

تغییرات پاراژنهای کانی شناسی گرانولیت‌های شمال غرب سبزوار طی دگرگونی‌ها

حسین معین‌وزیری^۱، محمد حسین رضوی^۱، محمد محجل^۲، محسن نصرآبادی^۱

۱- گروه زمین‌شناسی دانشگاه تربیت معلم

۲- گروه زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت مقاله: ۸۸/۶/۱۱، نسخه نهایی: ۸۹/۳/۷)

چکیده: بیرونزدگی‌هایی از متابازیت‌ها در داخل نوار افیولیتی شمال غرب سبزوار دیده می‌شوند که در شرایط رخساره‌ی گرانولیت با فشار بالا دگرگون شده‌اند. بر مبنای پاراژنهای کانی‌شناسی، ساختارهای واکنشی بین مجموعه‌های کانی‌شناسی مختلف، روابط کانی-شناسی و بافتی بین ادخال و پورفیربلاست و قلمرو پایداری مجموعه‌های کانی‌شناسی متفاوت یک دگرگونی پنج مرحله‌ای (M_1) تا (M_5) تشخیص داده شد که عبارتند از: مرحله‌ی دگرگونی پیشرونده (M_1)، مرحله‌ی اوج دگرگونی (M_2)، کلیفیتیزاسیون گارنت و تشکیل سیمپلکتیت آمفیبول + پلاژیوکلاز به صورت هاله (M_3)، جانشینی بخشی یا کامل گارنت به وسیله مجموعه‌ی آمفیبول + کلریت + اپیدوت (M_4) و تشکیل رگه‌های پره‌نیت و زئولیت در شکستگی‌های سنگ‌ها (M_5). داده‌های دما- فشارسنجی این مراحل یک مسیر فشار- دمای دگرگونی ساعتگرد نشان می‌دهد که از نظر زمین‌ساختی با برخورد خرده قاره‌ی ایران مرکزی با بلوک البرز و سپس فرسایش و بالآمدگی بعدی سازگار است.

واژه‌های کلیدی: سبزوار، گرانولیت، پاراژن کانی‌شناسی، دگرگونی‌ها.

مقدمه

شیمیایی سنگ کل، فشار بخشی سیالات و ترکیب آن‌ها، آمفیبول نیز می‌تواند در سنگ حضور داشته باشد. یکی از مسائل وابسته به سرزمین‌های دگرگونی درجه‌ی بالا، شدت دگرگونی‌های پسرونده‌ای است که از مرحله‌ی اوج دگرگونی تا بیرونزدگی سطحی، سنگ‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در بعضی از موارد عملکرد دگرگونی پسرونده تا حدی است که هیچ‌گونه اثری از کانی‌های دگرگون درجه‌ی بالا به جا نمی‌گذارد. در این گونه موارد با بررسی نمونه‌هایی که پاراژنهای درجه‌ی بالا را به صورت ادخال در پورفیروبلاست‌ها و یا به حالت نیمه پایدار در نقاط کمتر دگرشکل شده سنگ‌ها حفظ کرده‌اند و می‌توان درباره تاریخچه‌ی زمین‌ساختی واحدهای دگرگونی اظهار نظر کرد.

در این مقاله با استفاده از بررسی‌های سنگ‌نگاری و تعیین

حضور همزمان کلینوپیروکسن، ارتوپیروکسن و پلاژیوکلاز در متابازیت‌ها معرف رخساره‌ی گرانولیت است [۱] ولی این پاراژن تنها در فشار پائین‌تر از ۵ کیلوبار پایدار است (گرانولیت با فشار پائین). بررسی‌های تجربی [۲] حاکی از آنست که با افزایش فشار از واکنش ارتوپیروکسن با پلاژیوکلاز، گارنت متبلور می‌شود و پاراژن کلینوپیروکسن + ارتوپیروکسن + پلاژیوکلاز + گارنت در فشارهای بین ۵ تا ۱۰ کیلوبار حاکم می‌شود (گرانولیت با فشار متوسط). در نهایت در فشارهای بیش از ۱۰ کیلوبار ارتوپیروکسن در سنگ‌های غنی از پلاژیوکلاز ناپایدار شده و به مجموعه‌ی کلینوپیروکسن + گارنت + پلاژیوکلاز که معرف گرانولیت‌های با فشار بالا است تبدیل می‌شود. در هر یک از این سه مجموعه، با توجه به شرایط فشار، دما، ترکیب

پاراژنهای مختلف، دگرگونی‌های حاکم بر گرانولیت‌های منطقه‌ی شمال غرب سبزوار را تفسیر می‌کنیم.

روش بررسی

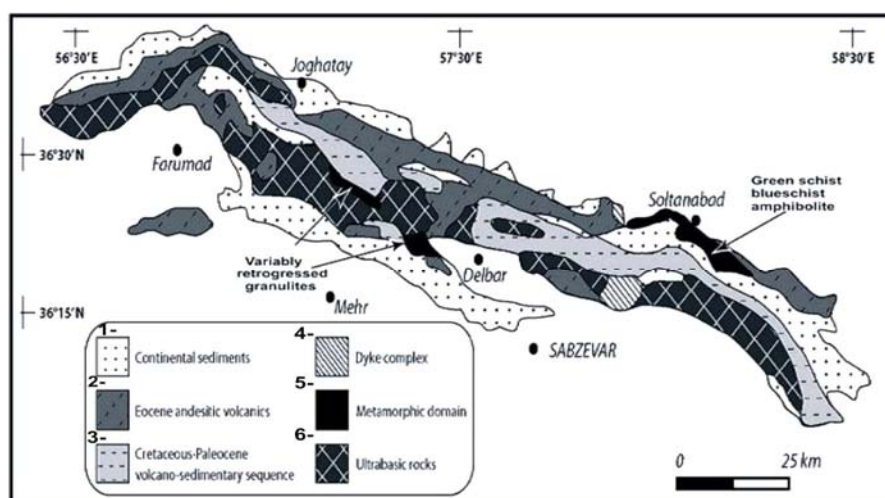
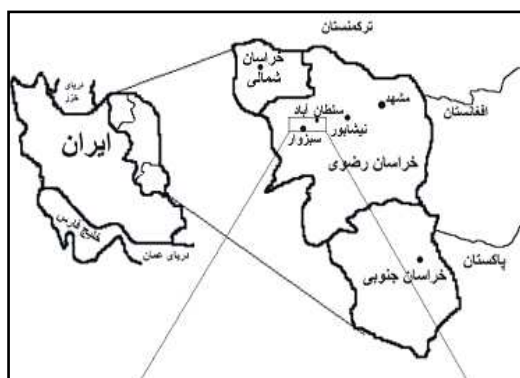
روش بررسی شامل جمع‌آوری نمونه‌های متعدد از نقاط مختلف **بیرونزده** گرانولیت‌ها، تهیه‌ی مقاطع نازک، بررسی‌های دقیق سنگ‌نگاری و آنالیز نقطه‌ای کانی‌های گوناگون (۷۰۰ نقطه) در دانشگاه اشتوتگارت آلمان و رم ایتالیا است. در دستیابی به فرمول ساختاری کانی‌ها از نرم‌افزار Calc Min و به‌منظور برآورد شرایط دما - فشار مراحل مختلف دگرگونی از نرم‌افزار ترموکالک و دما- فشارسنج‌های قراردادی استفاده شده است.

روابط صحرایی

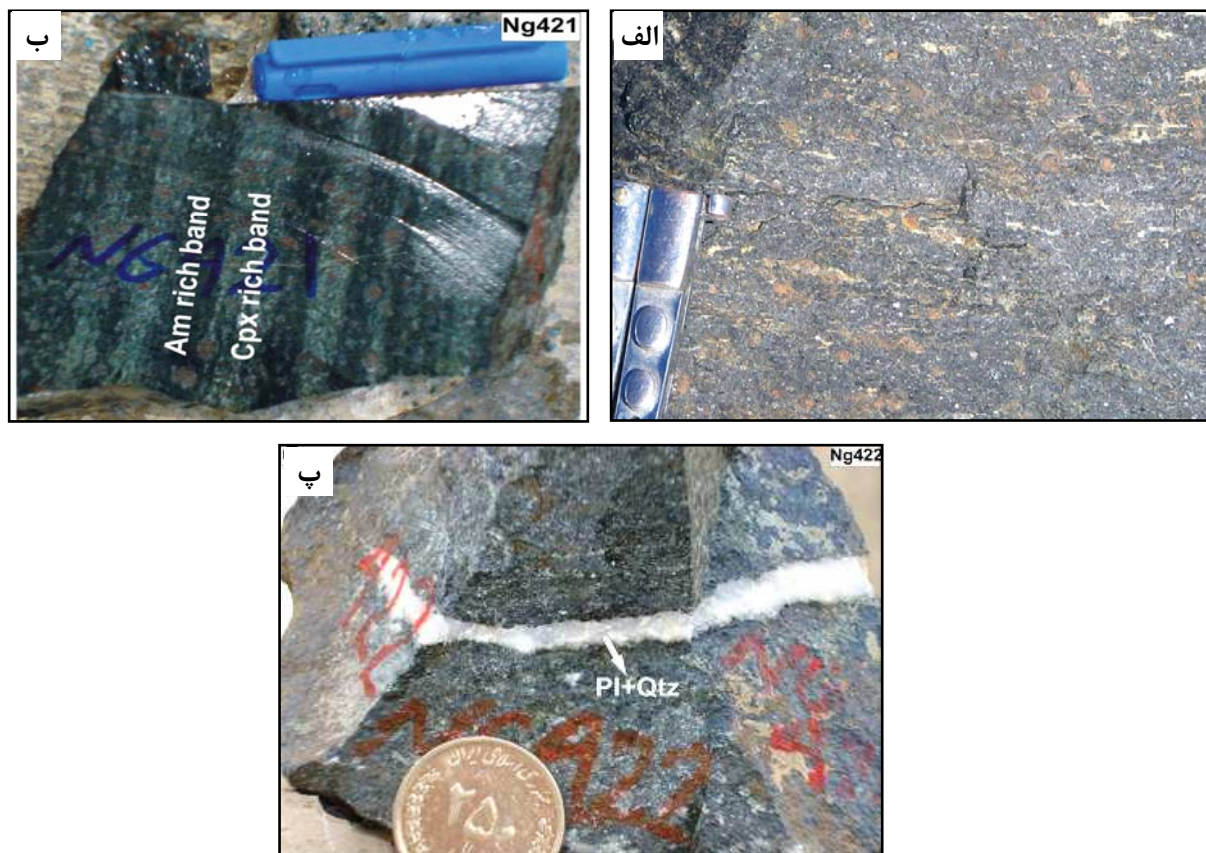
گرانولیت‌های نوار افیولیتی شمال غرب سبزوار (گارت - کلینوپیروکسن آمفیبولیت) در جنوب روستای زرقان و شمال روستای نوده (کلاته گرگیر) بیرونزدگی دارند. نقشه‌ی زمین- شناسی ساده [۳] از افیولیت‌های شمال سبزوار در **شکل ۱** نشان داده شده است. رخنمون گرانولیت‌های جنوب زرقان به‌صورت

