

## HT-MP metamorphism at the Shahindezh Metamorphic Core (SMC) – NW Iran; Mineral chemistry and thermobarometry of metapelites

M. Modjarrad<sup>1,2</sup>, M. Moazzen<sup>1</sup>, M. Moayyed<sup>1</sup>

1- Faculty of Natural Sciences, Department of Geology, University of Tabriz, Iran

2- Islamic Azad University, Urmia branch, Iran

E-mail: mmodjarrad@yahoo.com

(Received: 7/1/2007, in revised form: 24/6/2007)

**Abstract:** On the basis of microstructural evidence it is clear that SMC metapelites have experienced at least two regional (RM1, RM2) and one contact metamorphism (CM). During RM2, several porphyroblasts including kyanite, andalusite, staurolite, cordierite, garnet and fibrous sillimanite have grown in the mica - schists. In order to estimate the PT condition of metamorphism of metapelites, we used cation exchange and multi-equilibrium methods. Temperature of RM2 estimated using, Grt - Bt and Grt - Chl thermometry 650 - 700 °C. Also PT conditions are calculated by THERMOCALC computer program which is based on multi-equilibrium reactions. Kyanite - staurolite - cordierite - bearing mica - schists are metamorphosed at pressure ~5 - 7 kbar and temperature ~650 ± 50 °C. Thermal gradient at the SMC is considered to be ~ 40 °C/km. This thermal gradient is similar to those from continent-continent collision settings.

**Keywords:** *metapelites, HT/MP Metamorphism, mineral chemistry, thermobarometry, Shahindezh Metamorphic Core (SMC).*



## شیمی کانی و دما- فشار سنجی سنگهای رسی موجود در هسته دگرگون در دما بالا- فشار متوسط شاهیندژ (SMC) شمال غرب ایران

منیر مجرد<sup>۱</sup>، محسن مؤذن<sup>۱</sup>، محسن مؤید<sup>۱</sup>

۱- دانشکده علوم طبیعی، گروه زمین شناسی، دانشگاه تبریز

۲- دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارومیه

پست الکترونیکی: [mmodjarrad@yahoo.com](mailto:mmodjarrad@yahoo.com)

(دریافت مقاله ۱۳۸۵/۱۰/۱۷، نسخه نهایی ۱۳۸۶/۴/۲)

چکیده: با توجه به مطالعات ریزبافتی، مشخص شده است که متاپلیتهای هسته دگرگون شرق شاهیندژ (SMC) دستخوش چند دگرگونی شده و حداقل دو فاز دگرگونی ناحیه‌ای (RM1, RM2) و یک فاز دگرگونی مجاورتی (CM) را تجربه کرده‌اند. طی فاز دگرگونی ناحیه‌ای نهایی (RM2) پورفایروبلاستهای شکل‌دار کیانیت، آندالوزیت، استارولیت، کردیریت، گارنت، و رشته‌های فیبرولیت در میکاشیستها به وجود آمده‌اند. دما- فشار سنجی این فاز با استفاده از روشهای مختلف تعیین دما و فشار برای سنگهای رسی انجام شده است. دماسنج کاتیونی گارنت - بیوتیت و گارنت - کلریت دمای بیشینه  $650-700^{\circ}\text{C}$  را برای دگرگونی این سنگها نشان می‌دهد. همچنین با استفاده از دما- فشار سنجی از طریق قطع واکنشهای چندگانه تعادلی با استفاده از برنامه THERMOCALC، میانگین دما و فشار دگرگونی برای شیستهای کیانیت - استارولیت - کردیریت‌دار  $50 \pm 650^{\circ}\text{C}$  و  $7-5$  کیلوبار محاسبه شد. چنین دما و فشاری نشان دهنده شیب زمین گرمایی  $40^{\circ}\text{C}$  در هر کیلومتر است که از سرشتهای محیطهای برخورد قاره - قاره‌ای است.

واژه‌های کلیدی: متاپلیت، دگرگونی نوع *HT/MP* شیمی کانی، دما - فشارسنجی، و هسته دگرگون شاهیندژ.

### مقدمه

(سنگهای آهکی و توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی) و سنگهای آهکی الیگو- میوسن نیز در منطقه برونزد دارند. تا کنون مطالعه دقیقی در مورد سنگهای دگرگون SMC انجام نشده است. تنها مورد با اهمیت نقشه زمین‌شناسی منطقه است که از سوی سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شد [۱] که در آن به پاراژنز دقیق کانیها و مرز واحدهای لیتولوژی دقت نشده است. مطالعه جامع و گام به گام سنگهای دگرگون این ناحیه باید از توجه به بافت سنگها، روابط پاراژنتیک، آگاهی از تاریخچه دگرگونی و دگرشکلی و برآورد دما و فشار دگرگونی با در نظر گرفتن ترکیب شیمیایی کانیها آغاز شود. انواع شیست واجد پورفایروبلاستهای کیانیت، آندالوزیت، کردیریت، استارولیت و

در این کار پژوهشی به سنگ نگاشت، روابط بافتی، شیمی کانی و دما- فشار سنجی بر پایه روشهای مختلف در هسته دگرگون شاهیندژ (SMC) Shahindezh Metamorphic Core پرداخته شده است. این منطقه در زون ایران مرکزی قرار دارد که سرشت آن وجود سنگهای قدیمی (پرکامبرین و پالئوزوئیک) است. محدوده مورد مطالعه از جنوب و جنوب‌غرب با زون سندانج - سیرجان و از شمال و شرق با زون سهند - بزمان محاصره شده است. سنگهای آمفیبولیتی، گنیس و مرمر در منطقه وجود دارند که ظاهراً همزمان با سنگهای رسی دگرگون شده‌اند. به علاوه سنگهای جوان‌تر وابسته به کرتاسه

سنگهای پالئوزوئیک نادگرگون روی آن قرار دارند. فاز کوهزایی کاتانگائی در عربستان بنام حجاز و در حوالی دریاچه بایکال روسیه با نام بایکالین شناخته می‌شود. طی این فاز به طور کلی پوسته ایران دستخوش گسترش و بازشدگی بوده و آکالی گرانیته و ریولیت به درون سنگهای دگرگون نفوذ کرده‌اند. چنین سنگهایی در SMC هم مشاهده می‌شوند. بر اثر عملکرد این فاز، پی سنگ پرکامبرین ایران، پاکستان، بخشی از افغانستان، ترکیه، و عربستان به صورت تختگاه نسبتاً پایداری درآمده و دریای کم عمقی آنرا پوشانده است که تا اواخر پالئوزوئیک ادامه داشت [۸].

