

Mineralogy and petrography of calc-silicate xenoliths

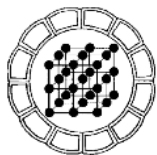
M. Khalili, M.A. Mackizadeh

*Department of Geology, University of Isfahan. Iran 81746-7344.
E-Mail: mahmoud_khalili@hotmail.com*

(received: 24/8/2003, received in revised form: 19/2/2004)

Abstract: The calc-silicate xenoliths, within the Shir-Kuh batholith are characterized by melilite, garnet, vesuvianite, and wollastonite mineral assemblage. On the basis of paragenetic relations, prograde and retrograde metamorphism are involved in the formation of these minerals. Melilite, wollastonite and diopside formed during progressive metamorphism which was accompanied by thermal peak shocking and decarbonization reactions in pyroxene-hornfels facies. The effect of fluids in later stage, which released during crystallization of batholith, caused the formation of hydrous minerals (hornblende-hornfels facies during retrograding metamorphism).

Keywords: *Calc-Silicate, Melilite, Xenolith, Shir- Kuh.*



کانی شناسی و سنگ شناسی زینولیت های کالک - سیلیکاته

محمود خلیلی، محمدعلی مکی زاده

دانشگاه اصفهان، گروه زمین شناسی

پست الکترونیکی: mahmoud_khalili@hotmail.com

(دریافت مقاله ۱۳۸۲/۶/۲ ، دریافت نسخه نهایی ۱۳۸۲/۱۱/۳۰)

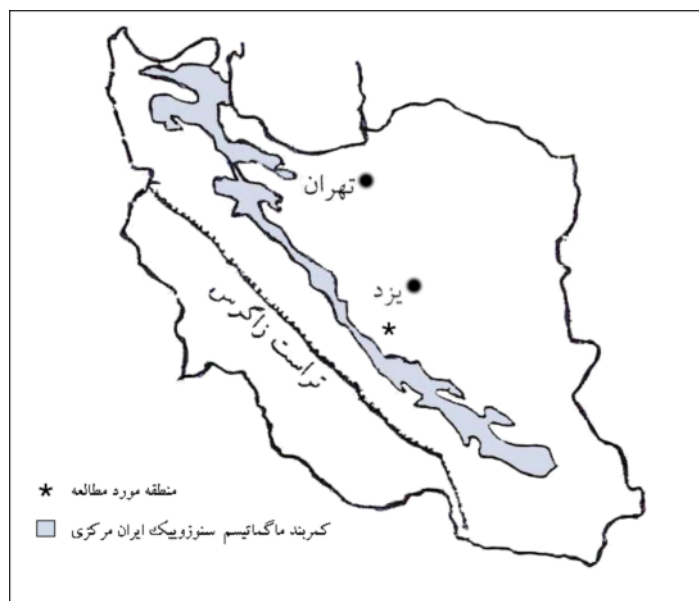
چکیده: زینولیت های کالک- سیلیکاته در باتولیت شیرکوه با مجموعه کانیهای ملی لیت، گارنت، وزوویانیت، ولاستونیت مشخص شده اند. بررسی روابط پاراژنتیکی مجموعه کانیهای فوق دو مرحله اساسی شکل گیری این کانی ها را مشخص می کند: مرحله پیشرونده و مرحله پسرونده. حین مرحله دگرگونی پیشرونده که با اعمال ضربه گرمایی و واکنشهای کربن زایی در رخساره پیروکسن- هورنفلس همراه بوده است، ملی لیت، ولاستونیت و دیوپسید شکل گرفته است. شارهای آبدار تأخیری آزاد شده از باتولیت در حال تبلور، باعث شکل گیری کانی های عمدتاً آبدار مرحله پسرونده شده است (رخساره هورنفلند- هورنفلس).

واژه های کلیدی: کالک- سیلیکاته، ملی لیت، زینولیت، شیرکوه.

مقدمه

اهمیت مواد فرار هنگام دگرگونی، به ویژه CO_2 و H_2O ، مورد مطالعه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۱ تا ۳]. این مطالعات ترکیب شاره‌های دگرگونی همجواری و نقش بارز آنها در تشکیل مجموعه‌های کانی‌شناختی را مورد بررسی دقیق قرار داده‌اند. مطالعه برهم‌کنش شاره - سنگ حین دگرگونی نیز موضوع تحقیق در سرزمین‌های دگرگون، به ویژه در هاله‌های مجاورتی بوده است. در این راستا و به منظور مطالعه شاره‌ها و شارش آنها در مجاورت پلوتون‌ها از کالک-سیلیکاتها به خوبی استفاده شده است [۴]. اثرهای دگرگونی پیشرفته شامل کربن زدائی و آبزدائی و دگرگونی پسرونده شامل آبزدائی موجب شکل‌گیری مجموعه‌های کانی‌شناسی ویژه‌ای در کالک-سیلیکاتهای دگرگونی مجاورتی می‌گردد. کانیهای گروه ملی‌لیت به عنوان کانیهای شاخص رخساره‌های سانیدینیت شناخته شده‌اند [۵]. این گروه کانیها در دماهای بالاتر از 500°C برای آکرومانیت و 600°C برای گهلنیت پایدارند، و در دماهای پائین‌تر و در حضور فشار بخار آب، در گستره $4/8$ تا $6/7$ کیلو بار به مجموعه کانیهای ولاستونیت، وزوویانیت، گارنت، دیوپسید و کلسیت تبدیل می‌شوند [۵].

