



IRANIAN SOCIETY of
CRYSTALLOGRAPHY
and MINERALOGY

Vol. 16, No. 2, summer 1387/2008

IRANIAN JOURNAL OF
CRYSTALLOGRAPHY
and MINERALOGY

Mineral chemistry and P-T estimation of formation of cummingtonite and coexisting minerals in the calc-silicate rocks from the Takht-e-Soleyman area, NW Iran

R. Hajialioghli¹, M. Moazzen¹, A. Jahangiri¹, G.T.R. Droop², R. Bousquet³

1- Department of Geology, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- School of Earth, Atmospheric and Environmental Sciences, University of Manchester, Oxford Road, Manchester, M13 9PL, UK

3- Institut für Geowissenschaften, Universität Potsdam, Postfach 601553, D-14415 Potsdam, Germany
Email: r_hajialioghli@yahoo.co.uk

(Received: 20/5/2007, in revised form: 22/12/2007)

Abstract: The calcareous rocks in the Takht-e- Soleyman area (NW Iran) crop out in association with a variety of metamorphic rocks including amphibolites, granitic gneisses, pelitic schists and meta-ultramafic rocks. Retrogressive metamorphism of these rocks occurred during decompressional cooling during exhumation. Cummingtonite-bearing rocks resulted from retrogression of the calc-silicates in the area. Their dominant mineral assemblage is plagioclase + garnet + calcic – amphibole + ferromagnesian – amphibole + quartz + calcite ± titanite ± epidote. Calcic - and ferromagnesian - amphiboles were determined by petrographical observations and EMPA analysis. Hornblende and cummingtonite compositions dominate the analysed amphiboles. Formation of Ca-poor cummingtonite coexisting with calcite and calcic - hornblende in the retrograde calc - silicates of the Takht-e-Soleyman area is a rare petrological occurrence. Thermometric estimates using mineral compositions of cummingtonite co-existing with hornblende is in the range of 550 - 600 °C. Al in hornblende barometry yields a pressure of 6.5 ± 0.6 kbar, corresponding to medium pressure amphibolite facies.

Keywords: Takht-e-Soleyman area, retrograde metamorphism, calc-silicates, cummingtonite, P-T conditions.



بررسی ترکیب شیمیایی و شرایط P-T تشکیل کامینگتونیت و کانیهای همراه در سنگهای کالک-سیلیکات منطقه تخت سلیمان، شمال غرب ایران

رباب حاجی علی اوغلی^۱، محسن مؤذن^۱، احمد جهانگیری^۱، ج. دروپ^۲، ر. بوسکو^۳

۱- دانشگاه تبریز، گروه زمین شناسی

۲- دانشگاه منچستر، دانشکده علوم زمین

۳- دانشگاه پتسدام، مرکز تحقیقات علوم زمین

r_hajialioghli@yahoo.co.uk

(دریافت مقاله: ۱۳۸۶/۲/۳۰ ، نسخه نهایی: ۱۳۸۶/۱۰/۱)

چکیده: سنگهای آهکی تخت سلیمان متشکل از مرمرها و کالک-سیلیکاتها در شمال غرب ایران به همراه انواع سنگهای دگرگون شامل آمفیبولیت، سنگهای متا-اولترامافیک، گنیس گرانیت و شیستهای پلیتی رخمنون دارند. سنگهای کالک-سیلیکات کامینگتونیت دار در منطقه مورد مطالعه حاصل فرایندهای دگرگونی پسروندی به دلیل بالا آمدگی سنگها در شرایط کاهش فشار و دما هستند. مجموعه کانیهای دگرگونی پسروندی در این سنگها عبارتند از پلازیوکلаз + گارنت + آمفیبول کلسیک + آمفیبول فرومیزین + کوارتز + کلسیت ± تیتانیت ± اپیدوت. ترکیب شیمیایی انواع کانیهای آمفیبول در سنگهای کالک-سیلیکات مورد مطالعه با استفاده از تجزیه EMPA مشخص شد. هورنبلند و کامینگتونیت به ترتیب ترکیب اصلی کانیهای آمفیبول کلسیک و آمفیبول فرومیزین را تشکیل می‌دهند. کامینگتونیت آمفیبول فقیر از کلسیم است و همزیستی آن با کلسیت و هورنبلند غنی از کلسیم در سنگهای کالک-سیلیکات منطقه تخت سلیمان از پدیدهای نادر و بسیار جالب در مطالعات سنگ شناختی در زمین‌شناسی است. دما سنجی براساس ترکیب شیمیایی کانیهای کامینگتونیت همزیست با گارنت دمای تشکیل $C^0 = 550 - 600$ را نشان می‌دهد. فشار دگرگونی با استفاده از مقدار Al در ترکیب هورنبلند در حدود $6/5 \pm 0/6$ کیلوبار محاسبه شد. دما و فشار به دست آمده با شرایط رخساره آمفیبولیت با فشار متوسط سازگاری دارد.

واژه‌های کلیدی: شمال غرب ایران، منطقه تخت سلیمان، سنگهای کالک-سیلیکات، دگرگونی پسروندی، کامینگتونیت، شرایط دما و فشار.

مجموعه دگرگونی کمپلکس تخت سلیمان، از انواع سنگهای دگرگون مرمر، کالک-سیلیکات، آمفیبولیت، گنیس و میکاشیست تشکیل شده است. این سنگها طی بالا آمدگی پوسته قاره‌ای در شرایط کاهش فشار و دما به صورت پسروندی، دگرگون شده‌اند.^۱ پیدایش کامینگتونیت در سنگهای کالک-

مقدمه

منطقه تخت سلیمان در شمال شرق تکاب (شمال غرب ایران) و حد فاصل عرضهای جغرافیایی $30^{\circ} 37^{\circ}$ و $30^{\circ} 36^{\circ}$ شمالی و طولهای جغرافیایی $45^{\circ} 47^{\circ}$ و $47^{\circ} 5^{\circ}$ شرقی قرار گرفته است. این منطقه در تقسیم بندی ساختاری ایران بخشی از زون سنندج-سیرجان در نظر گرفته شده است [۱].

به صورت دگرشیب (با مرز گسله) با سنگهای ته نشستی و ته نشستی-آواری الیکو-میوسن پوشانیده شده است (شکل ۱). منطقه تحت سلیمان به دلیل دارا بودن تنوع بالای از سنگهای دگرگون و نیز ویژگیهای ساختاری پیچیده، توسط پژوهشگران مختلف به زونهای ساختاری متفاوتی نسبت داده شد. این منطقه در تقسیم بندی ارائه شده توسط [۶]، بخشی از زون ایران مرکزی در نظر گرفته شد. [۷] منطقه تکاب را به زون سلطانیه-میشو نسبت داده است. در نقشه زمین‌شناسی تحت سلیمان [۸]، این منطقه در برخوردگاه زونهای ساختاری سندنج-سیرجان، ایران مرکزی و البرز-آذربایجان واقع شده است. بر پایه مطالعات اخیر [۱، ۹] منطقه مورد مطالعه در زون سندنج-سیرجان در نظر گرفته شده است (شکل ۱).

سن تشکیل انواع سنگهای دگرگون و نفوذ توده‌های آذرین در مجموعه دگرگون تحت سلیمان تا کنون به طور دقیق مشخص نشده است. سنین قدیمی (پرکامبرین) [۸] نسبت داده شده به انواع سنگهای دگرگون و آذرین منطقه تحت سلیمان بر پایه شواهد فسیل‌شناسی، چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی است.

مطالعات صحرائی

مرمرها و سنگهای کالک-سیلیکات تحت سلیمان با یک روند شمال غرب-جنوب شرق به صورت میان لایه‌ای با سنگهای آمفیبولیت و متا-اولترامافیک، بروزد شده‌اند (شکل ۱). مرمرها با رخمنون سفید رنگ و بیش از ۹۰٪ حجمی سنگ از دانه‌های بلورین کلسیت با بافت گرانوبلاستیک متوسط دانه تا درشت دانه تشکیل شده است. موسکوکیت، فلوگوپیت، و بیوتیت در مقادیر فرعی در برخی از مرمرها مشاهده می‌شوند. سنگهای کالک-سیلیکات به رنگ خاکستری تا خاکستری تیره بوده و دارای ناخالصی‌هایی از Al و Si در قالب کانیهای سیلیکات آلومینیم (مانند پلازیوکلاز و گارنت) هستند (جنوب روستای بنفسه دره سی، شکل ۱). بلورهای درشت دانه گارنت تا اندازه ۵ میلی متر، در نمونه‌های دستی این سنگها مشخص است. سمتگیری موازی کانیهای آمفیبول پیرامون پورفیروبلاست‌های گارنت، موجب بریدگی شده است. کانیهای اپیدوت و تیتانیت در مقادیر کم در این سنگها تشکیل شده‌اند.

