دست آمد. با توجه به گرادیان دمایی به دست آمده، دگرگونی نوع باکان برای سنگهای دگرگونی جنوب غرب ماهنشان در نظر گرفته شده است.

واژه‌های کلیدی: ژئوترموبارومتری، سنگهای رسی دگرگونی، سری باکان، منحنی‌های تعادلی چندگانه، ماهنشان، ترموکالک.



Geothermobarometry of metapelites of southwest Mahneshan, using multiple equilibria curves and THERMOCALC program

A. Saki, M. Moazzen, M. Moayyed

*Department of Geology, University of Tabriz, Tabriz, 51664, Iran
Email: moazzen@tabrizu.ac.ir*

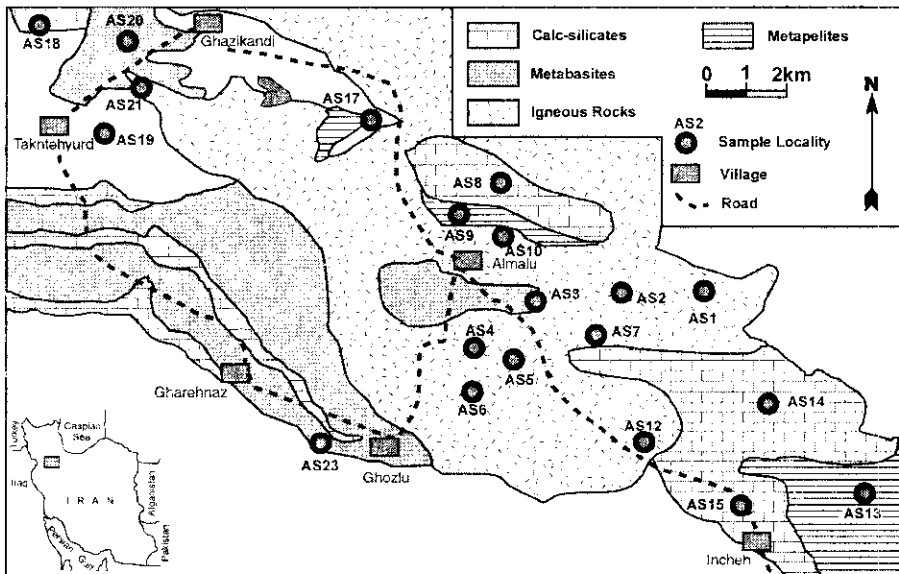
(Received: 19/02/2004, received in revised form: 05/08/2004)

Abstract: Pressure and temperature of metamorphism in the Mahneshan area were estimated in order to determine the type of metamorphism and tectonic setting of the rocks. Biotite, muscovite, plagioclase, garnet, quartz, andalusite and staurolite minerals are crystallized together in metapelites in the regional metamorphic rocks of southwest Mahneshan. Chemistry of coexisting minerals is studied using microprobe analysis. Using multiple equilibria calculations and THERMOCALC program, temperatures of ~520°C and pressure of ~3 kbar have been calculated for the formation of these rocks. Using these data, geothermal gradient of 60 °C/km has been calculated for the upper crust of the Mahneshan. Based on calculated geothermal gradient, the Buchan type metamorphism is suggested for the metamorphic rocks of southwest Mahneshan.

Keywords: *Geothermobarometry, metapelites, Buchan type, multiple equilibria, Mahneshan, THERMOCALC.*

مقدمه

اغلب مطالعاتی که امروزه در دگرگونی صورت می‌گیرد در جهت اطلاع از رفتار زمین ساختی و ساختار گرمایی گذشته زمین است. شناخت محیط زمین ساختی حاکم، با توجه به سری دگرگونی، حائز اهمیت است. یکی از مناطق جالب در این نوع تحقیقات زمین شناسی، جنوب غرب ماهنشان و چهارگوش تکاب است. تحقیقات محققین مختلف در گذشته نشان داده است که این منطقه بخشی از پی سنگ ایران است که احتمالاً در زمان پرکامبرین دگرگون است و ادامه دگرگونی‌های ایران مرکزی است [۱]. سنگهای رخنمون یافته در منطقه مورد مطالعه شامل سنگهای رسی دگرگون شده، کالک سیلیکاتها، سنگهای بازیگ و اولترابازیک سرپانتینی شده، مرمرها، و گنیسیها و گرانیت‌های نوع S و I هستند (شکل ۱). پس از نمونه برداری صحرایی از سنگهای رسی، مقاطع نازک میکروسکوپی متعددی برای مطالعات کانی‌شناسی و دگرشکلی تهیه شدند. سپس پاراژنز کانیها در این سنگها تعیین شد و ارتباط دگرشکلی و تبلور پورفیروبلاستها مشخص شد [۲]. سنگهای رسی که در این منطقه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند عبارتند از میکاشیست، گارنت‌شیست، و استارولیت- آندالوزیت‌شیست. با مطالعه میکروسکوپیکی مقاطع نازک، کانیها و پاراژنرها شناسایی و ارتباط پورفیروبلاستهای گارنت، آندالوزیت و استارولیت با فازهای دگرشکلی تعیین شدند. با استفاده از دماسنج تبادلی گارنت- بیوتیت، دمای 510°C برای اوج دگرگونی مشخص شد [۳]. با استفاده از برنامه کامپیوتری ترموکالک [۴] فشار در حدود ۳ کیلوبار و دما در حدود 520°C به دست آمد [۲]. دما و فشار محاسبه شده با مقادیر بدست آمده از روشهای دیگر همخوانی دارند.



شکل ۱ نمایش توزیع سنگهای دگرگونی مختلف در منطقه جنوب غرب ماهنشان.

دگرشکلی در سنگهای رسی دگرگون شده

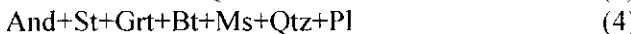
با مطالعه سنگهای رسی دگرگون شده، دو فاز دگرشکلی D_1 و D_2 در این سنگها شناسایی شدند [۵]. به طوری که D_2 از D_1 قویتر بوده و اثرهای D_1 را در بعضی از موارد از بین برده است. شواهدی که وجود D_1 را ثابت می‌کنند عبارتند از: وجود بقایای شیستوزیته S_1 درون شیست وارگی غالب S_2 و چین خوردگی S_1 در اثر S_2 .