هدف از این بررسی، سنگ‌شناسی زینولیت‌های کالک-سیلیکاته درسنگ‌های گرانیتی شیرکوه و مکانیسم تشکیل کانیهای گروه ملی‌لیت و فرآورده‌های دگرسانی آنهاست. گستره مورد مطالعه در فاصله ۴۰ کیلومتری جنوب غرب یزد و در موقعیت $31^\circ 35'$ تا $31^\circ 45'$ عرض شمالی $54^\circ 00'$ تا $54^\circ 10'$ طول شرقی قرار دارد (شکل ۱).



شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه در جنوب یزد

موقعیت زمین شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه در تقسیمات زمین شناختی ایران در زون ایران مرکزی قرار دارد [۶]. بیشتر این ناحیه را ارتفاعات شیرکوه پوشانده است. این ارتفاعات با روند شمال غرب- جنوب شرق و با بلندای بیش از ۴۰۰۰ متر شامل واحدهای زیر است:

سازندهای نایبند- شمشک (تریاس- ژوراسیک): این سازندها بیشتر از ماسه سنگ، کوارتزیت و میان لایه‌های آهکی (سازند نایبند) [۶] و نیز ماسه سنگ و شیل سیاه (سازند شمشک) [۷] تشکیل شده‌اند.

باتولیت شیرکوه: توده نفوذی شیرکوه از بخش شمالی تا بخشهای غرب و جنوب غرب منطقه مورد مطالعه گسترش دارد. سن احتمالی این توده ژوراسیک میانی [۸ و ۹] است و سنگهای گرانیته آن بیشتر شامل گرانودیوریت بیوتیت دار، مونزوگرانیته، آلکالی گرانیته و ترونجمیت است. بر اساس ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی، طبیعت این گرانیته‌ها از نوع S است [۱۰]. این توده سنگهای تریاس- ژوراسیک را به صورت همجواری دگرگون کرده است.

سازندهای سنگستان و تفت: سازند سنگستان به سن نئوکومین [۸] شامل سکانس ضخیمی از نهشته‌های سرخ آواری است. این نهشته‌ها گرانیته شیرکوه را با یک دگرشیبی زاویه دار می‌پوشانند. روی کنگلومرا و ماسه سنگ این سازند، آهک‌های فلات قاره‌ای سازند تفت قرار دارند. این آهک‌ها به رنگ‌های خاکستری، کرمی و به صورت لایه‌های ضخیم سنگی تا نازک دیده شده‌اند.

سنگ‌های دگرگونی همجواری منطقه مورد مطالعه در دو حاشیه شمالی و غربی باتولیت شیرکوه گسترش دارند. در حاشیه غربی، توده‌ای عمدتاً متشکل از آلکالی گرانیته و ترونجمیت رخنمون دارد که ماسه سنگ، شیل، کوارتزیت و میان لایه‌های آهکی (سازند شمشک و سازند نایبند) را تحت تأثیر دگرگونی همجواری ضعیفی قرار داده و مجموعه کانی‌های کوارتز، کلریت، کانی‌های کدر و میکای سفید را به وجود آورده است. در حاشیه شمالی، گرانو دیوریت‌های بیوتیت دار باتولیت گسترش وسیعی دارند. این سنگها روی واحدهای آواری سازندهای نایبند - شمشک اثر دگرگونی همجواری داشته و این واحد را به اسلیت، شیست و هورنفلس‌های کوردیریت دار تبدیل کرده است. در بخش‌های غربی و شمال غربی منطقه، سازندهای تریاس- ژوراسیک از تأثیر دگرگونی مصون مانده‌اند. بنابراین می‌توان تصور کرد که تنها فاز دگرگونی، در ارتباط با تأثیر گرما ناشی از نفوذ گرانیته شیرکوه بوده و شیستوزیته هورنفلس‌ها آثاری از لایه‌بندی اولیه رسوبی را نشان می‌دهد.