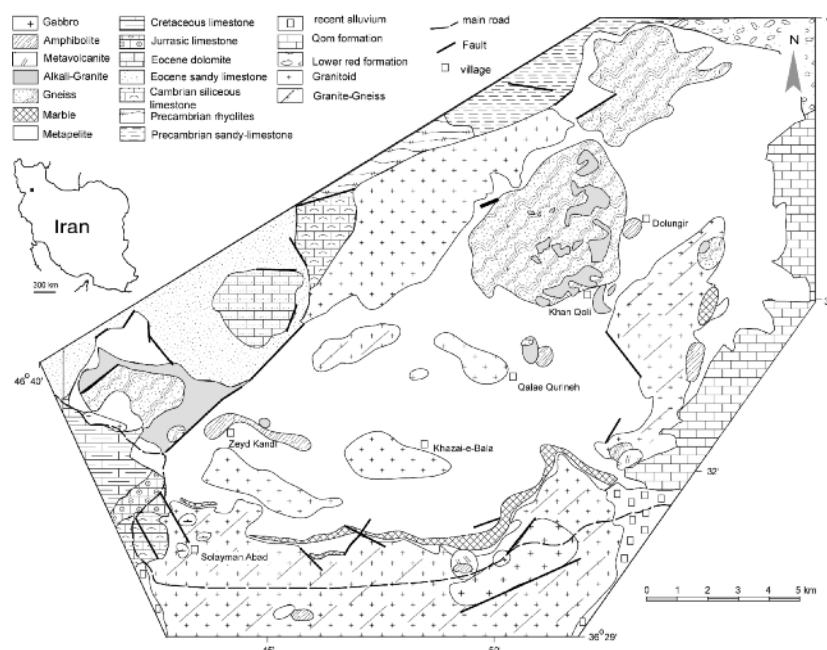
### سنگ شناسی

سنگهای رسی بخش اعظم گستره SMC را تشکیل داده‌اند. (شکل ۱) این سنگها شیتوزیته نشان می‌دهند و دارای پورفیروبلاستهای کیانیت (شکل ۲a)، آندالوزیت، استارولیت (شکل ۲b)، کردیریت (شکل ۲c)، گارنت (شکل ۲d)، و نیز رشته‌های فیبرولیت در زمینه ریز دانه از کوارتز، بیوتیت، مسکویت، فلدسپار پتاسیم، پلاژیوکلاز (آلبیت) و کلریت هستند. پورفیروبلاستهای کیانیت، آندالوزیت و کردیریت در نمونه ماکروسکوپی قابل مشاهده‌اند. اکسید فلزات، تورمالین، آپانیت، زیرکن و گرافیت از کانیهایی فرعی در این سنگها محسوب می‌شوند.

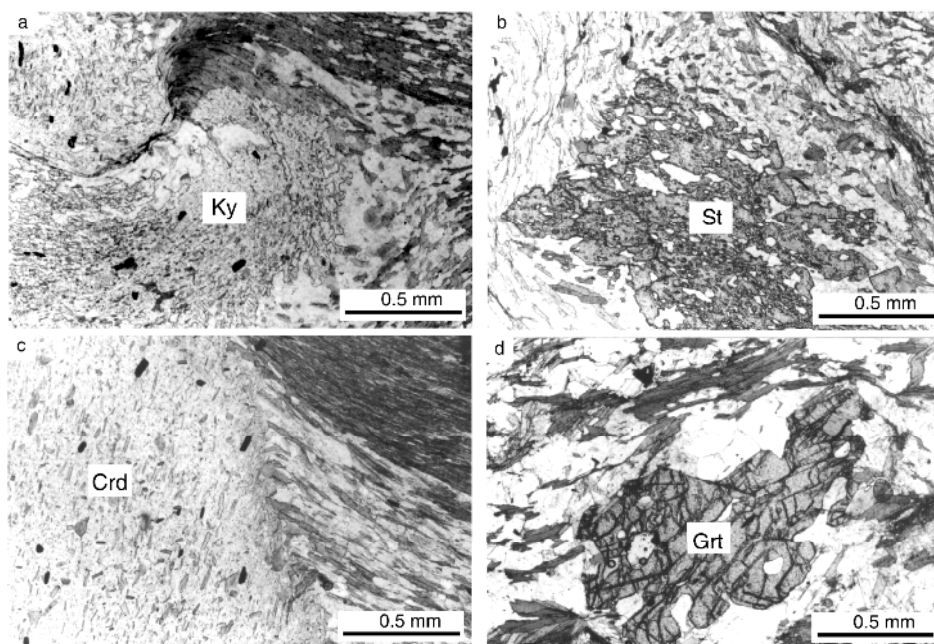
گارنت در منطقه دیده شده‌اند. در این مقاله سعی شده است با بررسی متاپلیت‌ها، علاوه بر تعیین تعداد فازهای دگرگونی عمل کننده بر روی متاپلیت‌ها، کانیهایی در حال تعادل با هم تعیین شده و سپس با توجه به ترکیب شیمیایی کانیهایی فرومنیزین شرایط دما و فشاری دگرگونی اصلی ناحیه‌ای مشخص شود. تشابه پاراژنز کانیایی و مسیر PT برای متاپلیت‌های SMC با سنگهای دگرگون HT/L-MP قدیمی (پرکامبرین تا پالئوزوئیک) در هندوستان، مصر، فرانسه، و اسپانیا که در اثر برخورد قاره - قاره ایجاد شده‌اند، قابل توجه است (برای مثال [۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷]).

