مطالعه پتروگرافی، شیمی کانی‌ها، تعیین روند دما– فشار دگرگونی و محاسبه اکتیویته سیالات اپیدوت –آمفیبول –گارنت شیست های کمپلکس بجگان، استان کرمان

مریم درانی[1*]، محسن آروین[2]، رولند اوبرهنسلی[3]، هادی عمرانی[4] و سارا درگاهی[5]

[1]دکترا، بخش زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

[2]استاد، بخش زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

[3]استاد، انستیتو علوم زمین، دانشگاه پتسدام، پتسدام، آلمان

[4]استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

[5]دانشیار، بخش زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۴

چکیده

کمپلکس بجگان بخشی از زمین‌شناسی مکران در ایران را تشکیل می‌دهد که شامل انواع سنگ‌های متاپلیت، متابازیت، کالک سیلیکات، آمفیبولیت، مرمر، متاولکانوسدیمنت، نفوذی‌های اسیدی، بازیک و اولترابازیک است. کالک سیلیکات‌های موجود در کمپلکس بجگان به انواع اپیدوت شیست‌های آمفیبول دار، اپیدوت–آمفیبول شیست‌ها، اپیدوت–آمفیبول–گارنت شیست ها و میکاشیست‌های کربنات دار تقسیم بندی می‌شوند. اپیدوت –آمفیبول –گارنت شیست ها بالاترین درجه دگرگونی را در بین تمامی نمونه‌های کالک سیلیکاته نشان می دهند و دارای گردهمایی کانیایی گارنت، آمفیبول، اپیدوت، کلسیت، کوارتز، کلریت ثانویه و مقادیر فرعی و پراکنده تیتانیت، آپاتیت، میکای سفید ومگنتیت هستند. در این پژوهش ترکیب شیمی کانی‌ها در اپیدوت –آمفیبول –گارنت شیست‌ها بررسی و دما، فشار و اکتیویته فاز سیال ها در مراحل مختلف دگرگونی تعیین شده است. بر اساس داده های شیمی کانی های اپیدوت –آمفیبول –گارنت شیست ها، کانی‌های گارنت دارای انحلال جامد آلماندین، گروسولار، اسپسارتین و پیروپ (Alm_{35-50}, Grs_{23-31}, $Sps_{14.6-36}$, $Prp_{2.6-9.8}$; mol%) و منطقه بندی رشدی هستند، به طوری‌که آلماندین و اسپسارتین، به ترتیب، افزایش و کاهش چشمگیری از مرکز به سمت حاشیه کانی نشان می‌دهند. کانی‌های آمفیبول در گروه آمفیبول‌های سدیک- کلسیک قرار می‌گیرند و از نوع باروسیت هستند. کانی‌های کلریت در زیرگروه ریپیدولیت قرار می‌گیرند و کانی‌های گروه اپیدوت ، در زیر گروه کلینوزوئیزیت تقسیم‌بندی می‌شوند. دما و فشار اوج دگرگونی در اپیدوت –آمفیبول –گارنت شیست‌ها به ترتیب، ۶۱۰ درجه سانتی‌گراد و حدود ۸ کیلو بار بوده و اکتیویته سیالات در این شرایط، به صورت کسر مولی CO_2 در حدود ۰/۳۲ و کسر مولی H_2O در حدود ۰/۶۸ برآورد شده است. در شرایط دگرگونی برگشتی، دما، فشار و اکتیویته سیال ها، به ترتیب ۵۲۵ درجه سانتی‌گراد، حدود ۴/۵ کیلو بار، کسر مولی CO_2 در حدود ۰/۳۰۶ و کسر مولی H_2O در حدود ۰/۶۹ محاسبه شده‌اند. روند تغییرات دما و فشار در اپیدوت– آمفیبول–گارنت شیست‌ها، نشان دهنده یک مسیر ساعتگرد دما- فشار در طی دگرگونی پیشرونده و پسرونده این سنگ‌هاست.

کلیدواژه‌ها: کالک سیلیکات، شیمی کانی، دما- فشارسنجی، اکتیویته سیال، کمپلکس بجگان، کرمان.

***نویسنده مسئول:** مریم درانی

E-mail: maryamdorani@sci.uk.ac.ir

۱– پیش‌نوشتار

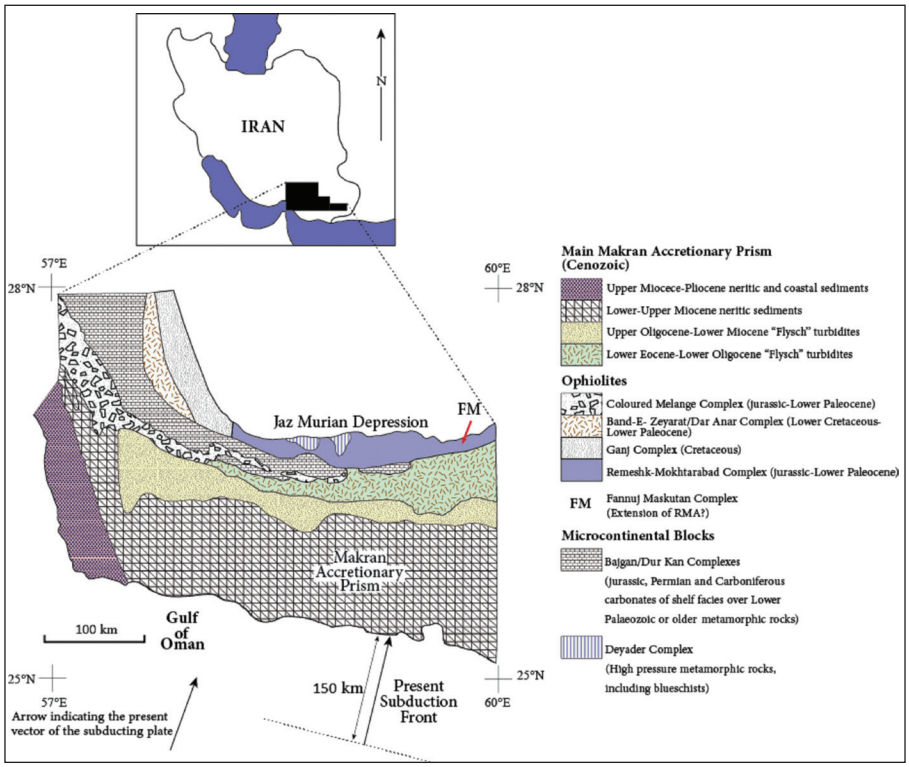
درجه دگرگونی دارای یک مفهوم استاتیک و عموماً بیانگر حداکثر شرایط دما و فشار وارده بر سنگ است (Spear, 1995). از این رو، هیچ گونه اطلاعاتی راجع به چگونگی رسیدن به چنین شرایطی و یا نحوه برگشت دوباره سنگ به سطح زمین در اختیار نمی‌گذارد. با این وجود، دگرگونی به‌صورت استاتیک نیست و به وسیله تغییر شرایط دما، فشار و استرس مشخص می‌گردد. تاریخچه شرایط دما- فشار یک سنگ در طی یک حادثه دگرگونی را روند دما- فشار دگرگونی می نامند. از تغییر فازها در طی روند دما- فشار می توان به عنوان ناظری حساس برای پارامترهای متعدد استفاده نمود. به‌طور مثال، موقعیت ساختاری محلی سنگ و نرخ جابه‌جایی تکتونیکی آن و همچنین، منابع گرمایی که باعث تغییرات دمایی می شوند. بنابراین، مشخص نمودن تاریخچه دما- فشار یک سنگ می‌تواند به درک بهتر فرآیندهای تکتونیکی کمک کند. اگر چه کالک سیلیکات ها بخش نسبتاً کوچکی را در پوسته تشکیل می دهند، اما دگرگونی آنها بسیار مهم است. زیرا علاوه بر تعیین شرایط دما- فشار، اطلاعات با ارزشی از فازهای سیال دگرگونی در اختیار می‌گذارند (Spear, 1995). در سنگ‌هایی همچون کالک‌سیلیکات‌ها، که هم شامل کانی‌های آبدار (سیلیکات های ورقه ای و آمفیبول ها) و هم کربنات‌ها هستند، در طی واکنش ها ممکن است به‌طور همزمان CO_2 و H_2O تولید و یا مصرف شوند. در چنین سنگ هایی، فاز سیال شامل حداقل دو گونه فرار CO_2 و H_2O است و غالباً، ترکیب سیال در اکثر سنگ‌های حاوی کربنات‌ها به صورت مخلوط CO_2 و H_2O در نظر گرفته می‌شود. معمولاً با مشخص کردن کسر مولی CO_2 (X_{CO2}) می‌توان ترکیب سیال را مشخص نمود. مقدار X_{CO2} در سیالات کاملاً خالص H_2O صفر و در سیالات کاملاً خالص CO_2 یک است. مقادیر X_{CO2} غالباً بر روی نمودارهای هم فشار T–X یا نمودارهای هم دمای P–X نشان داده می شوند. از کمپلکس دگرگونی بجگان در مقالات زمین شناسی متعددی نام برده شده است (McCall, 1985a and b, 2002 and 2003; McCall and Kidd, 1982)، اما مطالعه سنگ‌های دگرگونی کالک سیلیکاته در این کمپلکس کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین در این مقاله سعی شد به معرفی و تقسیم بندی این دسته از سنگ‌ها پرداخته شود و کانی‌شناسی، شرایط دما- فشار و ترکیب سیال اپیدوت– آمفیبول– گارنت شیست‌ها، که دارای بالاترین درجه دگرگونی در میان سنگ‌های کالک سیلیکاته کمپلکس بجگان هستند، مورد بررسی قرار گیرد.

