

تعادلات پاراژنزی، تخمین دما و X_{CO_2} تشکیل سنگ‌های کالک - سیلیکات منطقه جلبر؛ جنوب ارومیه

منیر مجرد*

دانشگاه ارومیه، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

*m.modjarrad@urmia.ac.ir

دریافت: ۹۲/۸/۲۱ پذیرش: ۹۲/۱۰/۷

چکیده

دولومیت‌های سیلیسی منطقه جلبر به واسطه نفوذ توده آلکالی گرانیتی بالستان در اوایل سنوزوئیک دچار دگرگونی مجاورتی شده‌اند. پاراژنز اصلی مشاهده شده در منطقه $Cal+Tlc+Srp\pm Tr\pm Di$ می‌باشد. تالک اولین کانی تولید شده در هاله مجاورتی بوده و به همراه کانی‌های کربناته دیگر و اندکی کوارتز تخریبی مولد سرپانتین به عنوان فراوان‌ترین کانی ظاهر شده، در منطقه بوده است. با پیاده کردن ترکیب شیمیایی واقعی نمونه‌های تجزیه شده در نمودار سازگاری SCM ملاحظه می‌شود تمامی نمونه‌ها تقریباً در امتداد خط اتصال کلسیت - سرپانتین قرار می‌گیرند. این مطلب بیانگر در حال تعادل بودن این پاراژنز در کالک - سیلیکات‌های منطقه مذکور است. با در نظر گرفتن عدم تبلور البوین و بروسیت و فشار ثابت ۲ کیلو بار برای دگرگونی مجاورتی و با کمک پتروژنتیک گریدهای استاندارد بیش‌ترین دمای ناشی از نفوذ توده در کربنات‌های جلبر کمتر از 50 ± 50 درجه سانتی‌گراد ارزیابی شده است. با توجه به اینکه سرپانتین در این نوع سنگ‌ها تنها تحت شرایط سیال بسیار غنی از آب متبلور می‌شود و با استفاده از محاسبات نرم‌افزار ترموکالک، X_{CO_2} کمتر از ۰/۰۵ تعیین شده و دمای به دست آمده تایید شده است.

واژه‌های کلیدی: تخمین دما و X_{CO_2} ؛ ترموکالک؛ جلبر؛ سرپانتین؛ کالک - سیلیکات

مقدمه

سنگ‌ها X_{H_2O} ، X_{CO_2} تغییرات زیادی نشان می‌دهند و بزرگ‌ترین کنترل کننده مجموعه‌های پدید آمده و دمای واکنش هستند [۱۵]. به طور کلی X_{CO_2} بالا، بازدارنده انجام واکنش‌ها می‌باشد و این واکنش‌ها برای انجام نیازمند دمای بیش‌تری خواهند بود.

برای سنگ‌های آهکی و دولومیت‌های سیلیسی تنوع ترکیب شیمیایی به معنای افزایش واکنش‌های انجام‌پذیر است. حضور تالک، ترمولیت و دیوپسید و در دولومیت‌های سیلیسی، فورستریت در دماهای بالا در هاله مجاورتی مشخص است. ولاستونیت در کالک - سیلیکات‌های خاصی در نزدیکی توده‌های نفوذی بزرگ دیده می‌شود، اما در دگرگونی ناحیه‌ای به چشم نمی‌خورد. دمای تشکیل این کانی تا اندازه زیادی از نسبت H_2O/CO_2 سیال تاثیر می‌پذیرد. در کربنات‌های ناخالصی که دارای رس بیش‌تری باشند، پس از دگرگون شدن سیلیکات‌های Al ، Ca مثل اپیدوت، گروسولار و هورنبلند پدید می‌آیند. وجود K_2O باعث تشکیل مسکویت یا فلوگوپیت خواهد شد [۳].

اهداف مختلفی از مطالعه سنگ‌های دگرگونی دنبال می‌شود ولی همه آن‌ها در نهایت به هدف درک تکامل پوسته زمین می‌رسند [۱۴]. در طی دگرگونی مجاورتی فرآیندهای زیر می‌تواند رخ دهد: درشت‌شدگی، تشکیل بلورهای جدید، متاسوماتیسم، آناکسی و تغییر شکل. دو مورد اول در همه هاله‌های مجاورتی رخ می‌دهند، در حالی که سه مورد باقی‌مانده با درجات متفاوت در هاله‌های مختلف ظاهر می‌شوند که بستگی به ترکیب سنگ اولیه، توده و درجه حرارت دارد [۱۰]. به طور کلی دگرگونی مجاورتی از نظر تغییرات فیزیکوشیمیایی به سه نوع ممکن است روی دهد: ایزوشیمیایی، آلووشیمیایی و منحصرًا تغییرات بافتی [۴]. در سنگ‌های آهکی خالص دگرگونی مجاورتی صرفاً باعث درشت‌شدگی دانه‌ها (coarsening) می‌شود [۱۲].

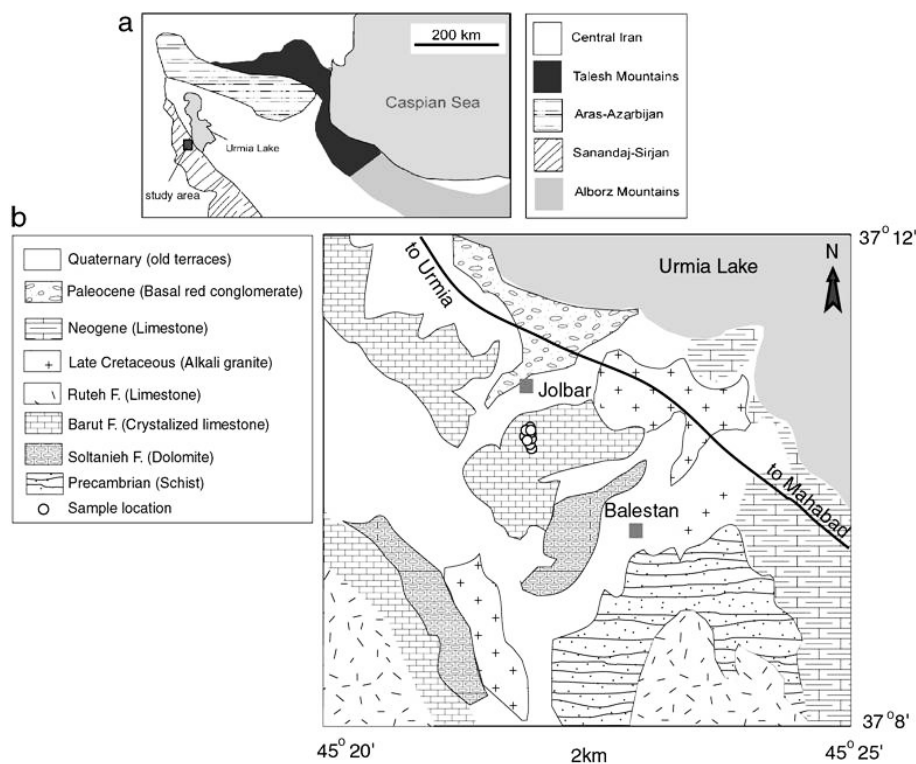
سنگ‌های رسوبی کربناته اغلب از $CaCO_3$ ، $MgCO_3$ ، SiO_2 تشکیل یافته‌اند، که با گرایش به سمت پلیتی شدن میزان Al_2O_3 ، K_2O آن‌ها افزایش می‌یابد. ترکیب سیال اثر مهمی بر مجموعه‌های پدید آمده دارد [۳]. در این