### زمین‌شناسی منطقه

سنگهای رسی دگرگون شده، قدیمی‌ترین واحد مشاهده شده در SMC هستند. این سنگها احتمالاً با واحدهای دگرگون تفکیک نشده در ایران مرکزی (پشت بادام) هم ارزند. کوهزایی بایکالین یا کاتانگائی در پرکامبرین پسین رخ داده و آثار آن را می‌توان در سنگهای پشت بادام، بافق، ترو، گلپایگان، موله، تکاب، و ارومیه دید. بر اثر این کوهزایی سنگهای پروتروزوئیک و آرکئوزوئیک دستخوش گسل خوردگی، چین‌خوردگی و دگرگونی شده‌اند [۸]. در متون زمین‌شناسی ایران درجه دگرگونی این سنگها از شیت سبز تا آمفیبولیت ارزیابی شده است [۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲]. به نظر می‌رسد که سنگهای دگرگون شرق شاهیندژ، سنی معادل پیش از پالئوزوئیک دارند، زیرا



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه مورد مطالعه که با اعمال تغییراتی از خسرقی [۱۶] اقتباس شده است. شهرستان شاهیندژ در غرب جاده اصلی بوده و در نقشه بالا قابل مشاهده نیست. منطقه مورد مطالعه در نقشه ایران به صورت چهارگوش سیاه نشان داده شده است.



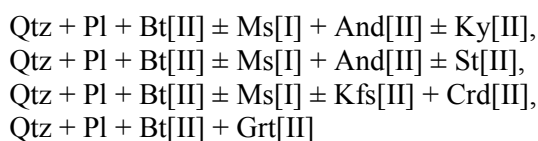
شکل ۲ تصاویر میکروسکوپی در حالت PPL از میکاشیستهای دگرگون به صورت ناحیه ای. a درشت بلور کیانیت. b ایدئوبلاست استارولیت با ماکل صلیبی. c پورفیروبلاست کردیریت با بافت پوئیکلیتیک. d پورفیروبلاست گارنت.

اغلب سنگهای رسی دگرگون در یک، دو، و یا سه روند، سمت گیری ترجیحی نشان می‌دهند. ابعاد پورفیروبلاستها در این سنگها گاه تا چند سانتیمتر نیز می‌رسد طول بیشتر آنها در حدود چند میلیمتر است. پورفیروبلاستهای کردیریت، گارنت، کیانیت، استارولیت و آندالوزیت موجود در متاپلیتها، بیشتر به صورت ایدئوبلاست هستند (شکل ۲). دو دسته فیبرولیت در این سنگها دیده شدند که با استناد به مشاهدات میکروسکوپی یکی از بیوتیت و دیگری با پیشرفت دگرگونی مجاورتی از آندالوزیت ایجاد شده است. علائم کانیها از [۱۳] Kretz گرفته شده‌اند.

#### چند دگرگونی

مطالعه روند اینکلوزنها و ارتباط شیستوزیته متن سنگ با آن که نشان می‌دهد که در منطقه SMC حداقل دو فاز دگرگونی ناحیه‌ای و یک فاز دگرگونی مجاورتی رخ داده است. در این بخش به تفکیک این فازها را بررسی می‌کنیم.

RM1: Chl[I], Ms[I], Bt[I] طی این فاز کانیهای رسی سنگهای ته نشستی به دنبال واکنشهایی به کلریت، مسکویت، و بیوتیت تبدیل شده‌اند. کلریت به دلیل مصرف شدن طی واکنشهای تشکیل بیوتیت، حجم اندکی دارد. درحالیکه بیوتیت و مسکویت به ترتیب فراوانترند. این پاراژنز تنها در برخی شیستهای بدون پورفیروبلاست منطقه محفوظ مانده است:



CM: Crd[III], And[III], Fib[III], Grt[III] با رخداد این فاز، آندالوزیت و کردیریت‌های جدیدی که با کانیهای موجود در فاز قبلی متفاوتند و نیز فیبرولیت و گارنت پدید آمده‌اند. سنگهای واجد کانیهای CM, RM2 با هم کمتر دیده شده‌اند. در حالیکه به دلیل نوع واکنش سازنده فیبرولیت، این کانی در سنگهای تشکیل شده در RM2 و با کانیهای آن همراه است. سنگهای با کانیهای CM، مساحت کمی از منطقه را پوشش می‌دهند و بیشتر محدود به مناطق همجوار با سنگهای آذرین

(احتمالاً سنگ مادر از منیزیم بسیار فقیر بوده است). مقدار Al(IV) از ۱/۳۸۷ - ۱/۰۸۳ و مقدار Al(VI) از ۰/۸۶۲ - ۰/۳۴ در تغییر است. مقدار TiO<sub>2</sub> در نمونه‌های گارنت دار بالاتر از نمونه‌های استارولیت‌دار و کردیریت‌دار است.

گارنت: این کانی در ۴ نمونه سنگی از منطقه SMC مورد بررسی قرار گرفت که از آلماندن غنی است (۸۶ - ۷۴٪). شکل ۴ ترکیب شیمیایی این کانی را در نمودار مثلثی پیروپ - گروسولار - آلماندن + اسپسارتین نشان می‌دهد.

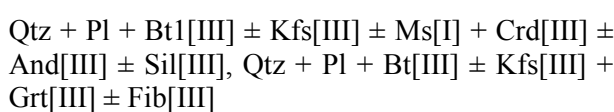
مقدار گروسولار و اسپسارتین آن کم است (گروسولار: ۰/۶ - ۲٪ و اسپسارتین: ۰/۷ - ۵٪). مقدار پیروپ در این کانی تغییرات طیفی گسترده‌ای دارد ولی بیشتر در حد ۲۲٪ است.

مسکویت: این کانی در دو نمونه آنالیز شد. متوسط مقدار کاتیون Si در این کانی ۳/۰۳ به ازای ۲۲ اکسیژن است. فاکتور Al(IV) برابر ۰/۹۷ و Al(VI) برابر ۱/۹۲ است. این کانی در نمونه‌های حاوی استارولیت ۷۶٪ از مسکویت و ۲۴٪ از پاراگونیت تشکیل شده و در نمونه‌های دارای استارولیت و کردیریت تا ۷۸٪ حاوی مسکویت است و پاراگونیت آن فقط ۱۳٪ است. مقدار Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> این کانی به ۳۷/۵٪ می‌رسد.