سیلیکات حاصل فرایندهای دگرگونی پسرونده است. کامینگتونیت در سنگهای دگرگون به دلایل زیر دارای اهمیت است؛

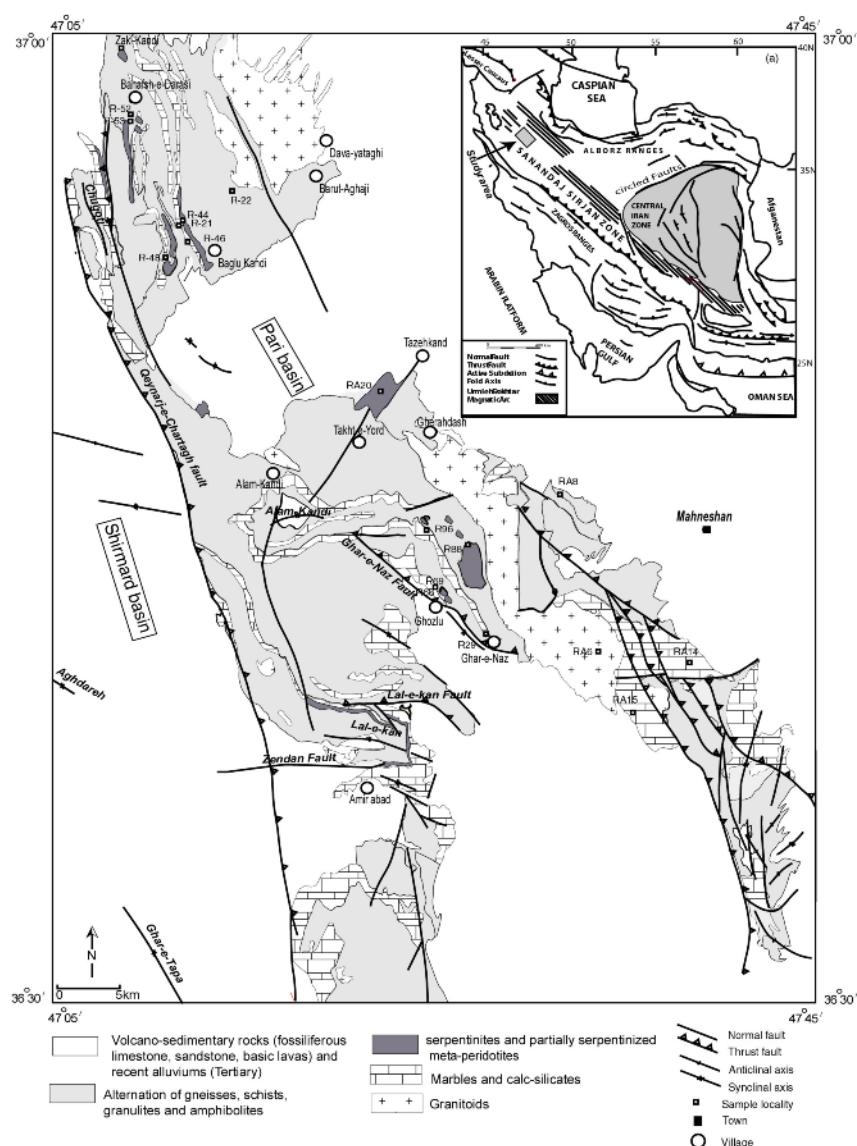
(۱) تشکیل کامینگتونیت در تعیین خاستگاه سنگزایی و ترکیب شیمیایی پروتولیت اولیه اهمیت دارد [۲، ۳]. خاستگاه کانیهای آمفیبول فرومیزین سری کامینگتونیت-گرونریت، عموماً پروتولیت‌های غنی از ترکیب‌های Mg و Fe (مانند سنگهای آمفیبولیت فقیر از کلسیم، سنگهای پلیتی فقیر از پتاسیم، گابروهای اورالیت شده و سازندهای غنی از آهن یا تشکیلات آهن نواری) هستند [۳].

(۲) گستره پایداری کامینگتونیت توسط بسیاری از پژوهشگران (مثل [۴، ۵]) به طور معمول در گستره فشار پائین/ فشار متوسط تا فشار بالای رخساره آمفیبولیت^۲ در نظر گرفته شده است.

در این کار پژوهشی روابط سنگ شناختی و بافتی کانی‌های دگرگون در سنگهای کالک-سیلیکات کامینگتونیت‌دار منطقه تحت سلیمان بررسی، و نیز ترکیب شیمیایی آنها از تجزیه EMPA تعیین شده است. برپایه دما‌سنجی با استفاده از ترکیب شیمیایی کامینگتونیت همزیست با گارنت، و فشار سنگی با استفاده از مقدار Al در ترکیب هورنبلنده، شرایط تقریبی دما و فشار در تشکیل سنگهای مورد مطالعه تعیین شدند. نتایج حاصل از این بررسی (همراه با بررسی‌های در دست انجام) در خصوص سنگ شناختی و سنگزایی سنگهای آمفیبولیت و متا-اولترامافیک در منطقه مورد مطالعه به بازسازی رویدادهای زمین‌شناسی در منطقه تحت سلیمان و مناطق مجاور در شمال غرب ایران کمک خواهد کرد.

زمین‌شناسی منطقه تحت سلیمان

مجموعه دگرگون تحت سلیمان از طیف سنگ شناختی گسترده از انواع سنگهای دگرگون درجه پائین تا درجه بالا شامل اسلیت، فیلیت، شیست سبز، اکتینولیت شیست، میکاشیست، گنیس، آمفیبولیت، سنگهای کالک-سیلیکات، مرمر، و متا-پریدوتیت تشکیل شده است. نفوذ توده‌های گرانیت‌ئیدی نسبتاً جوان به درون سنگهای دگرگون قدیمی در مواردی باعث دگرگونی مجاورتی سنگهای دربرگیرنده متابازیک و متابلیتی شده است. مجموعه دگرگون-آذرین تحت سلیمان



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، اقتباس از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ تخت سليمان [۷] و نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰ نشان [۲۳] با تغییرات. نقشه کوچک در سمت راست و بالا موقعیت منطقه مورد مطالعه بر اساس تقسیم‌بندی [۱] را نشان می‌دهد.

(الف) مرمرها: کلسیت کانی اصلی تشکیل دهنده مرمرها در منطقه مورد مطالعه است. بافت‌های گرانوبلاستیک و گرانوبلاستیک هم اندازه یا موزائیکی از انواع بافت‌های معمول در غالب مرمرها با درجه دگرگونی بالا هستند. کوارتز، اپیدوت، پلاژیوکلаз، زوئیزیت، ترمولیت و کانی‌های کدر در مقادیر فرعی در این سنگها وجود دارند. زیرکن، تیتانیت و آپاتیت کانی‌های کمیاب‌اند. سنگهای مرمر در منطقه تخت سليمان بر پایه مجموعه کانی‌های دگرگون در سه زیر گروه شامل فلوگوبیت-اپیدوت مرمر، ترمولیت-اپیدوت مرمر، و ترمولیت مرمر رده‌بندی شده‌اند (جدول ۱).