محاسبات برنامه کامپیوتری THERMOCALC v3.3 تهیه شده بر اساس داده‌های ترمودینامیکی [۹] نیز برای تعیین X_{CO_2} سیال دگرگونی استفاده شد. علائم اختصاری کانی‌ها در این نوشته از [۱۱] گرفته شده است.

استفاده در نمودارهای سازگاری مورد تجزیه شیمیایی به روش ICP-MS قرار گرفت. این آنالیزها در آزمایشگاه SGS کشور کانادا انجام گرفته است. همچنین برای تعیین نوع کانی‌های اکسید فلزی از آنالیز XRD در شرکت تجزیه مواد معدنی کانپزوه نیز استفاده شد. از

جدول ۱. نتایج مطالعات پتروگرافی ناحیه جلبر. موقعیت طول و عرض نمونه‌ها مشخص بوده و علائم X , x , t به ترتیب به معنی کانی با فراوانی زیاد، کم و خیلی کم بکار رفته است. علائم اختصاری کانی‌ها از [۱۱] گرفته شده است.

sample	G.R.	Cal	Qtz	Phl	Di	Tr	Atg	Tlc	Cln	Ore
J01	N 371020.1 E 452155.5	X								
J02	N 371019.1 E 452156.1	X				t				
J03	N 371020.0 E 452155.8	X					x			
J04	N 371019.6 E 452155.4	X				X				
J05	N 371022.2 E 452156.9									
J06	N 371022.3 E 452156.9	X	t				x			
J07A	N 371022.0 E 452156.3	X								X
J07B	"	X			X	x				
J07C	"	X			x					
J07D	"	X		X		t			t	X
J08	N 371022.5 E452156.6	X					X			x
J09	N 371022.9 E 452156.8	X						X	t	
J10	N 371022.9 E 452156.3	X					X			
J11	N 371023.6 E 452156.4									
JL1	N 371020.7 E 452156.5	X						X		
JL3	"	X				x				x
JL10	"	X					x			
JL14	"	X			t					
JL15	"	X					X			
JL17	N 371021.9 E 452155.9	x								
JL18A	N 371022.6 E 452156.9	x	x	X					t	X
JL18B	"	X								
JL18C	"	X							t	t
JL18D	"	X		x						x
JL18E	"	x		X						X
JL19		X					X			



شکل ۱. a. زون‌بندی شمال غرب ایران از [۵] به همراه موقعیت منطقه مورد مطالعه. b. نقشه زمین‌شناسی اقتباس [۲] و اصلاح شده منطقه جلبر.

بحث

پetroگرافی

تصاویر میکروسکوپی متعددی از نمونه‌های منطقه تهیه شده که تعدادی از آن‌ها برای نشان دادن تبلور کانی‌های شاخص یا بافت‌های تعادلی بین کانی‌ها ارائه شده است. شکل ۲ برای معرفی کانی‌های کلسیت، دولومیت، تالک، ترمولیت، سرپانتین، کلینوپیروکسن (دیوپسیدی)، مسکویت، کوارتز و کانی‌های فلزی آورده شده است. جدول ۱ نتایج پتروگرافی بر روی سنگ‌های مورد مطالعه را خلاصه کرده است. برای تعیین نوع کانی اکسید فلزی مشاهده شده در برخی نمونه‌های متاسوماتیک از آنالیز XRD در مرکز تحقیقاتی کانپروه استفاده شد. با استفاده از این روش معلوم شد کانی فلزی موجود مگنتیت بوده است.