کلریت: دو نمونه از سنگهای رسی منطقه کلریت مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفتند. کسر مولی منیزیم برای این کانی ۰/۵۵ - ۰/۴۹ است. بر اساس طبقه بندی [۱۴] Hey کلریت موجود در نمونه کردیریت دار از نوع ریپدولیت بوده و در نمونه گارنت دار از نوع پینوکلریت است و Si بیشتری دارد (شکل ۵). فعالیت دفنایت در کلریت نمونه گارنت‌دار بالاست، در حالیکه در نمونه کردیریت‌دار، کلریت از کلینوکلر و امسایت غنی‌تر است و دفنایت فعالیت پائینی داشته است. کاتیون Si از ۲/۹ - ۲/۷ تغییر می‌کند. مقدار Al در نمونه‌های کردیریت‌دار بیشتر و در نمونه‌های گارنت‌دار کمتر است. مقدار منگنز در کلریت نمونه کردیریت‌دار برابر ۰/۲ و در نمونه گارنت‌دار کمتر است ۰/۰۶ است. سدیم در کلریت‌های SMC صفر یا در حد چشم پوشی است.

کردیریت: این کانی در دو نمونه سنگی تجزیه شدند. ترکیب شیمیایی در هر دو نمونه برای کردیریت یکنواخت بوده و ۶۵٪ تا ۷۳٪ از MgCr<sub>2</sub> و ۱٪ تا ۲/۵٪ از MnCr<sub>2</sub> تشکیل شده است. فراوانی کاتیون Fe<sup>2+</sup> در این کانی ۰/۵ apfu به ازای ۱۸ اکسیژن است.

جوان هستند. از لحاظ فراوانی، کردیریت بیشتر از همه و گارنت بسیار کم متبلور شده است. پارائزهای غالب عبارتند از:



همچنین طی این فاز، کلریت و مسکوئیت‌های جدیدی پدید آمده‌اند که کاملاً متمایز از کانیهای تشکیل شده در RM1 هستند Ms[III], Chl[III]. بعلاوه بیشتر مسکویت و کلریت مربوط به RM1 تا این مرحله مصرف شده اند. معمولاً هر کدام این کانیها به تنهایی در هر دو گروه سنگهای دارای کانیهای RM1 و RM2 دیده می‌شوند.

### دگرسانی

در دگرگونی قهقرایی استارولیت به مسکویت، گارنت و کردیریت به کلریت، و بعضی آلومینوسیلیکاتها به مجموعه شیمیر (Shimmer aggregate = ephesite + paragonite, fine grain micaceous) تبدیل شده‌اند. در حالیکه معمولاً هسته‌های سالم گارنت با حاشیه کلریتی و آلومینوسیلیکاتهایی که در مرکز به کانیهای رسی تجزیه شده و حاشیه سالمی دارند، در منطقه فراوانند.

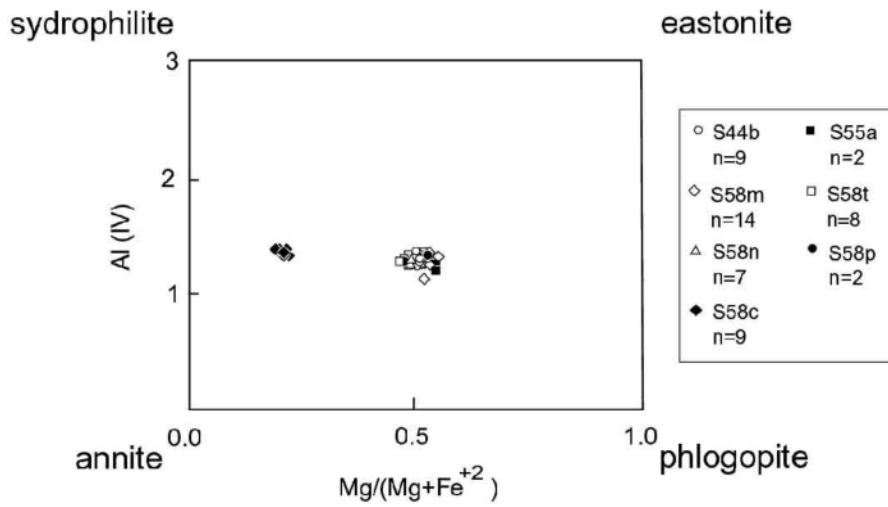
### شیمی کانی

روش تجزیه: تجزیه‌های شیمیایی با یک دستگاه ریز پردازنده نوع Cameca SX100 در گروه زمین‌شناسی دانشگاه پتسدام آلمان صورت گرفته است. برای مقایسه از استانداردهای طبیعی و مصنوعی استفاده شد، و تصحیح PAP صورت گرفت. فرمول کانیها برای گارنت بر اساس ۱۲ اکسیژن، مسکویت و بیوتیت ۲۲ اکسیژن، کلریت ۱۴، استارولیت ۴۶، کردیریت ۱۸، پلاژیوکلاز ۸، و ایلمنیت بر پایه ۳ اکسیژن محاسبه شده است. نسبت  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  بر اساس عنصر سنجی و با استفاده از برنامه کامپیوتری AX تعیین شد (<ftp://www.esc.cam.ac.uk/pub/minps/AX>). در جدول ۱ داده‌های ریز پردازش معرف برای هر کانی خلاصه شده است.

