

Petrology, mineral chemistry and petrogenesis of metapelites of Tanbour metamorphic complex, east of Sirjan (Kerman province)

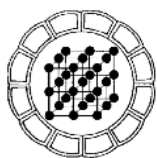
A. Moradian, S. Peighambari, H. Ahmadipour

*Department of Geology, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
E-mail: peighambari80@yahoo.com*

(Received: 9/06/2005, received in revised form: 22/09/2005)

Abstract: Tanbour metamorphic complex east of Sirjan is composed of metasediments and metabasic rocks. Petrofabric study of this complex shows two metamorphic and two deformational phases. Chemical studies of index minerals indicate that second phase of metamorphism occurred with a degree up to lower amphibolite facies. Mineral assemblage of first phase are biotite, muscovite and garnet while staurolite appears in peak of second phase of metamorphism. Mineral chemistry studies indicate that second phase of metamorphism occurred up to staurolite zone. Temperatures and pressures about 550-590 °C and 7-8/48 kb were also estimated using geothermobarometry. The data suggest that these metamorphic rocks underwent a medium P metamorphic event

Keywords: *South of Iran, Sanandaj – Sirjan belt, Tanbour.*



انجمن بائوسنس و کانی شناسی ایران

سال سیزدهم، شماره ۲، پاییز و زمستان ۸۴، از صفحه ۳۴۷ تا ۳۶۲

مجله
بلورشناسی
و کانی شناسی
ایران

سنگ شناسی، شیمی کانی ها و سنگ زایی متاپلیت های مجموعه تنبور واقع در شرق سیرجان (استان کرمان)

عباس مرادیان، سیما پیغمبری، حمید احمدی پور

بخش زمین شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
پست الکترونیکی: peighambary80@yahoo.com

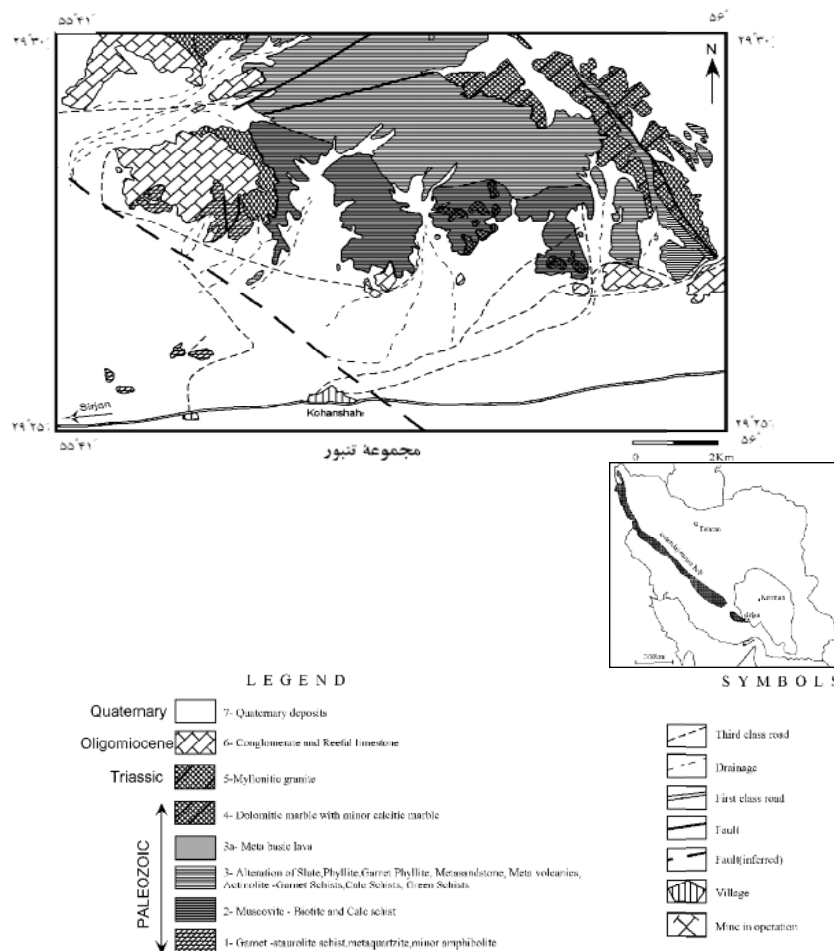
(دریافت مقاله ۱۳۸۴/۳/۱۹ ، دریافت نسخه نهایی ۱۳۸۴/۶/۳۱)

چکیده: مجموعه دگرگونی تنبور شرق سیرجان در استان کرمان از نظر سنگ شناسی شامل تناوبی از سنگ های رسوبی و دگرگون شده است. بررسی های بافت شناسی سنگ های متاپلیتی منطقه مورد مطالعه حاکی از دو فاز دگرگون و دو فاز دگر شکل است. مجموعه کانی های تشکیل شده در فاز نخست شامل بیوتیت، مسکویت و گارنت و ... می شود در حالیکه در فاز دوم دگرگونی، پیدایش استارولیت همراه با کانی های بالا در حد نهایی دگرگونی می باشد. مطالعات شیمی کانی های دگرگون نشان می دهد که فاز دوم دگرگونی نسبت به فاز نخست در درجه بالاتری قرار داشته و احتمالاً تا اوائل رخساره آمفیبولیت پیش رفته است. دما و فشارهایی در حدود ۵۵۰ تا ۵۹۰ درجه سانتیگراد و ۷ الی ۸/۴۸ کیلو بار از محاسبات زمین دما- فشارسنجی برآورد شد. این اطلاعات می توانند حاکی از این باشند که سنگ های دگرگون در یک رژیم دما فشار متوسط (بارووین) تشکیل شده اند.

واژه های کلیدی: جنوب ایران، زون سنندج - سیرجان، تنبور.

مقدمه

منطقه مورد مطالعه شامل مجموعه تنبور در ۲۵ کیلومتری شرق سیرجان است. این مجموعه از لحاظ زمین‌شناسی در جنوب شرقی کمر بند دگرگونی ساندج - سیرجان قرار دارد (شکل ۱). این مجموعه از نظر سنگ‌شناسی شامل تناوبی از سنگ‌های رسی، مارنی و بازیگ دگرگون شده متعلق به پارینه زیستی است [۱]. مجموعه کانی‌شناسی مشاهده شده در سنگ‌های رسی دگرگون شامل میکای سفید، کلریت، بیوتیت، گارنت، کوارتز $\pm$ پلاژیوکلاز $\pm$ استارولیت می‌شود. دگرگونی سنگ‌های رسی، سبب ایجاد ریزساختها و کانی‌های دگرگون شده است که مرتبط به حوادث تکتونوترمال پیچیده‌ای با چندین فاز دگرشکلی و دگرگونی هستند. در این پژوهش با نگرشی ویژه به شواهد بافت‌شناسی سنگ، شیمی کانی‌ها و زمین‌دما- فشارسنجی به بررسی سنگ‌زائی این مناطق می‌پردازیم.