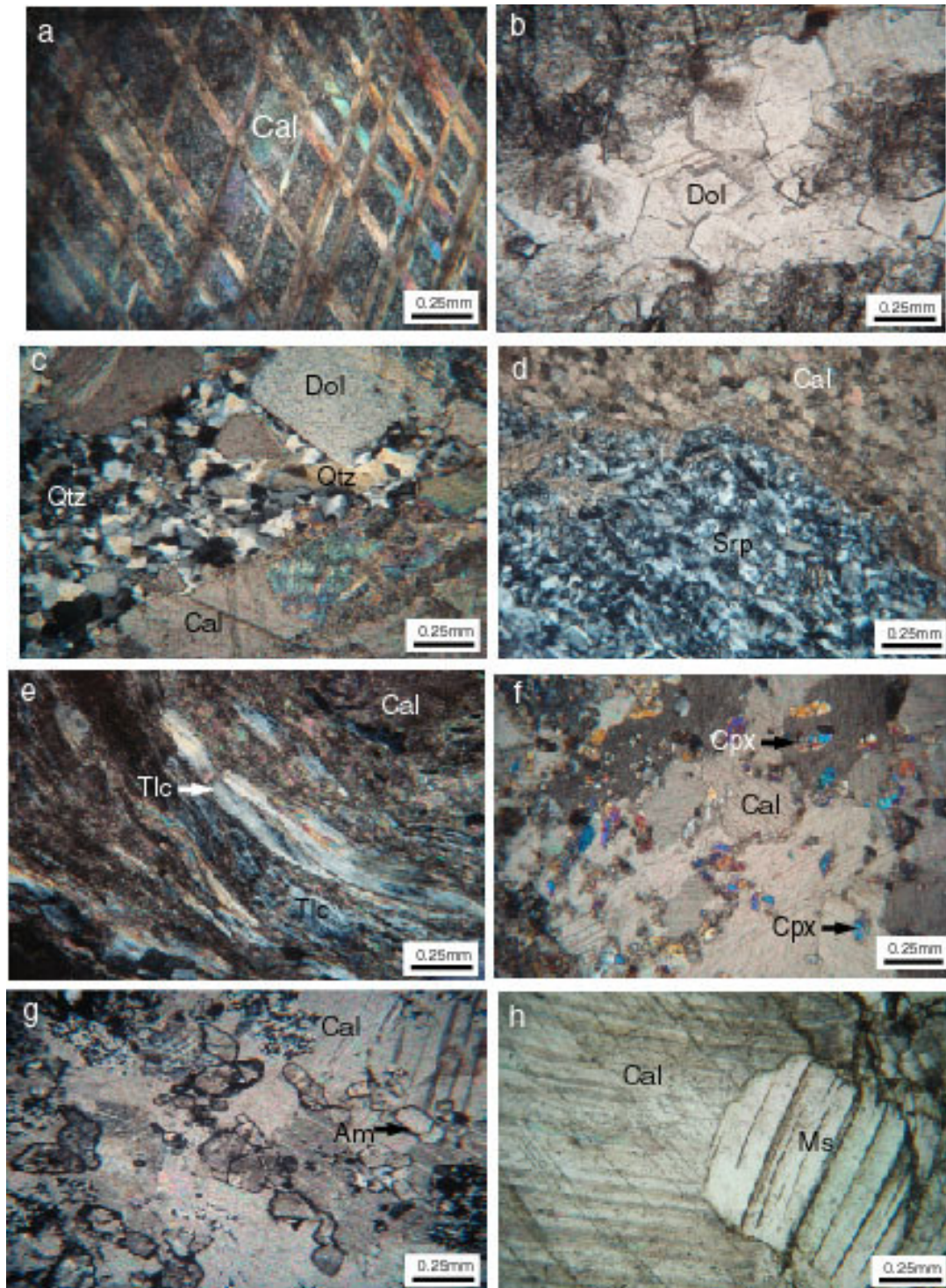
ژئوشیمی سنگ کل

با تجزیه شیمیایی سنگ‌ها علاوه بر دستیابی به ترکیب اکسیدهای عناصر اصلی در این سنگ‌ها، فراوانی ۳۸ عنصر کمیاب و نادر خاکی نیز مشخص شد. در این مقاله

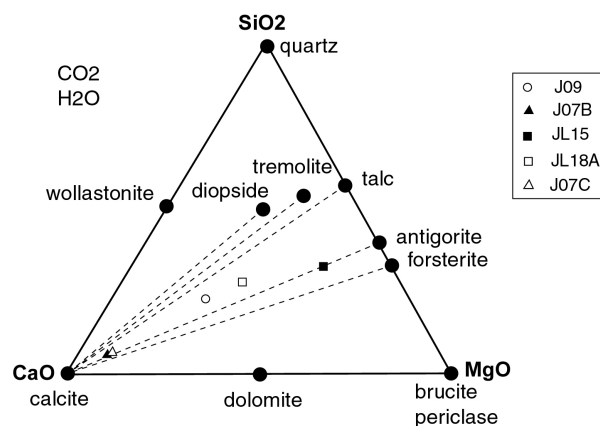
به تناسب موضوع فقط از عناصر اصلی صحبت شده است. جدول ۲ نتایج آنالیز برای عناصر اصلی را نشان می‌دهد. در کربنات‌های دولومیتی دگرگون شده منطقه جلبر ناخالصی‌های سیلیس (۳ تا ۳۰ درصد)، آلومین (۰/۲ تا ۵ درصد) و اکسید پتاسیم تا ۲ درصد حضور دارد (جدول ۲). وجود همین مقدار ناخالصی باعث تبلور کانی‌های سیلیکاته از قبیل تالک، سرپانتین، ترمولیت، کلینوپیروکسن (احتمالاً دیوپسیدی) و مسکویت در نمونه‌های مورد مطالعه شده و در نهایت منجر به تولید سنگ‌های کالک - سیلیکات دگرگون، شده است [۱]. فراوانی آهن (بدون تفکیک دو و سه ظرفیتی آن) در یک نمونه حاوی اکسید فلزی تا ۱۸ درصد گزارش شده است. فراوانی ۲۰ تا ۴۰ درصد مواد فرار نشانگر حجم بالای سیال آب و CO_2 در این سنگ‌ها می‌باشد که باعث تولید کانی‌های آبدار در نتیجه واکنش‌های دگرگونی شده است. به منظور نشان دادن موقعیت ترکیبی نمونه‌های کالک - سیلیکات جلبر، از مثلث SCM-HC که توسط بوخر و فری در ۱۹۹۴ [۸] پیشنهاد شده استفاده شد (شکل ۳). در ترسیم این نمودار فرض بر این بوده که در سیستم‌های کربناته همواره آب و گاز کربنیک به میزان

توجه شود. همچنین نبود الیوین در این نمونه‌ها و حضور فقط مقدار کمی کلینوپیروکسن و ترمولیت در این نمونه‌ها بی‌شک با ترکیب شیمی سنگ کل نمونه‌ها رابطه دارد.

مورد نیاز و بیش از آن در اختیار سیستم می‌باشد. حضور فراوان کانی‌های تالک و سرپانتین در این سنگ‌ها می‌تواند فرض اشباع بودن سیستم از آب را توجیه کند. به قرارگیری ترکیب شیمی سنگ کل نمونه‌ها در محدوده اتصال کانی‌های تالک - کلسیت - سرپانتین در شکل ۳



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌های مورد مطالعه. b, h در حالت PPL و بقیه در حالت XPL تهیه شده‌اند.



شکل ۳. نمودار ترکیبی SCM-HC ارائه شده توسط بوخر و فری [۸] که موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه بر روی آن پیاده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود همه نمونه‌ها بر روی مثلث پاراژنتیک تالک - کلسیت - سرپانتین قرار گرفته‌اند.

جدول ۲. فراوانی اکسید عناصر اصلی در نمونه‌های منطقه جلیبر.

sample	J09	J07B	JL15	JL18A	J07C
SiO ₂	17.4	3.64	30.3	18.8	3.72
Al ₂ O ₃	1.25	0.18	0.30	5.09	0.19
Fe ₂ O ₃	0.83	0.18	0.57	18.7	0.18
Cr ₂ O ₃	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
CaO	36.8	51.4	14.9	25.4	51.4
MgO	11.7	3.59	30.1	13.2	3.67
MnO	0.06	0.04	0.02	0.14	0.04
Na ₂ O	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
K ₂ O	0.03	0.02	0.03	2.12	<0.01
TiO ₂	0.04	<0.01	0.02	0.17	<0.01
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.03	<0.01	0.02
LOI	30.7	40.4	21.8	17.8	40.5
Total	98.9	99.5	98.7	101.5	99.8

