

تغییرات پاراژنهای کانی‌شناسی گرانولیت‌های شمال غرب سبزوار در طی تحولات دگرگونی

محسن نصرآبادی^{۱*}، حسین معین‌وزیری^۲، محمد حسین رضوی^۲، محمد محجل^۳

۱- گروه زمین‌شناسی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین

۲- گروه زمین‌شناسی دانشگاه تربیت معلم

۳- 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 فشار بالا دگرگون شده‌اند. بر مبنای پاراژنهای کانی‌شناسی، ساختارهای واکنشی بین مجموعه‌های کانی‌شناسی مختلف، روابط کانی‌شناسی و بافتی بین اذخال 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 کرونا (M_3)، جانشینی بخشی یا کامل گارنت به وسیله مجموعه‌ی آمفیبول+ کلریت+ اپیدوت (M_4) و تشکیل رگه‌های پره‌نیت و ژئولیت 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 بالاآمدگی بعدی سازگار است.

واژه‌های کلیدی: سبزوار، گرانولیت، پاراژن کانی‌شناسی، تحولات دگرگونی.

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 اذخال در پورفیروبلاست‌ها و یا به حالت نیمه پایدار در نقاط کمتر دگرشکل شده سنگ‌ها حفظ کرده‌اند می‌توان درباره تاریخچه‌ی دگرگونی و 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 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 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 فشار بالا است تبدیل می‌شود. در هر یک از این سه مجموعه، با توجه به شرایط فشار، دما، ترکیب

* نویسنده مسئول، تلفن: ۸۳۷۱۳۶۵ (۰۲۸۱)، نمابر: ۳۷۸۰۰۴۰ (۰۲۸۱)، پست الکترونیکی: mohsennasrabady@hotmail.com

پاراژنهای مختلف، تحولات دگرگونی حاکم بر گرانولیت‌های شمال غرب سبزوار را تفسیر می‌نمائیم.

روش بررسی

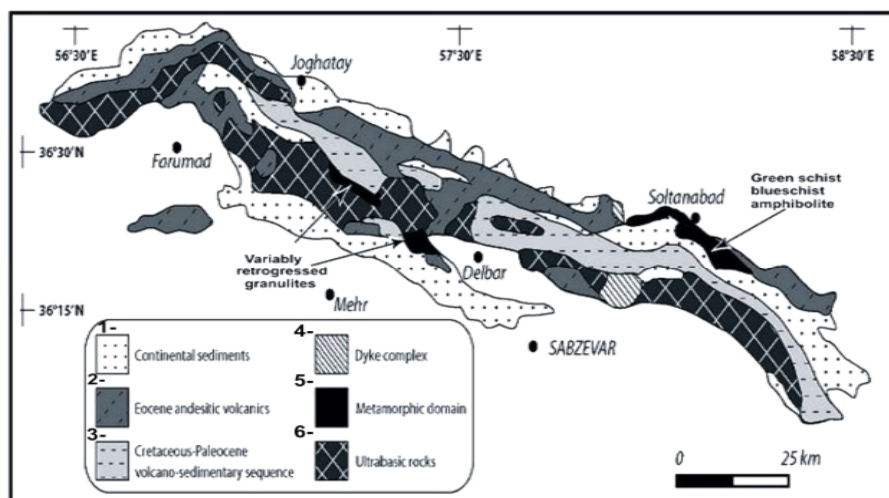
روش بررسی شامل جمع‌آوری نمونه‌های متعدد از نقاط مختلف بیرونزدگی گرانولیت‌ها، تهیه مقاطع نازک، بررسی‌های دقیق سنگ‌نگاری و آنالیز نقطه‌ای کانی‌های گوناگون (۷۰۰ نقطه) در دانشگاه اشتوتگارت آلمان و رم ایتالیا است. در دستیابی به فرمول ساختاری کانی‌ها از نرم‌افزار Calc Min و به‌منظور برآورد شرایط دما - فشار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