یک ورقه به طول تقریبی ۱۰ کیلومتر و عرض ۱ کیلومتر، با راستای شمال غربی - جنوب شرقی و شیبی زیاد به سمت جنوب غربی همراه سرپانتینیت‌ها مشاهده می‌شود. برخوردگاه گرانولیت‌ها با سرپانتینیت‌ها یک گسل است.

بر اساس فراوانی کانی‌های مافیک و فلسیک دو لیتولوژی مختلف در این گرانولیت‌ها شناسایی شده شامل: نمونه‌های غنی از پلاژیوکلاز و نمونه‌های فقیر و یا فاقد پلاژیوکلاز. گرانولیت‌های مورد بررسی در نمونه‌ی دستی تیره رنگ، ریز تا میان بلور بوده و غالباً توده‌ای و گاهی دارای برگوارگی‌اند. در بعضی از موارد پلاژیوکلاز به‌صورت بخشی (بافت کرونا)، جانشین پورفایروبلاست‌های گارت شده است. بعضی از نمونه‌ها نیز دارای ناهمگنی ترکیبی به‌صورت تناوبی از نوارهای غنی از پیروکسن و غنی از آمفیبول هستند. در بعضی از گرانولیت‌ها انبوهه‌های کوارتز - فلدسپات (مذاب ترونجمیتی) حاصل از ذوب بخشی موضعی، قابل مشاهده است (**شکل ۲**). بیشتر نمونه‌ها بافت پورفایروبلاستیک با زمینه‌ای دانه‌دار نشان می‌دهند.



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی ساده از نوار افیولیتی شمال سبزوار [۳]. ۱- رسوبهای **آته نشستهای** قاره‌ای ۲- آندزیت‌های ائوسن ۳- ولکانو- سیدیمترهای کرتاسه-پالئوسن ۴- مجموعه‌ی دایک‌های ورقه‌ای ۵- مجموعه دگرگونی ۶- مجموعه الترامافیک.



شکل ۲ نمونه‌های دستی گرانولیت: الف- پورفیروبلاست‌های گارنت که در مواردی در پیرامون خود دارای حاشیه‌ی نازکی از هاله‌ی پلاژیوکلازند. ب- لایه‌بندی مدال شامل تناوبی از باندهای غنی از آمفیبول و غنی از پیروکسن. پ- اجتماع ناپیوسته‌ای از مذاب ترونجمیتی (پلاژیوکلاز و کوارتز) که محصول ذوب بخشی گرانولیت‌های مافیک هستند.

سنگ‌نگاری و شیمی کانی‌ها

نمونه‌های مورد بررسی شامل بلورهای ریز تا متوسط آمفیبول، کلینوپيروكسن، گارنت و پلاژیوکلازند. کانیهای فرعی آنها عبارتند از: کوارتز، تیتانیت، روتیل، ایلمنیت، پرهنیت، ژئولیت و آپاتیت. بیشتر نمونه‌ها معمولاً بر اثر دگرگونی پسروده به‌طور کامل یا بخشی به آمفیبولیت تبدیل شده‌اند به طوری که تغییرات کانی‌شناسی قابل ملاحظه‌ای به علت دگرگونی پسروده در آنها به‌وجود آمده است. در بیشتر آمفیبولیت‌های با برگوارگی فراگیر، گارنت و پیروکسن دیده نمی‌شود.

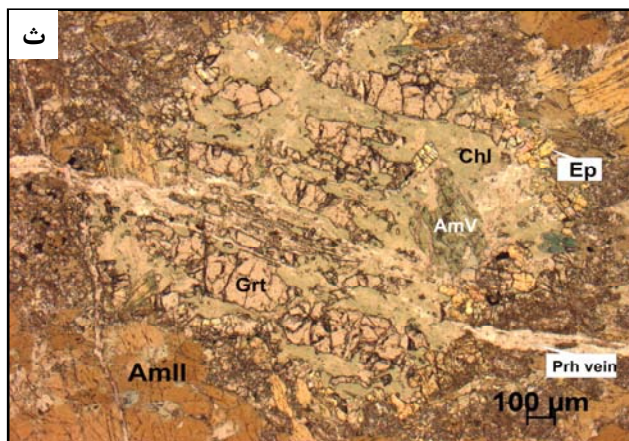
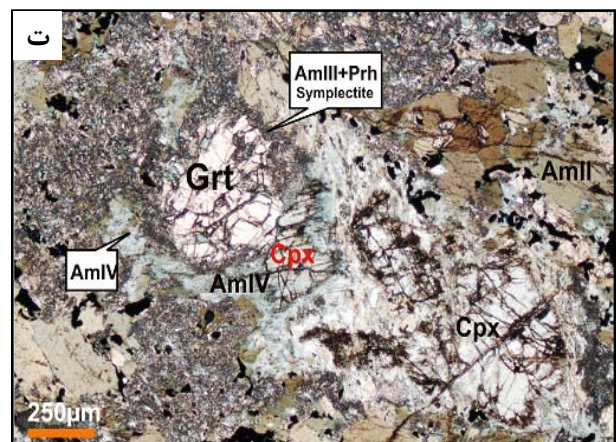
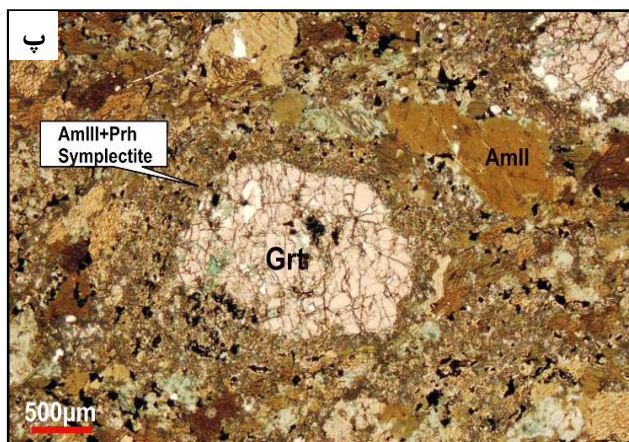
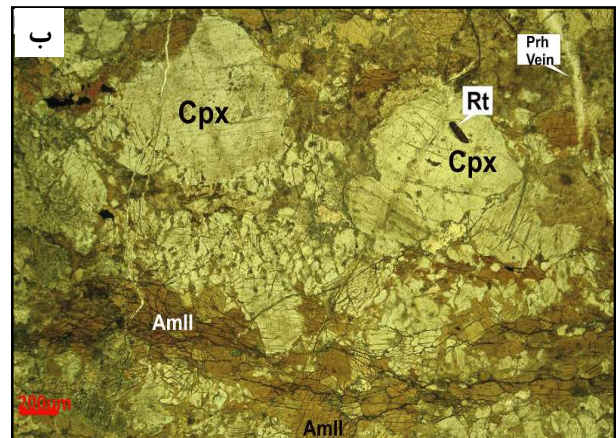
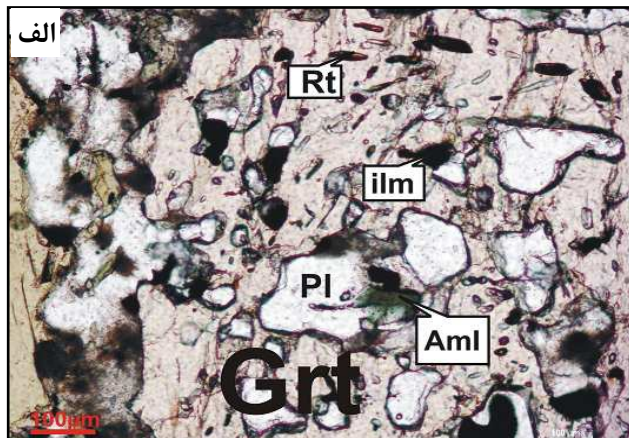
آمفیبول در بیشتر نمونه‌ها، کانی اصلی سنگ بوده و در بعضی از آنها (نمونه‌ی گارنت- هورنبلندیت) بیش از ۹۰ درصد سنگ را شامل می‌شود. آمفیبول نمونه‌های فقیر از پلاژیوکلاز قهوه‌ای است در حالی که آمفیبول نمونه‌های غنی از پلاژیوکلاز سبز رنگ است. با بررسی‌های سنگ‌نگاری و ژئوشیمیایی در

نمونه‌های مورد بررسی پنج نسل آمفیبول شناسایی شده و بنابر رده‌بندی آمفیبول‌ها [۴] به شرح زیر نام‌گذاری شده‌اند.