۲– زمین‌شناسی منطقه

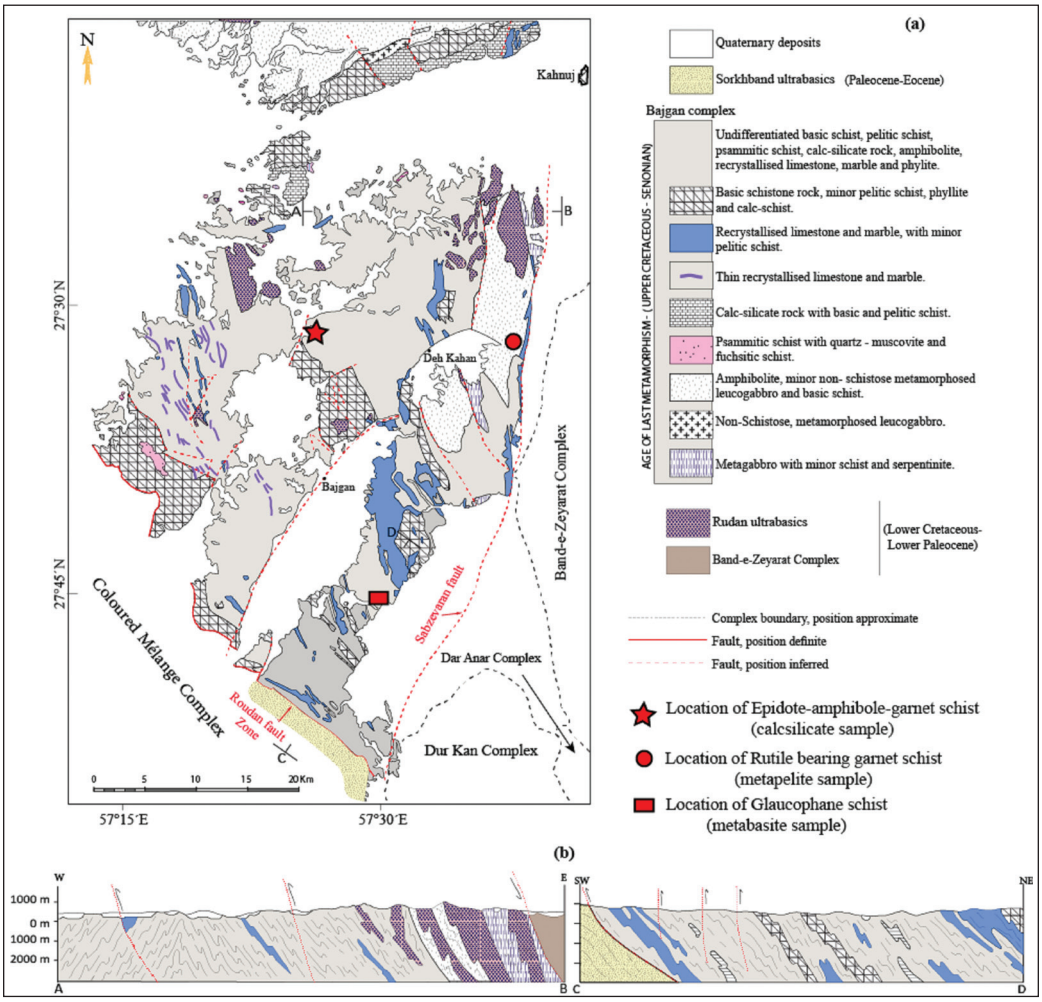
زون بجگان- دورکان، یک زون ممتد و باریک از پوسته اقیانوسی است که بخشی از زمین شناسی مکران در ایران را تشکیل می‌دهد (شکل ۱). در قسمت شمال غرب این زون که عرضی بیش از ۴۰ کیلومتر دارد، سنگ‌های دگرگونی پالئوزوئیک (کمپلکس بجگان) قرار گرفته‌اند که شامل انواع متاپلیت، متابازیت، کالک سیلیکات، آمفیبولیت، مرمر، متاولکانوسدیمنت، نفوذی های اسیدی، بازیک و اولترابازیک هستند (شکل‌های ۲ و ۳).

موقعیت کمپلکس بجگان در ارتباط با کمپلکس‌ها و واحدهای مجاورش به صورت زیر است:

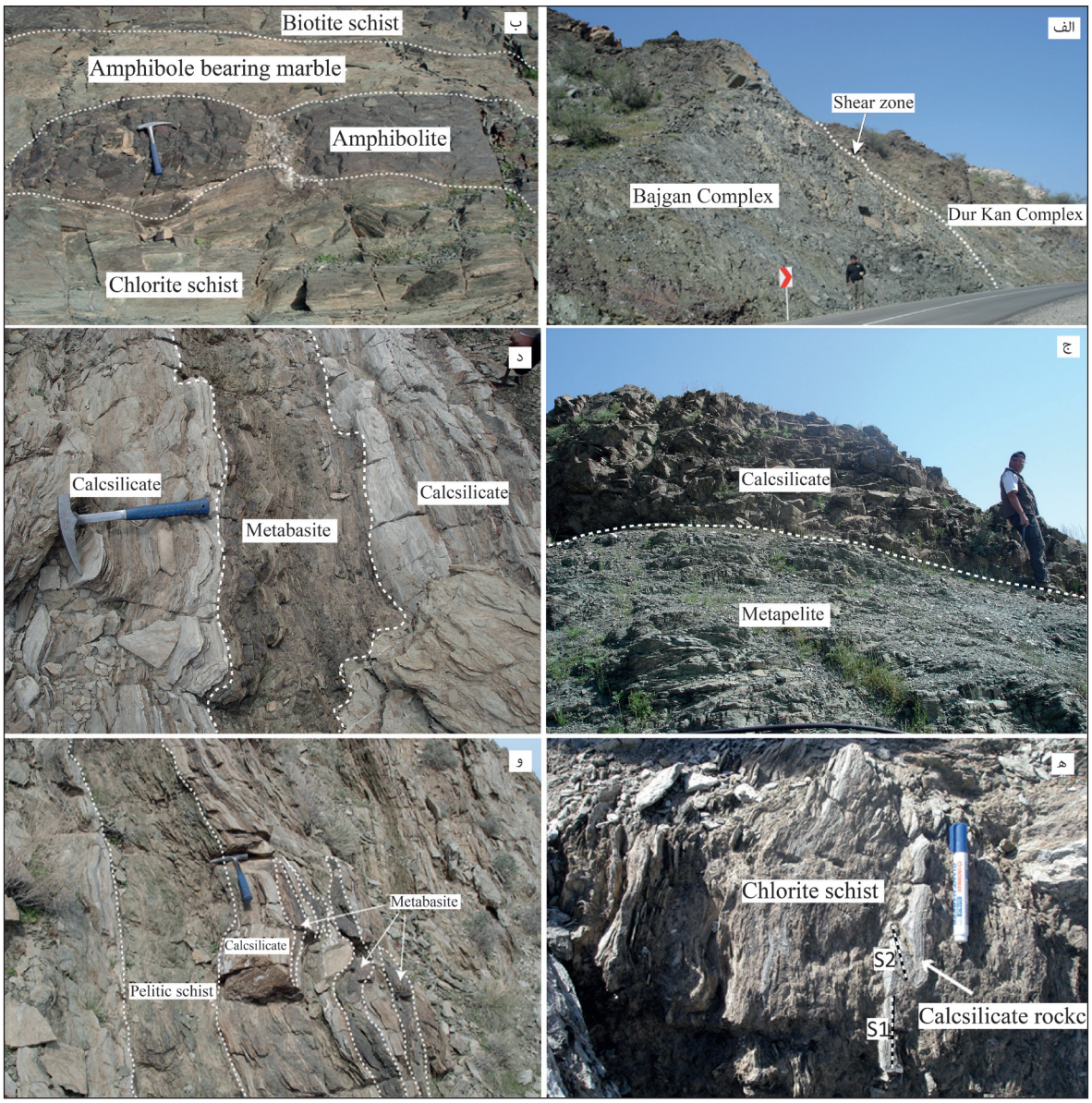
- بر روی قسمت‌های جنوب شرق کمپلکس بجگان، کمپلکس رسوبی دورکان مشتمل بر رسوبات چین خورده مزوزوئیک واقع شده است (شکل‌های ۲ و ۳).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی کمپلکس بجگان/دورکان بر روی نقشه زمین‌شناسی مکران (با تغییراتی از McCall, 2003).