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و موقعیت آن نسبت به زون ساندج- سیرجان (سبزه‌ای ۱۳۷۶، با اندکی تغییر).

روش مطالعه

برای بدست آوردن ترکیب شیمیایی کانی‌های مختلف و زمین دما- فشارسنجی، کانی‌ها با ریزکاو الکترونی Jeol JXA 8600 با شرایط ولتاژ ۱۵ KV و جریان الکتریکی ۱۵ nA، در دانشگاه مونسستر آلمان مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفتند. نتایج تجزیه شیمیایی، با استفاده از برنامه AX و MinPet مورد بررسی قرار گرفت و فعالیت (کارایی) و تعداد کاتیون‌های مورد نظر محاسبه شدند. در زیر ویژگی‌های بافتی نسل‌های مختلف کانی‌ها و نحوه تشکیل و ترکیب شیمیایی آنها مورد بحث قرار خواهد گرفت.

بحث و بررسی

مطالعه بافت‌شناسی سنگ‌های منطقه مورد مطالعه حاکی از عملکرد حداقل دو فاز دگرشکل و دو فاز دگرگون است در صورتیکه مؤذن [۲] سه فاز دگرگون و دو دگرشکل را در منطقه تنبور تشخیص داده است. فاز نخست دگرشکل (D1)، که به همراه فاز اول دگرگون (M1) بوده است، سبب ایجاد کلیواژ اسلیتی S1 شده (شکل ۲) و کانی‌هایی چون بیوتیت، مسکویت، کلریت، گارنت را در سنگ‌ها بوجود آورده است. دومین فاز دگرشکل (D2) ریزچین‌هایی را بر روی شیسستوزیته S1 بوجود آورده (شکل ۳) که با ادامه آن شیسستوزیته S2 بوجود آمده است. این فاز با دگرگونی فاز دوم (M2) همزمان بوده و کانی‌هایی از قبیل بیوتیت، گارنت $\pm$ استارولیت را تشکیل داده است. به نظر می‌رسد در مراحل انتهایی این فاز دگرگون در طول افزایش دما، گارنت توانسته دچار رشد مجدد شود.

شیمی کانی‌ها و شواهد بافتی تکامل دگرگونی

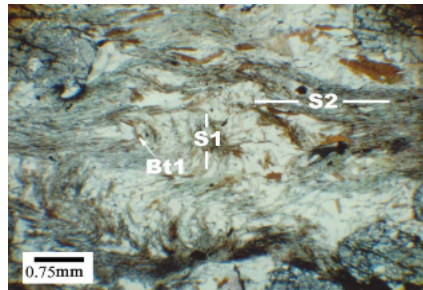
کلریت

به طور کلی کلریت ۲ نسل بافتی را در سنگ‌های منطقه مورد مطالعه از خود نشان می‌دهد:

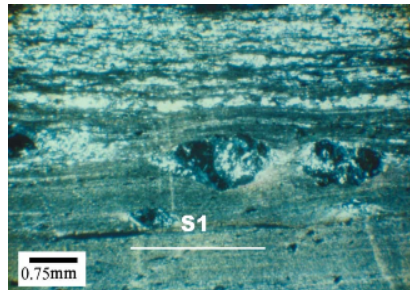
- کلریت نسل ۱: این نوع کلریت اکثراً شیسستوزیته S1 را در منطقه تنبور تشکیل داده است و سپس در زمان تشکیل S2، دستخوش لغزش یا دگرشکلی شده است.
- کلریت نسل ۲: نسل دوم از کلریت‌ها در اثر نفوذ آب‌گونها تشکیل شده‌اند و الگوی Si در آنها نسبت به Se در یک جهت قرار گرفته‌اند (شکل ۴). بین نمونه‌های کلریت، یک نمونه از کلریت‌های نسل دوم مورد تجزیه ریز گمانه قرار گرفت (جدول ۱). ترکیب شیمیایی این نوع کلریت بر اساس نمودارهای [۳]، در محدوده رپیدولیت قرار می‌گیرد (شکل ۵). مقدار X_{Fe} این نوع ۰/۴ و تعداد Si آن ۲/۶۱۱ بر مبنای ۱۴ اکسیژن است. به منظور گرماسنجی مرحله تشکیل کلریت‌های نسل دوم از دماسنج آلومینیم چهاروجهی در ساختمان کلریت که توسط [۴]، ارائه شده است، استفاده شد. معادله خطی بین مقدار آلومینیم و گرما تشکیل به صورت زیر است:

$$T(C) = -61.9229 + 321.9773 (Al^{IV})$$

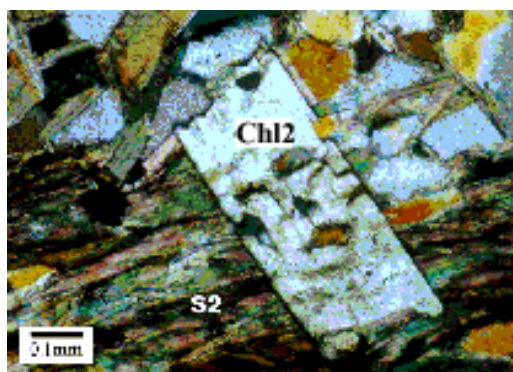
مقدار $Al(IV)$ کلریت مورد نظر برابر با ۱/۴۰۷ است: که بدین ترتیب دمای تشکیل کلریت در حدود ۳۹۱ بدست می‌آید (شکل ۶). علت تشکیل کلریت‌های تأخیری را می‌توان، دو عامل در نظر گرفت: اول تأثیر دما به علت بالا رفتن گرادیان زمین گرمایی به صورت استاتیک و دوم تأثیر آب‌گونه‌ها با ترکیب مناسب و در دمای ثابت (بدون بالا رفتن دما) [۵].



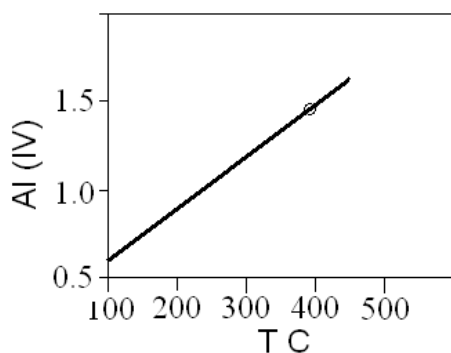
شکل ۳ رابطهٔ دوبرگوارهٔ S1 و S2 و نسل‌های مختلف بیوتیت (PPL).



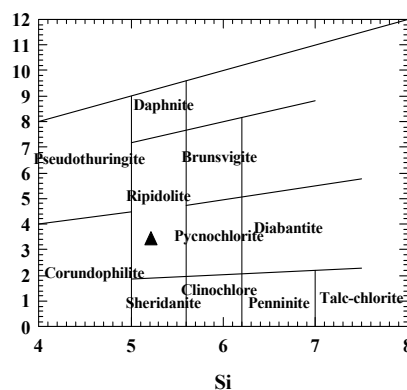
شکل ۲ فولیاسیون S1 (XPL)



شکل ۴ کلریت نسل ۲ (XPL).