الف- آمفیبول‌های سبزرنگ به‌صورت ادخال در پورفیروبلاست- های گارنت (**شکل ۳-الف**) یا کلینوپيروكسن دارای ترکیب هورنبلند یا چرماکیت (Am I).

ب- پورفیروبلاست‌های درشت آمفیبول با چندرنگی قهوه‌ای یا سبز پررنگ به‌صورت پراکنده در متن سنگ (Am II) که در مواردی بقایایی از پیروکسن نیز در داخل آنها دیده می‌شوند (**شکل ۳-ب**).

ج- نوع سوم آمفیبول (Am III) به‌صورت سیمپلکتیت با پرهنیت (پلاژیوکلاز اولیه تجزیه شده) و یا به‌صورت هاله در اطراف گارنت دیده می‌شود و ترکیب آنها چرماکیت، پارگازیت یا مینیزوهانستینگسیت است (**شکل ۳-پ**).



شکل ۳ نسل‌های مختلف آمفیبول طی شکل‌گیری‌های دگرگونی: الف-ادخال‌های اولین نسل آمفیبول (AmI) در گارنت. ب- پورفایروبلاست‌های آمفیبول (AmII) موجود در زمینه‌ی سنگ. پ- سومین نسل آمفیبول (AmIII) به‌صورت سیمپلکتیت در پیرامون گارنت. ت- نسل چهارم آمفیبول (AmIV) حاصل جایگزینی کلینوپیروکسن‌های موجود در متن سنگ. ث- آخرین نسل آمفیبول (AmV) در نتیجه‌ی تجزیه گارنت به‌وجود آمده است.

تجزیه‌ی شیمیایی نسل‌های مختلف آمفیبول در جدول ۱ ارائه شده است. در بعضی از نمونه‌ها ترکیب شیمیایی پورفایروبلاست‌های آمفیبول موجود در زمینه و آمفیبول‌های حاصل از آگیری کلینوپیروکسن یکسان بوده و از نوع چرماکیت هستند. لذا در این نمونه‌ها به نظر می‌رسد که پورفایروبلاست‌های آمفیبول موجود در متن سنگ ثانویه هستند و در دما و فشارهای بالا از شکل‌گیری پیروکسن به وجود آمده‌اند.

د- در داخل بعضی از آمفیبول‌ها با چندرنگی سبزکمرنگ (Am IV) بقایایی از پیروکسن اولیه مشاهده می‌شود (شکل ۳-ت). ترکیب این نسل از آمفیبول‌ها اکتینوت است. ف- آخرین نسل آمفیبول (AmV) با چندرنگی سبز کمرنگ یا بدون چندرنگی از تجزیه گارنت به‌وجود آمده و با اپیدوت و کلریت همراه است. مشخصات نوری این آمفیبول‌ها بیانگر آن است که از نوع اکتینوت هستند (شکل ۳-ث).

جدول ۱ نتایج آنالیز نقطه‌ای انواع آمفیبول‌های موجود در گرانولیت‌ها.

ROCK Type	Plagioclase-poor			Plagioclase-rich					
	SZ290			NG353				EG354	
Sample	۱۵#	۴۷#	۵۲#	۱۵۹#	۵۱#	۵۵#	۴۲#	۳۰#	۳۱#
Analysis									
Position	Am-k	Am-m	Am-m	Am-i	Am-s	Am-k	Am-c	Am-s	Am-m
SiO ₂	۴۰٫۸۰	۴۲٫۹۹	۴۲٫۹۴	۴۱٫۸۸	۴۲٫۷۲	۴۲٫۷۳	۴۳٫۰۱	۵۱٫۹۷	۴۲٫۲۱
TiO ₂	۱٫۲۱	۱٫۰۳	۱٫۱	۱٫۳۸	۱٫۷۳	۱٫۳۷	۱٫۶۳	۰٫۳۳	۱٫۹
Al ₂ O ₃	۱۴٫۶۸	۱۳٫۳۱	۱۲٫۸	۱۱٫۶۲	۱۲٫۰۲	۱۲٫۶۲	۱۲٫۳	۳٫۷۵	۱۲٫۳۴
FeO*	۸٫۸۸	۱۱٫۲۳	۱۱٫۳۷	۱۸٫۰۹	۱۷٫۶۳	۱۵٫۸۸	۱۶٫۶	۱۲٫۷۱	۱۶٫۹۵
MnO	۰٫۱	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۱۴	۰٫۲۸	۰٫۲۷	۰٫۲۱	۰٫۱۱	۰٫۱۱
MgO	۱۱٫۳۶	۱۴٫۳۷	۱۳٫۸۵	۸٫۸۹	۹٫۳۵	۱۰٫۱۵	۱۰٫۱۲	۱۴٫۷	۹٫۹۲
CaO	۱۱٫۳۸	۱۱٫۱۲	۱۱٫۴۶	۱۰٫۹۶	۱۱٫۳۳	۱۱٫۲۶	۱۱٫۱۶	۱۲٫۲۳	۱۱٫۳۵
Na ₂ O	۲٫۸	۲٫۵۶	۲٫۲	۱٫۹	۱٫۸	۱٫۶۵	۱٫۷۶	۰٫۶۳	۲
K ₂ O	۰٫۲۲	۰٫۳۶	۰٫۳۵	۰٫۷	۰٫۶۹	۰٫۷۷	۰٫۶۵	۰٫۱۲	۰٫۴۱
Total	۹۷٫۱۹	۹۷٫۹۹	۹۶٫۳۱	۹۷٫۹۸	۹۷٫۵۸	۹۷٫۲	۹۸٫۰۲	۹۶٫۶۲	۹۷٫۶۹
Si	۶۰٫۲	۶۱٫۷	۶۲٫۵	۶۴	۶۳٫۷	۶۳٫۶	۶۳٫۶	۷٫۵۶	۶۲٫۹
Ti	۰٫۱۳	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۱۶	۰٫۱۹	۰٫۱۵	۰٫۱۸	۰٫۰۳	۰٫۲۱
AlIV	۱٫۹۷	۱٫۸۲	۱٫۷۴	۱٫۶	۱٫۶۲	۱٫۶۳	۱٫۶۳	۰٫۴۳۵	۱٫۷۱
AlVI	۰٫۵۸	۰٫۴۲	۰٫۴۵	۰٫۴۹	۰٫۴۸	۰٫۵۷	۰٫۵	۰٫۲	۰٫۴۶
Fe ²⁺	۱٫۰۹	۰٫۳۹	۰٫۶۲	۱٫۸	۲٫۱۹	۱٫۴۴	۱٫۴۵	۱٫۴۱	۱٫۵۷
Fe ³⁺	۰٫۶۳	۰٫۹۵	۰٫۷۶	۰٫۵۱	۰	۰٫۵۳	۰٫۵۹	۰٫۱۳	۰٫۵۵
Mn	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Mg	۲٫۵	۳٫۰۷	۳٫۰۱	۲٫۰۲	۲٫۰۸	۲٫۲۵	۲٫۲۳	۳٫۱۸	۲٫۲
Ca	۱٫۸	۱٫۷۱	۱٫۷۸	۱٫۷۹	۱٫۸۱	۱٫۷۹	۱٫۷۶	۱٫۹	۱٫۸۱
Na	۰٫۸	۰٫۷۱	۰٫۶۲	۰٫۵۶	۰٫۵۲	۰٫۴۷	۰٫۵	۰٫۱۷	۰٫۵۸
K	۰٫۰۴	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۱۴	۰٫۱۲	۰٫۰۲	۰٫۰۸
Mg#	۶۹	۸۸	۸۲	۵۳	۵۴	۶۰	۶۰	۶۹	۵۸

ترکیب شیمیایی و فرمول ساختمانی آمفیبول بر اساس ۲۳ و تمایز آهن دو و سه ظرفیتی بر مبنای ۱۳ کاتیون (به جز Ca,Na,K,Ba) است. Am-k: آمفیبول موجود در کلیفیت پیرامون گارنت، Am-m: آمفیبول زمینه سنگ، Am-I: ادخال آمفیبول موجود در گارنت Am-s: آمفیبول ثانویه حاصل از تجزیه کلینوپروکسن Am-c: هاله‌ی آمفیبول پیرامون گارنت FeO*: all iron as FeO و Mg#: Mg/(Mg+Fe²⁺)