روابط صحرایی

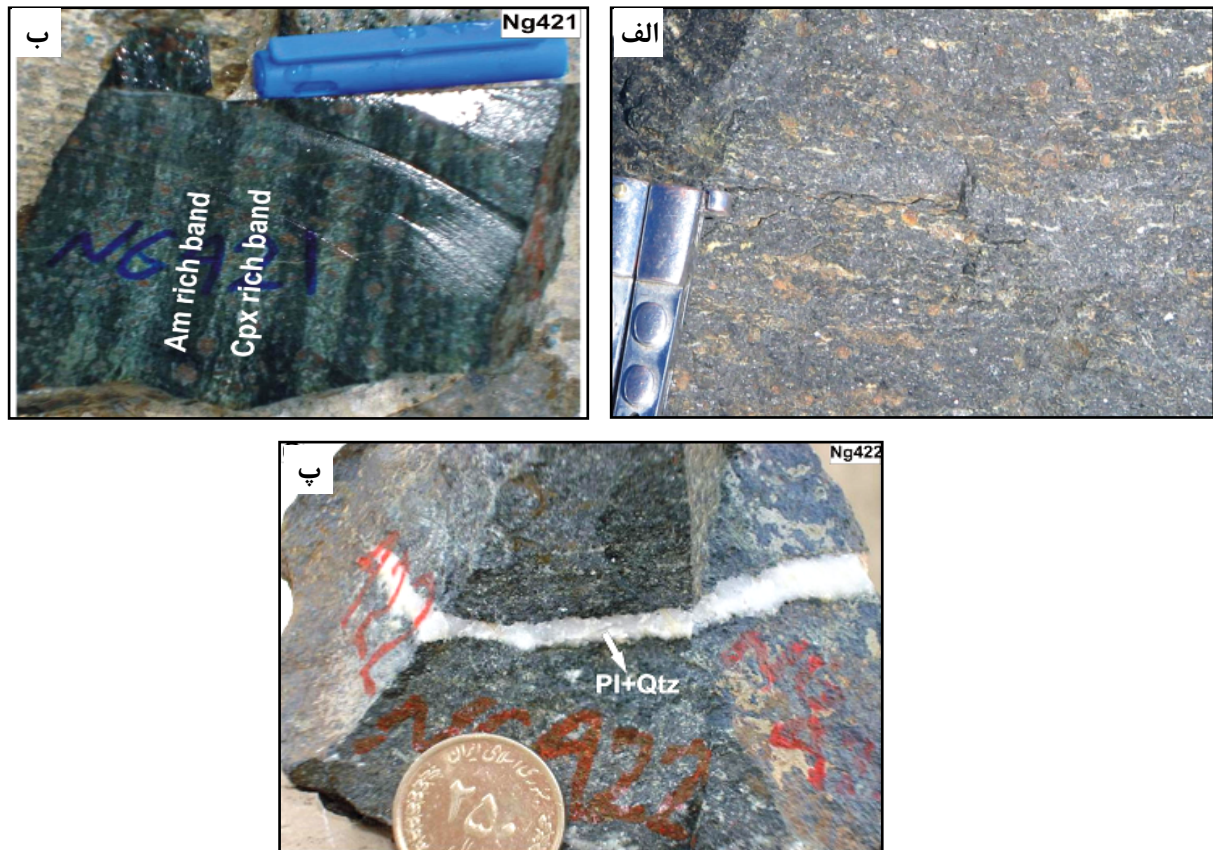
گرانولیت‌های نوار افیولیتی شمال غرب سبزوار (گارت - کلینوپیروکسن آمفیبولیت) در جنوب روستای زرقان و شمال روستای نوده (کلاته گرگیر) بیرونزدگی دارند. نقشه‌ی زمین-شناسی ساده [۳] از افیولیت‌های شمال سبزوار در شکل ۱ نشان داده شده است. رخنمون گرانولیت‌های جنوب زرقان به‌صورت

یک ورقه به‌طول تقریبی ۱۰ کیلومتر و عرض ۱ کیلومتر، با راستای شمال غربی- جنوب شرقی و شیبی زیاد به سمت جنوب غرب همراه سرپانتینیت‌ها مشاهده می‌شود. تماس بین گرانولیت‌ها با سرپانتینیت‌های اطراف به صورت گسلی 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 متوسط بلور بوده و غالباً توده‌ای و گاهی دارای برگوارگی‌اند. در بعضی از موارد پلاژیوکلاز به‌صورت بخشی (بافت کرونا)، جانشین پورفایروبلست‌های گارت شده است (شکل ۲ الف). بعضی از نمونه‌ها نیز دارای ناهمگنی ترکیبی به‌صورت تناوبی از نوارهای غنی از پیروکسن و غنی از آمفیبول هستند (شکل ۲ ب). در بعضی از گرانولیت‌ها انبوهه‌های کوارتز- فلدسپات (مذاب ترونجمیتی) حاصل از ذوب بخشی موضعی، قابل مشاهده است (شکل ۲ ب). بیشتر نمونه‌ها بافت پورفایروبلستیک با زمینه‌ای دانه‌دار نشان می‌دهند.