شکل ۶ محاسبهٔ دمای تشکیل کلریت براساس [۴]



شکل ۵ ترکیب شیمیایی یک نمونه کلریت [۳].

جدول ۱ نتایج تجزیه شیمیایی یک نمونه از کلریت نسل چهارم و محاسبه کاتیونها بر مبنای ۱۴ اکسیژن.

کلریت		فرمول ساختمانی	
SiO ₂	۲۵/۲	Si	
TiO ₂	۰/۱۲	Ti	۰/۰۰۹
Al ₂ O ₃	۲۳/۱۵	Al ^(IV)	۱/۴۰۸
Cr ₂ O ₃	۰	Al ^(VI)	۱/۴
FeO	۱۹/۸۲	Fe ²⁺	۱/۷۱۸
MnO	۰	Mn	۰
MgO	۱۸/۱۱	Mg	۲/۷۹۸
CaO	۰/۰۲	Ca	۰/۰۰۲
Na ₂ O	۰/۰۲	Na	۰/۰۰۵
K ₂ O	۰	K	۰/۰۰۱
total	۸۶/۴۵	total	۹/۹۶۹

بیوتیت

روابط بافتی و ساختاری نشان از ۲ نسل بیوتیت دارند که ترکیب شیمیایی آنها در جدول ۲ آورده شده است:

- بیوتیت ۱، تشکیل دهنده برگوارگی S1 شیبست‌های تنبور بوده (شکل ۳) و تا ۰/۲ میلی‌متر طول دارند. بیوتیت‌های این مرحله بر اثر دگرشکلی D2 دچار چین خوردگی شده و تبلور آنها را می‌توان همزمان با فاز دگرگونی M1 دانست. مقدار X_{Fe} در این نوع بیوتیت برابر با ۰/۴۲۵ است که کمتر از این مقدار در سایر انواع بیوتیت است.

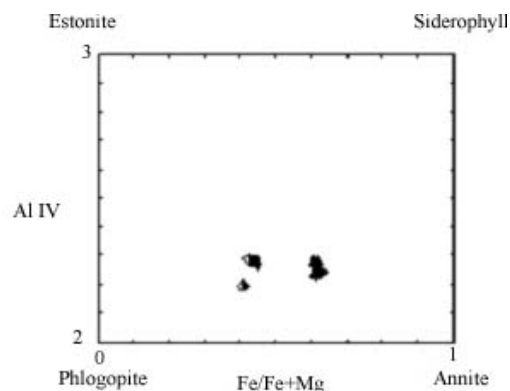
- بیوتیت‌های ۲، که همراه با مسکویت، فولیاسیون S2 را تشکیل داده و در طی فاز دگرشکلی D2 ایجاد شده‌اند (شکل ۳). X_{Fe} در آنها در حدود ۰/۴۴ تا ۰/۶۳ می‌باشد، که بیشتر از نوع قبلی است. بیوتیت‌های موجود در نمونه استارولیت دار حاوی مقادیر کمتری X_{Fe} هستند.

پیشرفت واکنش‌های پیوسته دگرگونی مولد بیوتیت، سبب کاهش در نسبت Fe^{2+}/Mg می‌شود [۶]. به این ترتیب، در بیوتیت‌های نسل دوم یعنی سازنده S2، درصد X_{Fe} از زون گارنت به سمت اوایل زون استارولیت کاهش یافته است. موقعیت بیوتیت‌های مذکور در نمودار فلوگوپیت-آنایت-ایستونایت-سیدروفیلیت (شکل ۷) نقل از دیر [۷] نشان داده شده است. در این بررسی، Fe موجود در بیوتیت به عنوان Fe^{2+} در نظر گرفته شده است. مطابق جدول ۲، اکثر نمونه‌ها، دارای مقدار قابل توجهی X_{Ann} و مقادیر کمتری X_{Phl} و X_{Eas} هستند.

مسکویت

همانند بیوتیت دو نسل از مسکویت در سنگهای منطقه مورد مطالعه قابل شناسایی است. نخستین نسل از آنها تشکیل دهنده کلیواژ اسلیتی S1 هستند. از لحاظ اندازه، تقریباً مشابه بیوتیت‌های نسل اولند. ظهور این کانی تنها محدود به S1 نبوده بلکه در طول شکل‌گیری S2 نیز متبلور شده‌اند و گوارگی S2 را تشکیل داده‌اند. تفاوت این نوع با نسل نخست تنها در اندازه آنهاست، که تا ۰/۵ میلی‌متر طول دارند. مسکویت‌های نسل یک کمتر دیده شده و آثار

آن را به صورت خمیده مابین S2 می‌توان دید. برای بررسی‌های شیمیایی، چند نمونه از مسکویت‌های تشکیل دهنده S2 مورد تجزیه قرار گرفتند (جدول ۳).



شکل ۷ ترکیب شیمیایی بیوتیت‌های تجزیه شد. (◆، ▲، ○، بیوتیت‌های نسل ۲۰۱)

جدول ۲ ترکیب شیمیایی بیوتیت و محاسبه کایونها براساس ۱۱ اکسیژن. مقدار Fe_2O_3 از طریق محاسبات استوکیومتری تعیین شده است.