مطالعات سنگ شناسی

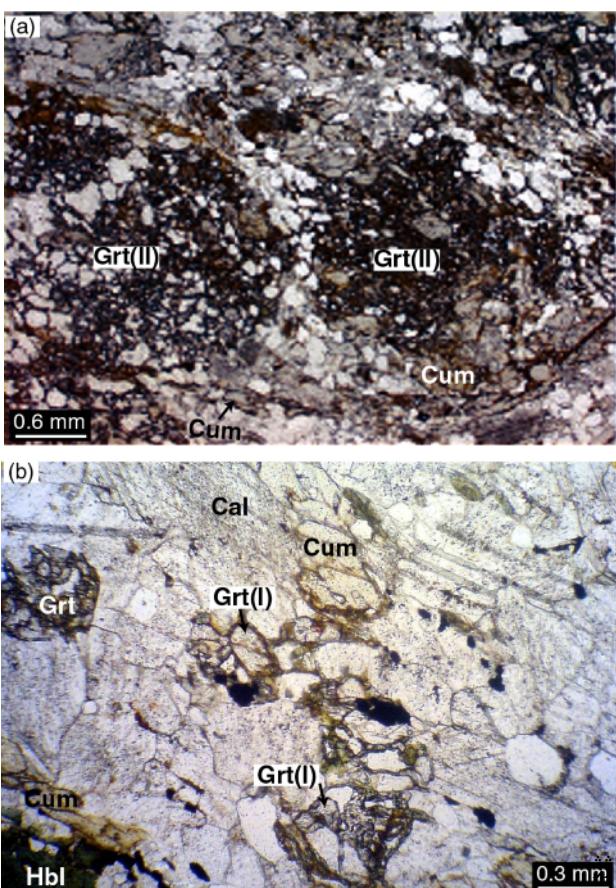
سنگهای آهکی در منطقه مورد مطالعه را بر پایه فراوانی قیاسی کانی‌های کلسیت/دولومیت به دو گروه اصلی شامل مرمرها و سنگهای کالک-سیلیکات تقسیم کرده‌ایم. بیشتر از ۹۰٪ حجمی سنگهای مرمر از کلسیت تشکیل شده است. سنگهای کالک-سیلیکات علاوه بر کلسیت دارای مقادیر بالایی از کانیهای سیلیکات آلومینیوم‌دار شامل گارنت، پلاژیوکلاز، آمفیبول، اپیدوت و تیتانیت هستند. جدول ۱ مجموعه کانیهای دگرگون مرمر و کالک-سیلیکات در منطقه تخت سليمان را نشان می‌دهد. علائم اختصاری استفاده شده برای کانیها از [۱۰] اقتباس شده‌اند.

جدول ۱ مجموعه کانیهای دگرگونی در سنگهای مرمر و کالک-سیلیکات منطقه تخت سلیمان. X: کانی اصلی، O: کانی فرعی، A: کانی دگرگونی پسروندیه. علائم اختصاری کانیها از [۱۰] است.

شماره نمونه	Cal/Dol	Hbl	Qtz	Cpx	Scp	Ol	Grt	Ep	Zo	Ms/Phl	Ttn	Cum	Act/Tr	Pl	Zrn	Opa	Ap	نام سنگ
R52	X	X	X				X	O	O		O	O	A	O	O	O	O	کالک-سیلیکات کامینگتونیت دار
R22	X	O	O					O		A	O		O	O	O	O		ترمولیت-اپیدوت مرمر
R53	X		O					O	O		O		O	O				ترمولیت-اپیدوت مرمر
RA14-b	X		O					O	O?		O		O	O		O		ترمولیت-اپیدوت مرمر
RA15-c	X		O					O			O		X	X				ترمولیت-اپیدوت مرمر
RA6-c	X		O										O	O				ترمولیت مرمر
RA8-d	X									O								فلوگوپیت مرمر
R46	X		O					O		X			O	O	O			فلوگوپیت مرمر
RA6-a	X		O	O	O?			O					O	O	O	O		فلوگوپیت-اپیدوت مرمر
R15-c	X		O					O	O		O		O	O				ترمولیت-اپیدوت مرمر
R-44	X		O					O			O		O	O	O	O		اپیدوت-فلوگوپیت مرمر
R21-b	X		O					O	O	O			O	O	O	O		اپیدوت-فلوگوپیت مرمر
R68-5	X	X	O	O	O		X	O		O	O		O?	O				اسکاپولیت-کلینوپیروکسن-گارنت کالک-سیلیکات
R66	X	X	O	O	O		X	O		O	O		O	O	O	O		اسکاپولیت-کلینوپیروکسن-گارنت کالک-سیلیکات
R69-8	O	X	O	O?			X	O	O		O		O	O				اسکاپولیت-کلینوپیروکسن-گارنت کالک-سیلیکات
R88-28	O		O	O		O		O					O	O				کالک-سیلیکات الیوین دار
R88-30	O		O	O		O	X	O	O				O	O				کالک-سیلیکات الیوین دار
R88-5	O	O	O		O		O						O	O				کالک-سیلیکات الیوین دار
R69-10	O	O	O	X?	X		X		O	O	O,A		O	O		O		اسکاپولیت-کلینوپیروکسن-گارنت کالک-سیلیکات
R29-9	O	X	O	X	O		O	O		O	O		O	O	O	O		اسکاپولیت-کلینوپیروکسن-گارنت کالک-سیلیکات
R-Bo	O	O	O	O			O		O				O					کلینوپیروکسن-گارنت کالک-سیلیکات
R88-21	O		O	O?		O							O		O			کالک-سیلیکات الیوین دار
R96-33	O	X	X	X	X		X	O	O		A,O		X	X	O	O		اسکاپولیت-کلینوپیروکسن-گارنت کالک-سیلیکات

از لحاظ سنگ شناختی و بافتی به دقت مطالعه شده بود، با ریزپردازندۀ Geoscan در دانشکده علوم زمین دانشگاه منچستر به روش EDS تجزیه شد. برنامۀ ZAF/FLS برای تبدیل سیگنالهای پرتو X به آنالیزهای اکسیدی عناصر استفاده شد. همسنجی دستگاه با استفاده از مجموعه‌ای از استانداردهای طبیعی و مصنوعی انجام شده است.

آمفیبول: کانیهای آمفیبول تجزیه شده عبارتند از آمفیبول کلسیک و آمفیبول فرومیزین. فرمول ساختاری کانیهای آمفیبول تجزیه شده در نمونه R52 به عنوان نمونه معرف در جدول ۲ آورده شد.



شکل ۲ (a) بافت پوئی کلیوبلاستیک در پورفیروblast گارنت. کانیهای کامینگتونیت، هورنبلندها و کلسیت به صورت طویل شده برگوارگی پیرامون پورفیروblast گارنت را تشکیل داده اند. PPL. (b) کانیهای گارنت دانه‌ریز و پوئی کلیوبلاستیک، آمفیبول فرومیزین، پلاژیوکلاز و کلسیت در زمینه گرانوبلاستیک، PPL.

ب) سنگهای کالک-سیلیکات: سنگهای کالک-سیلیکات علاوه بر کلسیت دارای مقادیر فراوانی از کانیهای سیلیکات آلومینیم شامل گارنت، اسکاپولیت، کلینوپیروکسن، پلاژیوکلاز، آمفیبول، ترمولیت، اپیدوت، و زوئیزیت هستند. کانیهای آمفیبول در برخی از نمونه‌ها به موازات بریدگیها سمت‌گیری کرده‌اند. نامگذاری انواع سنگهای کالک-سیلیکات پایه مجموعه کانیهای اصلی این سنگها انجام گرفته است (جدول ۱). سنگهای کالک-سیلیکات کامینگتونیت‌دار در منطقه مورد مطالعه به صورت لايهایی متناوب با سنگهای متا-اولترامافیک و آمفیبولیت تشکیل شده‌اند (نمونه R-52، شکل ۱).

مجموعه کانیهای دگرگون سنگهای کامینگتونیت‌دار عبارتند از گارنت (٪۲۰)، هورنبلندها (٪۱۰)، کامینگتونیت (٪۱۰)، کلسیت (٪۲۵)، کوارتز (٪۱۵)، پلاژیوکلاز (٪۵) و اپیدوت (٪۵). زیرکن و آپاتیت کانیهای جزئی را تشکیل می‌دهند. کانیهای گارنت در این سنگها به دو صورت مشاهده می‌شوند: (الف) گارنت بی‌شکل ریز دانه با بافت گرانوبلاستیک (GrtI) که احتمالاً با قیمانده‌هایی از گارنت تشکیل شده در شرایط اوج دگرگونی آند (شکل ۲-b). (ب) گارنت پورفیروblast (GrtII) با اندازه تقریبی ۵ میلی متر که دارای بافت پوئی کلیوبلاستیک با نفوذیهای فراوان و نسبتاً درشت دانه از کانیهای کوارتز، کلسیت و پلاژیوکلاز است (شکل ۲-b). بر پایه روابط بافتی و مجموعه کانیهای دگرگون، معلوم شد که کانیهای گارنت با بافت پوئی کلیوبلاستیک در تعادل بافتی با کانیهای کلسیت، هورنبلندها و کامینگتونیت بوده و حاصل دگرگونی پسرونده‌اند (شکل ۲-a). کلسیت به طول ۰.۶ میلی متر و کامینگتونیت به طول ۰.۸ میلی متر به موازات بریدگیها، پیرامون پورفیروblast گارنت تشکیل شده‌اند (شکل ۲-a). کامینگتونیت در نور طبیعی بی‌رنگ است و در مقاطع نازک با دو شکستی بالا و برجستگی شدید مشخص می‌شود. هورنبلندها به صورت همزیست با کامینگتونیت با بافت گرانوبلاستیک تشکیل شده است.