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



شکل ۲ نمونه‌های دستی گرانولیت: الف- پورفیروبلست‌های گارنت که در مواردی در پیرامون خود دارای حاشیه‌ی نازکی از هاله‌ی پلاژیوکلازند. ب- لایه‌بندی مودال شامل تناوبی از باند‌های غنی از آمفیبول و غنی از پیروکسن. پ- رگه‌ی 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، کلینوپیروکسن، گارنت و پلاژیوکلازند. کانی‌های فرعی آن‌ها عبارتند از: کوارتز، تیتانیت، روتیل، ایلمنیت، پره‌نیت، زئولیت و آپاتیت. بیشتر نمونه‌ها معمولاً بر اثر دگرگونی پسروده به‌طور کامل یا بخشی به آمفیبولیت تبدیل شده‌اند به‌طوری که در آن‌ها تغییرات کانی‌شناسی قابل ملاحظه‌ای به‌علت تحمل درجات متفاوت دگرگونی پسروده به‌وجود آمده است. در بیشتر آمفیبولیت‌های با برگوارگی فراگیر، گارنت و پیروکسن دیده نمی‌شود.

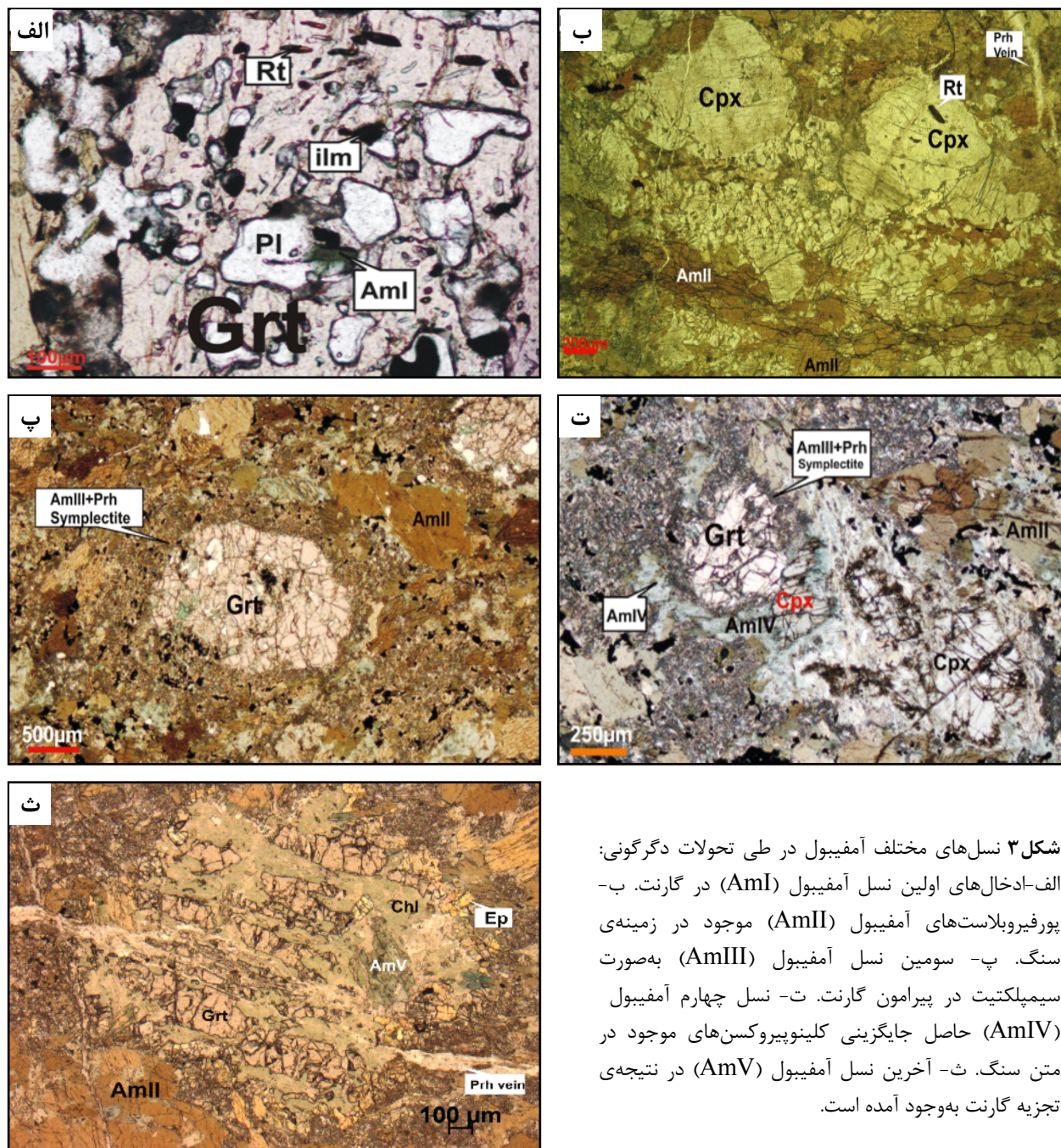
آمفیبول در بیشتر نمونه‌ها، کانی اصلی سنگ بوده و در بعضی از آن‌ها (نمونه‌ی گارنت- هورنبلندیت) بیش از ۹۰ درصد سنگ را شامل می‌شود. آمفیبول نمونه‌های فقیر از پلاژیوکلاز قهوه‌ای است در حالی که آمفیبول نمونه‌های غنی از پلاژیوکلاز سبز رنگ است. با بررسی‌های سنگ‌نگاری و ژئوشیمیایی در