همزمان با D_1 کانیهای دگرگون شامل گارنت، استارولیت، بیوتیت، مسکویت، کوارتز، و پلاژیوکلاز به وجود آمده اند. این فاز دگرگون M_1 نامیده می‌شود. پس از فاز دگرشکلی D_1 فاز دگرشکلی D_2 ، منطقه را تحت تأثیر قرار داده و دگرگونی M_2 تا زون آندالوزیت پیشرفته است. شیست وارگی غالب در منطقه، S_2 است که خود شاهدهی است بر وجود D_2 (شکل ۲).

کانیهای تشکیل شده طی دگرگونی M_1 در دگرگونی M_2 نیز پایدار بوده‌اند زیرا دگرسانی و بافتی‌ها و اکنشی پس رونده در این کانیها دیده نمی‌شود. بدین ترتیب پارائز کانیهای اوج دگرگونی عبارتند از استارولیت، آندالوزیت، گارنت، بیوتیت، مسکویت، کوارتز و پلاژیوکلاز.

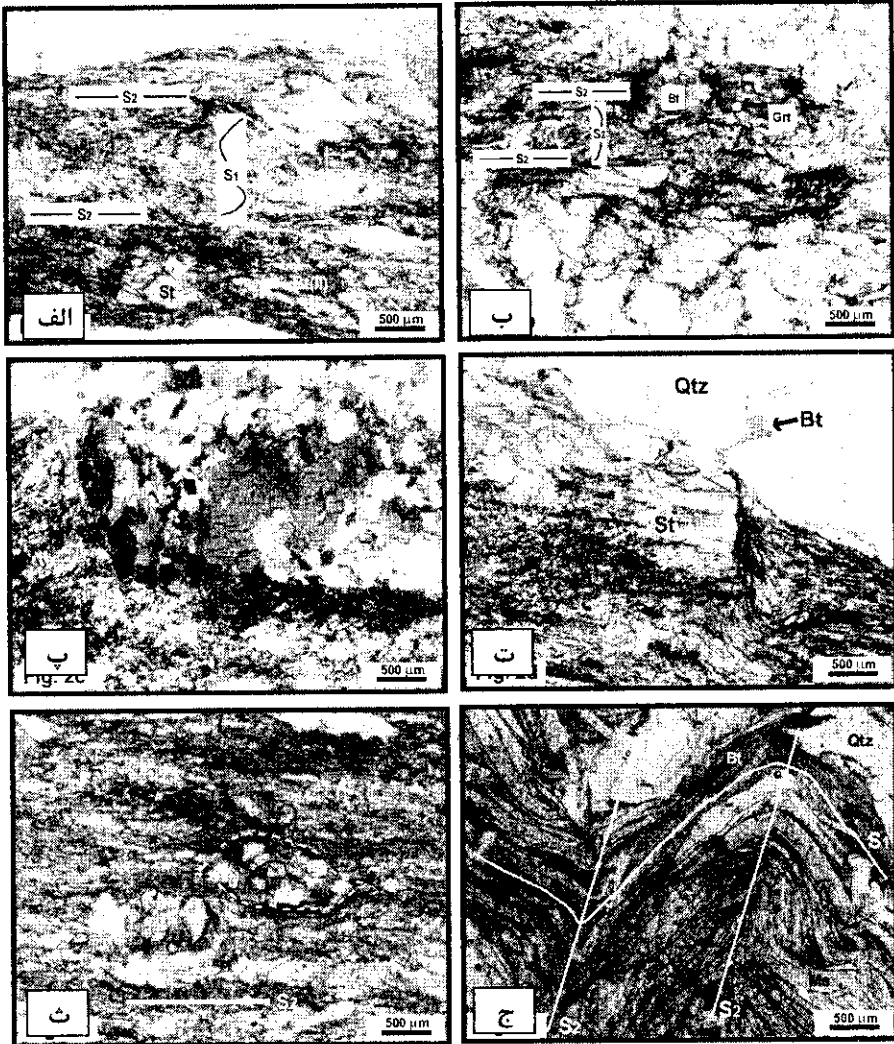
سنگ شناسی زونهای کانیایی و واکنشهای دگرگونی

طول سنگهای رسی دگرگون شده در نمونه دستی حاوی کانی آندالوزیت تقریباً به ۲ سانتیمتر می‌رسند و برخی از آنها به دلیل وجود گرافیت به رنگ تیره دیده می‌شوند. شیست وارگی در نمونه دستی به خوبی نمایان است. مجموعه کانیهای زیر در سنگهای متابلیتی جنوب غرب ماهنشان شناخته شده‌اند (علایم اختصاری از مرجع [۶] گرفته شده‌اند):



کانی آندالوزیت در این سنگها بصورت پرفیروبلاست دیده می‌شود و کوارتز به صورت کشیده و ریزدانه بین نوارهای بیوتیت قرار گرفته است. این کانی بدون شکل بوده و خاموشی موجی دارد (شکل ۲). بیوتیت بدون شکل تا نیمه شکل‌دار به همراه مسکویت به وجود آورنده شیست-وارگی اغلب نمونه‌هاست. آندالوزیت‌ها دارای بلورهای نیمه شکل‌دار و درشت بوده و برخی از آنها به سربسیت تجزیه شده‌اند. استارولیت دارای بلورهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار و دانه درشت است. آندالوزیت در نور طبیعی بی‌رنگ تا صورتی کم رنگ دیده می‌شود. آندالوزیت‌ها دارای بافت پوئی کیلوبلاستیک با انکلوزیونهایی از کانیهای تیره هستند. این کانیهای تیره گاهی در داخل کانی آندالوزیت جهت خاصی را مشابه به شیست وارگی در سنگها به وجود آورده‌اند. بلورهای گارنت نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار بوده و معمولاً با بیوتیت همراهند و گاهی حاوی انکلوزیونهای کوارتز هستند. اندازه گارنتها در حدود ۰.۵ تا ۲ میلیمتر است. با توجه به

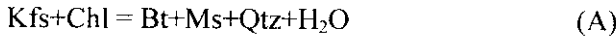
پاراژنهای مطالعه شده در سنگهای دگرگونی متاپلیتی جنوب غرب ماهنشان، زونهای دگرگون زیر در این سنگها گسترش یافته‌اند.