باعث می‌شود که بتوان این دو اکسید را به عنوان فاز اضافی در نظر گرفته و سیستم سه‌تایی SCM را برای بررسی تعادل فازها انتخاب نمود. با توجه به اینکه ترکیب شیمیایی سنگ کل نمونه‌ها در دست است، می‌توان با ترسیم نمودارهای سازگاری فازها، از در حال تعادل بودن پاراژنز در نظر گرفته شده اطمینان حاصل نمود. لیست پاراژنرها و واکنش‌های پیشنهادی برای ایجاد آن‌ها و نمونه‌های سنگی که پاراژنز در آن‌ها مشاهده شده، در جدول ۳ خلاصه شده است. واکنش‌هایی که رخداد آن‌ها توسط مشاهده بافت‌های واکنش‌های محتمل‌تر به نظر می‌رسد توسط علامت ستاره مشخص شده‌اند. سپس مقادیر مولی اکسیدهای کلسیم، سیلیسیم و منیزیم در نمونه‌ها محاسبه شده و در نمودارهای

نمودارهای سازگاری

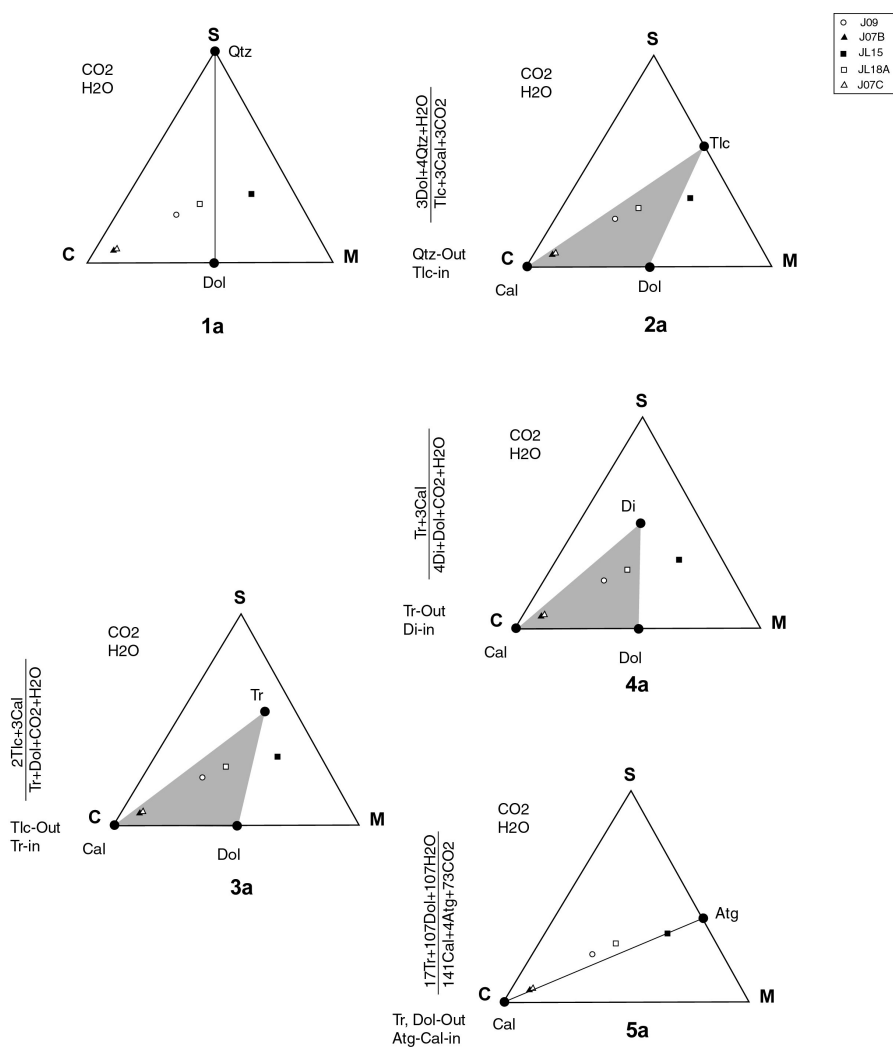
پس از استخراج پاراژنرها موجود در کالک - سیلیکات‌های منطقه جلیبر و نیز با توجه به فراوان‌ترین اکسیدهای موجود در شیمی سنگ کل آن‌ها (جدول ۲) سیستم مناسب جهت بررسی توالی واکنش‌های رویداده در اثر دگرگونی مجاورتی، سیستم CaO-MgO-SiO₂-H₂O-CO₂ انتخاب شد. محصول دگرگونی مجاورتی دولومیت‌های رسوبی با اندکی کوارتز تخریبی توسط این سیستم قابل بررسی است. حضور سایر سازنده‌ها مانند FeO, Al₂O₃, Na₂O, K₂O که اغلب باعث ظهور مقادیر اندکی اپیدوت، میکا، گارنت و فلدسپار می‌شوند، به جز یک نمونه JL18A در بقیه نمونه‌ها قابل توجه نیست. پیش فرض اساسی حضور مقدار کافی سیال H₂O-CO₂

در جدول ۳ در زیر سیستم AKM-QC آورده شده‌اند. با توجه به متاسوماتیسم پتاسیم در برخی نمونه‌ها که منجر به تولید میکاهای درشت در حد قابل مشاهده در نمونه‌های ماکروسکوپی شده است (نمونه JL18A) لزوم بررسی این دسته از سنگ‌ها در یک سیستم مجزای حاوی پتاسیم احساس شد.