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

الف- آمفیبول‌های سبزرنگ به‌صورت ادخال در پورفیروبلست- های گارنت (شکل ۳-الف) یا کلینوپیروکسن دارای ترکیب هورنبلند یا چرم‌اکت (Am I).

ب- پورفیروبلست‌های درشت آمفیبول با چندرنگی قهوه‌ای یا سبز تیره 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 کرونا در اطراف گارنت دیده می‌شود و ترکیب آن‌ها چرم‌اکت، پارگازیت یا منیزیه‌انستینگسیت است (شکل ۳-پ).



شکل ۳ نسل‌های مختلف آمفیبول در طی تحولات دگرگونی: الف-ادخال‌های اولین نسل آمفیبول (AmI) در گارنت. ب- پورفیروبلست‌های آمفیبول (AmII) موجود در زمینه سنگ. پ- سومین نسل آمفیبول (AmIII) به صورت سیمپلکتیت در پیرامون گارنت. ت- نسل چهارم آمفیبول (AmIV) حاصل جایگزینی کلینوپروکسن‌های موجود در متن سنگ. ث- آخرین نسل آمفیبول (AmV) در نتیجه تجزیه گارنت به وجود آمده است.

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

د- در داخل بعضی از آمفیبول‌ها با چندرنگی سبز-کمرنگ (Am IV) بقایایی از پروکسن 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 به وجود 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					
Sample	SZ290			NG353				EG354	
Analysis	۱۵#	۴۷#	۵۲#	۱۵۹#	۵۱#	۵۵#	۴۲#	۳۰#	۳۱#
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	۶٫۰۲	۶٫۱۷	۶٫۲۵	۶٫۴	۶٫۳۷	۶٫۳۶	۶٫۳۶	۷٫۵۶	۶٫۲۹
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 اکسیژن و تمایز آهن دو و سه ظرفیتی بر مبنای ۱۳ کاتیون (به جز Ca, Na, K, Ba) است. Am-k: آمفیبول موجود در هاله‌ی پیرامون گارنت، Am-m: آمفیبول زمینه سنگ، Am-I: اذخال 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 اذخال‌های آمفیبول در گارنت و پروکسن و حضور پروکسن با بافت پوئی‌کیلوبلاستیک)، شیمیایی (ترکیب دیوپسیدی پروکسن‌ها و مقادیر کم تیتانیم در آن‌ها) سنگ‌شناسی و دما- فشارسنجی بیانگر خاستگاه دگرگونی پروکسن‌هاست.