ترکیب شیمیایی کانیهای دگرگون
ترکیب عناصر اصلی در کانیهای گارنت، آمفیبول کلسیک، آمفیبول فرومیزین، پلاژیوکلاز و کلسیت در نمونه‌هایی که قبلاً

جدول ۲ ترکیب نماینده از انواع کانیهای دگرگون تجزیه شده در سنگ کالک-سیلیکات کامینگتونیت دار منطقه تخت سلیمان (R52). علاوه بر اختصاری کانیها از [۱۰] است.

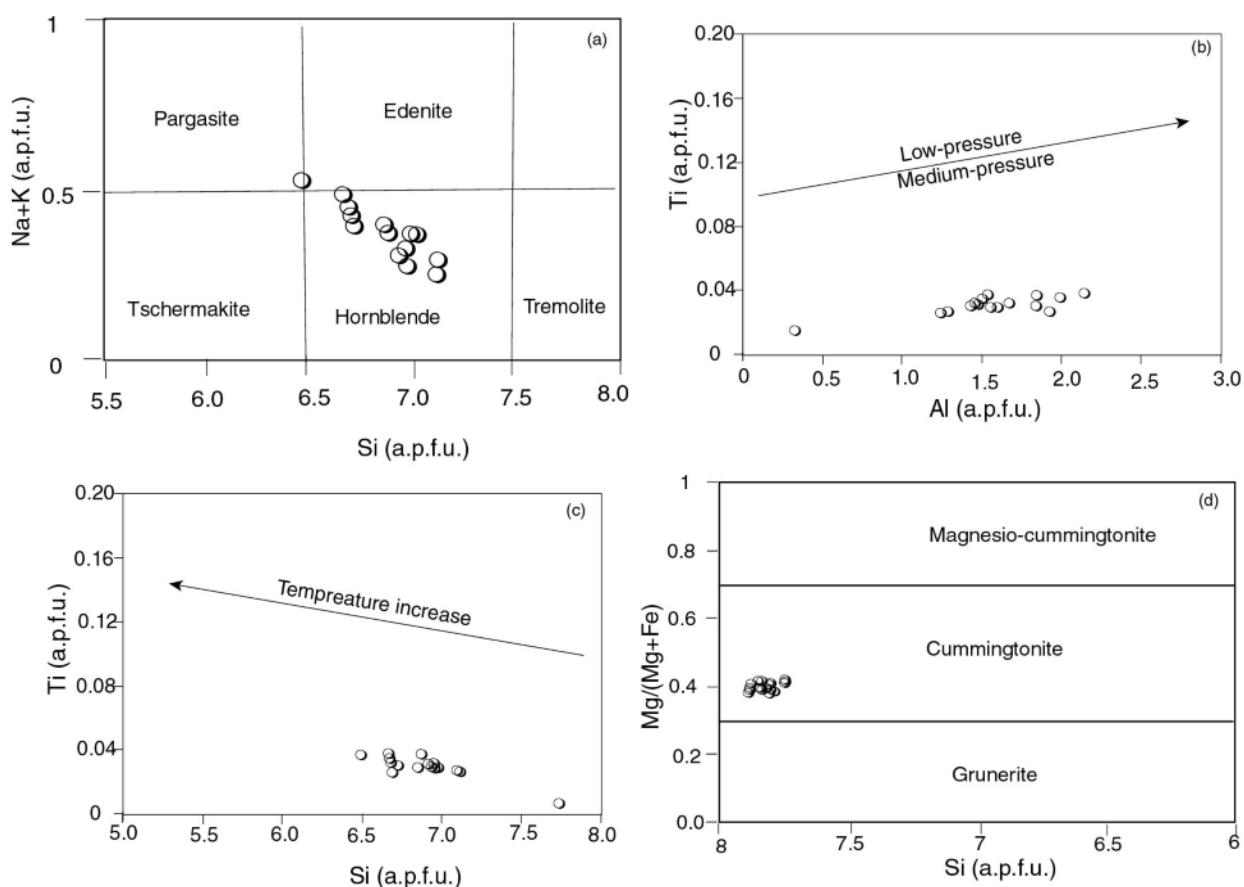
کانیهای تجزیه شده	Pl	Grt (retrograde)	Grt (relict)	Cum	Cum	Hbl	Hbl	Cal
SiO ₂	۵۵,۶۸	۳۶,۰۴	۳۶,۲۵	۴۰	,۰۲	,۰۱	,۷۷	,۰۰
TiO ₂	,۰۰	,۱۴	,۰,۰۸	۵۰	۵۰	۴۱	۴۲	,۰۰
Al ₂ O ₃	۲۷,۳۲	۲۰,۲۳	۲۰,۳۲	,۰۲	,۰۴	,۳۲	,۲۷	,۰۰
Cr ₂ O ₃	,۰۱	,۰۰	,۰۰	,۳۱	,۶۴	,۴۴	,۰۶	,۰۱
FeO	,۰۶	۲۹,۶۶	۳۲,۱۸	,۰۰	,۰۰	۱۱	۱۰	۳,۹۵
MnO	,۰۴	۴,۰۹	۳,۳۳	,۱۹	,۶۶	,۰۰۲	,۰۱	,۷۱
MgO	,۰۰	,۹۵	,۹۶	۳۳	۳۲	,۴۹	,۲۳	۱,۸۹
CaO	۹,۴۴	۷,۳۵	۶,۹۳	,۰۵۶	,۰۵۶	۲۳	۲۴	,۹۳
Na ₂ O	۶,۸۷	,۰۰	,۰۰	,۰۶	,۱۲	,۰۲۵	,۰۲۸	۵۳
K ₂ O	,۰۲۹	,۰۰	,۰۰	۱۱	۱۱	۶,۳۸	۷,۰۳	,۰۰
Sum	,۵۰	۹۹,۵۶	۹۹,۷۱	,۰۵۷	,۰۹۹	,۲۳	۹,۸۱	,۰۰
(O)	۱۰۰	۱۲	۱۲	,۰۰۵	,۰۰۶	۱۰	۱,۱۹	,۳۴
Si	۸	۵,۸۷	۵,۹۰	,۰۰	,۰۰۳	۱,۳۸	,۰۴۶	۶۰
Al	۲,۵۴	۳,۸۸	۳,۹۰	,۱۷	,۱۱	,۰۵۱	,۰۹	۱
Fe ³⁺	۱,۴۴	,۰۳۴	,۰۲۹	۹۶	۹۶	,۰۴	۹۶	,۰۰
Fe ²⁺	,۰۰	۳,۸۱	۴,۰۰	۲۳	۲۳	۹۵	۲۳	,
Ti	,۰۰	,۰۰۲	,۰,۰۱	۷,۹۰	۷,۸۴	۲۳	۶,۶۷	,۰۰
Cr	,۰۰	,۰۰	,۰۰	,۰۰۶	,۱۲	,۶,۴۹	۱,۸۵	,
Mn	,۰۰	,۰۵۶	,۰۴۶	,۰۰	,۰۰	۲,۱۳	,۰۲۸	,۰۰
Mg	,۰۰	,۰۲۲	,۰۲۳	۴,۳۵	۴,۲۸	,۰۲۹	۲,۸۴	,
Ca	,۰۰	۱,۲۸	۱,۲۱	,۰۰	,۰۰	۲,۷۸	,۰۰۳	,۰۵
Na	,۰۴۵	,۰۰	,۰۰	,۰۰	,۰۰	,۰۰۴	,۰۰	,
K	,۰۶۰	,۰۰	,۰۰	,۰۰۷	,۰۰۷	,۰۰	,۰۰۴	,۰۰
Sum	,۰۰۲	۱۶	۱۶	۲,۵۸	۲,۶۰	,۰۰۴	۱,۶۴	,
Al ^[IV]	۵,۰۳	۲,۱۳	۲,۱	,۰۱۰	,۰۱۷	۱,۵۰	۱,۶۴	,۰۰
Al ^[VI]		۱,۷۵	۱,۸۰	,۰۰۱	,۰۰۲	۱,۷۳	,۰۳۶	,
Mg/Mg+Fe		,۰۰۵	,۰۰۵	,۰۰	,۰۰	,۰۴۲	,۰۰۹	,۰۱
Al/Al+Fe ³⁺ +Cr ³⁺		,۰۹۲	,۰۹۳	۱۵,۰۸	۱۵,۱۱	,۰۱۰	۱۵,۴۵	,
(K+Na) _A						۱۵,۵۳	۱,۳۳	,۰۰۴
Na/Na+K+Ca						,۰۵۱	,۰۵۲	,۹۰
K/Ca+K+Na	,۰۵۶			,۰۳۷	,۰۳۸	,۰۶۲	,۰۳۷	,
Ca/K+Na+Ca	,۰۰۲					,۰۳۵	,۰۸۷	,۰۰
Alm	,۰۴۲	۶۴,۷۰	۶۷,۸۰			,۰۸۸	,۰۴۵	,
Prp		۹,۶۰	۷,۸۰			,۰۵۳	,۰۱۷	,۰۰
Sps		۳,۹۰	۴,۰۰			,۰۱۹	,۰۰۵	,
Grs		۲۰,۰۰	۱۹,۰			,۰۰۴	,۰۷۸	,۰۰
And		۱,۸۰	۱,۴۰			,۰۷۷		