مجموعه‌های کانی‌شناختی این سنگ‌ها را بیوتیت، سرپسیت، کوردیریت و موسکویت تشکیل می‌دهند. بر این اساس، سنگهای اصلی منطقه مورد مطالعه در رخساره هورنبلند-

هورنفلس دگرگون شده‌اند [۱۱]. در این ناحیه و در نزدیکی پیوند پیوسته سنگ‌های گرانیتی با واحد تریاس-ژوراسیک، رخداد استثنایی و بسیار اندک از زینولیت‌های کالک-سیلیکاته درون توده گرانیتی یافت می‌شوند. بزرگترین بعد این سنگ‌ها ۴۰ سانتیمتر و رنگ آن‌ها مایل به سبز است.

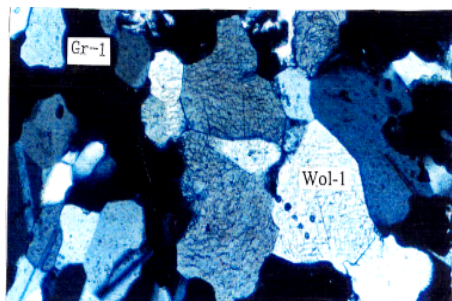
سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی زینولیت‌های کالک - سیلیکاته

زینولیت‌های کالک-سیلیکاته محدود به حاشیه شمالی باتولیت شیرکوه است. مجموعه کانی‌شناختی این سنگ‌های نادر از نظر تحولات دگرگونی بسیار قابل توجه است. بررسی‌های سنگ‌شناسی مجموعه کانیهای زیر را نشان داده است:

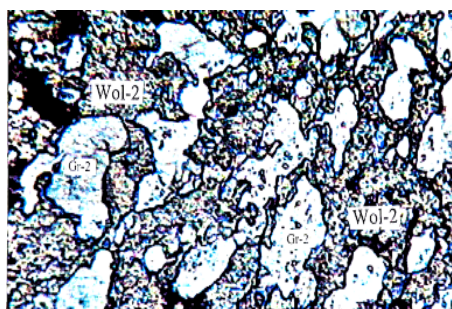
- (۱) ولاستونیت، گارنت، هیدروگروسولار؛
- (۲) ولاستونیت، وزوویانیت، گارنت، ملی‌لیت، هیدروگروسولار؛
- (۳) گارنت، ملی‌لیت، وزوویانیت.

ولاستونیت‌ها به دو شکل مختلف قابل مشاهده‌اند:

الف) ولاستونیت‌های منشوری بزرگ تا کوچک با ماکل چند ترکیبی و بافت گرانوبلاستیک قابل رویت هستند (شکل ۲). این ولاستونیت‌ها در مواردی بافت چند پهلوی (با زاویه 120°) را نیز به وضوح نشان می‌دهند (ولاستونیت‌های شکل اول). همچنین گارنت‌های همسانگرد که قطعات پراکنده ولاستونیت را فرا گرفته‌اند، بیانگر بافت پورفایروبلستیک و پوئی کیلو بلاستیک هستند (شکل ۳). ولاستونیت‌های اخیر تا حدودی کشیده و نیز شعاعی دیده شده‌اند.



شکل ۲ بافت گرانوبلاستیک در ولاستونیت‌های شکل اول XPL (طول میدان دید ۱ mm). Gr-1: گارنت شکل اول. Wol-1: ولاستونیت شکل اول.

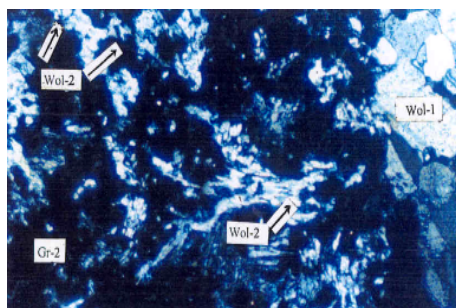


شکل ۳ ولستونیت با بافت پوئی کیلوبلاستیک،
ادخالهای فنوبلاست، گارنت هستند (طول
میدان دید ۱ mm). Gr-2: گارنت شکل دوم.
Wol-2: ولستونیت شکل دوم.

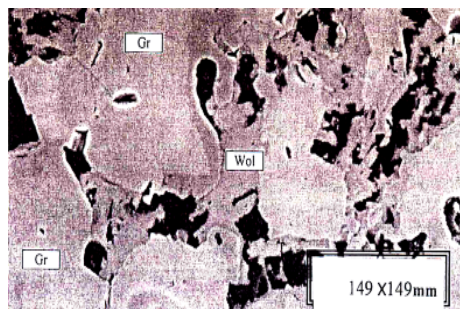
ب) ولستونیت‌های رشته‌ای و ریزدانه که منحصراً همراه با گارنت یافت می‌شوند
(شکل‌های ۴ و ۵) و در مجموع یک بافت سیمپلکتیت را نشان می‌دهند. این مجموعه در ظاهر
به خرج کانی ملیپت شکل گرفته است (ولستونیت شکل ۲).