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌هایی از سنگهای دگرگون ناحیه ماهنشان. الف) شیست وارگی S_1 در یک گارنت-استارولیت شسیت که به وسیله S_2 چین خورده است. $Bt(II)$ در دگرشکلی دوم تشکیل شده است. ب) تشکیل کلیواژ کرنیولیشن به علت تأثیر فاز دگرشکلی دوم. پ) تفاوت بافت بخشهای غنی از رس (سمت چپ پایین) و بخشهای غنی از کوارتز (سمت راست بالا) ت) رشد استارولیت همزمان با دگرشکلی مرحله اول. ث) رشد اجتماع گارنت و بیوتیت پیش از دگرشکلی دوم. ج) رابطه دگرشکلی‌های اول و دوم در سنگهای غنی از میکا.

۱- زون بیوتیت

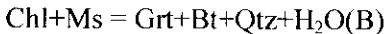
مجموعه کانی $Bt+Ms+Qtz+Kfs$ پایین‌ترین درجهٔ دگرگونی در سنگهای متاپلیتی جنوب غرب ماهنشان را نشان می‌دهد. اولین ظهور بیوتیت در این سنگها احتمالاً با واکنش زیر صورت گرفته است:



برای ظهور بیوتیت، دمایی در حدود $370^\circ C$ تا $400^\circ C$ در این ایزوگراد در نظر گرفته شده است [۷]. شرایط تعادل چنین واکنشی تابعی از X_{FeO} است [۸].

۲- زون گارنت

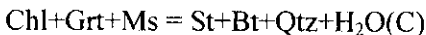
ویژگی گارنتهای زون گارنت، غنی بودن از آلماندین است و احتمالاً رشد آن با واکنش پیوسته زیر همراه است:



مجموعه کانی $Grt+Bt+Ms+Qtz+Pl$ در سنگهای پلیتی دارای اهمیت ویژه‌ای است. زیرا این مجموعه کانی در بازهٔ گسترده‌ای از دما در سنگهای رسی دگرگون پایدار است. در این سنگها مقدار بالای MnO و CaO باعث می‌شود که گارنت در دمای کمتر از $450^\circ C$ ظاهر شود، در حالی که در سنگهای با مقدار کمتر Mn و Ca ، گارنت تا دمای بالاتر از $500^\circ C$ ظاهر نمی‌شود [۹]. بنابراین به علت تفاوت ترکیب شیمیایی کل سنگها، یک ایزوگراد نامنظم از گارنت در صحرا مشاهده می‌شود. گارنت در رخنمون سنگی بعضی سنگها مشاهده می‌شود و در بعضی دیگر دیده نمی‌شود.

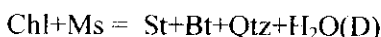
۳- زون استارولیت

مجموعه کانی $St+Grt+Bt+Ms+Qtz+Pl$ نمایانگر این زون در سنگهای رسی منطقه ماهنشان است. استارولیت در سنگهای متاپلیتی که در آنها کلرینوتوئید ظاهر نمی‌شود با واکنش زیر به وجود می‌آید [۱۰]:



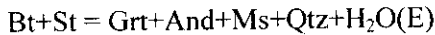
این واکنش تحت تأثیر مقدار MnO موجود در سنگ قرار دارد [۹]. واکنش مزبور برای یک دمای ثابت، در هر فشاری رخ می‌دهد [۷]. از این رو یک واکنش ناپیوسته است و تا زمانی ادامه می‌یابد که یکی از سه واکنشگر تمام شود. در منطقهٔ مورد مطالعه تمام شدن کلریت باعث کامل شدن واکنش شده است.

زمانی که استارولیت با واکنش بالا ایجاد می‌شود واکنش دیگری (D) نیز در سنگ رخ می‌دهد که موجب استارولیت اضافی خواهد شد. این واکنش در لایه‌های غنی از فیلوسیلیکات روی می‌دهد [۱۱]:



۴- زون آندالوزیت

مجموعه کانی $And+St+Grt+Bt+Ms+Qtz+Pl$ مشخص کننده این زون است. آندالوزیت در این زون احتمالاً با واکنش زیر ایجاد شده است:



سنگها در این زون دارای بیشترین فاز و کمترین درجه آزادی هستند. به همین علت کانیهای موجود در این زون به وسیله مایکروپروب تجزیه شده‌اند و از داده‌های حاصل در شیمی کانیها و ژئوترموبارومتری استفاده شده است.

شیمی کانیها

برای تعیین دقیق دما و فشار این مجموعه، سه مقطع نازک و صیقلی از سنگهایی که دارای بیشترین کانیهای اوج دگرگونی هستند (نمونه‌های AS13A-AS13B-AS13F) به روش الکترون مایکروپروب به وسیله دستگاه CAMECA مدل SX100 در انستیتو تحقیقاتی علوم زمین دانشگاه منچستر انگلستان تجزیه شدند و داده‌های قابل اطمینانی برای محاسبات ترمودینامیکی به دست آمد. این دستگاه در حالت wavelength dispersive کار می‌کند. ولتاژ شتاب باریکه الکترونی استفاده شده برابر ۱۵ kv و زمان تجزیه برای هر نقطه ۴۰ ثانیه بوده است. برای تجزیه نمونه، از جریانی به شدت ۳ nA استفاده شد. از استانداردهای طبیعی و مصنوعی برای همجنسی دستگاه استفاده شد. خطای دستگاه در حدود $\pm 1\%$ به صورت اکسید عناصر است. پیش از محاسبه دما و فشار، به بررسی ترکیب شیمیایی کانیها می‌پردازیم.

ترکیب شیمیایی گارنت

جدول ۱ تجزیه‌های معرف گارنت در نمونه‌های تجزیه شده را نشان می‌دهد. فرمول گارنت بر اساس ۱۲ اتم اکسیژن محاسبه شده است. مجموع اکسیدهای این کانی بین ۹۹٫۸۵ تا ۱۰۰٫۹۷، و مقدار Ti خیلی کم است. گارنت‌های تجزیه شده به صورت نمودار سه تایی $Fe^{2+}, Mn+Ca$ و Mg در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. گارنت در هر سه نمونه تجزیه شده از لحاظ ترکیب، محلول جامد آلماندن- اسپسارتین است که در حدود ۱۰ درصد آن اسپسارتین است.