محاسبه شده است. بر پایه رده‌بندی [۱۱] ترکیب کانیهای آمفیبول فرومینیزین تجزیه شده کامینگتونیت است (شکل ۳). مقادیر $Mg = Mg/Fe + Mg$ برابر با 0.40 ± 0.35 است. ترکیب شیمیایی کانیهای آمفیبول کلسیک و آمفیبول فرومینیزین در سنگهای کالک-سیلیکات کامینگتونیت دار منطقه تخت سلیمان در نمودارهای مثلثی $Mg-Ca-(Fe + Mn)$ نشان داده شده است (شکل ۴).

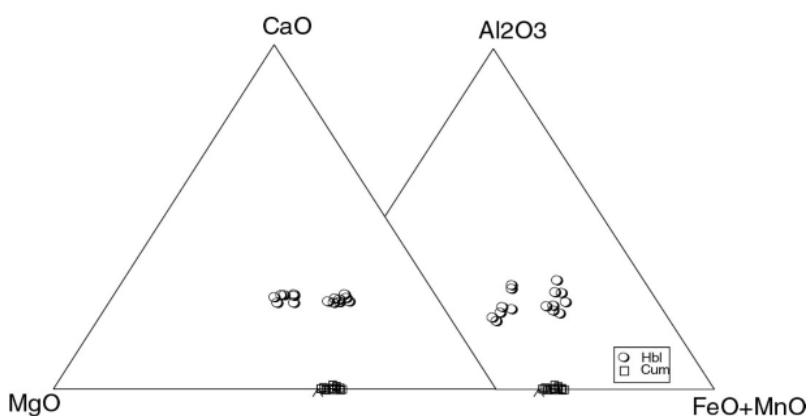
گارنت: ترکیب گارنت بی‌شکل و ریز دانه در زمینه گرانوبلاستیک تقریباً متفاوت از ترکیب گارنت پورفیروبلاست با بافت پوئی کیلوبلاستیک (گارنت دگرگون پسروند) است. مقادیر $Ca = 1.30 \text{ ppm}$ و $Mg = 0.46 \text{ ppm}$ در گارنت $Mn = 0.56 \text{ ppm}$ در گارنت $Al = 1.2 \text{ ppm}$ و پورفیروبلاست بیشتر از گارنت ریز دانه $Ca = 0.46 \text{ ppm}$ در زمینه گرانوبلاستیک بوده ولی مقادیر Mg در این کانیها در مقادیر جزئی تغییر نشان می‌دهد (جدول ۲).

آمفیبول کلسیک: مقدار Fe^{3+} بر پایه روش موازنۀ باری محاسبه شد. ترکیب کانیهای آمفیبول کلسیک در نمودار رده‌بندی [۱۱] بیشتر در گستره هورنبلند قرار می‌گیرد (شکل a-۳). ترکیب کانیهای هورنبلند از هسته به سمت حاشیه دارای تغییرات بسیار جزئی است. مقدار Ca در ترکیب هسته (۰.۷۶ a.p.f.u.) بیشتر از مقدار آن در ترکیب حاشیه (۰.۵۰ a.p.f.u.) است. مقدادر Na در ترکیب هسته (۰.۲۷ a.p.f.u.) در مقایسه با حاشیه (۰.۲۲ a.p.f.u.) نسبتاً بیشتر است. نمودارهای Si بر حسب Al و Ti بر حسب Al [۱۲] ویژگیهای فشار و دمای میانگین کانیهای هورنبلند در سنگهای کالک-سیلیکات کامینگتونیت دار منطقه تخت سلیمان را نشان می‌دهد (شکل b, c-۳).

آمفیبول فرومینیزین: جدول ۲ ترکیب کانیهای آمفیبول فرومینیزین در منطقه تخت سلیمان را نشان می‌دهد. فرمول ساختاری بر پایه ۱۵ کاتیون و ۲۳ اکسیژن با فرض نبود Fe^{3+}



شکل ۳ (a) ترکیب کانیهای آمفیبول کلسیک تجزیه شده در سنگهای کالک-سیلیکات مورد مطالعه بر پایه رده‌بندی [۱۳] (b,c) ترکیب کانیهای هورنبلند تجزیه شده در نمودارهای $Ti-Si$ و $Ti-Al$ [۱۴] (d) ترکیب کانیهای آمفیبول فرومینیزین در سنگهای کالک-سیلیکات مورد مطالعه در نمودار [۱۳].



شکل ۴ ترکیب کانیهای آمفیبول فرومینیزین و آمفیبول کلسیک در نمودار ترکیبی $\text{Mg}+\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{Fe}+\text{Mn})$ و $\text{Mg}-\text{Ca}-(\text{Fe}+\text{Mn})$

تشکیل دهنده‌هایی که فقط در تعداد محدودی از فازها وجود دارند، و نیز تشکیل دهنده‌هایی که مقادیر آنها در فازهای دگرگونی بسیار کم است، از سیستم حذف کرد بدون اینکه تغییری در روابط فازهای باقیمانده ایجاد شود. بنابراین با در نظر گرفتن قانون فاز برای ساده شدن سیستم شیمیایی سنگهای مورد مطالعه، به صورت زیر عمل کردایم:

- ۱- TiO_2 در سنگهای کالک-سیلیکات مورد مطالعه در فازهای تیتانیومدار اصلی مانند تیتانیت و ایلمنیت ذخیره شده است و مقادیر آن در ترکیب کانیهای تجزیه شده کم است. لذا از مقدار TiO_2 در سیستم چشم پوشی کردیم.

- ۲- Fe_2O_3 به صورت اصلی در اپیدوت وجود دارد و مقادیر آن در کانیهای آمفیبول و گارنت تجزیه شده کم است. Cr_2O_3 در کانیهای تجزیه شده وجود ندارد. با فرض جانشینی یونی Al_2O_3 و Fe_2O_3 می‌توان تشکیل دهنده‌های سه ظرفیتی

Al_2O_3 و Fe_2O_3 را در نمودار سازگاری با هم در نظر گرفت.

- ۳- تشکیل دهنده‌های Fe و Mg در فازهای آمفیبول، و گارنت حضور دارند با فرض جانشینی یونی Fe و Mg می‌توان این دو تشکیل دهنده را با هم در نظر گرفت. MnO در مقادیر کم در کانیهای فرومینیزین گارنت و آمفیبول حضور دارد. تشکیل دهنده‌های دو ظرفیتی MgO , FeO , MnO را می‌توان با هم در نمودار سازگاری نشان داد.