گارنت‌ها کاملاً همسانگردند. این کانی‌ها در دو مرحله شکل گرفته اند:

الف- گارنت‌های بزرگ و بی‌شکل که فضای خالی بین بلورهای کشیده ولستونیت را اشغال
کرده‌اند (گارنت شکل اول) و بافت میان کانیها را نشان می‌دهند. کرانه‌های ناپایدار (گرد شده و
کنگره‌دار) ولستونیت با گارنت به‌خوبی نشان می‌دهد که گارنت‌ها نسبت به ولستونیت تاخیری
هستند و در حقیقت ولستونیت‌ها از حاشیه به گارنت تبدیل شده‌اند (شکل ۳). در مواردی بافت
آتولی^۱ از گارنت داخل ولستونیت نیز کاملاً مشهود است.



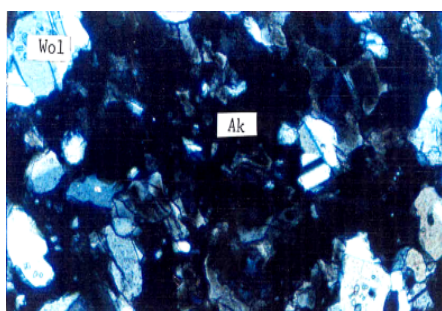
شکل ۴ ولستونیت‌های رشته‌ای (wol-2)
همراه با گارنت شکل دوم (Gr-2). در گوشه
سمت راست بالای شکل، ولستونیت‌های شکل
اول (wol-1) مشخص است. (طول میدان
دید ۱ mm)



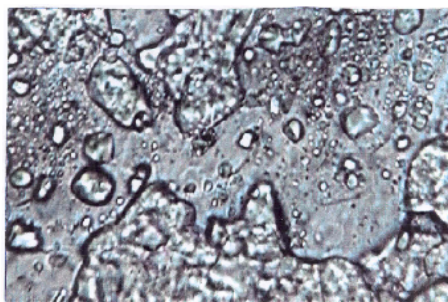
شکل ۵ تصویر BSE از مجموعه گارنت-ولاستونیت سیمپلکتیت گروسولار (Gr) و ولاستونیت (Wol).

ب- گارنت‌های ریزدانه بی‌شکل که همراه با ولاستونیت‌های سیمپلکتیت شکل دوم به‌جای ملیلیت نشسته‌اند (شکل ۴). ملیلیت‌ها نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل (شکل ۶)، با رنگ تداخلی غیرعادی و ترکیب متوسط $\text{Na-me}9.16$ $\text{Ge}12.683$ $\text{Fe-ak}1.6$ $\text{Ak}76.162$ هستند. همچنین آنالیز ریزگمانه وجود مقادیر قابل توجهی سودا-ملی‌لیت (حدود ۱۰ درصد وزنی) و مقدار کمی فرو-آکرمائیت در ترکیب ملی‌لیت را نشان می‌دهد (جدول ۱).

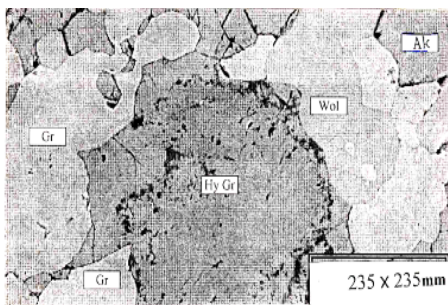
ملیلیت‌ها بیشتر دارای بلورهای گردگارنت و کمتر ولاستونیتند (بافت گرانوبلاستیک). این گارنت‌ها در برخی موارد بافت اتولی نشان می‌دهند (شکل ۷). گردشگی کرانه‌های گارنت‌ها که به وسیله ملی‌لیت‌ها محاط شده‌اند بیانگر شکل‌گیری این فازها به خرج گارنت است (شکل ۸). محصول دگرسانی ملی‌لیت‌ها، هیدروگروسولار (شکل ۸)، مجموعه سیمپلکتیت گارنت - ولاستونیت، و همچنین وزوویانیت و اجسام رشته‌ای قهوه‌ای سبولیت هستند. کلیه روابط متقابل کانی‌ها (پاراژنتیکی) در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۶ مجموعه ملیت‌های بی شکل بارنگ انترفرانس غیرعادی (Ak) همراه با ولاستونیت (Wol). تبدیل ناتمام ولاستونیت به ملیت قابل مشاهده است (طول میدان دید ۱ mm).



شکل ۷ گارنت بابافت آتولی در زمینه ولاستونیت (طول میدان دید ۱/۲ mm).



شکل ۸ تصویر BSE از دگرسانی ملیت به هیدروگروسولار. Gr: گروسولار. HyGr: هیدروگروسولار. Wol: ولاستونیت. Ak: اکرمانیت.