بیوتیت	T1(1)	T1(2)	T1(3)	T1(4)	T4(1)	T4(2)	T4(3)	T4(4)
SiO ₂	۳۶٫۴۵	۳۶٫۵۴	۳۶٫۱۳	۳۶٫۲۵	۳۶٫۹	۳۶٫۶۴	۳۶٫۷۲	۳۷٫۳۷
TiO ₂	۴٫۰۴	۳٫۵۸	۳٫۵۲	۳٫۷۴	۱٫۷	۱٫۴۳	۱٫۴۳	۱٫۶۲
Al ₂ O ₃	۱۸٫۴	۱۷٫۹۶	۱۷٫۳۲	۱۷٫۸۷	۱۹٫۰۵	۱۹٫۱۴	۱۸٫۸۴	۱۸٫۹
Cr ₂ O ₃	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Fe ₂ O ₃	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۲	۰٫۵۶	۰
FeO	۲۱٫۲۳	۲۲٫۱۷	۲۱٫۸	۲۱٫۷۶	۱۵٫۵۶	۱۶٫۲۹	۱۹٫۸۵	۱۵٫۴۹
MnO	۰٫۰۷	۰٫۰۹	۰٫۰۷	۰٫۲	۰	۰٫۰۴	۰	۰٫۰۶
MgO	۷٫۲۲	۷٫۷۳	۷٫۸۱	۷٫۲۳	۱۱٫۸	۱۲٫۴۱	۱۲٫۱۸	۱۲٫۴۵
CaO	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰	۰	۰٫۰۲
Na ₂ O	۰٫۱۴	۰٫۰۹	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۱۶	۰٫۲۸	۰٫۳۹
K ₂ O	۹٫۴۴	۹٫۷۱	۹٫۲۶	۹٫۳۴	۹٫۱۵	۹٫۰۶	۸٫۹۱	۸٫۵
total	۹۶٫۶۷	۹۷٫۹۸	۹۶٫۰۶	۹۶٫۵۳	۹۴٫۴	۹۵٫۳۷	۹۵٫۷۸	۹۴٫۸
Si	۲٫۷۵۳	۲٫۷۳۹	۲٫۷۵۲	۲٫۷۵۱	۲٫۷۶۷	۲٫۷۳۱	۲٫۷۳۴	۲٫۷۷۸
Ti	۰٫۲۲۹	۰٫۲۰۲	۰٫۲۰۲	۰٫۲۱۴	۰٫۰۹۶	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۹۱
Al ^(IV)	۱٫۲۶۶	۱٫۲۸۱	۱٫۲۶۳	۱٫۲۶۹	۱٫۲۴۸	۱٫۲۸۲	۱٫۲۷۸	۱٫۲۳۶
Al ^(VI)	۰٫۳۲۹	۰٫۲۹۵	۰٫۲۸۴	۰٫۳۱۸	۰٫۴۲۷	۰٫۳۹۲	۰٫۳۶۹	۰٫۴۱۲
Cr	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Fe ³	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۱۱	۰٫۰۳۱	۰
Fe ²	۱٫۳۴۱	۱٫۳۹	۱٫۳۹۱	۱٫۳۸۱	۰٫۹۷۶	۱٫۰۱۵	۱٫۰۴۹	۰٫۹۶۳
Mn	۰٫۰۰۵	۰٫۰۱۲	۰٫۰۰۵	۰٫۰۱۳	۰	۰٫۰۲	۰	۰٫۰۰۴
Mg	۰٫۸۱۳	۰٫۸۶۳	۰٫۸۸۸	۰٫۸۱۸	۱٫۳۱۹	۱٫۳۷۸	۱٫۳۵۲	۱٫۳۷۹
Ca	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۳	۰	۰	۰٫۰۰۱
Na	۰٫۰۲	۰٫۰۱۳	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۵	۰٫۰۲۹	۰٫۰۲۳	۰٫۰۴۱	۰٫۰۵۶
K	۰٫۹۱۱	۰٫۹۲۹	۰٫۹۰۲	۰٫۹۰۵	۰٫۸۷۶	۰٫۸۶۳	۰٫۸۴۷	۰٫۸۰۷
total	۷٫۶۸	۷٫۷۳۷	۷٫۷۲	۷٫۶۹۷	۷٫۷۴۸	۷٫۷۸۶	۷٫۷۸۷	۷٫۷۳۵

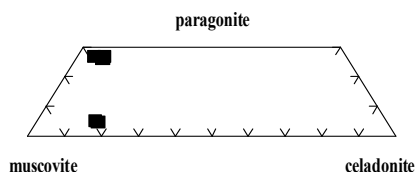
جدول ۳ نتایج تجزیه شیمیایی ۵ نمونه از مسکویت نسل دوم و محاسبه کاتیون‌ها و اجزای انتهایی میکای سفید براساس ۱۱ اکسیژن.

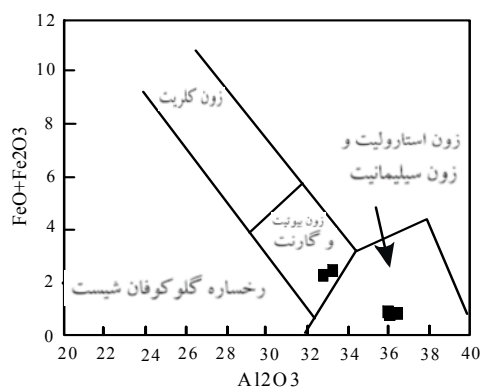
مسکویت	T1 (1)	T1 (2)	T4 (1)	T4 (2)	T4 (3)
SiO ₂	۴۸٫۴	۴۸٫۱۸	۴۷٫۹۲	۴۷٫۸۶	۴۸٫۱۶
TiO ₂	۱٫۲۶	۱٫۱۵	۱٫۳۳	۰٫۴	۰٫۳۱
Al ₂ O ₃	۳۲٫۹	۳۳٫۴۳	۳۶٫۵۷	۳۶٫۲	۳۶٫۰۸
Cr ₂ O ₃	۰٫۰۲	۰	۰	۰٫۰۴	۰
FeO	۲٫۲۷	۲٫۴	۰٫۷۲	۰٫۷۱	۰٫۸۲
MnO	۰	۰٫۰۹	۰٫۰۹	۰٫۰۳	۰
MgO	۱٫۲	۱٫۲۲	۰٫۶۳	۰٫۷۲	۰٫۷۹
CaO	۰٫۰۴	۰٫۰۱	۰٫۰۴	۰٫۰۱	۰
Na ₂ O	۰٫۲۷	۳	۱٫۶۹	۱٫۹۱	۱٫۸۳
K ₂ O	۱۰٫۲۳	۱۰٫۳۷	۷٫۲۷	۸٫۰۵	۸٫۱۱
total	۹۶٫۵۸	۹۷٫۱۷	۹۵٫۲۵	۹۶٫۰۱	۹۶٫۱
Si	۳٫۱۸	۳٫۱۴۵	۳٫۱۲	۳٫۱۱۲	۳٫۱۲۷
Ti	۰٫۰۶۲	۰٫۰۵۷	۰٫۰۱۶	۰٫۰۲	۰٫۰۱۵
Al ^(IV)	۰٫۸۲۱	۰٫۸۵۵	۰٫۸۸۲	۰٫۸۹۱	۰٫۸۷۶
Al ^(VI)	۱٫۷۱۴	۱٫۷۱۸	۱٫۹۲۳	۱٫۸۸۶	۱٫۸۸۳
Cr	۰٫۰۰۱	۰	۰	۰٫۰۰۲	۰
Fe ³⁺	۰	۰	۰	۰	۰
Fe ²⁺	۰٫۱۲۴	۰٫۱۳۲	۰٫۰۳۹	۰٫۰۳۹	۰٫۰۴۵
Mn	۰	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۱	۰
Mg	۰٫۱۱۸	۰٫۱۱۹	۰٫۰۱۶	۰٫۰۷	۰٫۰۷۶
Ca	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۱	۰
Na	۰٫۰۳۵	۰٫۰۳۸	۰٫۲۱۳	۰٫۲۴۱	۰٫۲۳۱
K	۰٫۸۵۹	۰٫۸۶۷	۰٫۶۰۴	۰٫۶۶۹	۰٫۶۷۳
total	۶٫۹۲۹	۶٫۹۵۲	۶٫۸۶۹	۶٫۹۳۳	۶٫۹۲۸
X _{Par}	۳٫۹۲۸	۴٫۲	۲۶	۲۶٫۵	۲۵٫۴۹
X _{Mus}	۶۷٫۴۷	۶۷٫۵۹	۶۶٫۳	۶۸٫۶	۶۷٫۸۱
X _{Cel}	۱۴٫۴	۱۴٫۳۹	۲۷٫۹	۷٫۵۲	۷٫۵۳۵

در مثلث مسکویت-پاراگونیت-سلادونیت [۸]، اکثر نمونه‌ها در محدوده پاراگونیت و مسکویت قرار می‌گیرند (شکل ۸). میکای سفید در سنگ‌های دگرگون محلول جامدی بین مسکویت و سلادونیت است. تغییرات ترکیبی مسکویت با دما یا رخساره‌های دگرگونی در شکل ۹ آورده شده است [۹]. به طوریکه مشاهده می‌شود، ترکیب شیمیایی مسکویت‌های نسل دوم (سازنده S2) از زون آلماندن تا زون استارولیت تغییر می‌کند. کسر مولی پاراگونیت با بالا رفتن درجه دگرگونی، افزایش یافته که این را در مورد نمونه‌های منطقه تنبور می‌توان به خوبی ملاحظه کرد. به این ترتیب که مسکویت‌های نسل دوم از زون گارنت به سمت اوایل زون استارولیت، حاوی کسر مولی بالاتری از پاراگونیت‌اند.