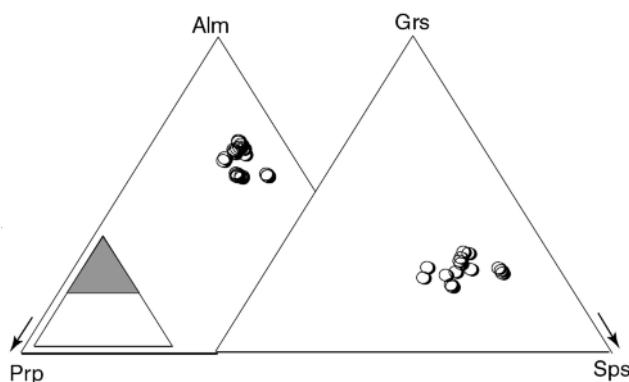
- ۴- Na_2O در مقادیر کم به صورت جانشینی با CaO در تشکیل برخی از کانی‌ها مانند پلازیوکلаз و آمفیبول، شرکت کرده است. با توجه به اینکه پلازیوکلاز در تمامی مجموعه کانی‌ها، در سنگهای مورد مطالعه وجود دارد، می‌توان تشکیل دهنده Na_2O را به صورت عضو پایانی آلیت به عنوان فاز اضافی برای این سیستم در نظر گرفت.

شواهد سنگ‌شناختی و بافتی نشان می‌دهد که گارنت بی-شکل و ریز دانه در زمینه گرانوبلاستیک بقایایی از کانیهای گارنت اولیه است ولی گارنت پورفیربلاست طی فرایندهای دگرگونی پسرونده تشکیل شده‌اند. ترکیب شیمیایی کانیهای گارنت پسرونده به صورت $\text{Grs}_{16.9-24.0}\text{Alm}_{58.3-68.6}\text{Sps}_{7.0-13.3}\text{Py}_{2.5-5.0}$ است. آندرادیت دارای مقادیر برابر با 26% - 14% است. ترکیب شیمیایی کانیهای گارنت در سنگهای کالک-سیلیکات کامینگتونیت‌دار منطقه تخت سلیمان در نمودارهای مثلثی Prp-Grs-Sps و Prp-Alm-Sps نشان داده شد (شکل ۵).

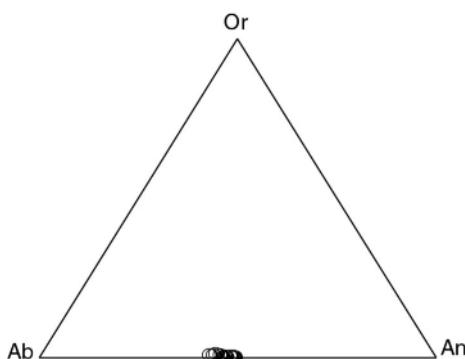
پلازیوکلاز: ترکیب کانیهای پلازیوکلاز تجزیه شده یکنواخت، و مقدار K_2O بسیار پائین ($0.01-0.02\text{ a.p.f.u.}$) است. ترکیب پلازیوکلاز در نمودار An-Or-Ab دیده می‌شود (شکل ۶).

کلسیت: کلسیت فاز کربنات اصلی در سنگهای کالک-سیلیکات مورد مطالعه است. فرمول کلسیت بر پایه 2 CaCO_3 و 3 O_2 اکسیژن به دست آمده است. مقادیر Fe و Mg در کانیهای کلسیت تجزیه شده به ترتیب در حدود 4.0 wt\% - 2.1 wt\% و 1.8 wt\% - 1.0 wt\% است. جدول ۲ ترکیب کانیهای تجزیه شده در سنگهای کالک-سیلیکات کامینگتونیت‌دار منطقه تخت سلیمان را نشان می‌دهد.

انتخاب سیستم شیمیایی مناسب برای نمایش ترکیب شیمیایی کانیهای تجزیه شده در سنگهای کالک-سیلیکات کامینگتونیت‌دار منطقه تخت سلیمان و نمایش ترکیب جمعی کانیهای سنگهای کالک-سیلیکات کامینگتونیت‌دار در نمودار ترکیبی مشکل از اجزای CaO , Na_2O , Fe_2O_3 , FeO , MnO , MgO , SiO_2 , TiO_2 , H_2O , CO_2 , Al_2O_3 است. برای ساده‌تر شدن سیستم می‌توان بر پایه قانون فاز

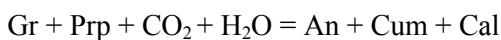


شکل ۵ ترکیب کانیهای گارنت تجزیه شده در نمودارهای Prp-Alm-Sps و Prp-Grs-Sps

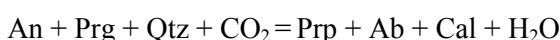


شکل ۶ ترکیب کانیهای پلاژیوکلاز تجزیه شده بر روی نمودار ترکیبی Or-Ab-An

کامینگتونیت در سنگهای کالک-سیلیکات مورد مطالعه حاصل واکنشهای شکست گارنت است. واکنش پیشنهادی برای تشکیل کامینگتونیت در سنگهای کالک-سیلیکات مورد مطالعه عبارت است از؛



واکنش بالا به سمت راست با کاهش دما همراه است. پلاژیوکلاز، کلسیت، و کامینگتونیت با تعادل بافتی در زمینه گرانوبلاستیک تشکیل شده است و بقایای گارنت به صورت بی-شکل و ریز دانه به صورت باقیمانده در آن مشاهده می‌شود. گارنت با بافت پوئی کیلوبلاستیک دارای اینکلوژن‌های فراوان از کانیهای کلسیت، کوارتز و پلاژیوکلاز نسبتاً درشت دانه است. واکنش برگشتی تشکیل گارنت با بافت پوئی کیلوبلاستیک به صورت زیر پیشنهاد می‌شود؛



۵- برای اینکه کانیهای CO_2 دار مانند کلسیت و کانیهای آبدار مانند آمفیبول را در نمودار نمایش دهیم فرض می‌کنیم که ترکیب اصلی فاز شاره‌های دگرگون H_2O و CO_2 بوده‌اند.

۶- سنگهای دگرگون مورد مطالعه دارای کوارتز و کلسیت فراوان‌اند بنابراین SiO_2 و کلسیت را می‌توان به صورت فازهای اضافی در سیستم نشان داد.

بنابراین با در نظر گرفتن موارد بالا مجموعه کانیهای دگرگون و ترکیب شیمیایی کانیها در سنگهای کالک-سیلیکات کامینگتونیت‌دار منطقه تخت سلیمان را می‌توان با سیستم شیمیایی CAF با تصویر برداری از کانیهای کوارتز، آلبیت، H_2O و CO_2 نمایش داد (شکل ۷).

متغیرهای تشکیل دهنده در سیستم مطالعاتی سنگهای کالک-سیلیکات عبارتند از؛

C: CaO

A: $\text{AlO}_{3/2} + \text{FeO}_{3/2} - \text{NaO}_{1/2}$

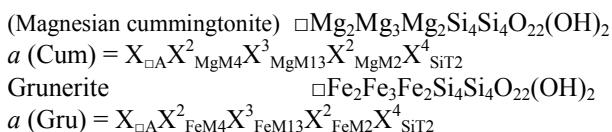
F: $\text{FeO} + \text{MgO} + \text{MnO}$

خطای کمتری برخوردار است [۳]. دماسنچ سنگهای مورد مطالعه به روش مقدار تیتانیوم در ترکیب کامینگتونیت بر پایه همسنجی [۱۵] دمای 550°C را به دست می‌دهد که تقریباً مشابه مقادیر محاسبه شده برای مقدار تیتانیوم در ترکیب هورنبلند همزیست است ($T = 570^{\circ}\text{C}$).