جدول ۱ آنالیزهای میکروپروب کانی‌های سازنده زینولیت.

در صد اکسید	ملی لیت			پیروکسن			گارت		
SiO ₂	۴۰/۸۸	۴۱/۶۷	۴۱/۱۸	۵۰/۴۳	۵۱/۸۱	۵۰/۵۲	۳۷/۸۰	۳۸/۶۱	۳۴/۸۸
TiO ₂	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۷۷	۰/۴۲	۰/۰۲
Al ₂ O ₃	۶/۶۴	۵/۹۷	۶/۵۰	۰/۶۶	۰/۰۴	۰/۱۳	۱۵/۶۴	۱۵/۰۹	۱۴/۱۲
Fe ₂ O ₃	۰/۵۹	۰/۰	۰/۰	۰/۶۵	۰/۱۷	۰/۱۳	۹/۶۲	۱۰/۳۳	۰/۴۴
FeO	۰/۰	۰/۵۹	۰/۵۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
MnO	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۰۵
MgO	۱۱/۰۳	۱۱/۲۴	۱۱/۰۸	۰/۱	۰/۱۳	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۴۰	۶/۹۷
CaO	۳۹/۷	۳۹/۵۳	۳۹/۲۹	۴۷/۴۴	۴۸/۴۵	۴۷/۶۳	۳۵/۸۰	۳۶/۰۴	۳۷/۲۰
BaO	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Na ₂ O	۱/۰۴	۱/۰	۱/۰	۰/۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰
K ₂ O	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Total	۱۰۰/۰۲	۱۰۰/۱۲	۹۹/۷۲	۹۹/۴۱	۱۰۰/۷۳	۹۸/۹۴	۱۰۰/۱۹	۱۰۱/۰۱	۹۳/۶۷
عناصر (ppm)	براساس ۷ اکسیژن			براساس ۶ اکسیژن			براساس ۱۲ اکسیژن		
Si	۱/۸۵۵	۱/۸۷۷	۱/۸۷۲	۱/۹۶۶	۱/۹۹۱	۱/۹۷۸	۲/۹۳۸	۲/۹۸۰	۲/۸۷۶
Ti	۰/۰	۰/۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰	۰/۰۴۵	۰/۰۲۴	۰/۰۰۱
Al IV	۰/۳۵۵	۰/۳۱۹	۰/۳۴۶	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۰۶	۰/۰۶۲	۰/۰۲۰	۰/۰۱۲۴
Al VI	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱/۳۷۰	۱/۳۵۲	۱/۲۴۸
Fe ³⁺	۰/۰۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰۱۹	۰/۱۷	۰/۰۰۴	۰/۵۶۲	۰/۶۰۰	۰/۰۲۷
Fe ²⁺	۰/۰	۰/۰۲۲	۰/۰۱۹	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Mn ²⁺	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۴	۰/۰	۰/۰۰۴	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳
Mg	۰/۷۴۶	۰/۷۵۹	۰/۷۴۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷	۰/۰۲۹	۰/۰۵۷	۰/۰۴۶	۰/۸۵۷
Ca	۰/۹۳۰	۰/۹۱۸	۱/۹۲۴	۱/۹۸۲	۱/۹۹۵	۱/۹۹۸	۲/۹۸۱	۲/۹۷۹	۳/۲۸۷
Total	۵/۰۰۳	۴/۹۹۸	۴/۹۹۹	۴/۰۰۷	۴/۰۰۴	۴/۰۱۷	۸/۰۲	۸/۰۱	۸/۴۲۳
Aker.	۷۵/۸۹	۷۶/۸۶	۷۵/۷۳۶	-	-	-	-	-	-
Fe-aker	۰/۳۱۲	۲/۲۷۶	۲/۱۹۳	-	-	-	-	-	-
Gehle.	۱۳/۳۶۵	۱۱/۶۰۱	۱۳/۰۳۸	-	-	-	-	-	-
Na--Mel.	۹/۴۰۷	۹/۰۶۱	۹/۰۳۴	-	-	-	-	-	-
Pyr.	-	-	-	-	-	-	۱/۸۸۱	۱/۵۳۱	۲۰/۶۶۷
Spe.	-	-	-	-	-	-	۰/۱۴۳	۰/۲۴۸	۰/۰۸۲
And.	-	-	-	-	-	-	۲۸/۴۳۲	۳۰/۳۵۴	۲/۱۴۵
Gro.	-	-	-	-	-	-	۹/۵۴۴	۶۷/۸۶۷	۷۷/۱۰۷
Wol (ca)	-	-	-	۹۹/۷۰۳	۹۹/۶۳۱	۹۸/۵۷	-	-	-
Ens (Mg)	-	-	-	۰/۲۹۷	۰/۳۶۹	۱/۴۲۱	-	-	-

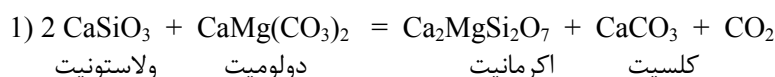
جدول ۲ روابط پاراژنتیکی کانی‌ها در زینولیت‌های کالک - سیلیکاته منطقه مورد مطالعه.