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی کمپلکس بجگان. الف) نمایش تنوع سنگی، موقعیت نمونه برداری اپیدوت-آمفیبول-گارنت شیست و گارنت شیست روتیل دار در کمپلکس بجگان، به همراه مرزهای واحدهای سنگی مجاور؛ ب) نمایش دو برش W-E و SW-NE و ارتباط بین واحدهای سنگی اصلی.



شکل ۳- تصاویر واحدهای سنگی کمپلکس بجگان. الف) نمایش مرز تکتونیکی مابین کمپلکس های بجگان و دورکان. در محل تماس این دو کمپلکس یک زون برشی دیده می‌شود؛ ب) ترکیبات متفاوت سنگ ها در توالی متاولکانوسدیمنت‌های کمپلکس بجگان. آمفیبولیت ها به علت مقاومت سنگ مادرشان به‌صورت توده‌ای و سایر قسمت‌ها به‌صورت لایه‌ای و دارای شیستوزیته دیده می‌شوند؛ ج) نمایش تماس سنگ‌های متاپلیتی (بیوتیت- کلریت شیست) و سنگ‌های کالک سیلیکاته؛ د) قرارگیری متابازیت‌ها در بین کالک سیلیکات‌های چین خورده؛ ه) نمایش تناوب سنگ‌های کالک سیلیکاته و کلریت شیست. به دو روند فولیاسیون S_1 و S_2 توجه فرمایید؛ و) کالک سیلیکات های چین خورده که به‌صورت بین لایه با پلیتیک شیست ها و متابازیت‌ها دیده می‌شوند.

- در بخش‌های شمالی و شرقی، کمپلکس بجگان به وسیله یک حوزه حاشیه‌ای باریک از بلوک قاره‌ای لوت جدا می‌شود. این حوزه حاشیه‌ای یک ریفت اقیانوسی مشخص از نئوکومین تا پالئوسن زیرین و مکانی است که به احتمال زیاد افیولیت های کهنوج در آنجا تشکیل شده اند (Kananian et al., 2001).

- در قسمت‌های جنوب و جنوب شرق کمپلکس بجگان، کمپلکس های دره انار و بند زیارت (شکل ۲) نشان دهنده بقایای اقیانوس داخلی سنی بین ژوراسیک تا پالئوسن پیشین هستند که در یک حوزه حاشیه‌ای تشکیل یافته اند (Kananian et al., 2001).

- در قسمت جنوبی، یک آمیزه رنگی تکتونیکی (McCall and Kidd, 1982) مابین گوه افزایشی مکران و کمپلکس بجگان- دورکان واقع شده است (شکل های ۱ و ۲). این آمیزه رنگی شامل دو کمپلکس الترامیفیک مجزا به نام‌های سرخ بند و رودان است که آنها را به عنوان افیولیت‌های ناقص در نظر می گیرند (McCall, 2002). بر اساس شواهد چینه‌شناسی، سنگ‌های رسوبی این آمیزه رنگی دارای سنی بین ۱۹۰ تا ۱۶۰ میلیون سال است (McCall, 1985a). بنابراین، سن تشکیل این آمیزه رنگی را می توان در کرتاسه پیشین و یا حتی ژوراسیک متصور شد (McCall and Kidd, 1982).

از آنجا که کمپلکس بجگان در قسمت جنوب شرق، توسط آهک‌های کربنیفر و پرمین کمپلکس دورکان و در قسمت‌های شمال توسط رسوبات ژوراسیک مکران پوشیده شده است، در نتیجه می‌توان سن پالئوزوئیک پیشین یا پرکامبرین را برای آن در نظر گرفت (McCall, 2002). علاوه بر این McCall (1985a) با توجه به روش K-Ar و فسیل‌های کشف شده در بخش شمالی کمپلکس بجگان، به ترتیب سن‌های پالئوزوئیک و دونین را برای این کمپلکس پیشنهاد کرده است. سن سنجی رادیومتریک امتداد این کمپلکس در بخش‌های شمالی، با استفاده از روش K-Ar، بیانگر سن کرتاسه (سنونین) است که بر روی سنگ‌های قدیمی‌تر قرار گرفته اند (McCall, 1985b).

۳- روش مطالعه

در طی مطالعات صحرایی در کمپلکس بجگان، ۵۸ نمونه از سنگ‌های کالک سیلیکاته جمع‌آوری و به منظور بررسی‌های پتروگرافی از آنها مقطع نازک میکروسکوپی تهیه شد. بر اساس نوع و فراوانی کانی‌های تشکیل دهنده کالک سیلیکات‌های موجود در کمپلکس بجگان، این سنگ‌ها به انواع اپیدوت شیست‌های آمفیبول دار، اپیدوت- مفیبول شیست‌ها، اپیدوت-آمفیبول-گارنت شیست‌ها و میکا شیست‌های کربنات دار تقسیم بندی شده‌اند. با توجه به اینکه اپیدوت-آمفیبول -گارنت شیست‌ها بالاترین درجه دگرگونی را در بین تمامی نمونه ها نشان می‌دهند، از این رو برای تعیین شرایط اوج دگرگونی در سنگ‌های کالک سیلیکاته کمپلکس بجگان انتخاب شده‌اند. به منظور انجام آزمایش الکترون میکروپروب بر روی نمونه مورد نظر، از دستگاه الکترون میکروپروب JEOL JXA-8200 با ولتاژ شتاب دهنده15kV و جریان 10-20nA و با قطر نقاط قابل اندازه گیری بین 2-10μm در دانشگاه پتسدام آلمان استفاده شده است. برای کالیبره کردن این دستگاه استانداردهای طبیعی و مصنوعی زیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند: رودونیت [M]، روتیل[Ti] ، ولاستونیت [Si, Ca]، پریکلاز [Mg]، ارتوکلاز [Al,k]، فلوریت [F]، آلبیت [Na] و هماتیت [Fe]. داده‌های تجزیه میکروروب کانی‌ها در جدول‌های ۱ تا ۴ آورده شده است. علاوه بر این، جهت استفاده از نرم افزار تریاک- دومینو و رسم سودوسکشن‌های مربوط به اپیدوت -آمفیبول -گارنت شیست ، آنالیز سنگ کل (XRF) این نمونه، در دانشگاه پتسدام آلمان انجام شد. نشانه‌های اختصاری استفاده شده برای نام کانی‌ها از Bucher and Grapes (2011) گرفته شده است.

جدول ۱- داده‌های تجزیه میکروپروب کانی گارنت در اپیدوت- آمفیبول- گارنت شیست‌های کمپلکس بجگان.