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

گارنت تنها به صورت پورفایروبلست‌های درشت در متن سنگ حضور دارد و در بیشتر نمونه‌ها در حال جایگزین شدن توسط پلاژیوکلاز و آمفیبول بصورت سیمپلکتیت و کرونا است. تجزیه شیمیایی گارنت نمونه‌های مختلف در جدول ۳ ارائه

شده است. سازنده‌های گارنت: آلماندن (۵۹-۳۸٪)، گروسولار (۳۲-۲۱٪)، پیروپ (۳۲-۱۳٪) و اسپسارتین (۵-۰٪) 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 Sample	Plagioclase-poor SZ290				Plagioclase-rich				
					NG353			EG354	
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			
Analysis	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: $\text{Fe} \# : \text{Fe}^{2+}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$.

پلاژیوکلاز.

پلاژیوکلاز در نمونه‌های مختلف به چهار صورت دیده می‌شود:

الف- ساخت سیمپلکتیت با آمفیبول و یا به صورت کرونا در پیرامون گارنت.

ب- به صورت ادخال مجزا و یا هم‌رشدی با ایلمنیت در گارنت.

ج- بلورهای درشت موجود در زمینه‌ی نمونه‌های غنی از پلاژیوکلاز.

د- لوکوسوم ترونجمیتی حاصل از ذوب بخشی.

در بیشتر نمونه‌ها گارنت توسط کانی‌های دیگر جایگزین

شده به‌طوری‌که در مجموع سه نوع جایگزینی در گارنت دیده می‌شود:

الف- تشکیل سیمپلکتیت $\text{Am} + \text{Pl}$ و کرونای پلاژیوکلاز در پیرامون گارنت

ب- جایگزینی گارنت با مجموعه‌ای متشکل از: $\text{Chl} + \text{Ep} + \text{Am}$

ج- جانشینی کامل گارنت با کلریت در نمونه‌های فقیر از

سوسوریتی هستند. در جدول ۴ ترکیب شیمیایی پلاژیوکلازهای مختلف معرفی شده‌اند.

کانی‌های فرعی

پرهنیت، زئولیت (هولاندیت)، تیتانیت، 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.

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

جدول ۴ نتایج آنالیز ریزپردازشی پلاژیوکلاز در دو نمونه از گرانولیت‌ها

Rock type	Plagioclase-rich					
Sample	NG353			EG354		
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 اکسیژن محاسبه شده است. Pl-m: پلاژیوکلاز موجود در زمینه. Pl-c: هاله‌ی پلاژیوکلاز پیرامون گارنت. Pl-i: پلاژیوکلاز به‌صورت ادخال در گارنت. Pl-s: سیمپلکتیت پلاژیوکلاز + آمفیبول در پیرامون گارنت. Pl-i-©: پلاژیوکلاز به‌صورت ادخال در کلینوپیروکسن. FeO*: آهن کل به‌صورت Fe₂O₃.

است. به‌طوری‌که می‌توان پورفایروبلست‌های درشت گارنت، کلینوپیروکسن و آمفیبول را با مرز مستقیم در تماس با یکدیگر مشاهده کرد. حضور کلینوپیروکسن و روتیل به‌صورت ادخال در حاشیه‌ی گارنت نیز نشان‌دهنده شرایط نزدیک به اوج دگرگونی است.

ج- مرحله‌ی اول دگرگونی پسروده (M3)

در بیشتر نمونه‌های مورد بررسی پورفایروبلست‌های گارنت در حال جایگزینی به‌وسیله‌ی سیمپلکتیت آمفیبول+ پلاژیوکلاز و یا هاله‌ی متشکل از پلاژیوکلاز هستند. اینگونه روابط واکنشی در بسیاری از مناطق گرانولیتی دیگر دنیا نیز گزارش شده و نتیجه‌ی کاهش فشار گرانولیت‌ها در دمای ثابت (یا تقریباً ثابت) طی بالآمدگی است [۵، ۶]. بنابراین اولین مرحله‌ی دگرگونی پسروده به‌صورت بالآمدگی در دمای تقریباً ثابت و با جانشینی گارنت به وسیله‌ی 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 فشار بالا است و در طی کاهش فشار، از تجزیه‌ی تیتانیت حاصل می‌شوند [۷].