مراحل کانیها	دگرگونی پیشرونده			دگرگونی قهقراپی
	I	II	III	
ملی لیت			—	
گروسولار				—
ولاستونیت	—			—
وزوویانیت				—
هیدروگروسولار				—
سبولیت				—

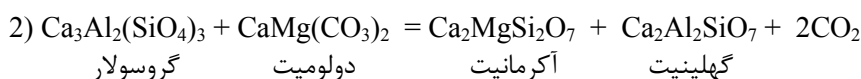
بحث و برداشت

بوون^۲ [۵] نشان داد که دگرگونی آهکها و دولومیت‌های سیلیسی با افزایش دما سکانس کانی‌های تالک، ترمولیت، دیوپسید، فورستریت، ولاستونیت، پریکلاز، مونتی سیلیت، اکرمانیت، تیلی‌ایت، اسپاریت، رنکینیت، مرونیت و لارنیت را به وجود می‌آورد. اکرمانیت محصول دگرگونی همجواری گرمایی بالا و فشار پائین است که معمولاً با گهلنیت به صورت بلورهای هم‌رشدی ریزدانه دیده می‌شوند [۱۱]. گهلنیت به صورت محلول جامد کامل با اکرمانیت و ناقص با سودا-ملی‌لیت یافت می‌شود.

بررسی سنگ‌شناسی زینولیت‌های کالک-سیلیکاته منطقه شیرکوه نشان می‌دهد که ملی‌لیت‌ها احتمالاً به خرج ولاستونیت و گارنت و ضمن واکنش‌های زیر شکل گرفته‌اند:

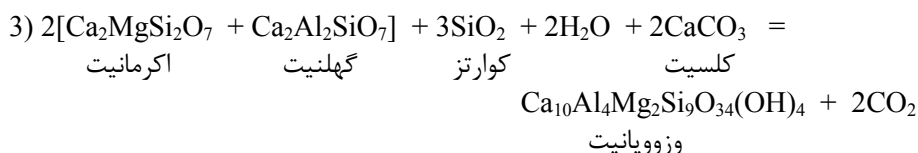


وجود مقادیر ناچیز کلسیت به صورت آزاد تأییدی بر وقوع واکنش فوق است.



چنانکه گفته شد، گردشگی گارنت به‌وسیله ملی‌لیت نیز بیانگر وقوع واکنش ۲ است. لذا هر دو واکنش ۱ و ۲ به احتمال بسیار زیاد در تشکیل ملی‌لیت نقش داشته‌اند.

ذکر این نکته ضروری است که بازمانده‌های تحلیل نرفته گارنت داخل ملی‌لیت خیلی فراوان‌تر از بازمانده‌های ولاستونیت است (شکل ۷). به‌نظر می‌رسد که برای تشکیل ملی‌لیت ساختار رشته‌ای ولاستونیت جهت نفوذ شاره‌های گرمایی مناسب‌تر از ساختار همسانگرد گارنت باشد. علاوه بر آن ملی‌لیت‌ها کاملاً از شکل و بافت ولاستونیت‌ها (پزدومورف ولاستونیت) پیروی می‌کنند (شکل‌های ۶ و ۷) و با توجه به ترکیب ملی‌لیت^۳ احتمال وقوع واکنش ۱ بیشتر است. شکل‌گیری وزوویانیت به خرج ملی‌لیت را می‌توان با واکنش زیر توجیه کرد:

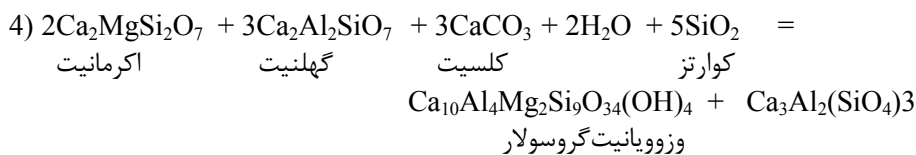


هجوم شاره‌های حاوی سیلیس و آب تنها از طریق توده گرانیته تأخیری امکان پذیرفته است. کلسیت نیز در محیط دگرگونی همجواری و بر اثر وقوع واکنش ۱ در دسترس است.