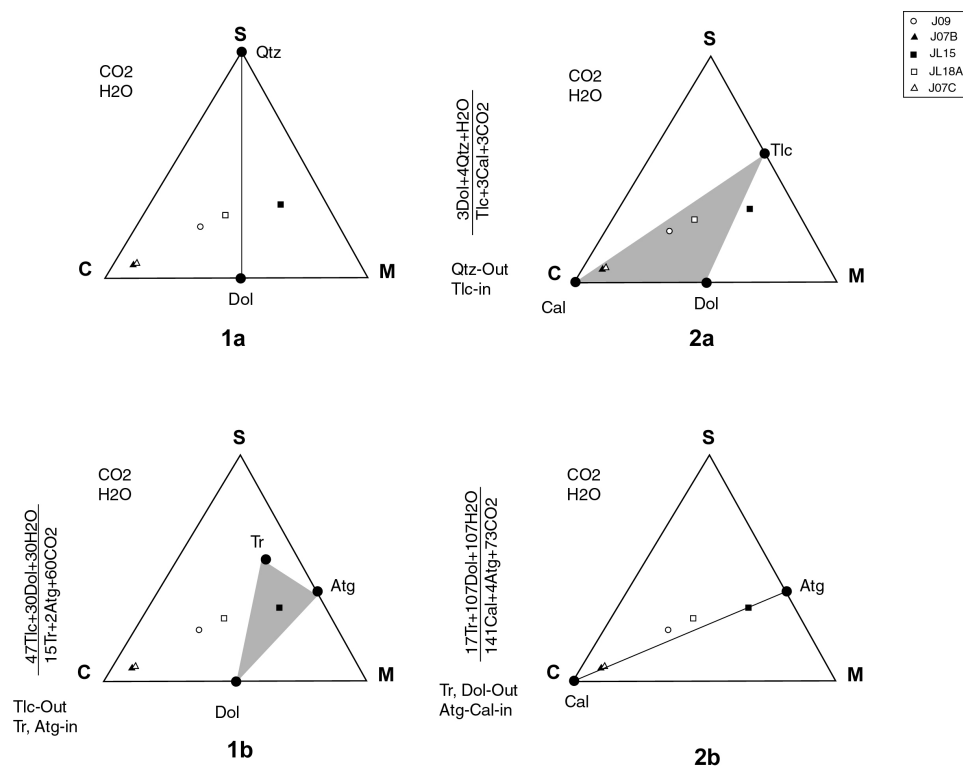
لذا تولید مسکویت و کلریت مشاهده شده در جوار کلسیت طی واکنش‌ها و نمودارهای دیگری مطالعه شد (شکل ۶). همانطور که شکل نشان می‌دهد موقعیت ترکیبی نمونه مد نظر در مرکز مثلث پارازنتیک یا بر روی خط اتصال کانی‌های اصلی قرار گرفته است که خود نشان دهنده تعادلی بودن مجموعه کانیایی با ترکیب سنگ کل نمونه می‌باشد.

سازگاری پیاده شده است. همانگونه که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود محل قرارگیری ترکیب سنگ کل نمونه‌ها در داخل مثلث‌های پارازنتیک، دقیقاً با تعادل فازی پیشنهاد شده همخوانی دارد. واکنش‌هایی که احتمال رخداد آن‌ها با توجه به تعادل بافتی مشاهده شده در مقطع میکروسکوپی بیش‌تر بوده است توسط علامت ستاره در جدول ۳ معین شده‌اند.

نمودارهای سازگاری برای واکنش‌های احتمالی رخ داده در اغلب نمونه‌های منطقه جلبر ترسیم شده و موقعیت ترکیبی دقیق سنگ کل نمونه‌های مورد مطالعه نیز بر روی تک تک آن‌ها پیاده شده است (شکل‌های ۴ و ۵). با هدف مطالعه دقیق‌تر نمونه‌های حاوی کانی‌های میکایی یک سری دیگر از واکنش‌ها و نمودارهای سازگاری مورد بررسی قرار گرفت. این دسته از سنگ‌ها



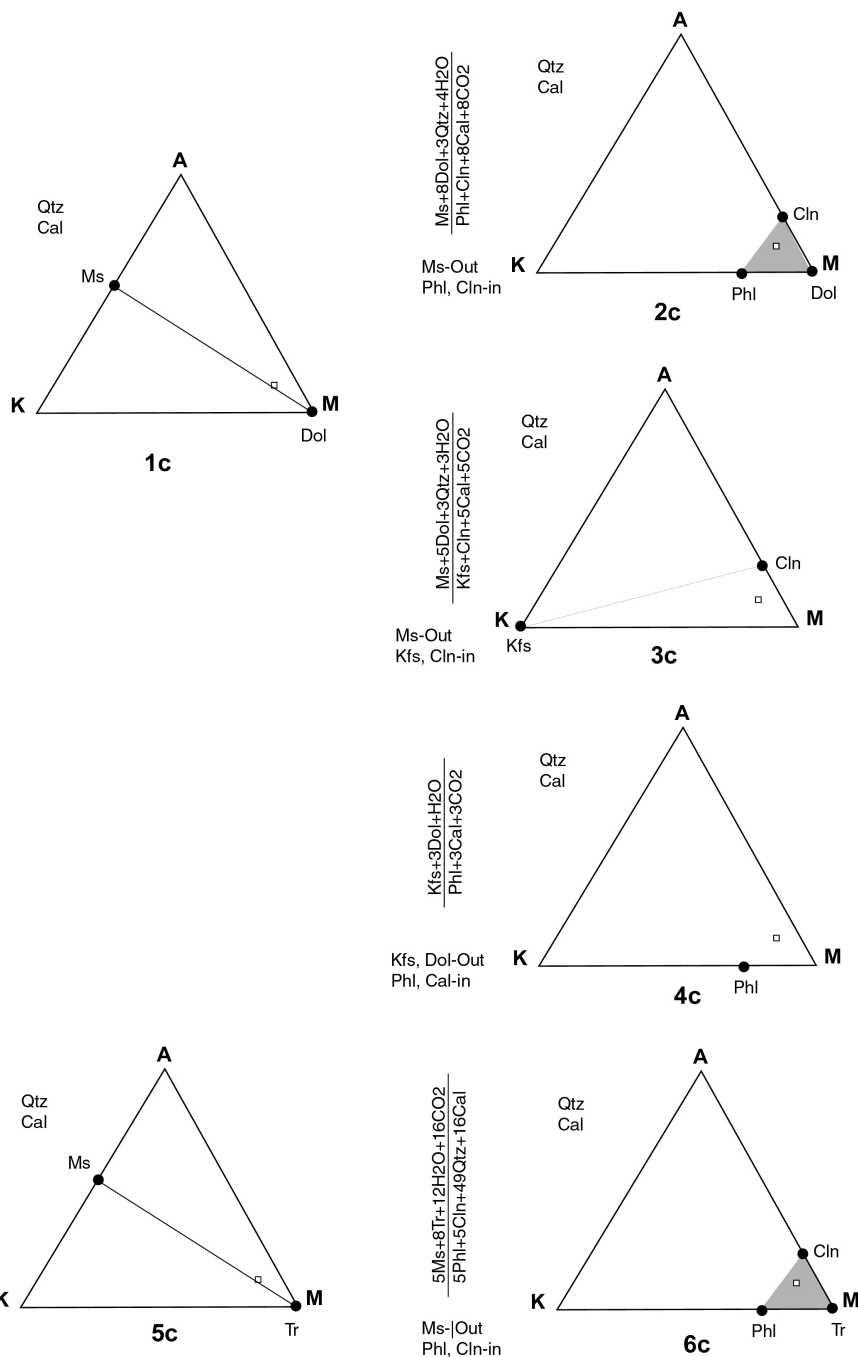
شکل ۴. نمودارهای سلسله‌ای سازگاری برای سنگ‌های کالک - سیلیکات جلبر.