ترکیب شیمیایی بیوتیت

تجزیه‌های معرف بیوتیت نیز در جدول ۱ دیده می‌شوند. فرمول بیوتیت بر اساس ۲۲ اکسیژن محاسبه شده است. بر اساس شکل ۴، ترکیب بیوتیت‌ها در محدوده آیت-فلوگوپیت قرار می‌گیرند.

ترکیب شیمیایی پلاژیوکلاز

تجزیه‌های معرف پلاژیوکلاز در نمونه‌های AS13B و AS13F در جدول ۱ آمده است. فرمول پلاژیوکلازها بر اساس ۸ اتم اکسیژن محاسبه شده است. کسر مولی البیت در پلاژیوکلاز به

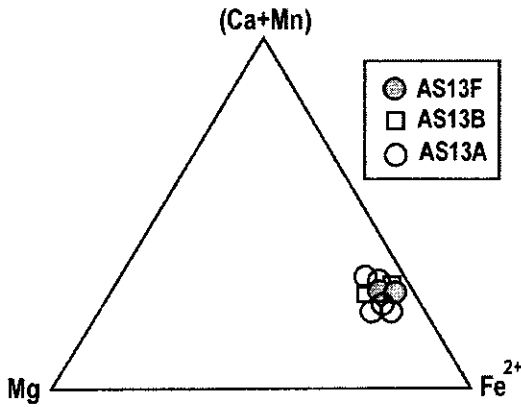
صورت $X_{Ab}^{Pl} = Na/(Na+Ca+K) = 0.8$ است. پلاژیوکلازها مقدار کمی آنورتیت و ارتوز دارند (شکل ۵).

ترکیب شیمیایی میکای سفید

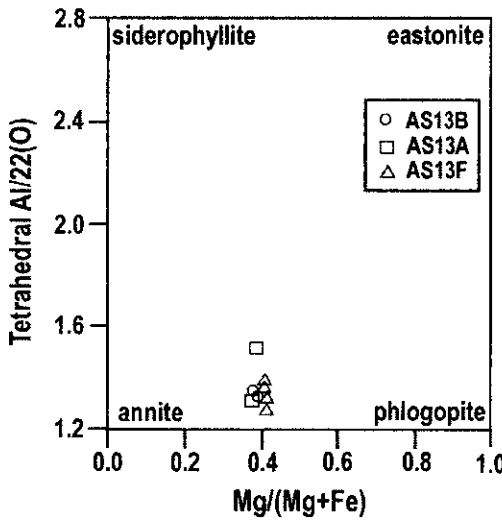
تجزیه‌های مایکروپروب میکای سفید در سه نمونه AS13F-AS13A-AS13B در جدول ۱ آمده‌اند. فرمول میکای سفید برای ۲۲ اکسیژن محاسبه شده است. مجموع اکسیدهای میکاها بین ۹۲/۴۴ تا ۹۷/۳۳ است. شکل ۶ تقسیم‌بندی میکاهای سفید در نمودار SAF را نشان می‌دهد. میکاهای مطالعه شده بیشتر مسکویت‌اند و عضو انتهایی سلادونایت بسیار کم است.

جدول ۱ تجزیه‌های میکروپروب کانیهای موجود در سنگهای رسی ماهنشان.