د- مرحله‌ی دوم دگرگونی پسروده (M4)

چهارمین مرحله‌ی دگرگونی یا دومین مرحله‌ی دگرگونی پسروده به‌صورت تجزیه پورفایروبلست‌های گارنت به‌وسیله‌ی 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 (M4) 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 (M5)

آخرین مرحله‌ی دگرگونی با پیدایش رگه‌های پره‌نیت و ژئولیت‌دار که قطع‌کننده‌ی بافت‌های دگرگونی قبلی است خودنمایی می‌کند. وجود این رگه‌های پره‌نیت، ژئولیت و کلسیت بیانگر دخالت فراگیر فاز سیال طی آخرین مرحله‌ی دگرگونی است.

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

تاریخچه تحولات دگرگونی

بر مبنای پاراژنهای کانی‌شناسی، ساختارهای واکنشی بین مجموعه‌های کانی‌شناسی مختلف، روابط کانی‌شناسی و بافتی بین ادخال و پورفایروبلست و قلمرو پایداری مجموعه‌های کانی‌شناسی متفاوت می‌توان پنج مرحله‌ی دگرگونی (M_1) تا (M_5) تشخیص داد: مرحله‌ی دگرگونی پیش‌رونده (M_1)، مرحله-ی اوج دگرگونی (M_2) و سه مرحله‌ی M_3 ، M_4 و M_5 در مسیر دگرگونی پسروده قرار دارند. ساختارها و روابط جانشینی و واکنشی در مسیر پسروده به شرح زیرند: کلیفیتیزاسیون گارنت به‌صورت تشکیل سیمپلکتیت آمفیبول+ پلاژیوکلاز و یا کرونا‌ی متشکل از آمفیبول یا پلاژیوکلاز (M_3)، جانشینی بخشی یا کامل گارنت به‌وسیله مجموعه‌ی آمفیبول+ کلریت+ اپیدوت (M_4) و در نهایت تشکیل پره‌نیت و ژئولیت که بیشتر پرکننده‌ی شکستگی‌های سنگ هستند و یا جانشین پلاژیوکلاز موجود در سیمپلکتیت پیرامون گارنت شده‌اند (M_5).

الف- مرحله‌ی دگرگونی پیش‌رونده (M1)

مانند بیشتر مناطق گرانولیتی دنیا، در گرانولیت‌های مافیک شمال غرب سبزوار 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 به‌صورت مجموعه‌ی ادخال‌هایی متشکل از: آمفیبول+ پلاژیوکلاز+ اپیدوت+ ایلمنیت+ روتیل± پیروکسن در پورفایروبلست‌های گارنت بعضی از نمونه‌ها حفظ شده‌اند. 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 (M2)

با وجود درجات مختلف دگرگونی پسروده، پاراژن‌های رخساره‌ی گرانولیت درجه بالا، در بعضی از نمونه‌ها حفظ شده

زمین‌دما- فشارسنجی

برای برآورد شرایط فشار و دمای دگرگونی از نرم‌افزار ترموکالک [۸] نسخه ۲۶/۳ (۲۰۰۷)، دما- فشارسنج‌های قراردادی، و نمودارهای گستره‌ی پایداری کانی‌ها استفاده شده است (جدول‌های ۵ تا ۷). محاسبات دما بر مبنای تبادل آهن و منیزیم بین گارنت و کلینوپیروکسن [۱۰،۹]، بین گارنت و آمفیبول [۱۱] و نیز مقدار زیرکسیم موجود در روتیل [۱۲-۱۵] صورت گرفته است. برآورد فشار حاکم در مراحل مختلف دگرگونی نیز به‌وسیله فشارسنج‌های گارنت- کلینوپیروکسن-

پلاژیوکلاز- کوارتز [۱۶،۱۷]، گارنت- آمفیبول- پلاژیوکلاز- کوارتز [۱۸] و کلسیم- چرماک (Ca-Ts)- پلاژیوکلاز- کوارتز [۱۹] انجام شده است. در نرم‌افزار ترموکالک برآورد فشار و دمای متوسط به‌وسیله داده‌های به‌دست‌آمده از برنامه‌ی AX صورت گرفته است. با استفاده از نتایج داده‌های دما-فشارسنج-های مذکور نمودار فشار- دمای مراحل مختلف دگرگونی رسم شده است (شکل ۴).