دیوپسید (۷۰-۴۹٪)، هیدنبرژیت (۲۹-۱۰٪)، کلسیم-چرماک (۱۷-۲٪)، ارتوپروکسن (۱۲-۵٪). بسیاری از شواهد سنگ‌نگاری (ریزدانه بودن و نبود تیغه-های جدایشی، وجود ادخال‌های آمفیبول در گارنت و پیروکسن و حضور پیروکسن با بافت پوئی کیلوبلاستیک)، شیمیایی (ترکیب دیوپسیدی پیروکسن‌ها و مقادیر کم تیتانیم در آن‌ها) سنگ‌شناسی و دما- فشارسنجی بیانگر خاستگاه دگرگونی پیروکسن‌هاست. گارنت تنها به صورت پورفیروبلاست‌های درشت در متن سنگ حضور دارند و در بیشتر نمونه‌ها در حال جایگزین شدن

کلینوپروکسن با چندرنگی سبزکمرنگ در نمونه‌های غنی از پلاژیوکلاز و بی‌رنگ در نمونه‌های فقیر از پلاژیوکلاز به صورت پورفیروبلاست در متن سنگ و یا به شکل ادخال در گارنت موجود است. در تمامی نمونه‌ها کلینوپروکسن در حال تبدیل به آمفیبول ثانویه است (Am IV). در تعدادی از نمونه‌ها نیز می‌توان سیمپلکتیتی متشکل از پیروکسن و ایلمنیت مشاهده کرد. تجزیه‌ی شیمیایی دو نوع پیروکسن موجود در گرانولیت‌های غنی و فقیر از پلاژیوکلاز در جدول ۲ آورده شده‌اند. سازنده‌های موجود در ترکیب شیمیایی آن‌ها به قرار زیرند:

به وسیله‌ی پلاژیوکلاز و آمفیبول بصورت سیمپلکتیت و هاله است. آنالیز شیمیایی گارنت نمونه‌های مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. سازهای گارنت: آلماندن (۳۸-۵۹٪)، گروسولار

(۲۱-۳۲٪)، پیروپ (۱۳-۳۲٪) و اسپسارتین (۰-۵٪) هستند. گارنت سنگ‌های فقیر از پلاژیوکلاز نسبت به سنگ‌های غنی از پلاژیوکلاز غنی‌تر از سازنده‌های پیروپ و گروسولار است.

جدول ۲ نتایج ریز پردازش کلینوپیروکسن گرانولیت‌ها.

Rock type	Plagioclase-poor				Plagioclase-rich				
	SZ290				NG353			EG354	
Sample	۳۲#	۳۹#	۲۲#	۲۴#	۲۹#	۳۱#	۵۲#	۲۹#	۲۸#
Analysis	۳۲#	۳۹#	۲۲#	۲۴#	۲۹#	۳۱#	۵۲#	۲۹#	۲۸#
Position	Cpx-r	Cpx-c	Cpx-i	Cpx-i	Cpx-r	Cpx-c	Cpx-i	Cpx-r	Cpx-c
SiO ₂	۵۰٫۳۴	۴۸٫۷۲	۴۹٫۱۲	۴۸٫۴۱	۴۹٫۷۳	۴۸٫۱۸	۵۱٫۶۱	۵۰٫۷	۵۰٫۶۵
TiO ₂	۰٫۲۹	۰٫۲۷	۰٫۵۷	۰٫۶۳	۰٫۴	۰٫۶	۰٫۱۷	۰٫۳	۰٫۳۳
Al ₂ O ₃	۴٫۸۹	۶٫۸۶	۵٫۲۹	۵٫۸۷	۴٫۰۴	۵٫۱۸	۱٫۹۶	۲٫۸۷	۲٫۶۳
FeO*	۷٫۵۱	۸٫۳۷	۹٫۲	۹٫۲۵	۱۲٫۲۸	۱۲٫۴۷	۱۰٫۵۵	۱۱٫۵۳	۱۱٫۲۶
MnO	۰٫۲۵	۰٫۲	۰٫۱۷	۰٫۱۱	۰٫۳۶	۰٫۳۱	۰٫۳۵	۰٫۲	۰٫۲۶
MgO	۱۳٫۶۸	۱۲٫۹۲	۱۲٫۹۴	۱۲٫۵۳	۱۰٫۶۶	۱۰٫۲۶	۱۰٫۶۸	۱۱٫۵۱	۱۱٫۳۵
CaO	۲۱٫۳۸	۲۰٫۸	۲۱٫۴	۲۱٫۲۷	۲۱٫۳۷	۲۱٫۹۹	۲۱٫۹۳	۲۱٫۵۷	۲۱٫۸۵
Na ₂ O	۰٫۷۲	۰٫۹۳	۰٫۶۸	۰٫۷۵	۰٫۷۳	۰٫۷۱	۰٫۵۶	۰٫۵۵	۰٫۵۴
K ₂ O	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰
Total	۹۹٫۱۵	۹۹٫۱۱	۹۹٫۴۳	۹۹٫۸۸	۹۹٫۵۶	۹۹٫۷	۹۸٫۵	۹۹٫۲۷	۹۸٫۹۲
Si	۱٫۸۸	۱٫۸۲	۱٫۸۴	۱٫۸۲	۱٫۸۹	۱٫۸۳	۱٫۹۷	۱٫۹۳	۱٫۹۳
Ti	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Al ^{IV}	۰٫۱۲	۰٫۱۸	۰٫۱۶	۰٫۱۸	۰٫۱۱	۰٫۱۷	۰٫۰۳	۰٫۰۸	۰٫۰۷
Al ^{VI}	۰٫۰۹	۰٫۱۲	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۵
Fe ²⁺	۰٫۱۶	۰٫۱۳	۰٫۱۷	۰٫۱۷	۰٫۳۱	۰٫۲۶	۰٫۳۴	۰٫۳۲	۰٫۳۱
Fe ³⁺	۰٫۰۷	۰٫۱۲	۰٫۱۱	۰٫۱۱	۰٫۰۷	۰٫۱۲	۰	۰٫۰۵	۰٫۰۴
Mn	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Mg	۰٫۷۶	۰٫۷۲	۰٫۷۲	۰٫۷	۰٫۶	۰٫۵۸	۰٫۶۴	۰٫۶۵	۰٫۶۵
Ca	۰٫۸۵	۰٫۸۳	۰٫۸۶	۰٫۸۶	۰٫۸۷	۰٫۸۹	۰٫۹	۰٫۸۸	۰٫۸۹
Na	۰٫۰۵	۰٫۰۷	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۴
K	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Sum	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
Mg#	۸۳	۸۵	۸۱	۸۱	۶۶	۶۹	۶۶	۶۷	۶۷
Fe ²⁺ /Mg	۰٫۲۱	۰٫۱۸	۰٫۲۴	۰٫۲۴	۰٫۵۱	۰٫۴۴	۰٫۵۲	۰٫۴۹	۰٫۴۹
Diop	۰٫۶	۰٫۵۵	۰٫۵۷	۰٫۵۶	۰٫۵	۰٫۵۱	۰٫۵۷	۰٫۵۴	۰٫۵۵
Hed	۰٫۱۳	۰٫۱	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۲۶	۰٫۲۲	۰٫۳	۰٫۲۶	۰٫۲۷
Tsch	۰٫۱۲	۰٫۱۸	۰٫۱۵	۰٫۱۶	۰٫۱	۰٫۱۵	۰٫۰۲	۰٫۰۷	۰٫۰۶

ترکیب شیمیایی و فرمول ساختمانی کلینوپیروکسن بر مبنای ۶ اکسیژن و تمایز آهن دو ظرفیتی از سه ظرفیتی بر اساس تعادل بار کاتیون‌ها و اکسیژن است. Cpx-r: حاشیه‌ی کلینوپیروکسن Cpx-c: مرکز کلینوپیروکسن Cpx-i: ادخال کلینوپیروکسن موجود در گارنت.

جدول ۳ تعدادی از داده‌های ریزپرذاشی حاشیه و مرکز گارنت در سه نمونه از گرانولیت‌ها.