شکل ۵. نمودارهای سازگاری برای شرایط تولید سرپانتین از ترمولیت.

جدول ۳. پارائزهای غالب در نمونه‌های مطالعه شده، واکنش‌های تولید کننده آن‌ها و شماره نمونه‌هایی که پارائز در آن‌ها مشاهده شده آورده شده است. واکنش‌هایی که رخداد آن‌ها توسط مشاهده بافت‌ها محتمل‌تر به نظر می‌رسد توسط علامت ستاره مشخص شده‌اند.

Probable reactions at the SCM (H ₂ O and CO ₂ in excess) system	Stable paragenesis	Sample No.
r1 * 3Dol+4Qtz+H ₂ O=Tlc+3Cal+3CO ₂	Cal+Tlc	J09, JL1
r2 5Tlc+4Qtz+6Cal=3Tr+6CO ₂ +2H ₂ O	Cal+Tr	J02, J04, JL3
r3 * 2Tlc+3Cal=Tr+Dol+CO ₂ +H ₂ O		
r4 8Qtz+5Dol+H ₂ O=Tr+3Cal+7CO ₂		
r5 * Tr+3Cal=4Di+Dol+CO ₂ +H ₂ O	Cal+Di+Tr	J07B
r6 Tr+3Cal+2Qtz=5Di+3CO ₂ +H ₂ O	Cal+Di	J07C, JL14
r7 2Qtz+Dol=Di+2CO ₂		
r8 * 107Dol+17Tr+107H ₂ O=141Cal+4Atg+73CO ₂	Cal+Atg	J03, J06, J08, JL10, JL15, JL19, JL21
r9 47Tlc+30Dol+30H ₂ O=15Tr+2Atg+60CO ₂		
r10 31Tr+45Cal=Atg+107Di+45CO ₂		
Probable reactions at the AKM (Qtz and Cal in excess) system		
r11 8Kfs+3Cln=3Ms+9Qtz+5Phl+4H ₂ O		
r12 * Ms+8Dol+3Qtz+4H ₂ O=Phl+Cln+8Cal+8CO ₂	Cal+Phl+Cln+Qtz	JL18A
r13 Ms+5Dol+3Qtz+3H ₂ O=Kfs+Cln+5Cal+5CO ₂		
r14 * 5Ms+8Tr+12H ₂ O+16CO ₂ =5Phl+5Cln+49Qtz+16Cal	Cal+Phl+Tr+Cln	J07D
r15 * 5Kfs+5Tlc=5Phl+20Qtz	Cal+Phl+Qtz	
r16 5Kfs+3Tr+2H ₂ O+6CO ₂ =5Phl+24Qtz+6Cal		
r17 * Kfs+3Dol+H ₂ O=Phl+3Cal+3CO ₂	Cal+Phl	JL18D, E



شکل ۶. نمودارهای سازگاری AKM-QC برای نمونه پتاسیم‌دار (JL18A).

مجموعه دولومیت - ترمولیت در سنگ‌های مطالعه شده، بیشینه دمای تجربه شده در حاله توده بالستان منطقه جلبر کمتر از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. در واقع واکنش تولید کننده فورستریت سقف دمایی این دگرگونی محسوب می‌شود. برونزد کوچک این توده در سطح زمین و نیز تاثیر گذاری دما پائین آن بر سنگ‌های دیواره حکایت از کم حجم بودن آن دارد.

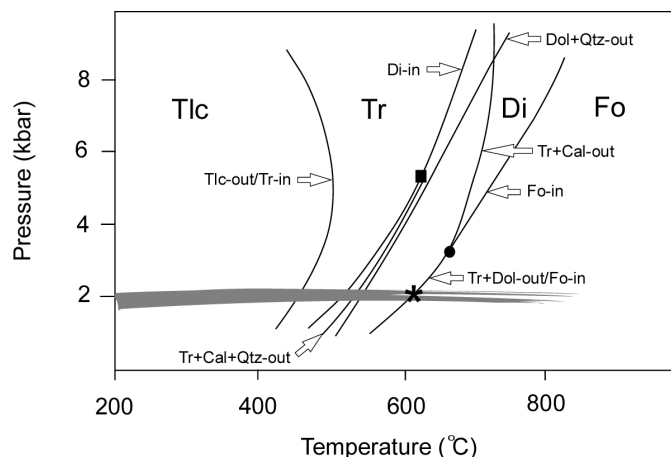
دماسنجی

برای تخمین دمای دگرگونی مجاورتی اطراف توده آلکالی گرانیتهی بالستان از شبکه پتروژنتیک استاندارد تهیه شده توسط بوخر و فری [۸] برای سنگ‌های کربناته استفاده شد (شکل ۷). با در نظر گرفتن فشار تقریبی ثابت حدود ۲ کیلوپار برای دگرگونی مجاورتی، عدم تبلور کانی فورستریت در حاله مجاورتی و هم‌چنین عدم مشاهده

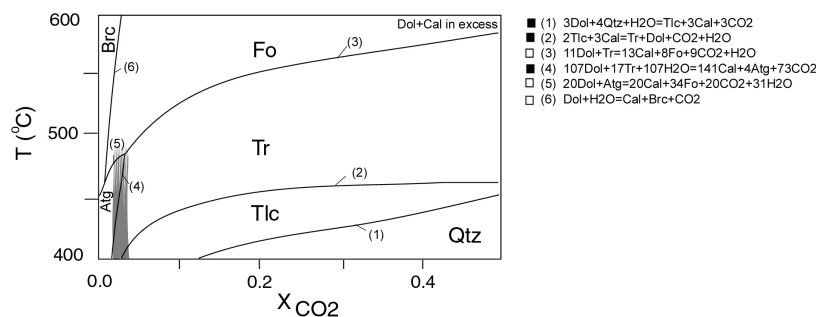
تخمین X_{CO_2}

هم‌چنین از نمودارهای ارائه شده توسط اسپیر [۱۴] که بر پایه داده‌های ترمودینامیکی [۶] ترسیم شده و نمودار دیگری از بوخر و فری [۸] برای تایید پر آب بودن سیال موجود در کالک - سیلیکات‌های جلبر استفاده شده است (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). در همه این نمودارها واکنش‌هایی که رخداد آن‌ها احتمال بیشتری داشته است با مربع توپر مشخص شده‌اند. در تعدادی از نمونه‌ها بدلیل خلوص بالا فقط درشت‌شدگی دانه‌ها اتفاق افتاده و با افزایش درجه دگرگونی این اندازه‌ها بزرگ‌تر شده است (مانند نمونه Jo1). حضور فاز ناخالصی در کنترل این اندازه‌ها نقش بسزایی دارد [۱۲]. برای تعیین دقیق‌تر ترکیب سیال حاضر در سیستم مورد مطالعه از برنامه کامپیوتری THERMOCALC v3.3 نیز بهره گرفته شد. از میان واکنش‌های متعددی که این برنامه برای کالک - سیلیکات‌های منطقه پیشنهاد کرده است، تعداد زیادی در X_{CO_2} حدود ۰/۰۵ همدیگر را قطع کرده‌اند (شکل ۱۲). هم‌چنین دمای حدود ۴۰۰-۵۵۰ درجه سانتی‌گراد برای پایداری پارائزهای مشاهده شده مشخص می‌شود که در تطابق با دمای بدست آمده از روش قبلی است.