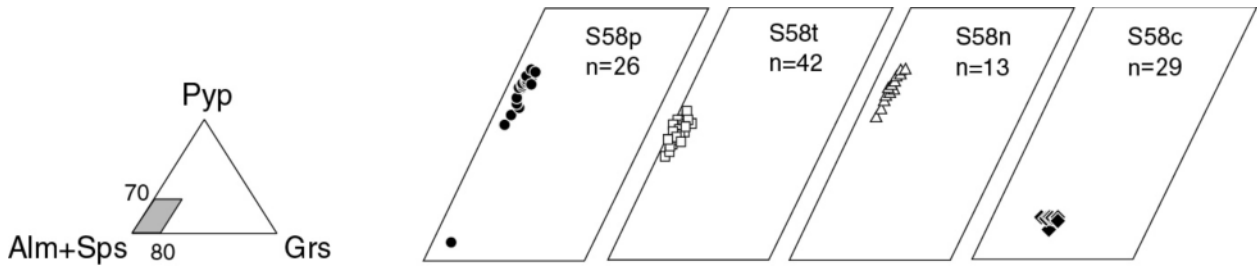
بیوتیت: این کانی در ۷ نمونه سنگی تجزیه شدند. کسر مولی منیزیم برای ۶ نمونه ۰/۴۵-۰/۵۷ است. ولی برای یک نمونه این مقدار ۰/۲ است (شکل ۳). این همان نمونه‌ای است که کمترین مقدار پیروپ را داشته و دارای بیشترین مقدار انایت است

جدول ۱ خلاصه داده‌های حاصل از آنالیز نقطه ای کانیها. تنها یک تجزیه معرف بعلاوه تعداد تجزیه های انجام شده در این کار پژوهشی، برای تدوین در مقاله ارائه شده‌اند.

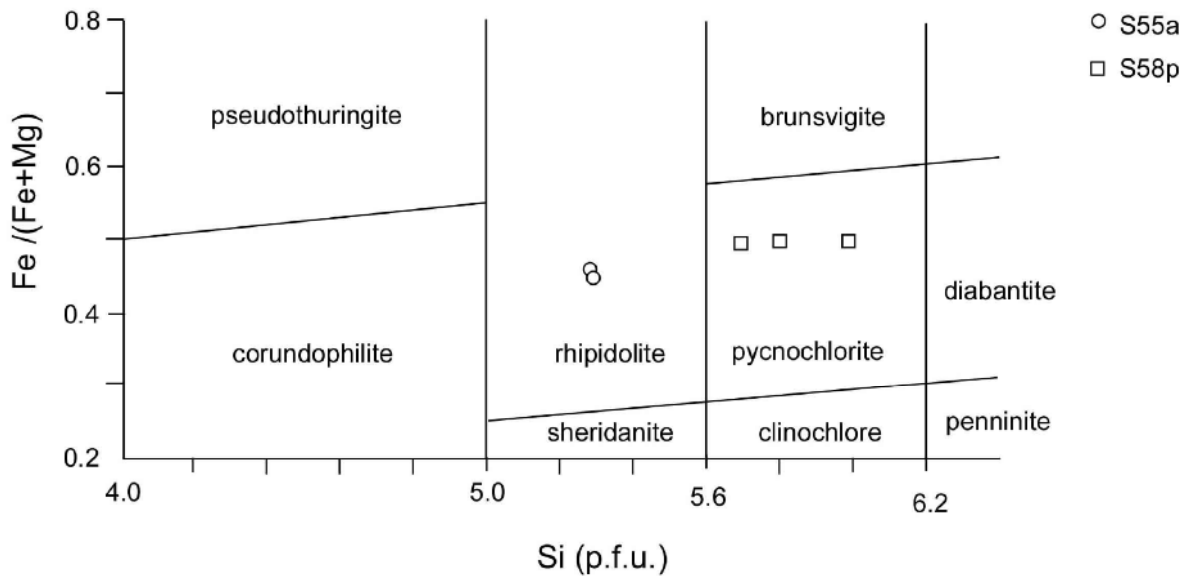
	استارولیت تعداد=۱۳	کلریت تعداد=۵	کردیریت تعداد=۳۱	ایلمنیت تعداد=۶	گارنت تعداد=۱۰۸	مسکویت تعداد=۳	بیوتیت تعداد=۵۸	پلاژیوکلاز تعداد=۶۶
SiO <sub>2</sub>	۲۷,۷۰	۲۵,۴۱	۴۸,۸۷	۰,۰۵	۳۷,۳۳	۴۵,۷۰	۳۶,۰۰	۶۶,۲۷
TiO <sub>2</sub>	۰,۵۰	۰,۱۱	۰,۰۱	۵۲,۹۴	۰,۰۳	۰,۴۳	۱,۸۱	۰,۰۱
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۵۳,۳۳	۲۳,۱۹	۳۳,۵۳	۲,۲۰	۲۱,۷۹	۳۷,۴۹	۲۰,۱۰	۲۱,۴۶
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۶	۰,۰۴	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۷	۰,۰۰
FeO	۱۳,۳۴	۲۳,۴۸	۵,۹۶	۴۱,۸۵	۳۳,۷۰	۰,۷۸	۱۷,۴۱	۰,۰۰
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۰	۰,۰۰	۱,۶۶	۰,۰۰	۱,۳۲	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
MnO	۰,۴۱	۰,۱۹	۰,۵۱	۲,۰۱	۰,۴۴	۰,۰۱	۰,۱۲	۰,۰۰
MgO	۱,۸۷	۱۵,۲۹	۸,۹۶	۰,۲۰	۵,۴۷	۰,۳۷	۱۰,۷۳	۰,۰۰
CaO	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۴	۰,۶۰	۰,۰۷	۰,۰۲	۱,۳۲
Na <sub>2</sub> O	۰,۱۸	۰,۰۰	۰,۲۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۱,۶۸	۰,۳۶	۱۱,۱۷
K <sub>2</sub> O	۰,۰۰	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۰	۰,۰۰	۸,۲۸	۸,۴۲	۰,۰۹
ZnO	۰,۴۶							
Total	۹۷,۸۵	۸۷,۷۷	۹۹,۷۵	۹۹,۳۴	۱۰۰,۶۹	۹۴,۸۲	۹۵,۰۵	۱۰۰,۴۰
Si	۷,۷۲۳	۲,۶۴۱	۴,۹۴۴	۰,۰۰۱	۲,۹۴۵	۳,۰۱۸	۲,۶۹۸	۲,۸۹۹
Ti	۰,۱۰۵	۰,۰۰۹	۰,۰۰۱	۰,۹۹۰	۰,۰۰۲	۰,۰۲۱	۰,۱۰۲	۰,۰۰۰
Al	۱۷,۵۲	۲,۸۴۲	۳,۹۹۹	۰,۰۶۴	۲,۰۲۷	۲,۹۱۹	۱,۷۷۶	۱,۱۰۷
Cr	۰,۰۱۳	۰,۰۰۳	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰	۰,۰۰۴	۰,۰۰۰
Fe <sup>2+</sup>	۳,۱۱۰	۲,۰۴۱	۰,۵۰۴	۰,۸۷۰	۲,۲۲۴	۰,۰۴۳	۱,۰۹۱	۰,۰۰۳
Fe <sup>3+</sup>	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۱۲۶	۰,۰۰۰	۰,۰۷۸	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰
Mn	۰,۰۹۷	۰,۰۱۷	۰,۰۴۴	۰,۰۴۲	۰,۰۲۹	۰,۰۰۱	۰,۰۰۸	۰,۰۰۰
Mg	۰,۷۷۷	۲,۳۶۹	۱,۳۵۱	۰,۰۰۷	۰,۶۴۳	۰,۰۳۶	۱,۱۹۹	۰,۰۰۰
Ca	۰,۰۰۰	۰,۰۰۲	۰,۰۰۰	۰,۰۰۱	۰,۰۵۱	۰,۰۰۵	۰,۰۰۲	۰,۰۶۲
Na	۰,۰۹۷	۰,۰۰۰	۰,۰۴۱		۰,۰۰۰	۰,۲۱۵	۰,۰۵۲	۰,۹۴۷
K	۰,۰۰۰	۰,۰۰۵	۰,۰۰۴		۰,۰۰۰	۰,۶۸۹	۰,۸۰۶	۰,۰۰۵
Zn	۰,۱۰۰	۰,۰۰۰						
X <sub>Mg</sub>	۰,۱۹۹	۰,۵۲۷						
X <sub>Zn</sub>	۰,۰۲۴							
X <sub>Mn</sub>	۰,۰۲۴							
MgCrd			۰,۷۳					
MnCrd			۰,۰۲۳					
Hem				۰,۰۰۰				
Ilm				۰,۹۵۴				
MnIlm				۰,۰۴۶				
X <sub>Alm</sub>					۰,۷۵۵			
X <sub>Sps</sub>					۰,۰۱			
X <sub>Py</sub>					۰,۲۲			
X <sub>Grs</sub>					۰,۰۲			
Al <sup>IV</sup>						۰,۹۸۲	۱,۳۰۲	
Al <sup>VI</sup>						۱,۹۳۷	۰,۴۷۴	
X <sub>Mg</sub>						۰,۴۶	۰,۵۲۴	
Ms						۰,۷۶		
Pa						۰,۲۴		
X <sub>An</sub>								۰,۰۶
X <sub>Ab</sub>								۰,۹۴