Sample	SZ290				NG353				EG354			
	۱#	۱۴#	۱۷#	۷#	۳۴#	۲#	۴۹#	۸#	۲۷#	۳۰#	۱۶#	۱۵#
Position	Grt-r	Grt-r	Grt-c	Grt-c	Grt-r	Grt-r	Grt-c	Grt-c	Grt-r	Grt-r	Grt-c	Grt-c
SiO ₂	۳۸,۳۷	۳۸,۷	۳۸,۶۹	۳۸,۵۷	۳۷,۷۶	۳۷,۶۵	۳۷,۰۶	۳۷,۷۹	۳۶,۴۷	۳۷,۷۷	۳۷,۵۵	۳۷,۴
TiO ₂	۰,۱۳	۰,۱۲	۰,۱۳	۰,۰۹	۰,۲۲	۰,۱۵	۰,۰۸	۰,۰۹	۰,۱۸	۰,۱۳	۰,۱۸	۰,۱۶
Al ₂ O ₃	۲۱,۶۷	۲۱,۸۱	۲۱,۴۶	۲۱,۸۱	۲۲,۰۰	۲۱,۸۳	۲۲,۰۹	۲۱,۹	۲۲,۸۵	۲۱,۹۱	۲۱,۸۱	۲۲,۱۴
FeO*	۲۱,۰۸	۲۱,۱۶	۲۰,۴۴	۱۸,۴۲	۲۵,۸۴	۲۶,۵۱	۲۶,۰۳	۲۶,۱	۲۴,۳۹	۲۵,۱۵	۲۴,۹	۲۴,۶۳
MnO	۰,۶۵	۰,۵۷	۰,۷۳	۰,۷۱	۱,۶۹	۱,۶۴	۱,۶۸	۱,۷۷	۱,۹۲	۱,۵۶	۳,۳۱	۲,۸
MgO	۶,۸۲	۷,۹	۷,۴۸	۷,۳۷	۳,۸۴	۳,۵۶	۴,۴۴	۴,۵۹	۳,۵۵	۴,۵۲	۳,۰۸	۳,۰۴
CaO	۱۱,۰۵	۱۰,۵۶	۱۰,۹۸	۱۰,۸۱	۱۰,۶۳	۱۰,۶۳	۹,۸۱	۹,۲۶	۱۱,۴۹	۱۰,۲	۱۰,۲۸	۱۱,۴۶
Na ₂ O	۰	۰,۰۲	۰,۲	۰,۰۱	۰,۰۴	۰,۰۲	۰,۰۲	۰	۰,۰۶	۰,۰۴	۰,۰۵	۰
K ₂ O	۰	۰	۰	۰	۰,۰۱	۰	۰,۰۲	۰	۰,۰۲	۰,۰۲	۰	۰
Total	۱۰۰	۱۰۱,۳	۱۰۰,۳	۱۰۰	۱۰۱,۹	۱۰۱,۹	۱۰۱,۲	۱۰۱,۵	۱۰۰,۹	۱۰۱,۳	۱۰۱,۲	۱۰۱,۶
Si	۲,۹۴	۲,۹۲	۲,۹۵	۲,۹۴	۲,۹۱	۲,۹۱	۲,۸۷	۲,۹۲	۲,۸۳	۲,۹۲	۲,۹۳	۲,۹
Ti	۰	۰	۰	۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱
AlIV	۰,۰۵	۰,۰۷	۰,۰۴	۰,۰۵	۰,۰۹	۰,۰۹	۰,۱۳	۰,۰۸	۰,۱۷	۰,۰۸	۰,۰۷	۰,۱
AlVI	۱,۹	۱,۸۶	۱,۸۸	۱,۹۱	۱,۹۱	۱,۹۰	۱,۸۹	۱,۹۱	۱,۹۲	۱,۹۱	۱,۹۳	۱,۹۲
Fe ²⁺	۱,۲۱	۱,۱۴	۱,۱۵	۱,۱۷	۱,۴۸	۱,۵۲	۱,۴۳	۱,۵۱	۱,۳۳	۱,۴۵	۱,۴۹	۱,۴۲
Fe ³⁺	۰,۱۳	۰,۱۹	۰,۱۵	۰,۱۲	۰,۱۷	۰,۱۸	۰,۲۳	۰,۱۶	۰,۲۳	۰,۱۶	۰,۱۲	۰,۱۶
Mn	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۱۱	۰,۱۱	۰,۱۱	۰,۱۲	۰,۱۳	۰,۱	۰,۲۲	۰,۱۸
Mg	۰,۷۸	۰,۸۹	۰,۸۵	۰,۸۴	۰,۴۴	۰,۴۱	۰,۵۱	۰,۵۳	۰,۴۱	۰,۵۲	۰,۳۶	۰,۳۵
Ca	۰,۹	۰,۸۵	۰,۸۹	۰,۸۸	۰,۸۸	۰,۸۸	۰,۸۱	۰,۷۷	۰,۹۶	۰,۸۴	۰,۸۶	۰,۹۵
Na	۰	۰	۰	۰	۰,۰۱	۰	۰	۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰
K	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Sum	۷,۹۹	۷,۹۹	۷,۹۹	۷,۹۹	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸
Fe#	۰,۶۱	۰,۵۶	۰,۵۸	۰,۵۸	۰,۷۶	۰,۷۹	۰,۷۴	۰,۷۴	۰,۷۶	۰,۷۴	۰,۸۱	۰,۸
Alm	۰,۴۱	۰,۳۸	۰,۳۸	۰,۳۹	۰,۵۱	۰,۵۲	۰,۵	۰,۵۲	۰,۴۷	۰,۴۹	۰,۵	۰,۴۹
Prp	۰,۲۶	۰,۳	۰,۲۸	۰,۲۸	۰,۱۵	۰,۱۴	۰,۱۸	۰,۱۸	۰,۱۵	۰,۱۸	۰,۱۲	۰,۱۲
Grs	۰,۳	۰,۲۹	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۲۸	۰,۲۶	۰,۳۴	۰,۲۹	۰,۲۹	۰,۳۳
Sps	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۷	۰,۰۶

ترکیب شیمیایی و فرمول ساختمانی گارنت بر اساس ۱۲ اکسیژن و جدایش آهن دو و سه ظرفیتی به روش تعادل بار صورت گرفته است.
Grt-r حاشیه گارنت: **Grt-c** مرکز گارنت: **FeO*** آهن کل: $Fe \# = Fe^{2+}/(Mg+Fe^{2+})$.

ج- جانشینی کامل گارنت با کلریت در نمونه‌های فقیر از پلاژیوکلاز.
 پلاژیوکلاز در نمونه‌های مختلف به چهار صورت دیده می‌شود:
 الف- ساخت سیمپلکتیت با آمفیبول و یا به صورت هاله در پیرامون گارنت.
 ب- به صورت ادخال مجزا و یا هم‌رشدی با ایلمنیت در گارنت.
 ج- بلورهای درشت موجود در زمینه ی نمونه‌های غنی از پلاژیوکلاز.

در بیشتر نمونه‌ها گارنت با کانی‌های دیگر جایگزین شده است به طوری که در مجموع سه نوع جایگزینی در گارنت دیده شده‌اند:
 الف- تشکیل سیمپلکتیت **Am + Pl** و هاله‌ی پلاژیوکلاز در پیرامون گارنت
 ب- جایگزینی گارنت با مجموعه‌ای متشکل از: **Chl + Ep + Am**

نمونه‌ها، پلاژیوکلازهای موجود در متن سنگ نیز سوسوریتیزه هستند. در جدول ۴ ترکیب شیمیایی پلاژیوکلازهای مختلف معرفی شده‌اند.

کانی‌های فرعی

پرهنیت، زئولیت (مزولیت و فیلیپسیت)، اسفن، روتیل، ایلمنیت، کوارتز، اپیدوت، کلسیت و آپاتیت از کانی‌هایی هستند که به مقدار جزئی در سنگ یافت می‌شوند. پرهنیت و زئولیت بیشتر پرکننده‌ی شکستگی‌های سنگ بوده و یا حاصل دگرسانی پلاژیوکلازند.

د- لوکوسوم ترونجمیتی حاصل از ذوب بخشی. از نظر ترکیبی دو نوع پلاژیوکلاز شناسایی شده‌اند: آندزین ($An = 49-50\%$) و آلبیت تقریباً خالص ($An = 1-3\%$). آندزین به صورت ادخال در گارنت یا به شکل هاله و ساخت سیمپلکتیت همراه با آمفیبول در پیرامون گارنت و یا به صورت بلورهای درشت در متن سنگ دیده می‌شود. آلبیت معمولاً با حاصل دگرسانی پلاژیوکلازهای اولیه سنگ است و یا گاهی به صورت ادخال در گارنت حضور دارد. پلاژیوکلاز سازنده‌ی بافت سیمپلکتیت در پیرامون گارنت و یا در متن سنگ (نمونه‌های فقیر از پلاژیوکلاز) با پرهنیت جانشین شده است. در بیشتر

جدول ۴ نتایج آنالیز ریزپردازشی پلاژیوکلاز در دو نمونه از گرانولیت‌ها

Rock type	Plagioclase-rich					
	NG353			EG354		
Sample	۴۶#	۵۴#	۶۱#	۵#	۳۵#	۳۶#
Analysis	۴۶#	۵۴#	۶۱#	۵#	۳۵#	۳۶#
Position	Pl-m	Pl-c	Pl-i	Pl-s	Pl-c	Pl-i-⊙
SiO ₂	۵۵٫۸	۵۴٫۵۷	۵۵٫۷۳	۶۷٫۷۵	۶۷٫۳۲	۵۶٫۰۹
TiO ₂	۰٫۰۷	۰	۰٫۰۵	۰٫۰۱	۰	۰٫۰۲
Al ₂ O ₃	۲۸٫۵۵	۲۸٫۸۳	۲۹٫۳	۲۱٫۱۳	۲۲٫۱۴	۲۸٫۶
FeO*	۰٫۱۶	۰٫۲۸	۰٫۴۴	۰٫۴	۰٫۱۲	۰٫۱۶
Mn ₂ O ₃	۰٫۰۶	۰٫۳۶	۰٫۰۴	۰	۰	۰٫۰۳
MgO	۰	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۰٫۰۴
CaO	۱۰٫۱۷	۹٫۸۷	۱۰٫۱۳	۰٫۹۳	۰٫۹	۹٫۵۷
Na ₂ O	۵٫۵۳	۵٫۱۷	۵٫۹۷	۱۱٫۲۳	۱۰٫۶۴	۶٫۳۶
K ₂ O	۰٫۱۲	۰٫۶۸	۰٫۱۶	۰٫۰۴	۰٫۶۶	۰٫۰۷
Total	۱۰۰٫۴۸	۹۹٫۶	۱۰۱٫۸۳	۱۰۱٫۴۹	۱۰۱٫۸۴	۱۰۰٫۹۳
Si	۲٫۴۹	۲٫۴۷	۲٫۴۷	۲٫۹۳	۲٫۹	۲٫۵
Ti	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Al	۱٫۵	۱٫۵۳	۱٫۵۳	۱٫۰۸	۱٫۱۲	۱٫۵
Fe ³⁺	۰	۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰	۰٫۰۱
Mn	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Mg	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Ca	۰٫۴۸	۰٫۴۷	۰٫۴۸	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۴۶
Na	۰٫۴۸	۰٫۴۵	۰٫۵۱	۰٫۹۴	۰٫۸۹	۰٫۵۵
K	۰	۰٫۳	۰٫۰۱	۰	۰٫۰۴	۰
Sum	۴٫۸۹	۴٫۹۹	۵٫۰۲	۵	۵	۵٫۰۲
XAn	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۴۸	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۴۵
XAb	۰٫۴۹	۰٫۴۹	۰٫۵۱	۰٫۹۵	۰٫۹۲	۰٫۵۴
XOr	۰	۰٫۰۴	۰٫۰۱	۰	۰٫۰۴	۰