استفاده از فشارسنج آمفیبیول بر پایه همسنجی‌های [۱۶ تا [۱۸] به ترتیب با شرایط فشار $P = 57 \text{ kbar}$, $P = 579 \text{ kbar}$, $P = 57 \text{ kbar}$, $P = 503 \text{ kbar}$ - 607 kbar همخوانی دارد. شرایط P-T دگرگونی پسروندۀ در همان نمونه نیز بر پایه واکنش‌های تعادلی، و با استفاده از برنامۀ THERMOCALC [۱۹] با داده‌های ترمودینامیکی [۲۰]، محاسبه شد. مقادیر فعالیت برای کانیهای پلازیوکلاز، گارنت و هورنبلند با استفاده از برنامۀ AX [۲۱] عبارتند از:

$$\begin{aligned} \text{Grs} &= 0.06, \text{Py} = 0.001, \text{Alm} = 0.22, \text{Tr} = 0.18, \\ \text{Prg} &= 0.01, \text{Ts} = 0.001, \text{An} = 0.65, \text{Ab} = 0.57 \end{aligned}$$

a-X فعالیت $Cum = 0.03$ و $Gru = 0.001$ بر پایه فرمول $\text{Gru} = \text{Cum} + \text{Gru}$ محاسبه شد. رابطه کسر مولی و فعالیت در اعضای نهائی [۲۲] تشکیل دهنده‌های آمفیبیول فرومیزین به صورت زیر است:



فعالیت کلسیت و کوارتز برابر با واحد در نظر گرفته شد. در محاسبات فشار و دما برای چشم پوشی از مقادیر خطای ناشی از ترکیب احتمالی پیچیده فاز شاره دگرگون، مقادیر X_{H2O} و X_{CO2} به صورت فازهای دو تائی فرض شده‌اند. شرایط P-T در سنگهای کالک-سیلیکات مورد مطالعه نیز با فرض $0.5 = X_{\text{H2O}}$ و $0.5 = X_{\text{CO2}}$ با برنامۀ ترموکالک محاسبه شد. واکنش‌های تعادلی با تشکیل دهنده‌هایی از گارنت، آمفیبیول، پلازیوکلاز، کلسیت و کوارتز برای مجموعه کانیهایی با تعادل بافتی و ترکیبی محاسبه شد. برخورگاه واکنش‌های تعادلی در نمودار، مقادیر فشار و دما را مشخص می‌کند. مقادیر دما در گستره $450-500^{\circ}\text{C}$ تغییر می‌کند (شکل ۸).

نتایج نشان می‌دهد که مقادیر محاسبه شده برای شرایط دما با استفاده از برنامۀ ترموکالک اغلب کمتر از مقادیر محاسبه

این واکنش در شرایط کاهش فشار و دما رخ داده است. حضور کانیهای آبدار آمفیبیول در مقادیر بالا، کلسیت فراوان همراه با تشکیل کانیهای اپیدوت و تیتانیت در مجموعه کانیهای کالک-سیلیکات‌های مورد مطالعه، نشان دهنده نفوذ شاره‌های غنی از H_2O طی فرایندهای دگرگونی پسروندۀ در منطقه مورد مطالعه است.

دما- فشارسنجی

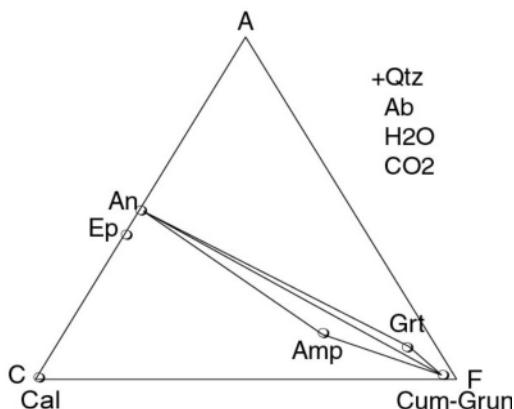
به دلیل نبود کانی‌های همزیست باقیمانده از شرایط اوج دگرگونی، میانبارها مناسب از فازهای باقیمانده در کانیهای پورفیروبلاست و منطقه‌بندی شیمیایی در کانیهای پورفیروبلاست تجزیه شده، شرایط P-T دگرگونی پیشروندۀ اوج دگرگونی در سنگهای کالک-سیلیکات مورد مطالعه مشخص نیست.

شرایط P-T دگرگونی پسروندۀ با استفاده از روش‌های زمین دما- فشارسنجی معمول و برنامۀ ترمودینامیکی THERMOCALC تعیین شد. شرایط دمایی با استفاده از دماسنچ Fe-Mg بین کانیهای گارنت و کامینگتونیت همسنجی شده توسط [۱۳] در حدود 600°C محاسبه شد. دماسنچ گارنت-کامینگتونیت بر پایه همسنجی [۱۴] دما را در حدود 570°C تعیین می‌کند. از طرف دیگر استفاده از همسنجی [۱۴، ۱۳] برای کانیهای گارنت (پورفیروبلاست) و هورنبلند همزیست به ترتیب با دمای 445°C و 480°C سازگار است. این تفاوت در مقادیر دمایی محاسبه شده برای کانیهای همزیست گارنت-کامینگتونیت و گارنت-هورنبلند در دماسنچ [۱۳] توسط [۳] مورد بحث قرار گرفته است. نکته مهم این است که در همسنجی [۱۳] مقادیر خطا برای دماسنچ گارنت-کامینگتونیت کمتر از دماسنچ گارنت-هورنبلند است. بنابراین تفاوت در مقادیر دمایی محاسبه شده در سنگهای کالک-سیلیکات منطقه مورد مطالعه با استفاده از دماسنجهای تبادلی گارنت-کامینگتونیت و گارنت-هورنبلند به دلیل جانشینی‌های پیچیده کاتیونی در ساختار آمفیبیول کلسیک در مقایسه با جانشینی تقریباً دو تا یکی در کامینگتونیت است.

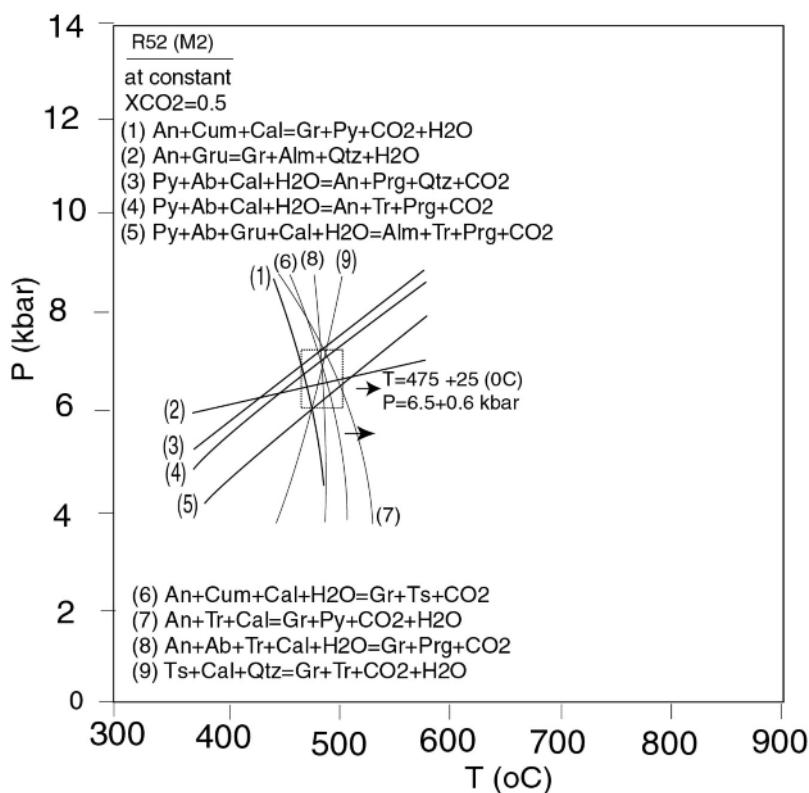
با در نظر گرفتن موارد بالا نتایج به دست آمده از دماسنچ گارنت-کامینگتونیت در مقایسه با نتایج دماسنچ گارنت-هورنبلند برای سنگهای کامینگتونیت‌دار منطقه مورد مطالعه از

مقادیر فشار محاسبه شده بر پایه واکنشهای تعادلی با استفاده از برنامه ترمومکالک تقریباً با 6.5 ± 0.6 kbar هم خوانی دارد (شکل ۸) که این نتایج با مقادیر محاسبه شده بر پایه دما سنجد گارنت-کامینگتونیت، و نیز دماهای مشابه به دست آمده بر پایه مقدار Al در آمفیبول با استفاده از همسنجی [۱۶ تا ۱۸] سازگار است.