Sample	Grt	Grt	Grt (rim)	Grt (core)	Grt (rm)	Grt	Grt	Grt	Grt
SiO_2	37.49	37.983	38.212	37.595	38.36	37.692	37.518	37.517	37.893
TiO_2	0.175	0.06	0.098	0.099	0.044	0.179	0.18	0.104	0.091
Al_2O_3	21.081	20.991	21.457	20.714	21.339	21.1	20.834	21.291	21.276
FeO	21.644	21.749	22.159	17.484	21.4	21.682	18.448	22.828	22.632
MnO	8.858	8.488	6.825	16.249	8.307	8.565	12.964	6.58	6.992
MgO	1.129	1.224	1.611	0.663	1.529	1.09	0.713	1.485	1.498
CaO	9.931	10.156	10.272	8.137	9.789	10.021	9.866	10.227	10.29
Na_2O	0.007	0	0.036	0.022	0.021	0.021	0.029	0.042	0.046
K_2O	0.003	0	0	0	0	0.002	0	0	0.003
Cr_2O_3	0	0.007	0.013	0.003	0	0	0	0	0.014
Total	100.318	100.658	100.683	100.966	100.789	100.352	100.552	100.074	100.735
cations per 24 Oxygens									
Si	5.974	6.026	6.031	6.002	6.06	6.001	5.984	5.967	5.988
Ti	0.021	0.007	0.012	0.012	0.005	0.021	0.022	0.012	0.011
Al	3.96	3.925	3.991	3.898	3.973	3.96	3.917	3.991	3.963
$*Fe^{3+}$	0.044	0.042	0	0.081	0	0.011	0.068	0.017	0.022
Fe^{2+}	2.841	2.844	2.925	2.253	2.827	2.877	2.393	3.019	2.969
Mn	1.196	1.141	0.912	2.197	1.111	1.155	1.752	0.886	0.936
Mg	0.268	0.289	0.379	0.158	0.36	0.259	0.17	0.352	0.353
Ca	1.696	1.726	1.737	1.392	1.657	1.71	1.686	1.743	1.742
Na	0.002	0	0.011	0.007	0.006	0.006	0.009	0.013	0.014
K	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0.001
Cr	0	0.001	0.002	0	0	0	0	0	0.002
Total	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Alm (%)	47.346	47.396	49.13	37.551	47.471	47.943	39.879	50.315	49.482
Prp (%)	4.47	4.824	6.367	2.63	6.046	4.312	2.826	5.868	5.882
Sps (%)	19.925	19.009	15.325	36.621	18.663	19.252	29.192	14.773	15.598
Grs (%)	28.259	28.771	29.178	23.198	27.82	28.493	28.103	29.045	29.038
*XMg	0.086	0.092	0.115	0.065	0.113	0.083	0.066	0.104	0.106

*XMg = $Mg/Mg+Fe^{2+}$, $*Fe^{3+}$ was estimated by charge balance.

جدول ۲- داده‌های تجزیه میکروپروب کانی آمفیبول در اپیدوت- آمفیبول- گارنت شیست های کمپلکس بجگان.

sample	Am	Am	Am	Am	Am	Am	Am	Am	Am	Am	Am
SiO_2	46.792	46.948	46.331	46.804	47.032	47.539	46.385	47.047	47.46	47.364	45.671
TiO_2	0.347	0.371	0.307	0.328	0.332	0.333	0.374	0.303	0.322	0.297	0.351
Al_2O_3	11.149	11.286	12.102	11.67	11.857	11.755	11.758	10.664	11.043	10.721	10.974
FeO	17.293	16.932	16.612	16.96	16.457	16.284	17.153	16.859	17.321	17.31	16.991
MnO	0.454	0.402	0.445	0.443	0.454	0.405	0.479	0.472	0.562	0.499	0.484
MgO	10.448	10.683	10.218	10.203	10.429	10.502	10.324	10.785	10.353	10.389	10.013
CaO	7.653	7.533	7.387	7.421	7.408	7.279	7.481	7.679	7.656	7.601	7.93
Na_2O	3.594	3.792	3.672	3.712	3.827	3.843	3.623	3.552	3.364	3.449	3.463
K_2O	0.431	0.445	0.424	0.46	0.408	0.362	0.46	0.404	0.418	0.437	0.485
Cr_2O_3	0	0	0	0.001	0.013	0	0.014	0	0.007	0	0.019
Total	98.161	98.392	97.498	98.002	98.217	98.302	98.051	97.765	98.506	98.067	96.381
cations per 23 equivalent Oxygens											
T: Si	6.713	6.71	6.668	6.718	6.722	6.772	6.651	6.764	6.772	6.795	6.715
Al (IV)	1.287	1.29	1.332	1.282	1.278	1.228	1.349	1.236	1.228	1.205	1.285
Fe^{3+}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T-Sum	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
C: Al (VI)	0.598	0.611	0.721	0.692	0.72	0.745	0.638	0.571	0.629	0.608	0.617
Ti	0.037	0.04	0.033	0.035	0.036	0.036	0.04	0.033	0.035	0.032	0.039
Fe^{3+}	1.183	1.16	1.164	1.12	1.078	1.062	1.236	1.169	1.181	1.156	1.007
Cr	0	0	0	0	0.001	0	0.002	0	0.001	0	0.002
Mg	2.235	2.276	2.192	2.183	2.222	2.23	2.207	2.312	2.202	2.222	2.195
Fe^{+2}	0.892	0.864	0.835	0.916	0.889	0.878	0.821	0.858	0.886	0.921	1.082
Mn	0.055	0.049	0.054	0.054	0.055	0.049	0.058	0.057	0.068	0.061	0.06
C-Sum	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
B: Ca	1.176	1.154	1.139	1.141	1.135	1.111	1.149	1.183	1.17	1.168	1.249
Na	0.824	0.846	0.861	0.859	0.865	0.889	0.851	0.817	0.83	0.832	0.751
B-Sum	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
A: Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Na	0.176	0.204	0.164	0.174	0.195	0.172	0.156	0.173	0.101	0.128	0.237
K	0.079	0.081	0.078	0.084	0.074	0.066	0.084	0.074	0.076	0.08	0.091
A-Sum	0.255	0.286	0.242	0.258	0.269	0.238	0.241	0.247	0.177	0.208	0.327
XMg	0.715	0.725	0.724	0.704	0.714	0.718	0.729	0.729	0.713	0.707	0.67
$Al^{VI}/(Al^{VI}+Fe^{3+})$	0.336	0.345	0.382	0.382	0.4	0.412	0.34	0.328	0.347	0.345	0.38
Fe^{3+} was estimated by charge balance.											

جدول ۳- داده‌های تجزیه میکروپروب کانی کلریت در اپیدوت- آمفیبول- گارنت شیست های کمپلکس بجگان.

sample	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl
SiO_2	27.12	27.144	27.351	27.256	27.153	27.604	27.248	26.922	26.848	27.538
TiO_2	0.038	0.036	0	0.019	0.048	0.005	0.039	0.045	0.054	0.019
Al_2O_3	20.732	20.621	20.379	20.398	20.577	20.174	20.927	21.303	21.202	20.458
Cr_2O_3	0	0.005	0.009	0.004	0.007	0	0.008	0	0	0.029
FeO	19.57	19.83	19.731	19.45	19.817	19.974	19.703	19.801	19.634	19.757
MnO	1.126	1.191	1.212	1.153	1.042	1.569	1.207	1.089	0.837	1.233
MgO	20.495	19.846	19.991	19.935	20.087	19.387	19.77	19.784	20.161	19.623
CaO	0.008	0.028	0.026	0.04	0.014	0.261	0.058	0.023	0.046	0.043
Na_2O	0	0	0	0.021	0.025	0.022	0	0.006	0.03	0.002

ادامه جدول ۳

sample	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl
K_2O	0.009	0.009	0.005	0	0	0.028	0.01	0	0.005	0.011
Total	89.098	88.71	88.704	88.276	88.77	89.024	88.97	88.973	88.817	88.713
cations per 14 equivalent Oxygens										
Si	2.73	2.75	2.77	2.77	2.75	2.8	2.75	2.72	2.71	2.8
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Al	2.46	2.47	2.43	2.45	2.46	2.41	2.49	2.54	2.53	2.44
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe^{2+}	1.65	1.68	1.67	1.65	1.68	1.69	1.66	1.67	1.66	1.67
Mn	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.13	0.1	0.1	0.1	0.11
Mg	3.08	3	3.02	3.02	3.03	2.93	2.98	2.98	3.03	2.96
Ca	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0
Na	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	10.02	10	9.99	9.99	10.02	9.98	9.98	10.01	10.03	9.98

جدول ۴- داده‌های تجزیه میکروپروب کانی اپیدوت در اپیدوت- آمفیبول- گارنت شیست‌های کمپلکس بجگان.