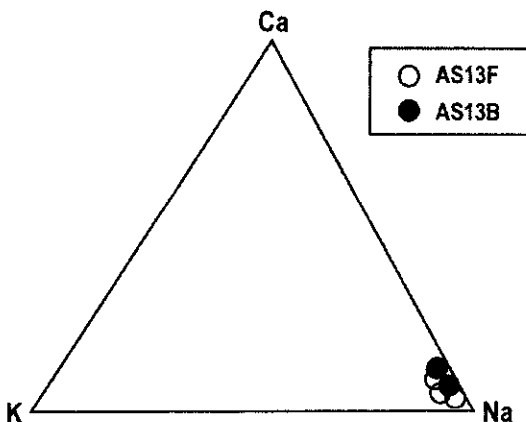
Sample	AS13A	AS13B	AS13F	AS13A	AS13B	AS13F	AS13A	AS13B	AS13F	AS13B	AS13F	AS13A	AS13B	AS13F
Mineral	Grt(cor)	Grt(cor)	Grt(cor)	Bt	Bt	Bt	St	St	Pl	Pl	Pl	Ms	Ms	Ms
SiO ₂	۳۵.۸۶	۳۵.۹۵	۳۶.۴۸	۳۴.۴۲	۳۴.۳۴	۳۴.۵۲	۳۵.۴۷	۲۶.۳۲	۶۶.۵۲	۶۷.۲۲	۶۵.۷۶	۴۶.۲۲	۴۶.۴۷	۴۶.۴۱
TiO ₂	۰.۰۲	۰.۰۷	۰.۰۶	۱.۲۸	۱.۳۶	۱.۲۵	۰.۱۳	۰.۲۸	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۲۰	۰.۲۷	۰.۲۷
Al ₂ O ₃	۲۰.۰۳	۲۰.۳۰	۲۰.۵۵	۱۹.۸۵	۱۹.۶۵	۱۹.۲۳	۵۴.۸۲	۴۵.۹	۲۱.۴۱	۲۰.۷۵	۲۱.۶۳	۳۵.۲۲	۳۵.۲۶	۳۵.۰۴
MgO	۱.۴۱	۱.۴۵	۱.۴۵	۷.۴۰	۷.۸۱	۸.۱۰	۱.۲۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۶۵	۰.۶۱	۰.۸۰
CaO	۱.۰۰	۰.۶۴	۱.۰۲	۰.۰۰	۰.۱۲	۰.۰۷	۰.۰۰	۰.۵۶	۲.۲۴	۱.۵۲	۲.۵۸	۰.۰۶	۰.۰۴	۰.۰۴
MnO	۸.۸۷	۱۰.۱۲	۱۰.۷	۱.۱۲	۰.۱۹	۰.۲۰	۰.۴۰	۱۳.۵۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰
FeO	۳۱.۹۵	۳۱.۰۸	۲۹.۵۳	۲۱.۷۳	۲۱.۸۳	۲۲.۲۱	۱۴۳.۰	۰.۵۲	۰.۰۹	۰.۰۸	۰.۰۷	۰.۸۲	۰.۸۵	۱.۹۱
ZnO	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۸	۰.۷۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۰۰
Na ₂ O	۰.۰۳	۰.۰۵	۰.۰۰	۰.۱۱	۰.۲۲	۰.۱۴	۰.۰۱	۰.۰۰	۱۰.۶۳	۱۰۰.۰۲	۱۰۲.۷	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
K ₂ O	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۸.۲۷	۸.۱۰	۸.۰۲	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۴	۰.۰۹	۰.۰۴	۸.۹۰	۸.۸۶	۸.۹۲
Total	۹۹.۴۷	۹۹.۷۲	۹۹.۸۵	۹۳.۸۰	۹۴.۰۶	۹۴.۱۷	۹۷.۳	۹۷.۳۲	۱۰۰.۱	۹۹.۷۵	۱۰۰.۷	۹۳.۳۱	۹۳.۴۴	۹۴.۴۶
		بر اساس ۱۲ اکسیژن			بر اساس ۲۲ اکسیژن			بر اساس ۲۳ اکسیژن		بر اساس ۸ اکسیژن		بر اساس ۱۱ اکسیژن		
Si	۲.۹۶	۲.۰۰	۲.۹۲	۳.۴۱	۵.۳۲	۵.۴۵	۳.۴۷	۳.۵۲	۲.۸۹	۲.۸۷	۲.۶۷	۶.۱۷	۶.۳۲	۶.۱۶
Ti	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۸	۰.۲۰	۰.۱۶	۰.۰۰	۰.۰۴	۰.۰۳	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۳	۰.۰۲	۰.۰۳
Al	۲.۰۰	۱.۹۷	۱.۹۲	۲.۵۰	۲.۶۰	۲.۵۰	۸.۷۴	۸.۶۶	۱.۱۱	۱.۱۱	۱.۱۵	۵.۶۳	۵.۳۵	۵.۶۷
Mg	۰.۱۸	۰.۱۸	۱.۰۲	۱.۷۱	۱.۸۰	۱.۵۶	۰.۱۹	۰.۲۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۱۸	۰.۰۹	۰.۲۰	۰.۰۹
Ca	۰.۰۴	۰.۰۵	۰.۰۱	۰.۰۶	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۱۳	۰.۱۳	۰.۰۸	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰
Mn	۰.۵۶	۰.۷۰	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۵	۰.۰۶	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Fe	۳.۲۸	۲.۱۴	۱.۵۷	۲.۶۵	۲.۸۳	۲.۶۲	۱.۵۴	۱.۵۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۲۸	۰.۱۳	۰.۱۳	۰.۰۹
Zn	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۸	۰.۰۵	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۱۳	۰.۰۰
Na	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۶	۰.۱۰	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۸۷	۰.۸۷	۰.۷۴	۰.۲۶	۰.۰۰	۰.۲۹
K	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۹	۱.۴۸	۱.۶۰	۱.۷۶	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۳	۱.۵۰	۱.۵۳	۱.۵۵
Total	۸.۱۰	۸.۰۴	۸.۳۷	۱۵.۲۷	۱۵.۳۵	۱۴.۹۵	۱۴.۰۹	۱۴.۰۸	۵.۰۰	۵.۰۰	۵.۱۳	۱۳.۷۸	۱۳.۷۲	۱۳.۸۵



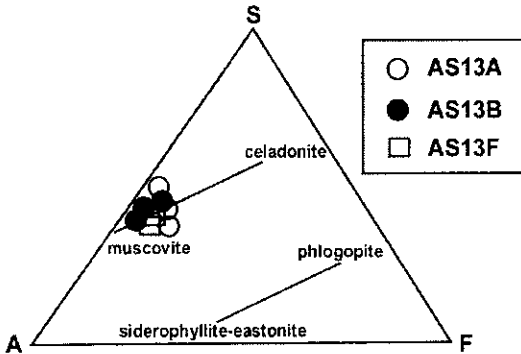
شکل ۳ ترکیب شیمیایی گارنت های مطالعه شده در نمودار سه تایی Mg و Fe^{2+} ، $Mn+Ca$ آلماندن مهمترین عضو نهایی است و مقداری گروسولار و اسپسارتین نیز وجود دارد.



شکل ۴ ترکیب شیمیایی بیوتیت ها که بین دو قطب آنیت و فلوگوپیت قرار دارند.



شکل ۵ نمایش ترکیب شیمیایی پلاژیوکلازهای تجزیه شده که نشان می دهد عضو نهایی آل بیت بیشترین مقدار را دارد.



شکل ۶ ترکیب شیمیایی میکاهای سفید تجزیه شده در نمونه های ماهنشان. میکاهای سفید عمدتاً از نوع مسکویت هستند. توجه شود که:

F: (FeO+MgO)
S: SiO_۲
A: Al_۲O_۳

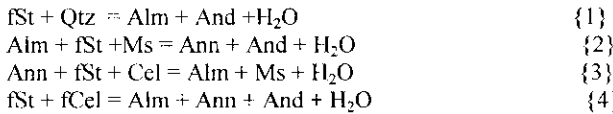
استفاده از برنامه کامپیوتری ترموکالک برای ژئوترموبارومتري

یکی از مهمترین روشهای ژئوترموبارومتري استفاده از منحنی های تعادلی چندگانه بین کانیهای موجود در یک سنگ در نمودار P-T است. در این روش ابتدا واکنش های دگرگونی را در سنگی که بالاترین تعداد کانیهای دگرگون در حالت تعادل کانی شناسی را دارد (پایین ترین درجه آزادی) پیدا می کنیم. سپس با استفاده از ترکیب شیمیایی کانیها (نتایج تجزیه به وسیله میکروپروب) منحنی های نشان دهنده واکنش را در یک نمودار P-T رسم کرده و با استفاده از پیوندگاه منحنی ها، دما و فشار را به دست می آوریم. برای بررسی واکنش های تعادلی و محاسبه فشار و دمای دگرگونی، برنامه های کامپیوتری مختلفی وجود دارند. برنامه کامپیوتری رایجی که کاربرد وسیعی در سنگ شناسی دگرگون دارد برنامه ترموکالک است که دارای داده ترمودینامیکی برای ۱۲۳ عضو نهایی است. برای طراحی برنامه ترموکالک [۱۲] از دقیق ترین مقادیر ممکن برای متغیرهای ترمودینامیکی، شامل: آنتروپی، حجم مولی، تراکم پذیری، انبساط پذیری، و ظرفیت گرمایی، استفاده شده است و حالت استاندارد آنتالپی های تشکیل شده از عناصر برای تمام اعضای نهایی با استفاده از روش حداقل مربعات تصحیح شده است. داده های ترموکالک تماماً با داده های تجربی هماهنگ هستند. محاسبات ترموکالک با استفاده از معادله ۱ زیر و با انتخاب مقادیر فشار و یا دما انجام می گیرد. بدین صورت که برای فشارهای در دمای مشخص و یا برای دماهای فشار مشخص تعادل منحنی های واکنش محاسبه می شود. در این تحقیق از ترموکالک نسخه ۲٫۴ استفاده شده است.