شده بر پایه زمین دما سنجدی گارنت-کامینگتونیت و مقدار Ti در ترکیب کامینگتونیت و هورنبلند است. با در نظر گرفتن خطای کمتر در نتایج به دست آمده از دما سنجد گارنت-کامینگتونیت، و نیز دماهای مشابه به دست آمده بر پایه مقدار Ti در ترکیب کانیهای آمفیبول تجزیه شده، به نظر می‌رسد که ترمومکالک دمای را کمی پائین‌تر از مقدار واقعی نشان می‌دهد.



شکل ۷ نمایش ترکیب کانیهای دگرگون در سنگهای کالک-سیلیکات منطقه تخت سلیمان روی سیستم SiO_2 -Ab- CO_2 - H_2O . فازهای اضافی هستند.



شکل ۸ تعیین شرایط تقریبی دما و فشار دگرگونی پسروندی کامینگتونیت‌دار منطقه تخت سلیمان با استفاده از برنامه ترمومکالک.

مراجع

- [1] Alavi, M., "Regional stratigraphy of the Zagros Fold-Thrust belt of Iran and its proforeland evolution", American Journal of Science 304 (2004) 1–20.
- [2] Miyano T., Klein C., "Fluid behavior and phase relations in the system Fe-Mg-Si-C-O-H: application to high grade metamorphism of iron-formations", American Journal of Science 286 (1986) 540-575.
- [3] Evans B.W., Ghiorso M.S., "Thermodynamics and petrology of cummingtonite", American Mineralogist, 80 (1995) 649-663.
- [4] Evans B.W., "Reactions among sodic, calcic, and ferromagnesian amphiboles", sodic pyroxene, and deerite in high-pressure metamorphosed ironstone, Siphnos Greece, American Mineralogist, 71 (1986) 1118-1125.
- [5] Lattard D., Le Breton N., "The P-T-fO₂ stability of deerite $Fe_{12}^{2+} Fe_6^{3+} [Si_{12}O_{40}]OH_{10}$ ", Contributions to Mineralogy and Petrology, 115 (1993) 474-487.
- [6] نبوی م. ح., "مقدمه ای بر زمین‌شناسی ایران". سازمان زمین‌شناسی ایران، ۱۳۵۵ ص. ۱۰۹.
- [7] افتخارنژاد ج., "طبقه بندی تکتونیکی ایران در ارتباط با حوضه‌های رسویگنا/اری". مجله انجمن نفت ایران، شماره ۸۲ (۱۳۵۹) ۲۸-۱۹.
- [8] بابا خانی ع. ر. قلمقاش ج., "نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان". سازمان زمین‌شناسی ایران، تهران، ۱۳۷۱.
- [9] Gilg H. A., Boni M., Balassone G., Allen C. R., Banks D., Moore F., "Marble-hosted sulfide ores in the Angouran Zn-(Pb-Ag) deposit, NW Iran: interaction of sedimentary brines with a metamorphic core complex", Mineral Deposita 41 (2006) 1–16.
- [10] Kretz R., "Symbols for rock-forming minerals", American Mineralogist 68 (1983) 277-279.
- [11] Leake B.E., "Nomenclature of amphiboles", Mineralogical Magazine 42 (1978) 533-563.
- [12] Hynes A., "A comparison of amphiboles from medium and low pressure metabasites, Contributions to Mineralogy and Petrology", 81 (1982) 119-125.
- [13] Graham C. M., Powell R., "A garnet-hornblende geothermometer: calibration, testing and application to the Pelona Schists, Southern

برداشت

- شرایط P-T اوج دگرگونی در سنگهای کالک-سیلیکات مورد مطالعه، به دلیل دگرگونی پسروند شدید، مجموعه کانیهای دگرگون در اوج دگرگونی با روش‌های دما- فشارستجی کانی-شناسی قابل تعیین نمی‌باشد.

- دگرگونی پسروند در سنگهای کالک-سیلیکات منطقه تخت سلیمان به دنبال اوج دگرگونی و در ارتباط با بالا آمدگی سنگها در شرایط کاهش فشار و دما رخ داده است.

- حضور کامینگتونیت در سنگهای دگرگون کالک-سیلیکات مورد مطالعه حاصل واکنشهای شکست گارنت اولیه در شرایط دگرگونی پسروند است. بقایای گارنت همراه با کانیهای همزیست کامینگتونیت، کلسیت و پلازیوکلаз در زمینه گرانوبلاستیک این پدیده را تایید می‌کند. واکنشهای پیشنهادی برای تشكیل کامینگتونیت نیز همزیستی این آمفیبول فقیر از کلسیم را با فازهای غنی از کلسیم مثل کلسیت و هورنبلند توجیه می‌کند.

- تشکیل گارنت با بافت پوئی کیلوبلاستیک دارای نفوذیهای فراوان و نسبتاً درشت دانه از کانیهای کلسیت، کوارتز و پلازیوکلاز عملکرد فرایند دگرگونی پسروند به دلیل کاهش شرایط فشار بر سنگهای دگرگون را نشان می‌دهد.

- تشکیل فازهای آبدار فراوان مانند هورنبلند، کامینگتونیت و نیز حضور کانیهای ثانویه اپیدوت و تیتانیت در سنگهای کالک-سیلیکات مورد مطالعه حضور فاز شاره غنی از H₂O در فرایندهای دگرگونی پسروند را نشان می‌دهد. حضور کلسیت در مقادیر فراوان در مجموعه کانیهای این سنگها نشان دهنده کاهش فعالیت X_{CO₂} به دلیل تاثیر فاز شاره غنی از H₂O در منطقه مورد مطالعه است.

- دما و فشار محاسبه شده در تشكیل کامینگتونیت و کانیهای همراه در سنگهای کالک-سیلیکات منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۰°C و ۵۵۰-۶۰۰ kbar است (رخساره آمفیبولیت فشار میانگین). با توجه به مقادیر فشار محاسبه شده، عمق تشكیل این سنگها در حدود ۲۱ کیلومتر برآورد شده است.

تشکر و قدردانی

از هدایت استعدادهای درخشان دانشگاه تبریز برای حمایت مالی از این پژوهش تشکر می‌کنیم.

- [19] Powell R., Holland T.J.B., "An internally consistent dataset with uncertainties and correlations: Applications to geobarometry", worked examples and a computer program. Journal of Metamorphic Geology, 6 (1988) 173-204.
- [20] Holland T.J.B., Powell R., "An enlarged and updated internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: the system $K_2O-Na_2O-CaO-MgO-MnO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-TiO_2-SiO_2-C-H-O_2$ ", J. of Metamorphic Geology, 8 (1990) 89-124.
- [21] Holland T.J.B., Powell R., "An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest", J. of Metamorphic Geology, 16 (1998) 309-343.
- [22] Will TM., Powell R., "Activity-composition relationships in multi-component amphiboles: an application of Darken's Quadratic Formalism", American Mineralogist 77 (1992) 954-966
- [۲۳] لطفی م., "نقشه زمین شناسی ۱,۰۰۰۰۰ ماه نشان", سازمان زمین شناسی ایران، تهران، (۱۳۸۰).
- California*", Journal of metamorphic Geology, 2 (1984) 13-34.
- [14] Perchuk L.L., Aranovich L.Y., Podlesski K.K., Lavrant'eva I.V., Gerasimov V.Y., Fed'Kin V.V., Kitsul V.I., Karasakov L.P., Brednikov N.V., "Precambrian granulites of the Aldan shield", eastern Siberia, USSR, Journal of metamorphic Geology, 3 (1985) 265-310.
- [15] Otten M.T., "The origin of brown hornblende in the Artjället gabbro and dolerites", Contribution to Mineralogy and Petrology, 86 (1984) 189-199.
- [16] Johnson M.C., Rutherford M.J., "Experimental calibration of the aluminum-in hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks", Geology 17 (1989) 837-841.
- [17] Hammarstrom J.M., "Zen E.-A., Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer", American Mineralogist 71 (1986) 1297-1313.
- [18] Hollister L.S., Grissom G.C., Peters E.K., Stowell H.H., Sisson V.B., "Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons", American Mineralogist, 72 (1987) 231-239.