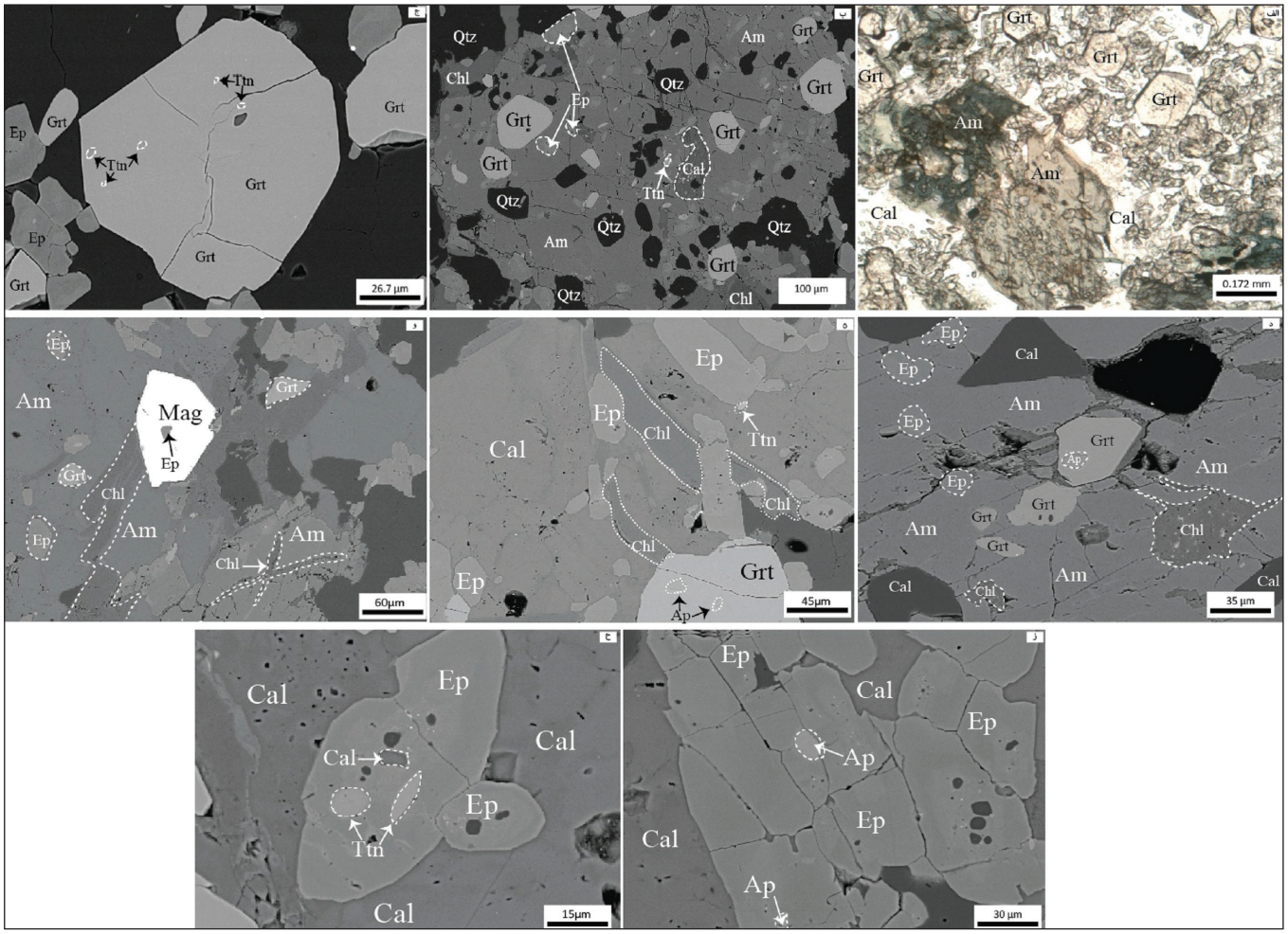
sample	Ep	Ep	Ep	Ep	Ep	Ep	Ep	Ep	Ep	Ep
SiO_2	37.3	37.328	37.842	37.583	37.688	37.431	37.205	38.021	37.506	37.889
TiO_2	0.075	0.045	0.063	0.069	0.141	0.095	0.079	0.074	0.089	0.165
Al_2O_3	23.288	22.74	24.016	24.131	24.704	22.907	22.97	24.297	25.047	24.79
FeO	12.938	13.374	11.753	11.836	11.502	13.278	13.038	11.128	10.267	11.376
MnO	0.776	0.727	0.598	0.431	0.369	0.811	0.844	0.395	0.207	0.376
MgO	0.03	0.014	0.002	0.037	0.05	0.026	0.017	0.034	0.048	0.057
Cr_2O_3	0	0.004	0	0.027	0	0.003	0.007	0.019	0.024	0.044
CaO	22.615	22.475	22.854	22.849	22.616	22.589	22.512	22.984	23.126	22.794
Na_2O	0	0	0	0	0.012	0	0	0	0.016	0.012
K_2O	0.009	0.008	0.002	0	0	0.002	0	0	0	0.007
Total	97.031	96.715	97.13	96.963	97.082	97.142	96.672	96.952	96.33	97.51
cations per 12.5 equivalent Oxygens										
Si	2.969	2.983	2.994	2.979	2.976	2.978	2.974	3.006	2.979	2.978
Ti	0.004	0.003	0.004	0.004	0.008	0.006	0.005	0.004	0.005	0.01
Al	2.185	2.142	2.24	2.254	2.299	2.148	2.164	2.264	2.345	2.297
Fe^{3+}	0.861	0.894	0.778	0.785	0.759	0.884	0.872	0.736	0.682	0.748
Mn	0.052	0.049	0.04	0.029	0.025	0.055	0.057	0.026	0.014	0.025
Mg	0.004	0.002	0	0.004	0.006	0.003	0.002	0.004	0.006	0.007
Cr	0	0	0	0.002	0	0	0	0.001	0.002	0.003
Ca	1.929	1.924	1.938	1.94	1.913	1.926	1.928	1.947	1.968	1.92
Na	0	0	0	0	0.002	0	0	0	0.002	0.002
K	0.001	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0.001
Sum	8.004	7.997	7.993	7.997	7.988	8	8.003	7.989	8.003	7.989
XPs	0.283	0.294	0.258	0.258	0.248	0.291	0.287	0.245	0.225	0.246

۴- سنگ نگاری اپیدوت- آمفیبول- گارنت شیست‌ها

اپیدوت- آمفیبول- گارنت شیست‌های مورد مطالعه در کمپلکس بجگان با توجه به نوع و فراوانی کانی های تشکیل دهنده آنها در گروه کالک سیلیکات‌ها طبقه بندی می‌شوند و شامل کانی‌های گارنت، آمفیبول، اپیدوت، کلسیت، کوارتز، کلریت ثانویه و مقادیر فرعی و پراکنده تیتانیت، آپاتیت، میکای سفید و مگنتیت هستند.

کانی‌های ریز گارنت با قطر حدود ۰/۱ میلی‌متر به صورت شکل‌دار در تمام قسمت‌های زمینه سنگ دیده می‌شوند (شکل ۴- الف). علاوه بر این، کانی‌های گارنت به‌صورت ادخال هایی در داخل کانی‌های آمفیبول به چشم می‌خورند (شکل ۴- ب). از طرف دیگر، در داخل کانی گارنت ادخال‌های ریز تیتانیت (شکل ۴- ج) و آپاتیت (شکل‌های ۴- د و ه) دیده می‌شوند که ممکن است بیانگر تقدم زمانی تکانی این ادخال‌ها نسبت به کانی گارنت باشند و همچنین ممکن است نشان دهنده رشد همزمان این کانی‌ها باشد که با گذشت زمان کانی گارنت با توجه به شرایط دگرگونی و شیمی سنگ سریع‌تر و بیشتر رشد کرده است. آمفیبول‌های سبز- آبی موجود در این سنگ‌ها، بر اساس داده های میکروپروب از نوع آمفیبول‌های سدیم- کلسیم دار باروسیت هستند و به‌صورت کشیده و جهت یافته در سنگ قرار گرفته‌اند و در برخی قسمت ها به‌وسیله کلریت‌های ثانویه جانشین شده‌اند. طول متوسط این کانی‌ها در حدود ۱ میلی‌متر است و ادخال‌های فراوان کلسیت، گارنت، اپیدوت و تیتانیت باعث ایجاد بافت پویی کیلوبلاستیک در این کانی‌ها شده‌اند (شکل‌های ۴- د، و). کانی‌های ریز تیتانیت علاوه بر حضور در داخل کانی‌های آمفیبول و گارنت، در زمینه سنگ نیز به‌طور پراکنده دیده می شوند.

کانی‌های اپیدوت در این سنگ‌ها، علاوه بر قرارگیری در داخل کانی‌های آمفیبول و گارنت، در زمینه سنگ نیز به وفور یافت می شوند و در برخی قسمت ها می توان ادخال‌های تیتانیت، کلسیت و آپاتیت را در آن ها مشاهده نمود (شکل‌های ۴- ز و ح). کانی‌های تیره موجود در این سنگ‌ها، دارای ترکیب مگنتیت هستند و به مقدار تقریباً اندک و غالباً به‌صورت نیمه شکل‌دار، هم در زمینه سنگ و هم به‌صورت ادخال در کانی‌های آمفیبول دیده می شوند (شکل ۳- و).