شکل ۳ توزیع ترکیب بیوتیت‌های آنالیز شده از شیستهای SMC. بجز یک نمونه، ترکیب بقیه بیوتیتها مشابه است.



شکل ۴ ترکیب شیمیایی گارنتهای SMC که همگی از آلماندن غنی هستند.



شکل ۵ ترکیب شیمیایی کلریت در نمودار طبقه بندی کلریتها [۱۴]. عضو نهایی ریپیدولیت و پینوکلریت در شیستهای SMC وجود داشته است.

THERMOCALC [۱۷] Holland and Powell در برنامه (v. 2.4) [۱۸] در حالت دما و فشار میانگینی [۱۹، ۱۸] انجام گرفته است. ترکیب فعالیت اعضای نهایی کانیها و نیز نسبت  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  با برنامه AX در دمای تخمینی اولیه محاسبه شدند. در این برنامه فعالیت میکای سفید از مدل Van Laar [۲۰] و بیوتیت از مدل اختلاط ایده آل سایت Al M1 محاسبه شده‌اند. این برنامه برای استارولیت اختلاط ایده آل در ۴ سایت را در نظر گرفته و برای به دست آوردن فعالیت اعضای نهایی کردیریت، بدون در نظر گرفتن آب و نسبت Max ratio برابر ۰/۲ عمل می‌کند. در این محاسبات همواره فرض بر این است که شارۀ خالص با ترکیب  $H_2O$  برای همهٔ مجموعه‌ها در اختیار بوده است. در این محاسبه سعی شده است انحراف از معیار برای فشار بیش از ۱/۵ کیلو بار و برای دما بیش از ۷۰ درجه سانتیگراد نباشد. بعلاوه از روشهای تبادل کاتیونی برای تعیین دما در نمونه‌های گارنت دار استفاده شد. روش گارنت - بیوتیت [۲۱] و گارنت - کلریت [۲۲] روشهای مورد استفاده برای این منظور بوده‌اند. در این مورد سعی شد که بیوتیت‌های موجود در زمینه و مجاور گارنت‌ها استفاده شود. جدول ۲ فعالیت معرف و میانگین اعضای نهایی کانیها را که در محاسبات برنامه THERMOCALC بکار رفته، نشان می‌دهد. دماسنجی کاتیونی گارنت - بیوتیت و گارنت - کلریت بر روی چهار نمونه از منطقه SMC بکار بسته شد. داده‌های مربوط به تجزیه ریز پردازنده از مرکز گارنت دمای بیشینه ۷۳۰ - ۶۶۵ درجه سانتیگراد، و نتیجهٔ دماسنجی گارنت - کلریت نیز دمای ۶۳۰ - ۷۳۰ درجه سانتیگراد را برای مرکز گارنت نشان می‌دهد.

نتایج دما- فشارسنجی با برنامه THERMOCALC برای نمونه‌های کیانیت-کردیریت-استارولیت شیست SMC فشار بشینه  $۱/۵ \pm ۷/۲ - ۵/۲$  کیلو بار و دمای  $۶۷۰ \pm ۶۰$  تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. شکل ۶ نتیجهٔ دما- فشارسنجی کاتیونی و منحنی‌های تعادلی چند گانه را با رسم بیضی خطا نشان می‌دهد.