جدول ۵ نتایج دما-فشارسنجی مراحل اول و دوم دگرگونی که با نرم‌افزار ترموکالک محاسبه شده است.

		Thermocal vc3/26		
		Temperature (°C)	Pressure(kb)	PT best fit (kb, °C)
Metamorphic Stage		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: *

جدول ۶ نتایج دما-فشارسنجی مراحل مختلف دگرگونی که با استفاده از دما- فشار سنج‌های قراردادی محاسبه شده است.

		Conventional thermobarometry							
		Temperature (°C)			Pressure(kb)				
Metamorphic Stage		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
M1	SZ290	*۷۵۵	*۸۳۷						
	NG353	*۶۵۵	*۷۱۲	۵۱۰-۸۲۰	۷۵۰	***۱۰٫۷	***۱۰٫۱	***۴٫۷-۶٫۴	
	EG354								
M2	SZ290	**۷۲۰	**۷۳۴		۷۰۰-۷۲۰	***۱۲٫۹	***۱۳		۱۱٫۳-۱۲٫۲***
	NG353	**۷۵۲	**۷۷۰		۷۹۰-۸۶۰	***۱۱٫۱	***۱۱٫۷		۱۰٫۷-۱۱٫۷***
	EG354	**۷۲۷	**۷۴۴		۸۲۰-۸۴۰	***۱۱٫۲	***۱۱٫۹		
M3	SZ290			۶۸۲-۸۴۳	۷۲۰-۷۳۵			***۳٫۵-۴٫۵	
	NG353			۵۷۴-۶۳۷	۷۵۰			***۳٫۹-۵٫۸	
	EG354			۶۱۱-۶۷۷				***۴٫۴-۶٫۲	
M4	SZ290								
	NG353								
	EG354				۵۲۰				

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

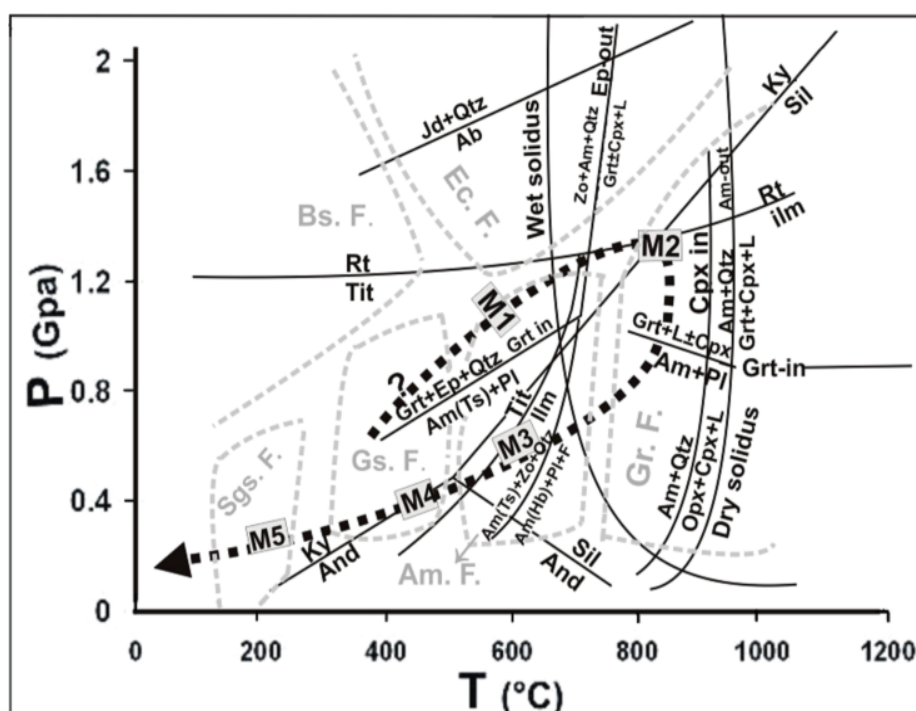
در ۷۵۰ درجه سانتیگراد: ***؛ در ۱۱ کیلو بار: **؛

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

جدول ۷ محاسبات دماسنجی با استفاده از میزان زیرکنیم موجود در روتیل.