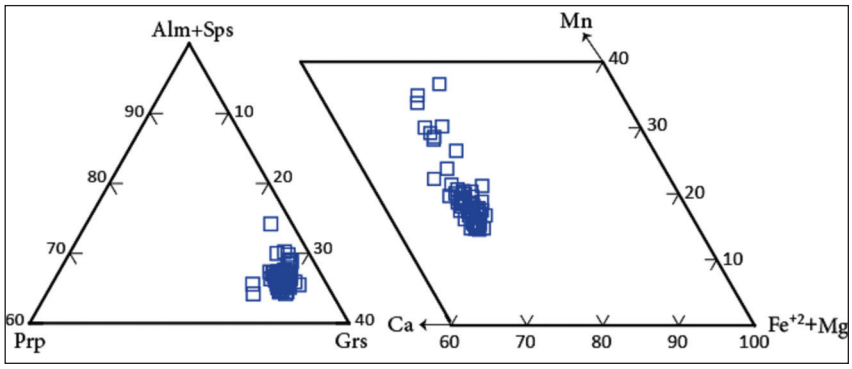
شکل ۴- تصاویر سنگ‌نگاری نمونه اپیدوت- آمفیبول-گارنت شیست. الف) کانی‌های یوهدرال گارنت در شرایط PPL؛ ب) تصویر الکترونی پورفیروبلاست آمفیبول که دارای بافت پوئی کیلوبلاستیک و حاوی ادخال‌های گارنت، کوارتز، کلسیت، اپیدوت و تیتانیت است. بخش‌هایی از کانی آمفیبول به وسیله کلریت های ثانویه جانشین شده‌اند؛ ج) نمایش ادخال تیتانیت در کانی گارنت در شرایط BSC؛ د) نمایش کانی تیتانیت در زمینه سنگ و ادخال های آپاتیت در داخل کانی گارنت در شرایط BSC؛ ه) تصویر الکترونی پوئی کیلوبلاست آمفیبول که شامل ادخال‌های گارنت، اپیدوت و کلسیت است. در برخی قسمت‌ها، آمفیبول به وسیله کلریت ثانویه جانشین شده است. کانی آپاتیت به‌صورت ادخال در کانی گارنت دیده می شود؛ و) نمایش ادخال مگنتیت در داخل پوئی کیلوبلاست آمفیبول در شرایط BSC؛ ز و ح) نمایش ادخال‌های کلسیت، تیتانیت و آپاتیت در داخل کانی اپیدوت در شرایط BSC.

۵- شیمی کانی‌ها

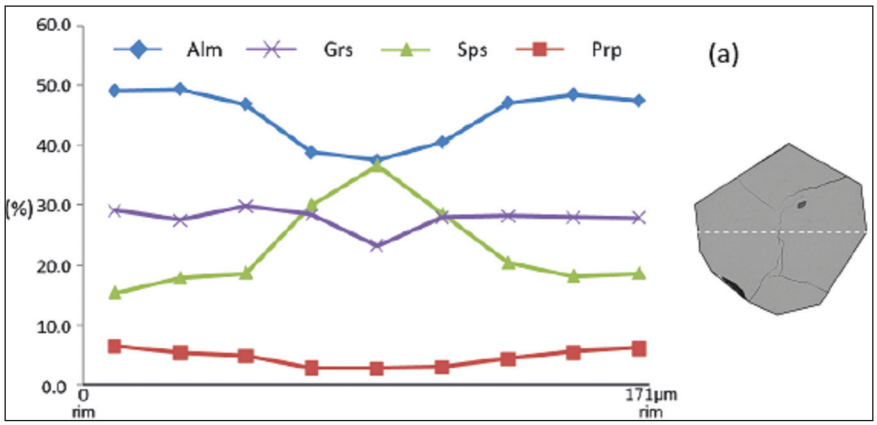
ترکیب شیمیایی کانی‌های دگرگونی گارنت، آمفیبول، اپیدوت و کلریت در سنگ‌های اپیدوت- آمفیبول-گارنت شیست با استفاده از روش EPMA مشخص شده است. گزیده‌ای از این داده‌ها در جدول های ۱ تا ۴ آورده شده است.

۵- ۱. گارنت

فرمول گارنت بر اساس ۱۶ کاتیون و ۲۴ اکسیژن به دست آمده (جدول ۱) و Fe^{3+} با استفاده از موازنه بارها محاسبه شده است. ترکیب گارنت‌های مورد مطالعه در نمودارهای مثلثی پیروپ- اسپسارتین- آلماندین+ گروسولر و کلسیم- منگنز- آهن+منیزیم (شکل ۵) دیده می شود که انحلال جامد آلماندین، گرسولار، اسپسارتین و پیروپ (Alm $_{35-50}$, Grs $_{23-31}$, Sps $_{14.6-36}$, Prp $_{2.6-9.8}$; mol%) دارند. نیمرخ ترکیبی پورفیروبلاست‌های گارنت‌های در سنگ‌های مورد مطالعه، بیانگر منطقه‌بندی رشدی در این کانی‌ها هستند، به طوری که آلماندین و اسپسارتین، به ترتیب، افزایش و کاهش چشمگیری از مرکز به سمت حاشیه کانی نشان می دهند (شکل ۶).



شکل ۵- ترکیب شیمیایی گارنت‌ها در نمودارهای سه تایی Ca-Mn-(Fe^{2+}+Mg) و Grs-Alm+Sps-Prp.



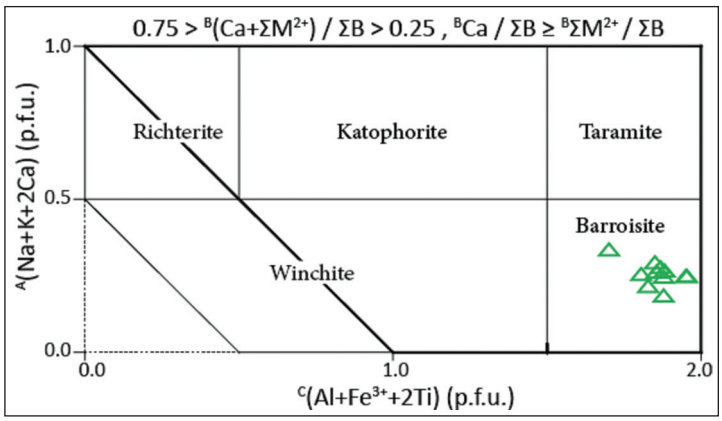
شکل ۶- نیمرخ رسم شده از منطقه بندی شیمیایی گارنت در سنگ‌های اپیدوت - آمفیبول-گارنت شیست. خط نقطه چین بر روی تصویر BSE مسیر نیمرخ آنالیز شده در طول پورفیروبلاست را نشان می دهد.

۵- ۲. آمفیبول

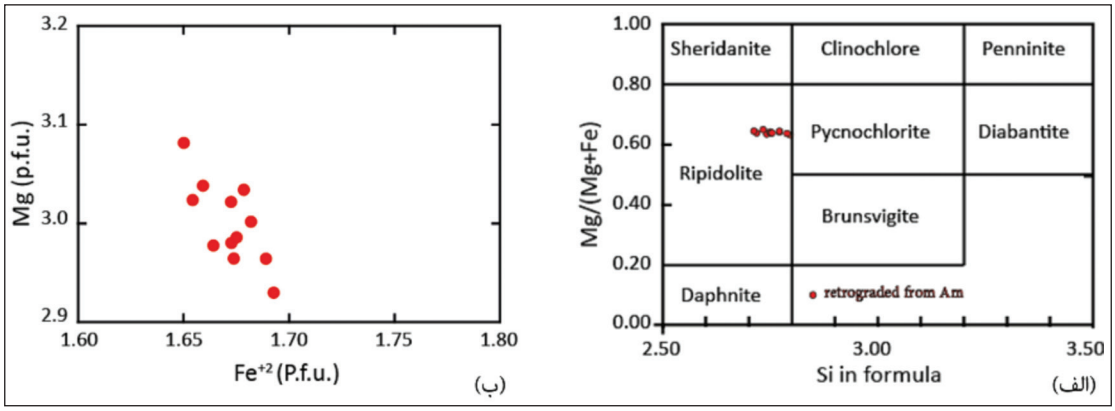
ترکیب ساختاری آمفیبول بر اساس ۱۳ کاتیون و ۲۳ اکسیژن محاسبه شده است (جدول ۲). بر اساس تقسیم بندی و نام‌گذاری Hawthorne et al. (2012) و با در نظر گرفتن شرایط $^{B}(Ca + \Sigma M^{2+})/\Sigma B > 0.25$, $^{B}Ca/\Sigma B \geq {}^{B}\Sigma M^{2+}/\Sigma B < 0.75$، کانی‌های آمفیبول در سنگ‌های مورد مطالعه در گروه آمفیبول های سدیک- کلسیک قرار می‌گیرند. در این کانی‌ها، فضای مواضع T و C به‌طور غالب و به ترتیب، به وسیله کاتیون های سیلیسیم و منیزیم پر شده است. موضع A غالباً خالی و مجموع سدیم و پتاسیم در این سایت کمتر از ۰/۵ بوده و عنصر کلسیم، کاتیون غالب در موضع B این نمونه هاست. نسبت‌های X_{Mg} ($Mg/Mg+Fe^{2+}$) در این کانی‌ها در محدوده بین ۰/۷۱ تا ۰/۹۹ متغیر است. بر اساس نمودار $^{C}(Al+Fe^{3+}+Ti)$ apfu در برابر $^{A}(Na+K+2Ca)$ apfu، ترکیب این کانی‌ها از نوع باروسیت است (شکل ۷).