استارولیت: در دو نمونهٔ سنگی تجزیه شده است. کسر مولی استارولیت منیزیم دار ۱۶/۳٪ تا ۲۰٪، استارولیت منگنزدار ۲٪ تا ۳/۴٪ و استارولیت روی دار ۲/۴٪ تا ۴/۳٪ است. فراوانی ZnO در این کانیها در حدود ۰/۵٪، و کسر مولی منیزیم از ۰/۱۷ تا ۰/۲ در تغییر است. پلاژیوکلاز: این کانی در ۶ نمونهٔ تجزیه شد. این کانی از آلبیت غنی و در حد الیگوکلاز است (An 4-20Ab 72-95). بالاترین مقدار آنورتیت در نمونهٔ گارنت دار است که گارنت آن از گروسولار و آلماندن غنی است. بیشترین مقدار آلبیت در نمونه‌های کردیریت دار دیده شده است. آلومینوسیلیکاتها: این دسته از کانیها در دو نمونه آنالیز شدند. فراوانی  $SiO_2$  برابر ۳۶/۷۴٪ - ۳۷/۵۲٪ است. مقدار آلومینیوم ۶۳/۰۲٪ - ۶۰/۴۴٪ است. مقدار FeO از ۰/۸۹ - ۰/۲۰ در تغییر است. فراوانی MgO در این کانیها در حدود ۱/۰۱٪ است. ایلمنیت: این کانی در دو نمونه مورد آنالیز قرار گرفته است. کانیهای کدر در متاپلیتهای SMC از نوع ایلمنیت هستند (۹۷٪). مقدار اندکی هماتیت (۰٪ - ۳) و منگنز ایلمنیت (۱٪ - ۵) در این کانی وجود دارد.

#### دما- فشارسنجی دگرگونی ناحیه‌ای

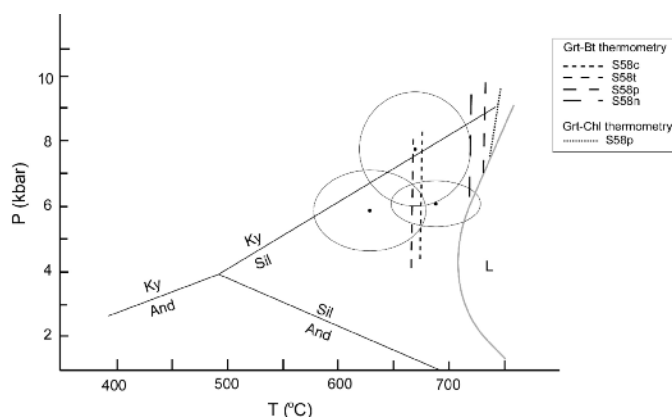
به کار بستن روشهای ترمودینامیکی برای پاراژنهای تعیین شده به صورت بافتی (میکروسکوپی)، مبنای دما- فشارسنجی بوده است. در انتخاب کانیها به عنوان پاراژن در حال تعادل دقت شده است (برای مثال [۱۵، ۱۶]).

به طور کلی در مورد هفت نمونه از سنگهای دگرگون SMC دما- فشارسنجی کاتیونی، و نیز برخوردگاه منحنی‌های تعادل چندگانه انجام گرفته است. برای پیشگیری از بروز خطای ناشی از میانگین گیری ترکیب کانیها در تعیین دما و فشار بر اساس بردارهای جانشین فرومنیزین و چرماک، به کمینه و بیشینه ترکیبی کانیهای در حال تعادل توجه شده است. به خصوص در مورد پورفیروبلاست گارنت به خاطر ثبت مراحل دگرگونی پسروده به ترکیب مرکز و حاشیه‌ها دقت کرده و از ترکیب مرکز برای تعیین دمای بیشینه استفاده شد. دما- فشارسنجی سه نمونه از SMC با استفاده از روش قطع واکنشهای تعادلی چندگانه و داده‌های ترمودینامیکی



جدول ۲ خلاصه فعالیت کانیها در دما - فشار سنجی توسط برنامه THERMOCALC.

تعداد تجزیه	میانگین فعالیت اعضای نهایی کانیها	نام کانی
۲۵	۰/۰۵۲	فلوگوپیت
	۰/۰۳۳	آنیت
	۰/۰۵۵	استونیت
۳	۰/۰۷۲	مسکویت
	۰/۰۸۳	پاراگونیت
	۰/۰۰۷۵	سلادونیت
۲	۰/۰۳۸	کلینوکلر
	۰/۰۱۶۸	دفنیت
	۰/۰۳۸۵	امسیت
۱۳	۰/۰۰۱۹	استارولیت منیزیم دار
	۰/۰۴۰	استارولیت آهن دار
۱۸	۰/۰۴۹	کردیریت
	۰/۰۱۱	کردیریت آهن دار
	۰/۰۰۰۵۵	کردیریت منگنز دار
۱۱	۰/۰۸۶	آلبیت
	۰/۰۲۳	آنورتیت
	۱	کیانیت
	۱	کوارتز



شکل ۶ نمودار دما و فشار که نتایج دما- فشار سنجی تبادل کاتیونی و تعادل چندگانه را که با برنامه THERMOCALC محاسبه شده است، نشان می‌دهد. بیضوی خطا پیرامون نقاط دما و فشار تخمینی ترسیم شده است.

#### برداشت

نتایج دما- فشار سنجی با قطع واکنشهای تعادلی چندگانه، نشان دهنده دگرگونی دمایی بالا / فشار پائین تا میانگین (HT/L-MP) برای SMC است. تغییرات فشار و دمایی سنگهای این منطقه با برنامه ترموکالک برابر ۵ تا ۷ کیلو بار در حدود ۶۵۰ °C محاسبه شدند. دمایی بیشینه دگرگونی با استفاده از روش گارنت - بیوتیت و گارنت - کلریت از مرکز گارنتها در چهار نمونه، در حدود ۷۰۰ °C محاسبه شد. شیب زمین گرمایی SMC در حدود ۴۰ °C در کیلومتر برآورد شد که با مشخصات محیط برخوردگاه قاره - قاره پرازش دارد. دما و فشار به دست آمده و نیز پارائز کانیایی در SMC مشابه موارد گزارش شده از سنگهای دگرگون میزبان ماسیو سولفاید

Rajpura-Dariba در شمالغرب هند [۶]، کمر بند دگرگونی Taba در صحرای سینا در مصر [۷]، متاپلیتهای هرسی نین Canigou فرانسه [۵]، متاپلیتهای واریسکن پایانی Bossost dome پیرنه مرکزی [۳]، سنگهای دگرگون هرسی نین Velay Dome ماسیو سانتال فرانسه [۲]، و متاپلیتهای HT-LP واریسکن شمالشرق Iberia اسپانیا [۴] است. همه این سرزمینهای دگرگون در اثر برخورد قاره - قاره حاصل شده‌اند و از نوع HT/MP محسوب می‌شوند.