شکل ۸. طبقه‌بندی مسکویت‌ها در مثلث مسکویت-پاراگونیت-سلادونیت به علت درجات مختلف دگرگونی [۸].





شکل ۹ ترکیب شیمیایی میکای سفید در درجات متفاوت دگرگونی [۹].

گارنت

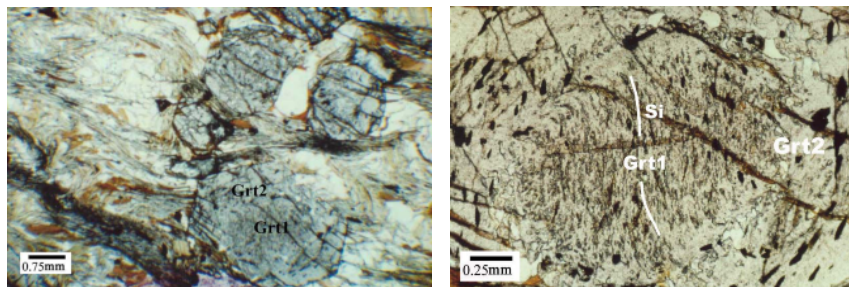
گارنت یکی از مهمترین پورفایروبلاست‌ها در منطقه مورد مطالعه است. روابط برگوارگی داخلی (Si) و برگوارگی زمینه (Se)، برای تعیین سن نسبی رشد کانی‌ها نسبت به برگوارگی به کار می‌رود [۱۰]. لذا مطالعه روابط بافتی گارنت و ارتباط آن با دگرشکلی و دگرگونی بسیار مهم و مفید خواهد بود. در فیلیت‌ها و شیست‌های منطقه، پورفایروبلاست‌های گارنت به فراوانی حضور دارند که در اینجا به ترتیب زمانی به شرح چگونگی تبلور آنها می‌پردازیم:

- رشد مرحله ۱ گارنت: گارنت‌های این مرحله از رشد (G1)، دارای یکسری الگوی ورودی مستقیم تا کمی خمیده هستند (شکل ۱۰). شدت باز یا بسته بودن ریزچین‌های موجود در ورودیهایی داخل پورفایروبلاست، نسبت به زمینه وسیله‌ای مفید برای تشخیص مراحل اولیه از مراحل انتهایی دگرشکلی است [۱۰]. این موارد را به خوبی می‌توان در گارنت مرحله ۱ مشاهده کرد. چنانکه مشخص است، الگوی ورودیه‌ها به صورت چین‌های بسیار بازی است که می‌توان آنها را به مراحل اولیه D1 نسبت داد. در این نسل از گارنت مقدار $X_{Fe}=0.584-0.610$ ، $X_{Mn}=0.104-0.203$ و $X_{Mg}=0.0501-0.112$ درصد است.

- رشد مرحله ۲ گارنت: در این مرحله یک رشد ثانوی در اطراف هسته مرکزی (گارنت G1) مشاهده می‌شود و دارای ورودیه‌های درشت کوارتز است. با توجه به تفاوت اندازه ورودیه‌های و حالت S مانند آنها در گارنت، به نظر می‌رسد که این کانی‌ها متعلق به دومین فاز دگرشکلی‌اند که سبب ایجاد ریزچین روی S1 شده است (شکل ۱۱). در آن مقدار $X_{Fe}=0.610-0.733$ و $X_{Mn}=0.106-0.107$ و $X_{Mg}=0.122-0.139$ است. قطع شدگی در امتداد ورودیه‌های دانه ریز کوارتز در هسته مرکزی گارنت نسبت به ورودیه‌های نسبتاً درشت تر کوارتز در حاشیه خود می‌تواند دلیلی بر مرحله بعدی رشد باشد. بررسی نتایج ریزگمانه، نشان دهنده منطقه بندی شیمیایی در گارنت‌هاست، به نحویکه مقدار اسپسارتین و X_{Mn} از هسته به سمت حاشیه کم

شده و مقدار آلماندن و پیروپ افزایش می یابد. وجود منطقه بندی شیمیایی غالباً ناشی از رشد در طی افزایش دما است.

وجود ترکیب شیمیایی گارنت مرکزی و حاشیه حاکی از آن است که درجه دگرگونی فاز دوم دگرگونی از فاز نخست بیشتر است. ترکیب شیمیایی افق های غنی از گارنت توسط مؤذن [۲] تعیین شده و آنها را مربوط به زون گارنت می داند. جدول ۴ ترکیب شیمیایی نسل های مختلف گارنت را نشان می دهد.



شکل ۱۱ گارنت نسل ۲ (PPL).

شکل ۱۰ گارنت نسل ۱ (PPL).

جدول ۴ ترکیب شیمیایی انواع مختلف گارنت. تعداد کاتیونها براساس ۱۲ اکسیژن محاسبه شده اند. مقدار Fe_2O_3 بر اساس محاسبات عنصرسنجی به دست آمده اند.