۵- ۳. کلریت

فرمول کانی‌های کلریت در نمونه‌های اپیدوت-آمفیبول- گارنت شیست بر اساس ۱۴ اکسیژن محاسبه (جدول ۳) و در دیاگرام Si در مقابل Mg/(Mg+Fe) ترسیم شده‌اند (شکل ۸- الف). با توجه به دیاگرام مذکور، کانی‌های مورد مطالعه در زیرگروه ریپیدولیت قرار می‌گیرند. هماهنگی کاملی بین مقدار محتوای Fe^{2+} و Mg این کانی‌ها وجود دارد. به طوری که با افزایش Fe^{2+}، مقدار Mg کاهش می یابد و نمونه با حداکثر Fe^{2+} (۱/۷ p.f.u) دارای حداقل Mg (۲/۹۳ p.f.u) و نمونه با حداقل Fe^{2+} (۱/۶۵ p.f.u) دارای حداکثر Mg (۳/۰۸ p.f.u) است (شکل ۸ - ب).



شکل ۷- تقسیم بندی آمفیبول های سدیک - کلسیک در نمودار $^{C}(Al+Fe^{3+}+Ti)$ (p.f.u). در برابر $^{A}(Na+K+2Ca)$ (p.f.u.) (Hawthorne et al., 2012).



شکل ۸-الف) ترسیم موقعیت ترکیبی کلریت در نمودار Si در مقابل Mg/(Mg+Fe)؛ ب) ترسیم نمونه‌های کلریت در نمودار Fe^{2+} (p.f.u). در مقابل Mg (p.f.u).

۵- ۴. اپیدوت

بر اساس تقسیم بندی Armbruster et al. (2006) کانی‌های اپیدوت آنالیز شده از نمونه‌های مورد مطالعه، در زیر گروه کلینوزوئیزیت قرار می گیرند و فرمول آن‌ها بر پایه ۸ کاتیون و ۱۲/۵ اکسیژن به دست آمده است (جدول ۴). همه آهن در ساختار این کانی‌ها به صورت Fe^{+3} در نظر گرفته شد و مقدار $X_{ps}[Ps=pistacite, Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Al)]$ از ۰/۲۲ تا ۰/۳۰ در نوسان است.

۶- زمان- دما- فشارسنجی اپیدوت - مفیبول- گارنت شیست ها

بالاترین شرایط دما و فشار سنگ‌های کالک سیلیکاته در کمپلکس بجگان مربوط به نمونه‌های اپیدوت- آمفیبول- گارنت شیست است. به منظور تعیین محدوده دما و فشار این سنگ‌ها و رسم سودوسکشن مربوط به آنها، از نرم افزار تریاک- دومینو و اطلاعات ترمودینامیکی Berman (1988) استفاده شده است. این نرم افزار برای مدلسازی‌های ترمودینامیکی در سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (Omrani et al., 2013a and b and 2017).

با استفاده از نتایج داده های XRF نمونه سنگی اپیدوت- آمفیبول-گارنت شیست، سودوسکشن مربوط به این نمونه به ترتیب، در محدوده‌های دمایی و فشاری ۲۵۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۱/۵ تا ۱۵ کیلوبار ترسیم شده است (شکل ۹). به منظور پی بردن به تاریخچه تحولات دگرگونی نمونه مورد مطالعه، از داده های الکترون میکروپروب آنالیز کانی گارنت استفاده شد. از میان تمامی داده‌های مربوط به کانی‌های گارنت موجود در نمونه مورد مطالعه، کانی دارای بالاترین میزان عضو انتهایی، پیروپ بود که مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از نرم‌افزار تریاک - دومینو، ایزوپلت‌های مربوط به اعضای انتهایی آلماندین و پیروپ کانی گارنت ترسیم شده اند (شکل های ۱۰ و ۱۱).

نتایج داده‌های الکترون میکروپروب مربوط به کانی گارنت، بیانگر تغییرات مقادیر اعضای انتهایی از هسته به سمت حاشیه این کانی هستند (شکل ۱۲). به منظور بررسی تاریخچه دما و فشار تشکیل و رشد کانی گارنت، داده‌های الکترون میکروپروب به سه بخش متمایز مرکزی، میانی و حاشیه‌ای تقسیم شده اند، که در شکل ۱۲ به رنگ‌های متفاوت و به ترتیب با شماره های ۱، ۲ و ۳ مشخص شده اند.

در ابتدای تشکیل و هسته بندی کانی گارنت (بخش۱ شکل ۱۲)، اعضای انتهایی آلماندین و پیروپ به ترتیب دارای مقادیر ۳۸% و ۳% هستند. محل تلاقی مقادیر ذکر شده دو ایزوپلت آلماندین و پیروپ، منطبق بر دمای ۴۸۰ درجه سانتی گراد و فشار ۱/۶۵ کیلوبار است (شکل ۱۳- الف).

با ادامه روند رشد، محتوای عضو انتهایی پیروپ به‌طور ناگهانی تا ۹/۵% افزایش می‌یابد (بخش ۲ شکل ۱۲). در چنین شرایطی محتوای عضو انتهایی آلماندین به

۴۱% می رسد. با توجه به اینکه رابطه مستقیمی مابین افزایش فشار و افزایش محتوای عضو انتهایی پیروپ وجود دارد، محل تلاقی مقادیر ذکر شده دو ایزوپلت آلماندین و پیروپ که منطبق بر دمای ۶۱۰ درجه سانتی گراد و فشار ۷/۹ کیلوبار بوده (شکل ۱۳- ب)، نمایانگر حداکثر دما و فشار اعمال شده بر سنگ و یا به عبارتی شرایط اوج دگرگونی است.

چنین دما و فشاری، مطابق با زون گارنت در متاپلیت هاست (Yardley, 1982). علاوه بر این، شرایط اوج دگرگونی اپیدوت-آمفیبول-گارنت شیست‌ها تقریباً برابر با حداکثر دما و فشار (۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۹ کیلوبار) اعمال شده بر گارنت شیست‌های روتیل دار (نمونه متاپلیتی) موجود در کمپلکس بجگان می باشد (درانی، ۱۳۹۶) که از نظر موقعیت جغرافیایی به‌صورت هم عرض با یکدیگر واقع شده اند (شکل ۲).

با گذر از بخش میانی به قسمت حاشیه‌ای کانی گارنت (بخش ۳ شکل ۱۲)، محتوای اعضای انتهایی آلماندین و پیروپ در دو مرحله دچار تغییراتی می‌شوند. در مرحله نخست، دو عضو انتهایی آلماندین و پیروپ به ترتیب به مقادیر ۴۵% و ۴/۶۶% می‌رسند (بخش a ۳ شکل ۱۲)، که محل تلاقی مقادیر ذکر شده دو ایزوپلت آلماندین و پیروپ منطبق بر دمای ۵۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۳/۵ کیلوبار است (شکل ۱۳- ج). در مرحله دوم که بیانگر آخرین شرایط دما و فشار حاکم بر رشد کانی گارنت است، مقادیر دو عضو انتهایی آلماندین و پیروپ به ترتیب تا ۵۰% و ۶/۲۱% افزایش می‌یابند (بخش b ۳ شکل ۱۲). در چنین شرایطی، دما و فشار به دست آمده از تلاقی دو ایزوپلت آلماندین و پیروپ، به ترتیب، برابر با ۵۲۵ درجه سانتی‌گراد و ۴/۵۵ کیلوبار است (شکل ۱۳- د).