$$0 = \Delta G_{(r),T}^0 (P-1)(\Delta V_S + \Delta \alpha_V)(T-289) \Delta(\beta_V)P/2 + n_1 RT \ln f_1 + RT \ln K \quad (1)$$

در این معادله $\Delta G_{(r)}$ تغییرات انرژی آزاد گیبس واکنش، ΔV_S تغییر حجم فازهای جامد، α_V ضریب انبساط پذیری گرمایی، β_V ضریب فشردگی، R ثابت گازها، f_i فوگاسیته فاز شماره، K ثابت تعادل، n تعداد مولها و P و T به ترتیب فشار و دما هستند. برای برآورد دما و فشار به کمک ترموکالک، نخست اکتیویته اعضای نهایی کانیها با استفاده از تجزیه های میکروپروب

محاسبه شدند. اکتیویته کانیهای بیوتیت و گارنت با مدل‌های ارائه شده در [۴] و [۱۳]، و فعالیت کانی مسکویت با مدل [۴] محاسبه شده است. سپس با استفاده از ترموکالک و فعالیت اعضای نهایی چهار واکنش زیر شناسایی شدند:



در این واکنشها، f نشان دهنده اعضای نهایی آهن‌دار کانیها است. در جدول ۲، P و T مربوط به هر یک از واکنشها که با ترموکالک محاسبه شدند، آمده است. بر اساس این داده‌ها، محل واقعی واکنشها را در نمودار $P-T$ رسم کرده‌ایم. مقدار خطای هر واکنش محاسبه شد و خطای کلی دما و فشارسنج نیز مورد نظر قرار گرفتند. شکل ۷ محدوده خاکستری گستره دما و فشار سنگهای رسی دگرگون شده منطقه ماهنشان را نشان می‌دهد. دمای محاسبه شده در اوج دگرگونی در حدود $520^\circ C$ و فشار محاسبه شده در حدود ۳ کیلو بار است. این داده‌ها با دماسنج گارنت-بیوتیت [۳] و فشارسنج GPMB [۲] همخوانی کامل دارند.

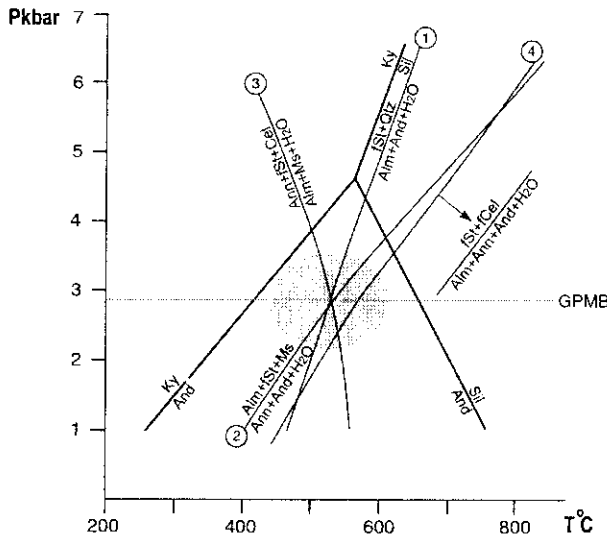
جدول ۲ حل معادله ۱ برای دما ($^\circ C$) به ازای فشارهای از یک تا ده کیلو بار برای واکنشهای ۱ تا ۴.

P (kbar)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	sdT	sdP
واکنش ۱	۴۷۱	۵۰۷	۵۴۲	۵۷۶	۶۱۱	۶۴۵	۶۷۹	۷۱۴	۷۵۰	۷۸۵	۱۶	۰.۴۶
واکنش ۲	۴۰۵	۴۷۹	۵۵۶	۶۳۸	۷۲۵	۸۱۸	۹۱۹	۱۰۳۰	۱۱۵۵	+	۸۰	۰.۸۲
واکنش ۳	۵۶۱	۵۴۸	۵۲۳	۴۹۲	۴۵۹	۴۱۶	۳۶۵	۳۱۲	۲۵۵	-	۶۹	۲
واکنش ۴	۴۷۵	۵۲۳	۵۹۰	۶۶۱	۷۳۴	۸۱۱	۸۹۳	۹۸۱	۱۰۷۴	۱۱۷۵	۷۴	۰.۹۳

(sdT: انحراف معیار دما، و sdP: انحراف معیار فشار را نشان می‌دهد)

بحث و برداشت

مطالعه سنگهای دگرگون جنوب غرب ماهنشان در استان زنجان نشان می‌دهد که این سنگها دو مرحله دگرشکلی و دو مرحله دگرگونی را تجربه کرده‌اند. کانیهای مانند گارنت و استارولیت در مرحله اول دگرگونی (و دگرشکلی) حاصل شده‌اند. با توجه به پایداری بافتی (و در نتیجه ترمودینامیکی) کانیهای حاصل از دگرگونی مرحله اول طی دگرگونی مرحله دوم، از پارائز سنگهایی با بالاترین تعداد کانیها برای مطالعات ترکیب شیمیایی کانیها و برآورد دما و فشار دگرگونی استفاده شد. فشار محاسبه شده در حدود ۳ کیلو بار و دمای محاسبه شده در حدود $520^\circ C$ درجه سانتیگراد است. با در نظر گرفتن هر کیلو بار فشار معادل $2/8$ کیلومتر عمق، برای سنگهای پوسته‌ای فشار ۳ کیلو بار، عمق تشکیل سنگها در حدود $8/5$ کیلومتر بوده است. این عمق نشانگر دگرگونی در پوسته بالایی است. با تقسیم دمای حاصل ($520^\circ C$) درجه سانتیگراد) بر عمق ($8/5$ کیلومتر) گرادیان زمین گرمایی در حدود $60^\circ C/km$ به دست می‌آید. این گرادیان زمین گرمایی با دگرگونی نوعی دمای بالا- فشار پایین (HT/LP) مطابقت دارد [۲۲].