#### تشکر و قدردانی

بدینوسیله از پروفیسور P. O'Brien استاد دانشگاه پتسدام آلمان و پروفیسور D. Whitney استاد دانشگاه مینه سوتای

- [12] Berberian M., "A brief geological description of north-central Iran. In materials for the study of seismotectonics of Iran: North-Central Iran", Geol. Surv. Iran, Rep 29 (1974) 127-138.
- [13] Kretz R., "Symbole for rock-forming minerals", Am Mineral 68 (1983) 277-279. [5] Bhattacharya A., Mohanty L., Maji A., Sen S.K., Raith M., "Non-ideal mixing in the phlogopite-annite binary: constraints from experimental data on Mg-Fe partitioning and a reformulation of the biotite-garnet geothermometer", Contrib Mineral Petrol 111(1992) 87-93.
- [14] Hey M.H., "A new review of the chlorites", Min Mag 30 (1954) 277-292.
- [15] Droop G.T.R., Bucher-Nurminen K., "Reaction textures and metamorphic evolution of sapphirine-bearing granulites from the Gruf Complex, Italian Central Alps", J Petrol 25 (1984) 766-803.
- [16] Dale J., Holland T. J. B., "Geothermobarometry, P-T paths and metamorphic field gradients of high-P rocks from the Adula Nappe, Central Alps", J Metamorph Geol 21 (2003) 813-829.
- [17] Holland T.J.B., Powell R., "An internally consistent thermodynamic dataset for phase of petrological interest", J Metamorph Geol 16 (1998) 309-343.
- [18] Powell R., Holland T.J.B., "An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlation: 3. Application to geobarometry, worked examples and computer program", J Metamorph Geol 6 (1988) 173-204.
- [19] Powell R., Holland T.J.B., "Optimal geothermometry and geobarometry", Am Mineral 79 (1994) 120-133.
- [20] Coggon R., Holland T.J.B., "Mixing properties of phengitic micas and revised garnet-phengite thermobarometers", J Metamorph Geol 20 (2002) 683-696.
- [21] Bhattacharya A., Mohanty L., Maji A., Sen S.K., Raith M., "Non-ideal mixing in the phlogopite-annite binary: constraints from experimental data on Mg-Fe partitioning and a reformulation of the biotite-garnet geothermometer", Contrib Mineral Petrol 111(1992) 87-93.
- [22] Grambling J., "Internally-consistent geothermometry and H<sub>2</sub>O barometry in metamorphic rocks: the example garnet-chlorite-quartz", Contrib Mineral Petrol 105 (1991) 617-628.
- آمریکا به دلیل راهنمایی‌های ارزنده علمی تشکر می‌کنیم. تجزیه‌های شیمیایی مورد استفاده در این مقاله در مرکز تحقیقات GFZ پتسدام آلمان صورت گرفته است. از اینرو از دکتر Rhede و خانم Appelt در مرکز تحقیقات GFZ آلمان به خاطر کمک‌هایشان در این امر سپاسگزاریم.
- مراجع
- [1] Khasragi K., Eghlimi, M.H., Amini Azar R., Alavi-Naini M., "Geological map of Sahindezh 1:100000", Geol Surv. Iran. No. 5363 (1994).
- [2] Barbey P., Macaudiere J., Marignac C., Jabbori J., "Sillimanite concentrations in the southern Velay Dome and Late Hercynian P-T-t evolution in the French Massif Central", CR Geoscience 337 (2005) 872-879.
- [3] Mezger J., Passchier C.W., Regnier J.L., "Metastable staurolite-cordierite assemblage of the Bossost dome: Late Variscan decompression and polyphase metamorphism in the Axial Zone of the central Pyrenees", C R Geoscience 336 (2004) 827-837.
- [4] Estrada J.R., Martinez F.J., "Evolution of bulk composition, mineralogy, strain style and fluid flow during an HT-LP metamorphic event: sillimanite zone of the Catalan Coastal Ranges Variscan basement, NE Iberia", Tectonophysics 348 (2002) 111-134.
- [5] Azamber B., Guitard G., "Kyanite and staurolite-bearing Hercynian metapelites from the Canigou (eastern Pyrenees, France)", Earth and Planetary Sciences 333 (2001) 601-609.
- [6] Mishra B., Upadhyay D., Bernhardt H.J., "Metamorphism of the host and associated rocks at the Rajpura-Dariba massive sulfide deposit, Northwestern India", Journal of Asian Earth Sciences (in press) 2005.
- [7] El-Enen M.M.A., Will T.M., Okrusch M., "P-T evolution of the Pan-African Taba metamorphic belt, Sinai, Egypt: Constraints from metapelitic mineral assemblages", J African E Sci 38 (2004) 59-78.
- [8] Darvish zadeh A., "Geology of Iran", Amirkabir press (1990) 901p.
- [9] Alavi-Naini M., Amidi S.M., "Geology of western parts of Takab Quadrangle", Geol. Surv. Iran. Note no 49 (1968), 98p.
- [10] Haghypour A., "Etude geologique de la region de Biabanak-Bafq (Iran Central); petrologie et tectonique du precambrien et de sa couverture", These, universite scientifique et medicale de Grenoble, France (1974) 403p.
- [11] Nabavi M.H., "Geology of Iran", Geol. Surv. Iran (1975) 109p.