گارنت	G1	G1	G2	G1	G2	G2
SiO ₂	۳۷٫۲۸	۳۶٫۷۲	۳۷٫۴۳	۳۷٫۸۸	۳۷٫۱۲	۳۷٫۶۶
TiO ₂	۰٫۰۲	۰٫۱	۰	۰٫۱۲	۰٫۲۱	۰٫۰۰۳
Al ₂ O ₃	۲۱٫۳	۲۱٫۱	۲۱٫۲۸	۲۱٫۹۵	۲۱٫۳۳	۲۱٫۳۴
Cr ₂ O ₃	۰	۰٫۰۶	۰	۰٫۰۲	۰٫۰۶	۰
Fe ₂ O ₃	۰	۰٫۷۱	۰	۰	۰	۰
FeO	۲۷٫۰۳	۲۶٫۰۳	۲۹٫۲۸	۲۷٫۰۳	۲٫۵	۲۷٫۸۶
MnO	۷٫۱۱	۸٫۴۸	۳٫۴۷	۷٫۴۶	۷٫۵۴	۵٫۲۷
MgO	۱٫۴۷	۱٫۲۴	۱٫۷۳	۱٫۴۳	۱٫۴۴	۱٫۵۹
CaO	۵٫۷۵	۵٫۶	۶٫۷۸	۶٫۰۱	۵٫۷۴	۶٫۲
Na ₂ O	۰٫۰۱	۰	۰٫۰۱	۰	۰٫۰۲	۰
K ₂ O	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۱
total	۹۹٫۹۷	۱۰۰٫۰۵	۹۹٫۹۸	۱۰۱٫۹۱	۹۹٫۹۷	۹۹٫۹۶
Si	۲٫۹۹۷	۲٫۹۶۵	۲٫۹۹۹	۲٫۹۸۵	۲٫۹۸۵	۳٫۰۱۵
Ti	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۶	۰	۰٫۰۰۷	۰٫۰۱۳	۰٫۰۰۲
Al	۲٫۰۱۹	۲٫۰۰۹	۲٫۰۱	۲٫۰۳۹	۲٫۰۲۲	۲٫۰۱۴
Cr	۰	۰٫۰۰۴	۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۴	۰
Fe ₃	۰	۰٫۰۴۳	۰	۰	۰	۰
Fe ₂	۱٫۸۱۸	۱٫۷۵۸	۱٫۹۶۲	۱٫۷۸۱	۱٫۷۸۲	۱٫۸۶۵
Mn	۰٫۴۸۴	۰٫۵۸	۰٫۲۳۶	۰٫۴۹۸	۰٫۵۱۴	۰٫۳۵۷
Mg	۰٫۱۷۶	۰٫۱۴۹	۰٫۲۰۷	۰٫۱۶۸	۰٫۱۷۳	۰٫۱۹
Ca	۰٫۴۹۵	۰٫۴۸۵	۰٫۵۸۲	۰٫۵۰۸	۰٫۴۹۵	۰٫۵۳۲
Na	۰٫۰۰۲	۰	۰٫۰۰۱	۰	۰٫۰۰۳	۰
K	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۰۱
total	۷٫۹۹۲	۸	۷٫۹۹۷	۷٫۹۸۸	۷٫۹۹	۷٫۹۷۷
Prp	۵٫۹۲۳	۵٫۰۱۴	۶٫۹۱۶	۵٫۸۶	۸٫۸۲	۶٫۴۴۵

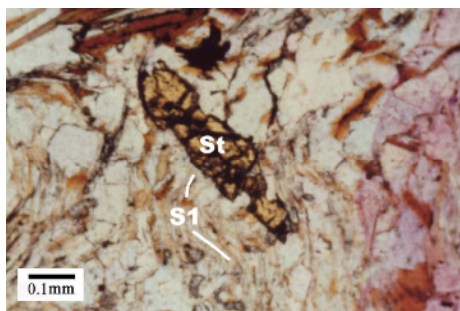
Sps	۱۶/۲۷۷	۱۹/۴۸۱	۷/۷۷۲	۱۶/۸۵۲	۱۷/۳۱۵	۱۲/۱۳۸
Alm	۶۱/۰۹۷	۵۹/۲۳۲	۶۵/۶۶۸	۶۰/۲۸۹	۶۰/۰۸۶	۶۳/۳۵۴

ادامه جدول ۴

گارنت	G1	G2	G2	G2	G2	G2
SiO ₂	۳۶/۲	۳۷/۳۵	۳۷/۴۱	۳۶/۸۸	۳۶/۷۵	۳۷/۳۶
TiO ₂	۰/۱۲	۰	۰/۰۳	۰	۰/۰۲	۰/۰۴
Al ₂ O ₃	۲۰/۸۶	۲۱/۷۹	۲۱/۶۹	۲۱/۶۲	۲۱/۶۳	۲۱/۹۸
Cr ₂ O ₃	۰/۰۵	۰	۰	۰	۰/۱۵	۰/۱۲
Fe ₂ O ₃	۲/۲۳	۰	۰/۷	۰/۵۹	۰/۱۷	۰
FeO	۲۵/۴۱	۳۲/۲۲	۳۱/۹۶	۳۲/۳۱	۲۸/۵۴	۳۱/۶۱
MnO	۸/۷۴	۲/۹۵	۰/۲۴	۱/۵	۴/۵۶	۰/۳۱
MgO	۱/۲۲	۳/۰۱	۳/۵۱	۲/۲۷	۲/۷۸	۳/۴۹
CaO	۵/۳۲	۲/۶۳	۴/۷۴	۴/۸۶	۴/۵۶	۴/۰۷
Na ₂ O	۰/۰۳	۰	۰/۰۵	۰	۰	۰
K ₂ O	۰	۰	۰	۰	۰	۰
total	۱۰۰/۱۸	۹۹/۹۵	۱۰۰/۳۳	۱۰۰/۰۳	۱۰۰/۱۸	۹۹/۹۸
Si	۲/۹۳	۲/۹۸۸	۲/۹۶۷	۲/۹۵۹	۲/۹۳۹	۲/۹۶۷
Ti	۰/۰۰۸	۰	۰/۰۰۲	۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲
Al	۱/۹۹۱	۲/۰۵۵	۲/۰۲۸	۲/۰۴۵	۲/۰۳۹	۲/۰۵۸
Cr	۰/۰۰۳	۰	۰	۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۷
Fe ₃	۰/۱۳۶	۰	۰/۰۴۲	۰/۰۳۶	۰/۰۷۱	۰
Fe ₂	۱/۷۲	۲/۱۵۶	۲/۱۲	۲/۱۶۸	۱/۹۰۹	۲/۰۹۹
Mn	۲/۵۹۹	۰/۲	۰/۰۱۶	۰/۱۰۲	۰/۳۰۹	۰/۰۲۱
Mg	۰/۱۴۷	۰/۳۵۹	۰/۴۱۵	۰/۲۷۱	۰/۳۳۱	۰/۴۱۳
Ca	۰/۴۶۱	۰/۲۲۶	۰/۴۰۳	۰/۴۱۸	۰/۳۹۱	۰/۴۳۲
Na	۰/۰۰۵	۰	۰/۰۰۷	۰	۰	۰
K	۰	۰	۰	۰	۰	۰
total	۸	۷/۹۸۴	۸	۸	۸	۷/۹۹۹
Prp	۰/۱۵۵	۰	۰	۰	۰/۴۶۱	۰/۳۷
Sps	۶/۲۹۷	۰	۰	۱/۶۱۱	۳/۲۶۱	۱/۶۷۹
Alm	۵/۰۰۹	۱۲/۲۱	۱۴/۰۴	۹/۱۶۲	۱۱/۲۵۵	۱۳/۹۳۶
Prp	۲/۰۳۹	۶/۷۹۹	۰/۵۴	۳/۴۴	۱۰/۴۸۹	۰/۷۰۳
Sps	۹/۲۴۸	۷/۶۶۸	۱۳/۶	۱۲/۴۸۶	۹/۵۴۶	۱۴/۱۸
Alm	۵۸/۷۴	۷۳/۳۲۳	۷۱/۷۶	۶۵/۱۹۳	۶۴/۹۳۵	۷۰/۸۱

استارولیت

در قسمتی از گارنت میکا شیبست‌های مجموعه تنبور، تعدادی استارولیت (کمتر از ۰/۵٪) یافت می‌شود. توجه به خصوصیات میکروسکوپی، نشان می‌دهد که ارتباط آنها با دگرشکلی واضح نیست ولی با توجه به طرز قرارگیری آنها نسبت به S2، استارولیت را به احتمال قوی می‌توان همزمان با S2 در نظر گرفت (شکل ۱۲).