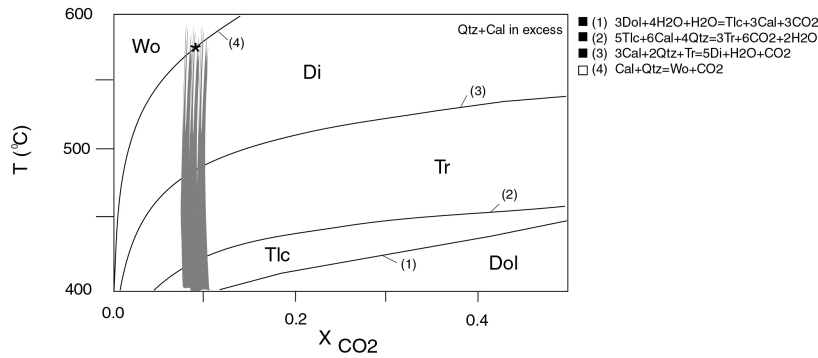
با هدف تعیین نسبت بین آب و گاز کربنیک در سیال در حال تعادل در سیستم دگرگونی از یک دسته نمودار دیگر بهره گرفته شد. با استفاده از نمودار دیگری [۸]، مشخص شد که پایداری سرپانتین در دولومیت‌های دگرگون شده منوط به غنی بودن سیال از آب به میزان زیاد می‌باشد. بطوری‌که در ترکیب سیال حاضر در طی دگرگونی باید $X_{CO_2} < 0.05$ باشد تا امکان پایداری سرپانتین در مجموعه وجود داشته باشد. همانند نمودار قبل واکنش تولید فورستریت و نیز بروسیت سقف دمایی برای حضور مجموعه سرپانتین + کلسیت بوده و دمای کمتر از ۴۷۰ درجه سانتی‌گراد را برای آن پیشنهاد می‌کند (شکل ۸). مقدار کمی X_{CO_2} در دمای پائین‌تر امکان تبلور مقدار زیادی تالک که در منطقه بوفور مشاهده می‌شود را می‌دهد. در سنگ‌هایی که ناخالصی سیلیس بیشتری داشته‌اند از فقدان ولاستونیت در این نمونه‌ها برای تعیین دمای اوج استفاده شده است. این نمودار دمای حدود ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد را در حضور $X_{CO_2} < 0.1$ پیشنهاد می‌کند (شکل ۹).



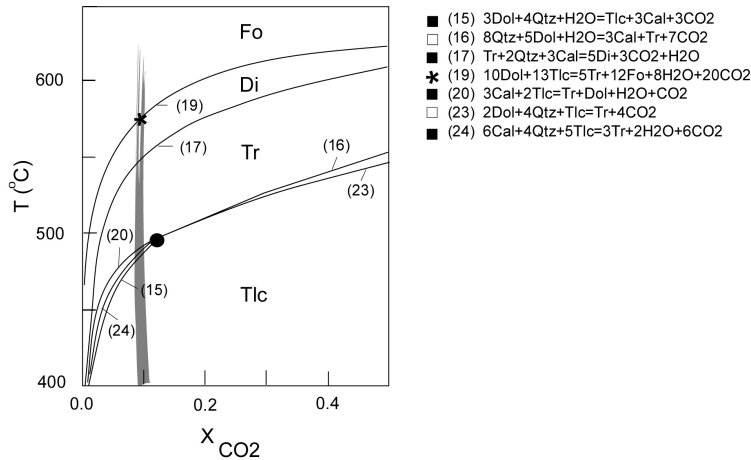
شکل ۷. شبکه پتروژنتیک استاندارد [۸] برای تعیین دمای ناشی از نفوذ توده بر سنگ‌های هاله در منطقه جلبر. علامت ستاره معرف بیشینه دمای تجربه شده توسط هاله می‌باشد.



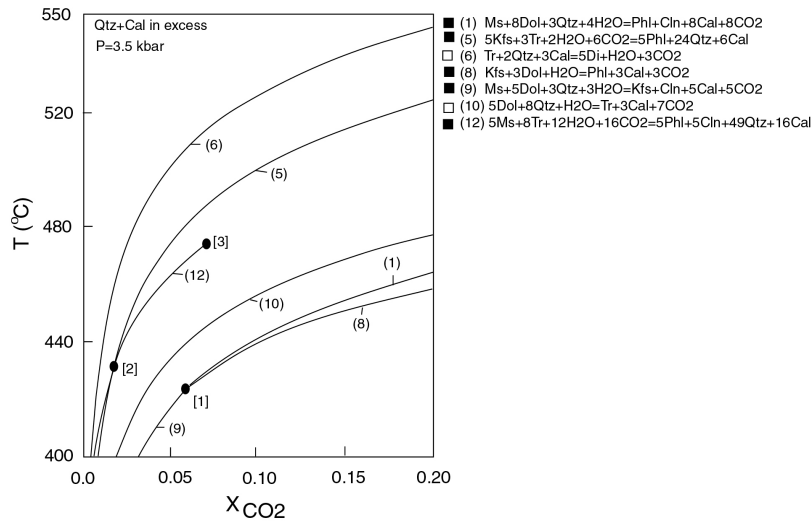
شکل ۸. نمودار $T-X_{CO_2}$ ارائه شده [۸] برای فشار ثابت ۲ کیلوپا در حضور دولومیت و کلسیت اضافی که نشان می‌دهد میزان فراوانی آب در سیال موجود در سیستم بسیار بیش‌تر از گاز کربنیک بوده است.