شکل ۷ محل واکنشهای ۱ تا ۴ در نمودار P-T. محدوده پایداری آندالوزیت-سیلیمانیت-کیانیت برای مقایسه داده شده است. محدوده بیضی خاکستری که بر اساس میزان خطا در ترموبارومتري رسم شده است، گستره دما و فشار اوج دگرگونی در سنگهای منطقه ماهنشان را نشان می‌دهد. دما در حدود ۵۲۰ درجه سانتیگراد و فشار در حدود ۳ کیلو بار است. خط افقی (GPMB) فشار گارنت-پلاژیوکلاز-سکویت-بیوتیت را از مطالعات قبلی [۱ و ۲] نشان می‌دهد.

گسترش زونهای دگرگونی ناحیه‌ای در سنگهای جنوب غرب ماهنشان و پاراژنز کانیه‌ها مشابه سنگهای دگرگون مناطق Calabria در جنوب ایتالیا [۱۱]، زون Moldabian در اروپای مرکزی [۱۴] و سنگهای دگرگون Saxothurinigian-Moldabian در اروپاست [۱۵]. همچنین سنگهای دگرگون ناحیه‌ای جنوب غرب ماهنشان از نظر دما و فشار شکل‌گیری شبیه به مناطق Abukuma در ژاپن [۱۶] و Buchan در اسکاتلند [۱۷] است. تنها تفاوت سنگهای منطقه مورد مطالعه با سنگهای دگرگون مناطق Abukuma و Buchan، عدم وجود کانی کردیریت در سنگهای ماهنشان است. البته مطالعات دیگر [۱۸] وجود کردیریت در سنگهای دگرگونی ناحیه‌ای در مناطق مجاور مانند منطقه شاهین‌دژ را نشان می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان با در نظر گرفتن گرادیان زمین‌گرمایی محاسبه شده، سنگهای دگرگون منطقه ماهنشان را معادل نوع Buchan در نظر گرفت. باید توجه داشت که حضور و یا عدم حضور کانی کردیریت به ترکیب شیمیایی سنگ اولیه بستگی دارد، به طوری‌که علیرغم شرایط ترمودینامیکی مناسب، در سنگهای غنی از آهن و فقیر از آلومینیوم این کانی متبلور نمی‌شود [۱۱]. حضور کردیریت در سنگهای منطقه شاهین‌دژ و عدم حضور آن در سنگهای ماهنشان را

می‌توان به تفاوت ترکیب شیمیایی سنگ اولیه در این دو منطقه ربط داد. در مورد سن دگرگونی در منطقه ماهنشان داده‌های سن‌یابی در دست نیست، ولی با توجه به زمین‌شناسی منطقه و با توجه به این مطلب که سنگهای مربوط به سازندهای اوایل دوران اول در منطقه ماهنشان (و نیز منطقه شاهین‌دژ) مانند دولومیت سلطانیه دگرگون نشده‌اند می‌توان گفت که سن دگرگونی پیش از کامبرین (پرکامبرین؟) است. در صورتیکه این مطلب درست باشد، این بررسی، دگرگونی دمای بالا و فشار پایین در زمان پرکامبرین در پوسته فوقانی منطقه ماهنشان را نشان می‌دهد. دگرگونی دمای بالا و فشار پایین به یکی از دلایل زیر صورت می‌گیرد:

- ۱- نازک شدن پوسته‌ای^۱ [۱۹].
- ۲- دمای ناحیه‌ای حاصل از نفوذ گروهی از پلوتونها در عمق کم تا متوسط [۲۰ و ۲۱].
- ۳- تصادم قاره‌ها در مرزهای همگرا.

با توجه به نبود دگرگونیهای فشار متوسط تا بالا که در محیط تصادم قاره‌ای به وجود می‌آیند، به احتمال زیاد سنگهای دگرگون ماهنشان حاصل تصادم قاره‌ای نیستند. بنابراین، مدل سوم برای تشکیل سنگهای دگرگون منطقه ماهنشان درست به نظر نمی‌رسد.

توده‌های نفوذی متعددی در منطقه ماهنشان وجود دارند که گرانیتوئیدهایی از نوع I و نیز از نوع S هستند [۲]. نفوذ این سنگها می‌توانست باعث بالا رفتن گرادیان زمین‌گرایی در پوسته فوقانی شده و سنگهای دگرگون، دمای بالا و فشار پایین ماهنشان را پدید آورده باشند. دگرگونی دمای بالا و فشار پایین در Calabria به بالا رفتن گرادیان دمایی به علت نفوذ توده‌های آذرین ربط داده شده است [۱۱].

وجود سنگهای بازیک و اولترا بازیک دگرگون شده به سرپانتین، از واحدهای مهم زمین‌شناسی منطقه ماهنشان هستند [۲]. وجود این سنگها در منطقه و فشار محاسبه شده روی سنگهای رسی دگرگون شده می‌تواند حاکی از پوسته قاره‌ای نازک در منطقه ماهنشان در زمان پرکامبرین باشند. بدین ترتیب که به علت نازک شدن پوسته، دمای اعمالی از گوشته فوقانی باعث بالا رفتن گرادیان زمین‌گرایی شده و به علت عدم انباشت مواد پوسته (مثلاً در اثر فاز کوهزایی و یا فرورانش) فشار بالا نبوده است [۲۲ و ۲۳]. نتیجه دگرگونی دمای بالا و فشار پایین در این منطقه است. در مناطقی شکافت پوسته‌ای پس از نازک شدن، باعث نفوذ مواد گوشته‌ای شده است که به صورت سنگهای بازیک و الترابازیک منطقه دیده می‌شوند. علت نازک شدن پوسته‌ای تأثیر نیروهای کششی بر منطقه بوده است. عامل کشش می‌تواند متعدد باشد ولی برآمدگی گوشته‌ای زیر پوسته یکی از عوامل مهم است. با توجه به جهت امتداد نفوذ

1- Crustal thinning or shortening.