شکل ۱۲ استارولیت که احتمالاً همزمان با S2 شکل گرفته است (PPL).

پلاژیوکلاز

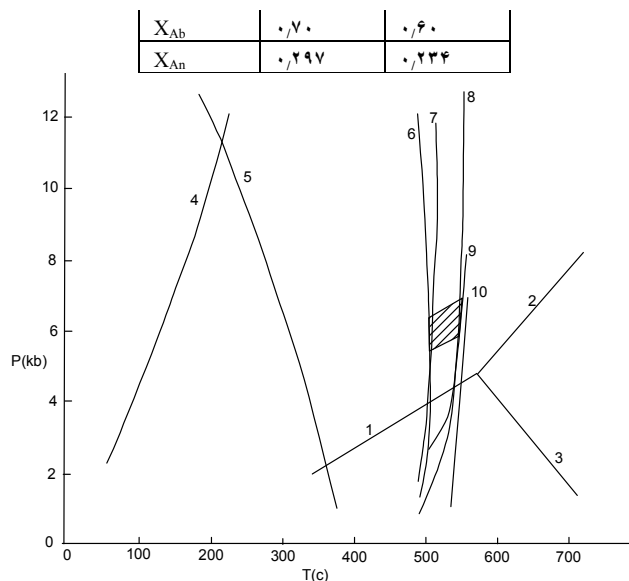
طول پلاژیوکلازها معمولاً تا ۲ میلیمتر است. ماکل آلبیتی به ندرت در آنها دیده می‌شود، زیرا در رخساره شیست سبز و حتی اوایل آمفیبولیت، فلدسپارها بخصوص، آلبیت، بدون ماکل هستند و با افزایش دما، ماکل در آنها به وجود می‌آید [۱۱ و ۱۲]. بررسی ترکیب شیمیایی ۲ نمونه از فلدسپارهای گارنت-میکاشیست‌ها نشان می‌دهد که فلدسپار عموماً از جنس الیگوکلاز (An_{۲۳-۲۹}) هستند (جدول ۵).

محاسبات زمین دما- فشارسنجی

برای تعیین شرایط دگرگونی که منطقه را تحت تأثیر قرار داده است، از شبکه سنگ‌زایی و معادلات مختلف زمین دما- فشارسنجی استفاده شده است. طبق شبکه سنگ‌زایی رسم شده براساس کانی‌ها و منحنی‌های تعادلی واکنش‌ها، فشار و دمایی حدود ۵-۷ کیلو بار و ۵۵۰-۵۰۰ درجه سانتیگراد بدست آمد (شکل ۱۳).

جدول ۵ نتایج تجزیه شیمیایی ۲ نمونه از فلدسپارهای منطقه و محاسبه کاتیونها و اجزای انتهایی آنها بر مبنای ۸ اکسیژن.

پلاژیوکلاز	●T1 (1)	●T1 (2)
SiO ₂	۶۱٫۵۸	۶۲٫۵۵
TiO ₂	۰	۰
Al ₂ O ₃	۲۴٫۵۳	۲۳٫۶۲
Cr ₂ O ₃	۰	۰
Fe ₂ O ₃	۰	۰
FeO	۰	۰
MnO	۰٫۰۸	۰٫۰۳
MgO	۰	۰
CaO	۵٫۹۳	۴٫۷۵
Na ₂ O	۷٫۷۴	۶٫۷۱
K ₂ O	۰٫۳۱	۲٫۷۹
total	۱۰۰٫۱۹	۱۰۰٫۴۶
Si	۲٫۷۲۶	۲٫۷۷۶
Ti	۰	۰
Al	۱٫۲۸۱	۱٫۲۶۳
Cr	۰	۰
Fe ³	۰	۰
Fe ²	۰	۰
Mn	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱
Mg	۰	۰
Ca	۰٫۲۸۱	۰٫۲۲۶
Na	۰٫۶۶۴	۰٫۵۷۸
K	۰٫۰۱۸	۰٫۱۵۸
total	۴٫۹۷۴	۴٫۹۷۴



شکل ۱۳ شبکه سنگ‌زایی و محدوده‌ی تقریبی فشار - دما (بخش هاشور خورده) برای دگرگونی‌های منطقه مورد مطالعه. اعداد داخل شبکه به ترتیب: ۱، ۲، ۳: نمودار پایداری سیلیکات‌های آلومین، ۴: واکنش $Ms + Chl = Ms + Bt + Qtz + H_2O$ ، ۵: واکنش $Chl + Kfs = Ms + Bt + Qtz + H_2O$ ، ۶: واکنش $Ms + Chl = Ms + Bt + Qtz + H_2O$ ، ۷: واکنش $Chl + Kfs = Bt + Alm + H_2O$ ، ۸: واکنش $Chl + Grt = Bt + St$ ، ۹: واکنش $Ms + Chl = Bt + Alm + St + H_2O$ ، ۱۰: واکنش $Chl + Ms = St + Bt + Qtz + V$ ، ۱۱: واکنش $Chl + Kfs = Bt + Alm + H_2O$ ، ۱۲: واکنش $Chl + Kfs = Ms + Bt + Qtz + H_2O$ ، ۱۳: واکنش $Ms + Chl = Ms + Bt + Qtz + H_2O$. [۱۵]

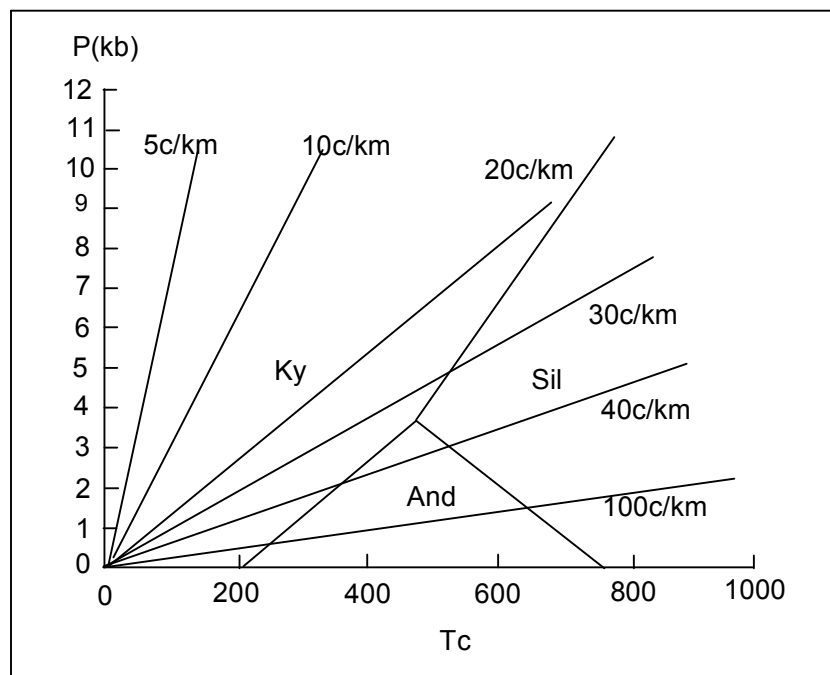
کاربرد زمین دماسنج گارنت-بیوتیت که توسط فری و اسپیر [۱۳] همسنجی شد، دمای تقریبی ۵۵۴ درجه سانتیگراد را برای دگرگونی M2 تعیین می‌نماید. از دماسنج مسکویت-بیوتیت همسنجی شده توسط هوایش [۱۴] دمای تقریبی ۵۹۰ درجه سانتیگراد برای اوج دگرگونی M2 محاسبه گردید. فشار از طریق روش هلند و پاول [۱۵] با استفاده از سیستم گارنت - پلاژیوکلاز - مسکویت - بیوتیت - کوارتز ۷ تا ۸/۴۸ کیلو بار است.