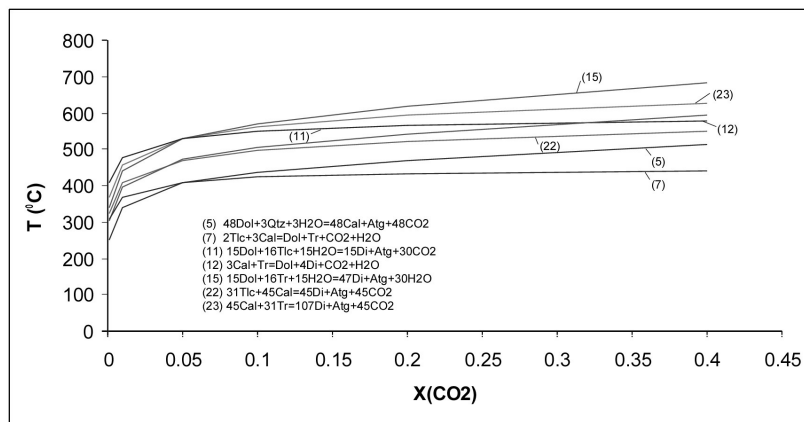
شکل ۹. نمودار دما - کسر مولی سیال از [۸] برای سنگ‌های با سیلیس بیش‌تر در فشار ثابت ۲ کیلو بار که از منحنی واکنشی تولید ولاستونیت و عدم تبلور آن بعنوان پیشینه دمایی استفاده شده است.



شکل ۱۰. نمودار T-X برگرفته شده از [۱۴] که بر مبنای داده‌های ترمودینامیکی [۶] و برنامه PTX ارائه شده توسط [۱۳] برای سیستم SCM-HC ترسیم شده است.



شکل ۱۱. نمودار T-X برگرفته شده از [۸] برای سیستم KCMAS-HC که برای نمونه‌های پر پتاسیم استفاده شده، ترسیم شده است.



شکل ۱۲. نتیجه محاسبات برنامه THERMOCALC v3.3 برای نمونه‌های جلبر. اکتیویته فازهای کانیایی در این محاسبه یک در نظر گرفته شده است. واکنش‌های دخیل در محاسبه در شکل آمده است. اکثر آن‌ها در غلظت پائین CO₂ همدیگر را قطع کرده‌اند.

نتیجه‌گیری

کالک- سیلیکات‌های ایجاد شده در اثر دگرگونی مجاورتی در منطقه جلبر ارومیه حاوی مجموعه کانیایی کلسیت+تالک+سرپانتین+ترمولیت+دیوپسید می‌باشد. ترکیب شیمیایی سنگ کل کالک - سیلیکات‌ها نشانگر در حال تعادل بودن پاراژنز فوق و صحت نسبی سری واکنش‌های پیشنهاد شده می‌باشد. با دقت در موقعیت پیاده شده ترکیب شیمیایی نمونه‌ها در نمودار سازگاری SCM مشخص می‌شود تمامی نمونه‌ها تقریباً در امتداد خط اتصال (Tie Line) کلسیت - سرپانتین قرار می‌گیرند. این مطلب نشان می‌دهد که پاراژنز فراوان Cal+Srp در نمونه‌های مطالعه شده در حال تعادل ترمودینامیکی بوده است. با توجه به عدم تبلور فورستریت و حضور همیشگی و فراوان سرپانتین در این نمونه‌ها، واکنش تولید کننده الیوین معرف سقف دمایی انتشار یافته از سوی توده به هاله مجاورتی می‌باشد. بیشترین دمای ثبت شده در هاله حدود 50 ± 50 درجه سانتی‌گراد تعیین شده است. با استفاده از نمودارهای استاندارد و محاسبات برنامه THERMOCALC v3.3 ترکیب سیال بسیار غنی از آب ارزیابی شده و دمای تخمینی، تایید شده است. به احتمال زیاد بخشی از آب مربوط به سیالات موجود در سنگ‌های رسوبی قبل از شروع دگرگونی بوده و بخشی از آن از توده تامین شده است. برای درک دقیق منشأ سیال نیاز به مطالعات ایزوتوپی می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسنده بر خود لازم می‌داند از اساتید ارجمند آقایان دکتر سپاهی‌گرو و دکتر مؤذن که نظرات سازنده‌شان در بهبود مقاله اثر زیادی داشت کمال تشکر را داشته باشد. همچنین از معاونت پژوهشی دانشگاه ارومیه که هزینه‌های مالی انجام این تحقیق را فراهم نمودند، سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- [۱] مجرد، م (۱۳۸۹) تعادلات فازی در کالک- سیلیکات‌های جلبر ارومیه. چهاردهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، ارومیه.
- [۲] نقی‌زاده، ر (۱۳۸۳) نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اشنویه. شماره ۷۱۵۲. سازمان زمین‌شناسی کشور.
- [3] Barker A.J (1990) Introduction to metamorphic textures and microstructure, Blackie USA, Chapman and Hall, New York.
- [4] Barton M.D., Staude J.M., Snow E.A., Johnson D.A (1991)a Aureole systematic, In: Contact metamorphism, Kerrick DM (ed) Reviews in Mineralogy (26). Mineralogical Society of America.
- [5] Berberian M. and King C.P (1981) Towards a paleogeography and Tectonic evolution of Iran, Canadian Journal of Earth Sciences, 19: 210-265.
- [6] Berman R.G (1988) Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system Na₂O-K₂O-CaO-MgO-FeO-Fe₂O₃-Al₂O₃-SiO₂-TiO₂-H₂O-CO₂, Journal of Petrology, 29:445-522.

- [7] Best M.G (1982) *Igneous and metamorphic petrology*, WH Freeman, San Francisco, 630pp.
- [8] Bucher K. and Frey M (1994) *Petrogenesis of metamorphic rocks*, Translated by Valizadeh M.V. and Sadegian M. in to Persian. Tehran university press, 404p.
- [9] Holland T.J.B. and Powell R (1998) An internally consistent thermodynamic dataset for phase of petrological interest, *Journal of Metamorphic Geology*, 16: 309-343.
- [10] Kerrick D.M (1991) Overview of Contact Metamorphism, In: *Contact metamorphism*, Kerrick DM (ed) *Reviews in Mineralogy* (26) Mineralogical Society of America.
- [11] Kretz R (1983) Symbole for rock-forming minerals, *American Mineralogist*, 68: 277-279.
- [12] Moazzen, M. and Modjarrad, M. 2005. Contact metamorphism and crystal size distribution studies in the Shivar aureole, NW Iran., *Geological Journal*, 40: 499-517.
- [13] Perkins E.H., Brown T.H., Berman R.G (1986) PTX-SYSTEM: Three programs for calculation of pressure-temperature-composition phase diagrams, *Computers and Geosciences*, 12 :749-755.
- [14] Spear, F.S (1993) *Metamorphic phase equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*, Mineralogical Society of America, 799p.
- [15] Walther L.S. and Helgeson H.C (1977) Calculation of the thermodynamic properties of aqueous silica and the solubility of quartz and its polymorphs at high pressure and temperatures, *American Journal of Science*, 277.