Calibration	Number of Considered Mineral pairs	Z2004	W2006	F&W2007	T2007
M1 stage					
GT3a_core	(f)	156	141	141	*129
GT4_core	(f)	151	135	135	*115
GT3b_rim	(r)	122	113	113	*103
M2 stage					
GT3a_rim	(r)	116	164	163	**172
GT4_rim	(r)	114-114	107-115	107-115	**108-114

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



شکل ۴ نمودار فشار- دمای 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 تیتانیم‌دار [۲۳، ۲۴]، آلومینوسیلیکات‌ها [۲۲]، آلبیت [۲۵] و گساره‌ی محدوده‌ی تقریبی رخساره‌های دگرگونی نیز در شکل نشان داده شده است (رخساره‌ی اکلوژیت: Ec. F، رخساره‌ی آمفیبولیت: Am. F، رخساره‌ی شیبست آبی: Bs. F، رخساره‌ی گرانولیت: Gr. F، رخساره‌ی شیبست سبز: Gs. F، رخساره‌ی ساب‌گرین شیبست: Sgs. F).

بحث و تفسیر محیط زمین ساختی

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

الف- بالآمدگی و کاهش فشار در دمای ثابت: در این حالت مسیر P-T-t با حرکت، ساعتگرد و در زمان برخورد قاره‌ای و

ضخیم‌شدگی پوسته‌ای به وجود می‌آید. این امر مستلزم تدفین واحدهای سنگی تا اعماق بیشتر از ضخامت پوسته‌ی قاره‌ای معمولی (۳۰ کیلومتر)، برگشت دوباره‌ی آن‌ها به اعماق کم و نازک‌شدگی پوسته در نتیجه فرایندهای زمین‌ساختی و فرسایش است [۲۷،۲۶].

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.

[12] Zack T., Moraes R., Kronz A., "Temperature dependence of Zr in rutile : empirical calibration

ب- سردشدگی در فشار تقریباً ثابت: اینگونه مسیره‌های P-T-t در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت 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 [۳۱، ۳۹] و محیط‌های ریفی [۳۲] به وجود می‌آیند. در این گونه موارد پارائزهای فشار بالا در گرانولیت‌ها تشکیل نمی‌شوند.

محاسبات دما- فشارسنجی، بررسی‌های سنگ‌نگاری و پارائز گرانولیت‌های منطقه نشان می‌دهد که مسیر دگرگونی پیش‌رونده‌ی آن‌ها پس از عبور از رخساره‌ی آمفیبولیت تا رخساره‌ی گرانولیت فشار بالا پیش رفته و به‌صورت موضعی دستخوش ذوب بخشی شده‌اند. سپس به‌علت دلامینیشن ورقه-ی اقیانوسی در برخورد با گوه‌ی گوشته‌ای قطعاتی از این ورقه به‌صورت آدیاباتیک به سطح زمین آورده شده‌اند. در این سنگ-ها، در طول اعمال دگرگونی برگشتی، ساختارهای سیمپلکتیت به‌وجود آمده است. این مسیر P-T با فرورانش لیتوسفر اقیانوسی به سمت شمال و سپس برخورد خرده قاره‌ی ایران مرکزی با بلوک البرز سازگاری دارد.

پیدایش سنگ‌های دگرگونی درجه بالا طی فرورانش و برخورد، مستلزم وجود یک رژیم فرورانش داغ است. شیب‌های زمین 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. در این خصوص وجود حوضه‌های اقیانوسی باریک داغ و جوان در منطقه‌ی سبزوار 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.
- [2] Green D.H., Ringwood A.E., "An experimental investigation of the gabbro to eclogite transition

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

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-pyroxene-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.

[23] Liou J.G., Zhang R., Ernst W.G., Liu J., McLimans R., "Mineral parageneses in the

- [38] Baroze J., Macaudiere J., Montigny R., Noghreyan 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).
- [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 paleogeograpy and tectonic evolution of Iran*", Can. J. Earth Science 18(1981) 210- 265.