سنگهای بازیک و الترابازیک، حداقل در تئوری، می‌توان جهت تأثیر نیروهای کششی را مشخص کرد. به علت جابجایی‌های زمین‌ساختی تأخیری در منطقه ماهنشان، تعیین دقیق جهت کشش ممکن نیست، لیکن می‌توان گسل‌های بزرگ موجود در منطقه و افتادگی‌های پری و شیرمرد [۲] را که جهت تقریبی شمال - جنوبی دارند، از نمودهای پدیده کشش در نظر گرفت. اگر این فرض درست باشد در این صورت جهت کشش شرقی - غربی بوده است.

تشکر و قدردانی

بخشی از پژوهش از سوی دانشگاه تبریز حمایت مالی شده است. از دکتر Giles Droop از دانشگاه منچستر به علت ارائه نظرات سازنده و از آقای Dave Plant مسؤول دستگاه میکروپروپ دانشگاه منچستر انگلستان که در تجزیه نمونه‌ها کمک بسیاری کرده‌اند تشکر می‌شود.

مراجع

- [۱] ساگی ع.، مؤذن م.، "ژئوترموبارومتری سنگهای متاپلیتی جنوب غرب ماهنشان با استفاده از تعادل ترمودینامیکی بین کانیهای گارنت، بیوتیت، موسکویت و پلازیوکلاز"، هفتمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه اصفهان، شهریور ماه (۱۳۸۲).
- [۲] ساگی ع.، "مطالعه دگرشکلی و دگرگونی ناحیه‌ای جنوب غرب ماهنشان"، رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز (۱۳۸۲).
- [۳] مؤذن م.، ساگی ع.، مؤید م.، "ترموتری سنگهای متاپلیتی جنوب غرب ماهنشان به کمک زوج کانی گارنت - بیوتیت، ششمین گردهمایی انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، دی ماه (۱۳۸۱).
- [4] Holland T.J.B., Powell R., "An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlation. 2: Data and results", *Journal of metamorphic Geology* 3 (1985) 343-370.
- [۵] ساگی ع.، مؤذن م.، مؤید م.، مجتهدی م.، عامری ع.، "بررسی ارتباط دگرشکلی و تبلور کانیها در منطقه دگرگونی جنوب غرب ماهنشان، استان زنجان"، ششمین همایش زمین‌شناسی ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، شهریور ماه (۱۳۸۱).
- [6] Kretz R., "Symbols for rock forming minerals. *American Mineralogist*", 68 (1983) 277-279.
- [7] Yardley B.W.D., "An introduction to metamorphic petrology", Longman, Harlow (1989) p. 319.

- [8] Bucher K., Frey M., *"Petrogenesis of metamorphic rocks"*, Springer Verlag (1994) p. 318.
- [9] Spear F.S., *"Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature time paths"*, Mineralogical Society of America. Monograph. (1993) p. 799.
- [10] Rios C., Garcia C., Takaus A. *"Tectono-metamorphic evolution of the Silgara Formation metamorphic rocks in the southern Santander Massif, Colombian Andes"*, Journal of south American Earth sciences 16(2) (2003) 133-154.
- [11] Graeßner T., Schenk V., *"Low-pressure metamorphism of Palaeozoic pelites in the Aspromonte, southern Calabria: constraints for the thermal evolution in the Calabrian crustal cross-section during the Hercynian orogeny"*, Journal of Metamorphic Geology 17 (1999) 157-172.
- [12] Holland T.J.B., Powell R., *"An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest"*, Journal of Metamorphic. Geology 16 (1998) 309-343.
- [13] Patino-Douce A.E., Johnston A.D., Rice J.M., *"Octahedral excess mixing properties in biotite: a working model with application to geobarometry and geothermometry"*, American Mineralogist 78 (1993) 113-131.
- [14] Blümel P., Schreyer W., *"Progressive regional low pressure metamorphism in Moldanubian metapelites of the Northern Bavarian Forest, Germany"*, Krystalinikum 12 (1976) 7-30.
- [15] Wagener-Lohse C., Blümel P., *"Prograde metamorphose vom Niederdruck-Typ in der Grenzzone Saxothuringikum/Moldanubikum E'Tirschenereuth/NE-Bayern"*, Beiheft zu Fortschritte der Mineralogie 62 (1984) 254-255.
- [16] Miyashiro A., *"Metamorphism and Metamorphic Belts"*, George Allen and Unwin Ltd., London (1973).
- [17] Hudson N.F.C., *"Regional metamorphism of some Dalradian pelites in the Buchan area, N.E. Scotland"*, Contributions to Mineralogy and Petrology 73 (1980) 39-51.
- [۱۸] جشیدی بدر م. بررسی پترولوژی و پتروگرافی سنگهای دگرگونی و آذرین منطقه روستای اینچه و بلاغ اصلی مابین شاهین دژ و تکاب، رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز (۱۳۸۱) صفحه ۱۳۹.
- [19] Weber K., *"Variscan events: early Paleozoic continental rift metamorphism and late Palaeozoic-crustal shortening. In: DHW Hutton and*

DJ Sanderson (eds) *Variscan Tectonics of the North Atlantic Regional (Geol. Soc. London. Spes. Publ. no.14)*", Blackwell Scientific, Oxford (1984) pp. 3-22.

[20] Barton M.D., Hanson R.B., "Magmatism and the development of low-pressure metamorphism: Implications from thermal modelling at the western United States", *Geol. Soc. Amer. Bull.* 101 (1989) 1051- 1065.

[21] De Yoreo J.J., Lux D.R., Guidotti C.V., "Thermal modelling in low-pressure/high-temperature metamorphic belts", *Tectonophysics* 188 (1991) 209-238.

[22] Moazzen M., Droop G.T.R., Saki A., "Low pressure regional metamorphism in the Mahneshan area, Western Iran", *Geophysical Research Abstracts* 5 (2003) 1254.

[۲۳] ساکی ع.، مؤذن م.، مؤید م.، "مینرال شیمی کانیه‌های اوج دگرگونی و ترموبارومتري سنگهای رسی دگرگونی ناحیه‌ای منطقه ماهنشان"، بیست و یکمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی تهران، بهمن ماه (۱۳۸۱).