ترکیب شیمیایی و فرمول ساختاری بر مبنای ۸ محاسبه شده است. Pl-m: پلاژیوکلاز موجود در زمینه‌ی. Pl-c: هاله ی پلاژیوکلاز پیرامون گارنت. Pl-i: پلاژیوکلاز به صورت ادخال در گارنت. Pl-s: سیمپلکتیت پلاژیوکلاز + آمفیبول در پیرامون گارنت. Pl-i-⊙: پلاژیوکلاز به صورت ادخال در کلینوپیروکسن. FeO*: آهن کل به صورت Fe₂O₃.

از نکات قابل توجه، می‌توان به حضور هر سه فاز تیتانیم‌دار در بعضی از گرانولیت‌ها اشاره کرد. در نمونه‌ی NG353 مقادیر نسبتاً زیادی ایلمنیت در متن سنگ و مرکز گارنت وجود دارد. در حالی که روتیل تنها به صورت ادخال و در حاشیه گارنت دیده می‌شود و از حاشیه بلور روتیل به وسیله ایلمنیت در حال جایگزین شدن است. بیشتر ادخال‌های ایلمنیت (موجود در گارنت) در داخل پلاژیوکلاز محصور شده و یا به صورت هم‌رشدی با یکدیگر مشاهده می‌شوند. اسفن نیز بیشتر به صورت ادخال در آمفیبول موجود است.

شکل‌گیری دگرگونی

بر مبنای پاراژنهای کانی‌شناسی، ساختارهای واکنشی بین مجموعه‌های کانی‌شناسی مختلف، روابط کانی‌شناسی و بافتی بین ادخال و پورفیروبلاست و قلمرو پایداری مجموعه‌های کانی‌شناسی متفاوت می‌توان پنج مرحله‌ی دگرگونی (M_1 تا M_5) را تشخیص داد: مرحله‌ی دگرگونی پیش‌رونده (M_1)، مرحله‌ی اوج دگرگونی (M_2) و سه مرحله‌ی M_3 ، M_4 و M_5 در مسیر دگرگونی پسروده قرار دارند. ساختارها و روابط جانیشینی و واکنشی در مسیر پسروده به شرح زیرند: کلیفیتیزاسیون گارنت به صورت تشکیل سیمپلکتیت آمفیبول + پلاژیوکلاز و یا هاله‌ی متشکل از آمفیبول یا پلاژیوکلاز (M_3)، جانیشینی بخشی یا کامل گارنت به وسیله مجموعه‌ی آمفیبول + کلریت + اپیدوت (M_4) بالاخره تشکیل پره‌نیت و زئولیت که بیشتر پرکننده‌ی شکستگی‌های سنگ هستند و یا جانیشین پلاژیوکلاز موجود در سیمپلکتیت پیرامون گارنت شده‌اند (M_5).

الف - مرحله‌ی دگرگونی پیش‌رونده (M_1)

مانند بیشتر مناطق گرانولیتی دنیا، در گرانولیت‌های مافیک شمال غرب سبزواری نیز اطلاعات بافتی و شیمیایی مربوط به مرحله‌ی دگرگونی پیش‌رونده طی مراحل بعدی دگرگونی از بین رفته است. با وجود این، باقیمانده‌هایی از پاراژنهای مرحله‌ی دگرگونی پیش‌رونده به صورت مجموعه‌ی ادخال‌هایی متشکل از: آمفیبول + پلاژیوکلاز + اپیدوت + ایلمنیت + روتیل ± پیروکسن در پورفیروبلاست‌های گارنت بعضی از نمونه‌ها دیده می‌شوند. این پاراژن بیانگر آنست که مسیر دگرگونی پیش‌رونده از شرایط رخساره‌ی اپیدوت - آمفیبولیت عبور کرده و به درجات بالاتر رسیده است.

ب - مرحله‌ی اوج دگرگونی (M_2)

با وجود درجات مختلف دگرگونی پسروده، پاراژنهای رخساره‌ی گرانولیت با درجه بالا، در بعضی از نمونه‌ها حفظ شده است. به طوری که می‌توان پورفیروبلاست‌های درشت گارنت، کلینوپیروکسن و آمفیبول را با مرز مستقیم در تماس با یکدیگر مشاهده کرد. حضور کلینوپیروکسن و روتیل به صورت ادخال در گارنت نیز نشان‌دهنده شرایط نزدیک به اوج دگرگونی است.

ج - مرحله‌ی اول دگرگونی پسروده (M_3)

در بیشتر نمونه‌های مورد بررسی پورفیروبلاست‌های گارنت در حال جایگزینی به وسیله سیمپلکتیت آمفیبول + پلاژیوکلاز و یا هاله‌ی متشکل از پلاژیوکلاز هستند. اینگونه روابط واکنشی در بسیاری از مناطق گرانولیتی دیگر دنیا گزارش شده و نتیجه‌ی کاهش فشار گرانولیت‌ها در دمای ثابت (یا تقریباً ثابت) طی بالآمدگی است [۵، ۶]. بنابراین اولین مرحله‌ی دگرگونی پسروده به صورت بالآمدگی تقریباً تک‌دما و با جانیشینی گارنت به وسیله آمفیبول و پلاژیوکلاز مشخص می‌شود.

در بعضی از نمونه‌ها نیز سیمپلکتیت‌هایی متشکل از کلینوپیروکسن + ایلمنیت وجود دارند. پیدایش این گونه سیمپلکتیت‌ها از ویژگی‌های بارز گرانولیت‌های با فشار بالا است و در طی کاهش فشار، از تجزیه‌ی اسفن حاصل می‌شوند [۷].

د - مرحله‌ی دوم دگرگونی پسروده (M_4)

چهارمین مرحله‌ی دگرگونی یا دومین مرحله‌ی دگرگونی پسروده به صورت تجزیه پورفیروبلاست‌های گارنت به وسیله مجموعه‌ی آبدار اپیدوت + کلریت + آمفیبول، پس از کلیفیتیزاسیون آن توصیف می‌شود. احتمالاً تجزیه کلینوپیروکسن به آمفیبول از مرحله دگرگونی پسروده‌ی قبلی شروع شده و آمفیبول‌های درشت قهوه‌ای - سبز ($AmII$) با ترکیب چرماکیت را به وجود آورده و در درجات دگرگونی پایینتر (M_4) به اکتینوت ($Am IV$) تبدیل شده است.

تبدیل پاراژن بی‌آب گارنت + کلینوپیروکسن به مجموعه‌ی آبدار اپیدوت + کلریت + اکتینولیت بیانگر حضور سیالات غنی از آب طی بالآمدگی و دگرگونی پسروده این سنگ‌هاست.

ه - مرحله‌ی آخر دگرگونی پسروده (M_5)

آخرین مرحله‌ی دگرگونی با پیدایش رگه‌های پره‌نیت و زئولیت‌دار که قطع‌کننده‌ی بافت‌های دگرگونی قبلی است

برآورد فشار حاکم در مراحل مختلف دگرگونی نیز به وسیله فشارسنج‌های گارنت- کلینوپیکروکسن- پلاژیوکلاز- کوارتز [۱۷، ۱۶]، گارنت- آمفیبول- پلاژیوکلاز- کوارتز [۱۸] و کلسیم- چرماک (Ca-Ts)- پلاژیوکلاز- کوارتز [۱۹] انجام شده است. در نرم‌افزار ترموکالک محاسبات فاز نمودار و برآورد فشار و دمای متوسط به وسیله داده‌های فعال به دست آمده از برنامه‌ی AX صورت گرفته است. نتایج دما- فشارسنجی مراحل مختلف دگرگونی در **جدول‌های ۵ تا ۸** ارائه شده‌اند. با استفاده از این داده‌ها نمودار فشار- دمای مراحل مختلف دگرگونی رسم شده است (شکل ۴). **جدول ۴؟؟**

خودنمایی می‌کند. وجود این رگه‌های پره‌نیت، ژئولیت و کلسیت بیانگر دخالت فاز سیال طی آخرین مرحله‌ی دگرگونی است.