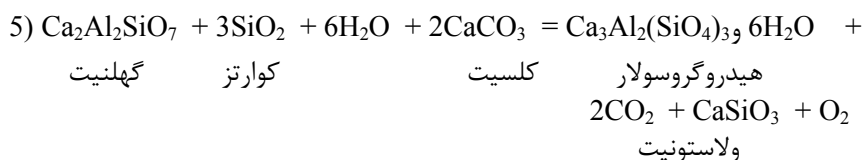
2- Bowen

3- Ak76.162Fe-ak1.6Ge12.683 Na-me9.16

واکنش زیر همیافتی گارنت-وزوویانیت به‌جای ملی‌لیت را توجیه می‌کند:



مجموعهٔ سیمپلکتیت گارنت-ولاستونیت (شکل ۵) بجای ملی‌لیت را می‌توان توسط واکنش زیربخوبی توجیه نمود (دراین جا تنها سازه گهلنیت واردواکنش می‌شود):



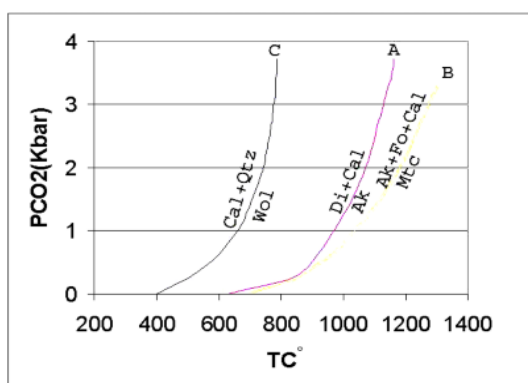
وجود مجموعهٔ مینرالی زینولیت‌های کالک - سیلیکاته در منطقهٔ مورد مطالعه حاکی از دو پاراژنز متفاوت است. پاراژنز مربوط به سری دگرگونی پیشرونده و پاراژنز سری دگرگونی پسرونده. در سری پیشرونده، پاراژنز خشک و حرارت بالا (رخسارهٔ پیروکسن - هورنفلس) و در سری پسرونده پاراژنز آبدار (رخسارهٔ هورنبلند-هورنفلس) شکل گرفته است.

سری پیشرونده در شرایط اوج دگرگونی حرارتی حاصل از جایگیری باتولیت گرانودیوریتی شیرکوه صورت گرفته است. در این مرحله نسبت $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ در سیال بالا بوده است. CO_2 مورد نیاز دگرگونی پیشرونده بطور یقین از بخش‌های آهکی سازند نایبند-شمشک تأمین شده است. حین این فرایند، واکنش‌های کربن زدائی (واکنش‌های ۱ و ۲) صورت گرفته است. در فرایندهای دگرگونی پسرونده نسبت $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ پس از تبلور توده آذرین شیرکوه رو به افزایش گذاشته است و باعث وقوع واکنش‌های آبیگری (واکنش‌های ۳، ۴ و ۵) شده است. در واقع در فرایندهای دگرگونی پیشرونده، نقش CO_2 برنقش H_2O فزونی داشته است. تشکیل کانی‌های وزوویانیت و هیدروگروسولار حکایت از نقش فعال آب در فرایندهای دگرگونی پسرونده دارد. با بررسی واکنش‌های دگرگونی انجام یافته در شکل‌گیری پاراژن‌های زینولیت‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که مرحلهٔ اول دگرگونی پیشرونده با خروج CO_2 همراه بوده است. آکرمانیت و کلسیت بخرج دولومیت و ولاستونیت پدید آمده‌اند، که این واکنش در حرارت بیش از ۶۰۰ درجه سانتیگراد و فشار CO_2 در بازهٔ ۱ تا ۴ کیلو بار به وقوع پیوسته است (نمودار ۱) [۱۳].

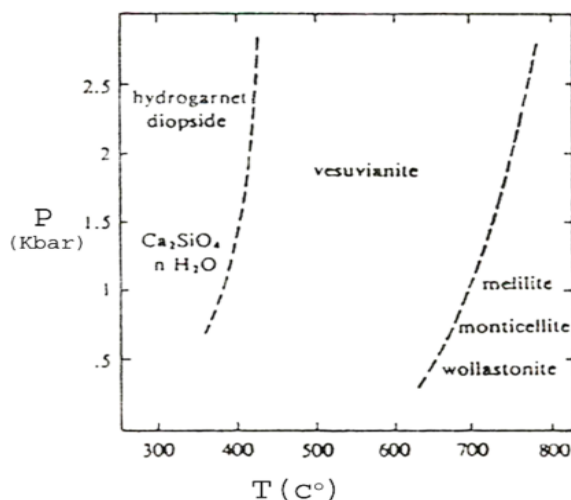
عدم یافت مونت سیلیت در این پاراژنز نشان از سه احتمال زیر دارد:

- ۱- حرارت برای پدید آمدن مونتی سیلیت احتمالاً کافی نبوده است.
- ۲- منیزیم مورد نیاز برای تشکیل مونتی سیلیت (مطابق واکنش ۱) در دسترس نبوده و تمام منیزیم موجود صرف تشکیل آکرمانیت شده است.
- ۳- فقدان نمونه‌های کافی در مشاهدات صحرایی جهت مطالعات پتروگرافی و شناسائی کامل پاراژنرها.