سنگ‌زایی

به علت عدم وجود داده‌های دما-فشارسنجی برای مرحله نخست دگرگونی، نمی‌توان دما و فشاری را برای آن به دست آورد. تنها می‌توان در مورد دومین فاز دگرگونی اظهار نظر کرد. گرادیان زمین گرمایی تقریبی در این مرحله بر اساس نمودار میاشیرو [۱۶] $20\text{ }^{\circ}\text{C/Km}$ است (شکل ۱۴). شواهد زیر دال بر نوع فشار متوسط (باروین) برای سنگ‌های دگرگون منطقه است:

- فراوانی گارنت در متاپلیت‌ها و متابازیت‌ها
- حضور استارولیت در متاپلیت‌ها
- گرادیان زمین گرمایی $20\text{ }^{\circ}\text{C/Km}$ در زمان پیشرفت دگرگونی.

- فشارهای بین ۷ الی ۸ کیلو بار.



شکل ۱۴ میانگین گرادیان زمین‌گرمایی در مناطق مختلف دگرگونی [۱۶]. (۱-فشار بالا یا نوع گلوکوفان
۲- باروین یا فشار متوسط ۳- دگرگونی نوع فشار پائین)

برداشت

مجموعه دگرگونی تنبور که جزئی از زون سنندج- سیرجان است، اغلب شامل متاپلیت‌ها و متابازیت‌هاست. بررسی‌های بافت‌شناسی سنگ و شیمی کانی‌های سنگهای متاپلیتی حاکی از رخداد دو مرحله دگرشکلی و دو فاز دگرگونی در سنگ‌های منطقه است. با توجه به مطالعات زمین دما- فشارسنجی می‌توان عنوان کرد که دومین فاز دگرگونی پیشرونده در منطقه از نوع فشار متوسط بوده و تا حد رخساره‌های شیست سبز و آمفیبولیت پیش رفته است. از اینرو و بنا به موقعیت منطقه نسبت به زون سنندج - سیرجان می‌توان نتیجه گرفت که این منطقه در طول فاز کوهزایی کیمرین پیشین تحت تأثیر قرار گرفته است. با توجه به عدم مشاهده دگرگونی‌های فشار بالا و مطالب فوق می‌توان منطقه قوس را به دگرگونی‌های مذکور نسبت داد.

تشکر و قدردانی

از راهنمایی‌های سازنده آقای دکتر مؤذن و از همکاری آقای دکتر Brendt از دانشگاه مونسستر آلمان برای تجزیه نقطه‌ای کانی‌ها تشکر و قدردانی می‌نماید.

مراجع

- [۱] سبزه‌ای م.، "نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ چهارگوش سیرجان"، سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۷۶).
- [۲] مؤذن م.، "پترولوژی (سنگ‌شناسی) مجموعه دگرگونی کوه تنبور با نگرش ویژه به لایه‌های غنی از گارنت"، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده علوم (۱۳۷۱) ۱۶۲.
- [3] Hey M. T., "A new review of chlorites", Mineral. Mag, v.30 (1954) 278-292.
- [4] Cathlineau M., "Cation site Occupancy in chlorite and illite as a function of temperature", Clay Mineral, v. 23 (1988) 471-485.
- [۵] ساکی ع.، مؤذن م.، تالاری س.، صبوری س.، "مینرال شیمی، حلالیت و نحوه تشکیل کلریت‌های پس از دگرشکلی در سنگهای متاپلیتی جنوب غرب ماهشان"، یازدهمین کنفرانس بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران (۱۳۸۲)، ۲۴۱-۲۳۸.
- [6] Abu El-Enen M. M., Will T. M., Okrusch M., "P-T evolution of the Pan-African Taba metamorphic belt, Sinai, Egypt constraints from metamorphic mineral assemblages", J. of. African Earth Sciences, v. 38 (2004) 39-78.
- [7] Deer W. A., et al., "An Introduction to the Rock Forming Minerals Seventeenth impression", Longman Scientific Technical (1991) 528.
- [8] Schliestedt M., "Phasengleichgewichte in Hoch druckgesteinen von Sifnos", Griechen land. Ph.D. Thesis, Technical University Braunschweig, Germany (1980) 142.
- [9] Guidotti C. V., "A comment on chemical study of minerals from the Moine Schists of the Ardnamurchan area, Argyllshire, Scotland by Butler, B. C. M. and its implications for the phengite problem", J. of. Petrol., v.10 (1963) 164-170.
- [10] Mamtani M. A., Merh S. S., Karanth R. V., Greiling R. O., "Time relationship between Metamorphism and deformation in Proterozoic rocks of the Lunarada region, Southern Aravalli Mountain Belt (India)-a microstructural study", J. Asian Earth Sciences, v.19 (2001) 195-205.
- [11] Engel A. E. J., Engel C. G., "Progressive metamorphism of amphibolite, Northwest Adirondack Mountains", New York. In Petrologic Studies (Buddington Vol.), ed. by: A. E. J. Engel et al., Geol. Soc. America (1962a) 37-82.

- [12] Iwasaki M., "*Metamorphic rocks of the Kotu-Bizan area*", eastern Sikoku. Tokyo Uni. Fac. Sci. J., Sec. 2, 15 (1963) 191-7.
- [13] Ferry J. M., Spear F. S., "*Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet*", Cont. Miner. Pet., v.66 (1978) 113-117.
- [14] Hoisch T. D., "*A muscovite-biotite geothermometer*", Am Mineral. v.74 (1989) 565-572.
- [15] Holland J. J. B., Powell R., "*An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest*", J. Metamorphic. Geol., v.16 (1998) 309-343.
- [۱۶] میاشیرو آ، "پترولوژی دگرگونی"، ترجمه محمد ولی زاده و محمود صادقیان، انتشارات دانشگاه تهران (۱۳۷۹) صفحه ۵۰۲.