زمین دما- فشارسنجی

برای برآورد شرایط فشار و دمای دگرگونی از دما- فشارسنج- های قراردادی، نرم افزار ترموکالک [۸] نسخه‌ی ۲۶،۳ (۲۰۰۷) و نمودارهای گسترده‌ی پایداری کانی‌ها استفاده شده است. محاسبات دما بر مبنای تبادل آهن و منیزیم بین گارنت و کلینوپیکروکسن [۱۰، ۹]، بین گارنت و آمفیبول [۱۱] و نیز مقدار زیرکینیم موجود در روتیل [۱۲-۱۵] صورت گرفته است.

جدول ۵ نتایج ترموبارومتري مراحل مختلف دگرگونی که با استفاده از ترموبارومترهای قراردادی محاسبه شده است.

Metamorphic Stage		Conventional thermobarometry							
		Temperature (°C)				Pressure(kb)			
		Grt-Cpx		Grt-Am	Am	Grt-Cpx-Pl-Qtz		Grt-Am-Pl	CaTs-Pl-Q
KR-a	EG	KR-b	E-L	PN	E	Ks	MP	E-L	
M1	SZ290	*۷۵۵	*۸۳۷						
	NG353	*۶۵۵	*۷۱۲	۵۱۰-۸۲۰	۷۵۰	***۱۰،۷	***۱۰،۱	***۴،۷-۶،۴	۹-۱۰
	EG354								
M2	SZ290	**۷۲۰	**۷۳۴		۷۰۰-۷۲۰	***۱۲،۹	***۱۳	۱۱،۳-۱۲،۲***	۱۲-۱۳،۵
	NG353	**۷۵۲	**۷۷۰		۷۹۰-۸۶۰	***۱۱،۱	***۱۱،۷	۱۰،۷-۱۱،۷***	۱۱-۱۲
	EG354	**۷۲۷	**۷۴۴		۸۲۰-۸۴۰	***۱۱،۲	***۱۱،۹		۹-۱۰،۵
M3	SZ290			۶۸۲-۸۴۳	۷۲۰-۷۳۵			***۳،۵-۴،۵	۱۳-۱۴
	NG353			۵۷۴-۶۳۷	۷۵۰			***۳،۹-۵،۸	۱۲
	EG354			۶۱۱-۶۷۷				***۴،۴-۶،۲	
M4	SZ290								
	NG353								
	EG354				۵۲۰				۳-۴

از ۵۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد: ***؛ در ۷ کیلو بار: *

در ۷۵۰ درجه سانتیگراد: ***؛ در ۱۱ کیلو بار: **

KR_a:[۱۰]; KR_b:[۱۱]; EG:[۹]; PN:[۱۶] E:[۱۷]; KS:[۱۸]; M-P: [۱۹] E-L: [۱۹].

جدول ۶ محاسبات دماسنجی با استفاده از میزان زیرکینیم موجود در روتیل.

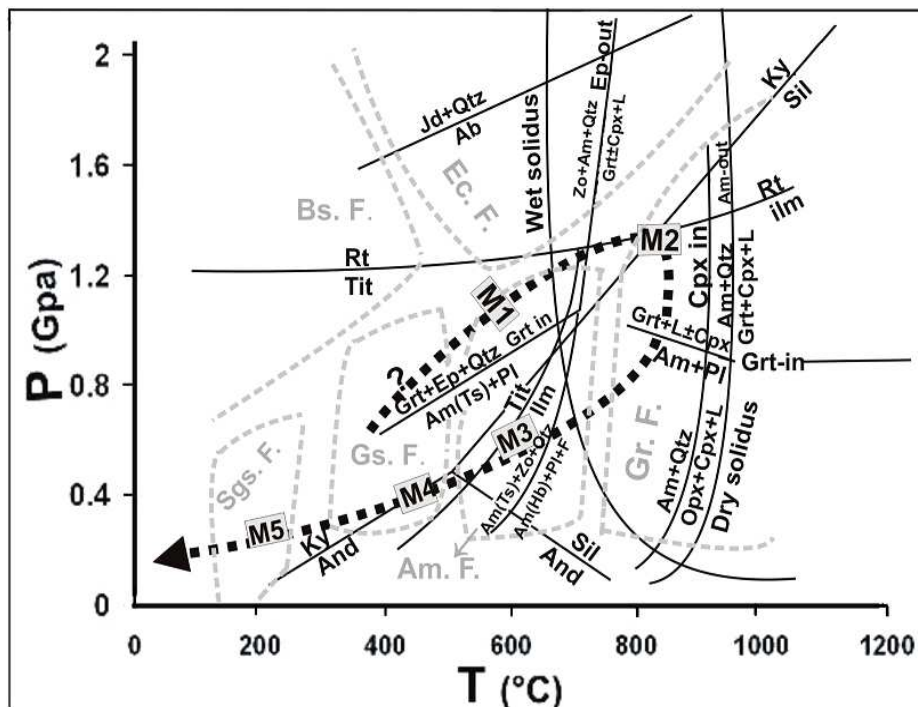
Calibration	Number of Considered Mineral pairs	Z2004	W2006	F&W2007	T2007
M1 stage					
GT3a_core	(۴)	۸۵۶	۷۴۱	۷۴۱	*۷۲۹
GT4_core	(۴)	۸۵۱	۷۳۵	۷۳۵	*۷۱۵
GT3b_rim	(۳)	۸۲۲	۷۱۳	۷۱۳	*۷۰۳
M2 stage					
GT3a_rim	(۲۰)	۸۸۶	۷۶۴	۷۶۳	**۷۷۲
GT4_rim	(۲)	۸۱۴-۹۱۴	۷۰۷-۷۸۵	۷۰۷-۷۸۵	**۷۰۸-۷۹۴

در ۱۱ کیلو بار: **؛ در ۷ کیلو بار: *؛ [۱۵]: T۲۰۰۷؛ [۱۴]: F&W۲۰۰۷؛ [۱۳]: W۲۰۰۶؛ [۱۲]: Z۲۰۰۴

جدول ۷ نتایج دما-فشارسنجی مراحل اول و دوم دگرگونی که با نرم‌افزار ترموکالک محاسبه شده است.

Metamorphic Stage		Thermocal vc3/26		
		Temperature (°C)	Pressure(kb)	PT best fit (kb, °C)
		Grt-Cpx	Grt-Cpx-Pl-Qtz	
M1	SZ290	*۷۸۱		
	NG353	*۷۶۳	***۷٫۶	۸۱۵±۷۶°C ۸٫۶±۱٫۲Kb
M2	SZ290	**۷۳۵	***۱۲٫۵	۷۴۰±۱۰۵ °C ۱۲٫۴ ± ۱٫۵ Kb
	NG353	**۷۴۷	***۹٫۳	۷۴۲±۷۴°C ۹٫۷±۱٫۲Kb

در ۷۵۰ درجه سانتیگراد: *** در ۱۱ کیلو بار: ** در ۷ کیلو بار: *



شکل ۴ نمودار فشار-دما-فشارسنجی مراحل مختلف دگرگونی که نشان‌دهنده مسیر دگرگونی ساعتگرد است. منحنی‌های انجماد و واکنش‌های دگرگونی حاکم در رخساره‌ی آمفیبولیت و گرانولیت از ویلزوف و اشمیت [۲۱] اقتباس شده است. قلمرو پایداری فازهای تیتانیوم‌دار [۲۳، ۲۴]، آلومینوسیلیکات‌ها [۲۲]، آلبیت [۲۵] و گساره‌ی تقریبی رخساره‌های دگرگونی نیز در شکل نشان داده شده است (رخساره‌ی اکلوزیت: Ec. F.، رخساره‌ی آمفیبولیت: Am. F.، رخساره‌ی شیت آبی: Bs. F.، رخساره‌ی گرانولیت: Gr. F.، رخساره‌ی شیت سبز: Gs. F.، رخساره‌ی ساب گرین شیت: Sgs. F.).

بحث و تفسیر محیط زمین‌ساختی

بر پایه‌ی ساختارهای واکنشی و محاسبات دما-فشارسنجی، دو مدل تکتونوترمال برای مسیرهای P-T-t (فشار-دما-زمان) سرزمین‌های رخساره‌ی گرانولیت معرفی شده‌اند [۲۶]:

الف- بالا آمدگی و کاهش فشار در دمای ثابت: در این حالت مسیر P-T-t با حرکت ساعتگردی و در زمان برخورد قاره‌ای و ضخیم‌شدگی پوسته‌ای به وجود می‌آید. این امر مستلزم تدفین واحدهای سنگی تا اعماق بیشتر از ضخامت پوسته‌ی قاره‌ای

- [2] Green D.H., Ringwood A.E., "An experimental investigation of the gabbro to eclogite transition and petrological implications", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 31(1967), 767–833.
- [3] Lensch G., Mihm A., Alavi Tehrani N., "Major element geochemistry of the ophiolites north of Sabzevar (Iran)", *J. P. Geol. Planet. Mh.* 7(1979) 415-447.
- [4] Leake B.E., Alan R.W., William D.B., Ernst A.J.B., Giovanni F., Jeol D.J., Frank C.H., Hanan J.K., Vladimir G.K., John C.S., Nicholas C.N.S., Eric J.W.W., "Nomenclature of amphiboles: Additions and revisions to the International Mineralogical Associations amphibole nomenclature", *American Mineralogist* 89(2004) 883–887.
- [5] Carswell D.A., "Eclogites and eclogite facies: definitions and classification", In: *Eclogite Facies Rocks*, (ed. D. A. Carswell), (1990) 219-221. Blackie, London.
- [6] O'Brien P.J., "Garnet zoning and reaction textures in overprinted eclogites, Bohemian Massif, European Variscides: a record of their thermal history during exhumation", *Lithos* 41(1997) 119-133.
- [7] O'Brien P.J., Rötzler J., "High-pressure granulites: Formation, Recovery of Peak Conditions and Implication for Tectonics", *Journal of Metamorphic Geology* 21 (2003) 3-20.
- [8] Holland T.J.B., Powell R., "An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest", *Journal of Metamorphic Petrology* 16(1998) 309-343.
- [9] Ellis D.J., Green D.H., "An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria", *Contribution to Mineralogy and Petrology* 71(1979) 13-22.
- [10] Krogh Ravna E., "The garnet-clinopyroxene Fe^{2+} -Mg geothermometer: an update calibration", *Journal of Metamorphic Geology* 18(2000a) 211-219.
- [11] Krogh Ravna E., "Distribution of Fe^{2+} and Mg between coexisting garnet and hornblende in synthetic and natural systems: an empirical calibration of the garnet – hornblende Fe-Mg geothermometer", *Lithos* 53(2000b) 305-321.