در مرحله دگرگونی پسروده در اثر تبلور باتولیت و خروج CO_2 از طریق درزه‌ها و شکاف‌های سنگ میزبان، غلظت CO_2 رو به کاهش گذاشته است، و در ضمن هجوم آب از بخش‌های داخلی باتولیت نیز باعث رقیق شدن CO_2 شده است. در این میان، واکنش‌های پسروده موجب تشکیل کانی‌های وزوویانیت و هیدروگروسولار شده است (نمودار ۲) [۱۴]. در این شرایط، کانی شاخص حرارت بالا (ملی‌لیت) در دماهای حدود ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد و فشار بخار آب ۴/۸ تا ۶ کیلو بار ناپایدار شده و فرآورده‌های دگرسان شده را فراهم نموده است.



نمودار ۱ منحنی P-T تشکیل
ولاستونیت، آکرمانیت و مونتی سیلیت
در سیستم CMS(CO_2).
(اقتباس از [۱۳]).



نمودار ۲ منحنی P-T تشکیل
وزوویانیت در محیطی با آب خالص و
عاری از آلکالی برای ترکیب
 $\text{Ca}_{20}\text{Al}_8\text{Mg}_4\text{Si}_8(\text{OH})_{6.n}\text{H}_2\text{O}$.
(اقتباس از [۱۴]).

قدردانی

آنالیز میکروپروب کانی‌های زینولیت‌ها در بخش زمین شناسی دانشگاه اکلاهما سیتی آمریکا انجام گرفته است که بدین وسیله از آقای دکتر جورج مورگان (G. Morgan) برای انجام آنالیزها، و از پروفسور چارلز گیلبرت (C. Gilbert) که هزینه آنها را تأمین کرده‌اند قدردانی می‌شود. از داوران محترم مجله که جهت اصلاح این مقاله نکات علمی چندی را تذکر دادند نیز سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

- [1] Greenwood R., "Wollastonite: Stability in $H_2O - CO_2$ mixtures and occurrence in a contact metamorphic aureole near Salmo, British Columbia, Canada", American Mineralogists **52** (1967) pp. 1669-1689 .
- [2] Spear F.S., "Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time path", Mineralogical Society of America **32** (1995) pp. 447-467.
- [3] Ferry J.M., "Dehydration and decarbonation reactions as a record of fluid infiltration", Mineralogical Society of America **26** (1991) pp. 352-393.
- [4] Wallmach T., Hatton C.J., Dewall S.A., Gibson R.L., "Retrogressive hydration of calc-silicate xenoliths in the eastern Bushveld Complex: evidence for late agmatic fluid movement", Journal of African Earth Science **21(4)** (1995) pp. 633-646.
- [5] Bowen N.L., "Progressive metamorphism of siliceous limestone and dolomite", Journal of Geology **48** (1948) pp. 225-274.
- [6] Stocklin J., "Structural history and tectonic of Iran, A review", American Association of Petroleum Geologists Bulletin **52(7)** (1968) pp. 1129-1258.
- [7] Assereto R., "The Jurassic Shemshak Formation in Central Iran", Review Italia Paleontological Stratigraphy **72(4)** (1966) pp. 1133-1182.

- [۸] نبوی م.ح.، دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی ایران (۱۳۵۵) ص ۱۱۰.
- [۹] سبزه‌ای م.، روشن روان ج.، ناظم زاده ش.م.، علایی م.س.، "اکتشاف فلدسپات و کائولن در منطقه یزد"، سازمان زمین‌شناسی ایران (مرکز کرمان)، گزارش داخلی (۱۳۶۵) ص ۶۱.
- [10] Khalili M., "*Petrography, mineral-chemistry and geochemistry of Shir-Kuh granite SW of Yazd, Central Iran*", Ph.D dissertation, University of Hamburg (1997) p. 148.
- [11] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., "*Rock Forming Minerals*", Longman (1986) p. 629.
- [12] Ferry J.M., Burt G., "*Characterization of metamorphic fluid composition through mineral equilibria*", Mineralogical Society of America **10** (1982) pp. 207-262.
- [13] Tracy R., Frost B.R., "*Phase equilibria and thermobarometry of calcareous ultramafic and mafic rocks and iron formation: In contact metamorphism*", ed. by Kerrick D.M., Mineralogical Society of America Review in Mineralogy **26** (1991) pp. 207-289.
- [14] Ito J., Arem J.E., "*Idiocrase: Synthesis, phase relation and crystal chemistry*", American Mineralogists **55** (1970) pp. 880-912.