معمولی (۳۰ کیلومتر)، برگشت دوباره‌ی آن‌ها به اعماق کم و نازک‌شدگی پوسته در نتیجه فرایندهای زمین‌ساختی و فرسایش است [۲۶،۲۷].

ب- سردشدگی در فشار تقریباً ثابت: اینگونه مسیرهای P-T-t پاد ساعتگردی است و در نتیجه تزریق توده‌های نفوذی گوشته‌ای به قوس ماگمایی قاره‌ای که به‌طور درجا سرد می‌شوند [۲۸-۳۰] و یا به‌علت وجود نقاط داغ تنوره‌های گوشته‌ای [۲۹،۳۱] و محیط‌های ریفتی [۳۲] به وجود می‌آیند. در این ساز و کارها پارائزهای با فشار بالا در گرانولیت‌ها تشکیل نمی‌شود.

محاسبات دما- فشارسنجی، بررسی‌های سنگ‌نگاری و پارائز گرانولیت‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که مسیر دگرگونی پیش‌رونده‌ی آن‌ها پس از عبور از رخساره‌ی آمفیبولیت تا رخساره‌ی گرانولیت با فشار بالا پیش رفته و تا اندازه‌ای دستخوش ذوب بخشی شده‌اند. سپس به‌علت دلامینیشن ورقه‌ی اقیانوسی در برخورد با گوه‌ی گوشته‌ای قطعاتی از این ورقه به‌صورت **بی دررو** به سطح زمین آورده شده‌اند. در این سنگ‌ها، در طول شکل‌گیری‌های دگرگونی برگشتی، ساختارهای سیمپلکتیت بوجود آمده است. این مسیر P-T با فرورانش لیتوسفر اقیانوسی به سمت شمال و سپس برخورد خرده قاره‌ی ایران مرکزی با بلوک البرز همخوانی دارد.

پیدایش سنگ‌های دگرگون با دمای بالا طی فرورانش و برخورد، مستلزم وجود یک سیستم فرورانش داغ است. شیب‌های گرمایی بالا در مناطق فرورانش بیشتر با وجود حوضه‌های اقیانوسی جوان و باریک و سپس برخورد دو قاره سازگار است [۳۳،۳۴]. این امر با فرورانش دراز مدت یک پوسته‌ی اقیانوسی گسترده و بالغ از نظر گرمایی مغایرت دارد. بنابر این، وجود حوضه‌های اقیانوسی باریک داغ و جوان در منطقه‌ی سبزووار توسط بسیاری از پژوهشگران خاطر نشان شده است [۳۵-۳۸].

مراجع

- [1] Smulikowski W., Desmons J., Hart B., Sassi F. P., Schmid R., "Towards a unified nomenclature of metamorphism: 3 Types, Grades and Facies. International Union of Geological Sciences-Subcommission of the Systematic of Metamorphic Rocks (SCMR)", (1997) Work in progress.

- [23] Liou J.G., Zhang R., Ernst W.G., Liu J., McLimans R., "Mineral parageneses in the Piampaludo eclogitic body, Gruppo di Voltri, western Ligurian Alps", (1998) Schweizerische
- [24] Liu J., Bohlen S.R., Ernest W.G., "Stability of hydrous phases in subducting oceanic crust", Earth and Planetary Science Letters 143(1996) 161-171.
- [25] Holland T.J.B., "The experimental determination of activities in disordered and short-range ordered jadeitic pyroxenes", Contributions to Mineralogy and Petrology 82(1983) 214-220.
- [26] Harley S.L., "The origin of granulites: A metamorphic perspective", Geological Magazine 126(1989) 215-247.
- [27] Sonder L.J., England P.C., Wernicke B.P., Christiansen R.L., "A physical model for Cenozoic extension of western North America In: Continental Extensional Tectonics", Special Publication 28(1987), (Eds Coward, M. P. Dewey, J. F. & Hancock P. L.), PP. 187-201. Geological Society, London.
- [28] Wells P.R.A., "Thermal models for the magmatic accretion and subsequent metamorphism of continental crust", Earth and Planetary Science Letters 46(1980) 253-265.
- [29] Bohlen S.R., 1987. "Pressure-temperature-time path and a tectonic model for the evolution of granulites", Journal of Geology 95(1980) 617-632.
- [30] Bohlen S.R., "On the formation of granulites", Journal of Metamorphic Geology 9(1991) 223-229.
- [31] Hill R.I., Campbell I.R., Davis G.F., Griffiths R.W., "Mantle plumes and continental tectonics", Science 256(1992) 186-193.
- [32] Sandiford M., Powell R., "Deep crustal metamorphism during continental extension: ancient and modern examples", Earth and Planetary Science Letters 79(1986) 151-158.
- [33] Peacock S.M., "Creation and preservation of subduction-related inverted metamorphic gradients", Journal of Geophysical Research, B, Solid Earth and Planets 92(1987) 12763-12781.
- [34] Cloos M., "Thermal evolution of convergent plate margin: thermal modeling and reevaluation of isotopic Ar-ages for blue schist in Franciscan subduction complex of California", Tectonics 4(1985) 421-433.
- [35] Stöcklin J., "Possible ancient continental margins in Iran". In: Burke, C.A., Darke C. L.
- [12] Zack T., Moraes R., Kronz A., "Temperature dependence of Zr in rutile: empirical calibration of a rutile thermometer", Contribution to Mineralogy and Petrology 148(2004a) 471-488.
- [13] Watson E.B., Wark D.A., Thomas J.B., "Crystalisation thermometers for zircon and rutile", Contribution to Mineralogy and Petrology 151(2006) 413-433.
- [14] Ferry J., Watson E.B., "New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers", Contribution to Mineralogy and Petrology 154(2007) 429-437.
- [15] Tomkins A.G., Pattison D.R.M., Frost B.R., "On the initiation of metamorphic sulfid anatexis", Journal of Petrology 48(2007) 511-535.
- [16] Perkins D. III, Newton R.C., "Chamockite geobarometers based on coexisting garnet-plagioclase-quartz", Nature 292(1981) 144-146.
- [17] Eckert J.O., Newton R.C., Kleppa O.G., "The ΔH of reaction and recalibration of garnet-pyroxene-plagioclase-quartz geobarometers in the CMAS system by solution calorimetry", American Mineralogist 76(1991) 148-160.
- [18] Kohn M.J., Spear F.S., "Two new geobarometers for garnet amphibolites, with applications to Southeastern Vermont", American Mineralogist 75(1990) 89-96.
- [19] McCarthy T.C., Patiño Douce A.E., "Empirical calibration of the silica-Ca-tschermak's-anorthite (SCAn) geobarometer", Journal of Metamorphic Geology 16(1998) 675-689.
- [20] Ernest W.G., Liu J., "Experimental phase-equilibrium study of Al- and Ti-contents of calcic amphibole in MORB-A semiquantitative thermobarometer", American Mineralogist 83(1998) 952-969.
- [21] Vielzeuf D., Schmidt M.W., "Melting reactions in hydrous systems revisited: applications to metapelites, metagreywackes and metabasalts", Contributions to Mineralogy and Petrology 141(2001) 251-267.
- [22] Holdaway M.J., "Significance of chloritoid-bearing rocks in the Picuris Range, New Mexico", Geological Society of America Bulletin 89(1978) 1404-1414.

[38] Baroze J., Macaudiere J., Montigny R., Noghrean M., Ohnensteter M., Rocci G.A., "Ophiolites and related formations in the central part of the Sabzevar (Iran) and possible geotectonics reconstructions", Geodynamic Project (Geotraverse) in Iran: GSI, Rep. No.: 51(1983).

(Eds.), The geology of continent margins, Springer, New York, (1974) pp. 873-887.

[36] Stampfli G.M., "Etude geologique generale the I' Elbourz oriental au sud de Gondbad-e-Qabus, Iran NE", These Geneve, (1978) 329 P.

[37] Berberian M., King G.C.P., "Toward a paleogeography and tectonic evolution of Iran", Can. J. Earth Science 18(1981) 210- 265.

‖