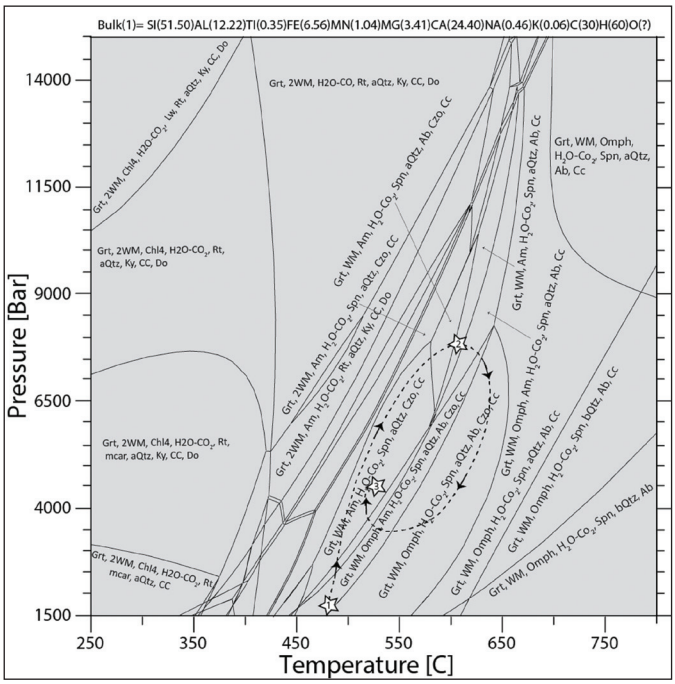
با در نظر گرفتن شرایط دما و فشار حاکم بر رشد کانی گارنت، از بخش مرکزی به قسمت‌های حاشیه‌ای، می‌توان روند زمان- دما- فشار اعمال شده بر نمونه مورد مطالعه را همانند مسیر نقطه چین شکل ۹ ترسیم نمود. روند تغییرات دما و فشار در اپیدوت- آمفیبول-گارنت شیست ها، نشان دهنده یک مسیر ساعتگرد دما- فشار (شکل ۹) در طی دگرگونی پیشرونده و پسرونده این سنگ‌هاست.

۷- محاسبه X_{CO2} و X_{H2O} در اپیدوت -آمفیبول -گارنت شیست ها

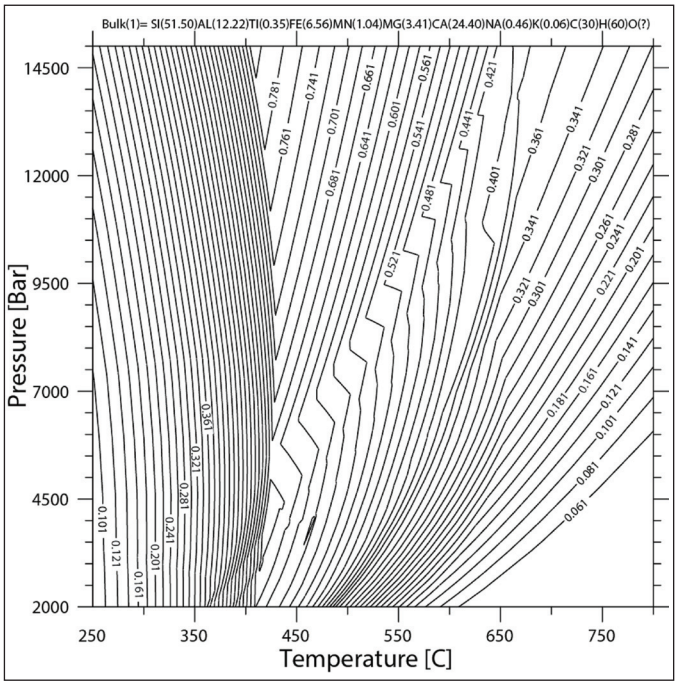
پس از محاسبه دما و فشار در اپیدوت- آمفیبول-گارنت شیست‌ها، برای محاسبه اکتیویته سیال های CO_2 و H_2O در شرایط اوج دگرگونی و دگرگونی برگشتی، از نرم‌افزار تریاک - دومینو استفاده شده است. در هرکدام از شرایط اوج دگرگونی (شکل ۱۴) و دگرگونی برگشتی (شکل ۱۵) در دو مرحله X_{CO2} محاسبه شده است. در مرحله اول، دما ثابت در نظر گرفته شده و فشار بین مقادیر ۲ تا ۱۵ کیلوبار متغیر بوده است. در چنین شرایطی، X_{CO2} در صد مرحله محاسبه شده است. در مرحله دوم، فشار ثابت در نظر گرفته شده و دما از مقدار ۲۵۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تغییر کرده است.

در شرایط اوج دگرگونی (دمای ۶۱۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۷۹۰۰ بار)، کسر مولی CO_2 حدود ۰/۳۱۸ برآورد شده است (شکل ۱۴) و در نتیجه کسر مولی H_2O برابر با ۰/۶۸۲ است.

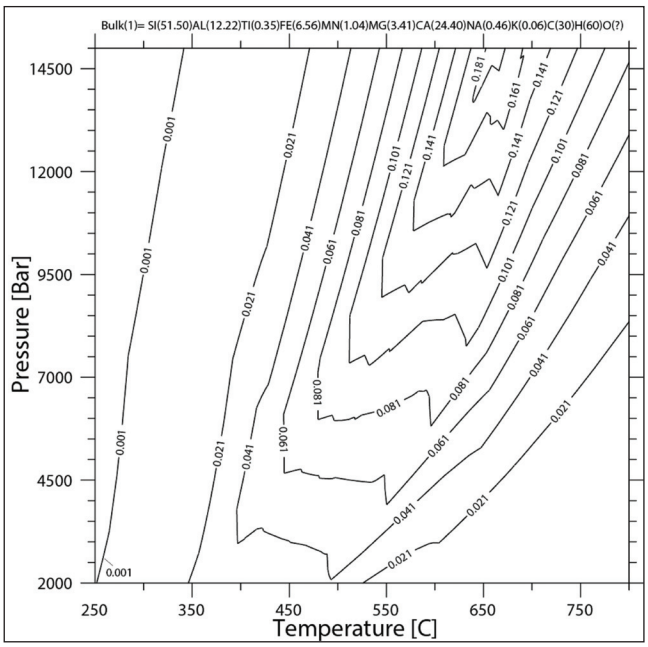
در مراحل پایانی دگرگونی برگشتی (دمای ۵۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۴۵۵۰ بار)، کسر مولی CO_2 در حدود ۰/۳۰۶ محاسبه شده است (شکل ۱۵) و از این رو، کسر مولی H_2O، در حدود ۰/۶۹۴ برآورد می‌شود. بر اساس داده‌های به دست آمده، کسر مولی CO_2 همزمان با افزایش دما و فشار، به ترتیب، افزایش و کاهش می‌یابد و در نتیجه با گذر از مرحله اوج دگرگونی به دگرگونی برگشتی، کسر مولی CO_2 روند نزولی طی می کند.



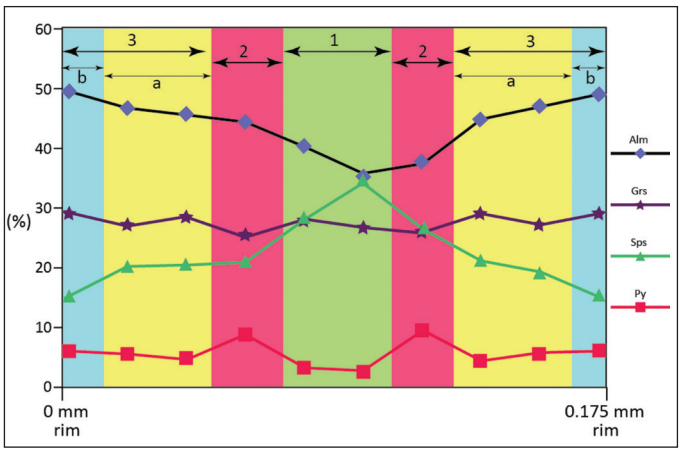
شکل ۹- سودوسکشن محاسبه شده برای اپیدوت- آمفیبول-گارنت شیست کمپلکس بجگان. جهت فلش ها بر روی خطوط نقطه چین نشان دهنده مسیر ساعتگرد زمان- دما- فشار نمونه مورد مطالعه هستند. ☆ شماره ۱ دما و فشار هسته بندی کانی گارنت، ☆ شماره ۲ دما و فشار اوج دگرگونی و☆ شماره ۳ دما و فشار حاکم بر سنگ در شرایط دگرگونی برگشتی را نشان می دهند.



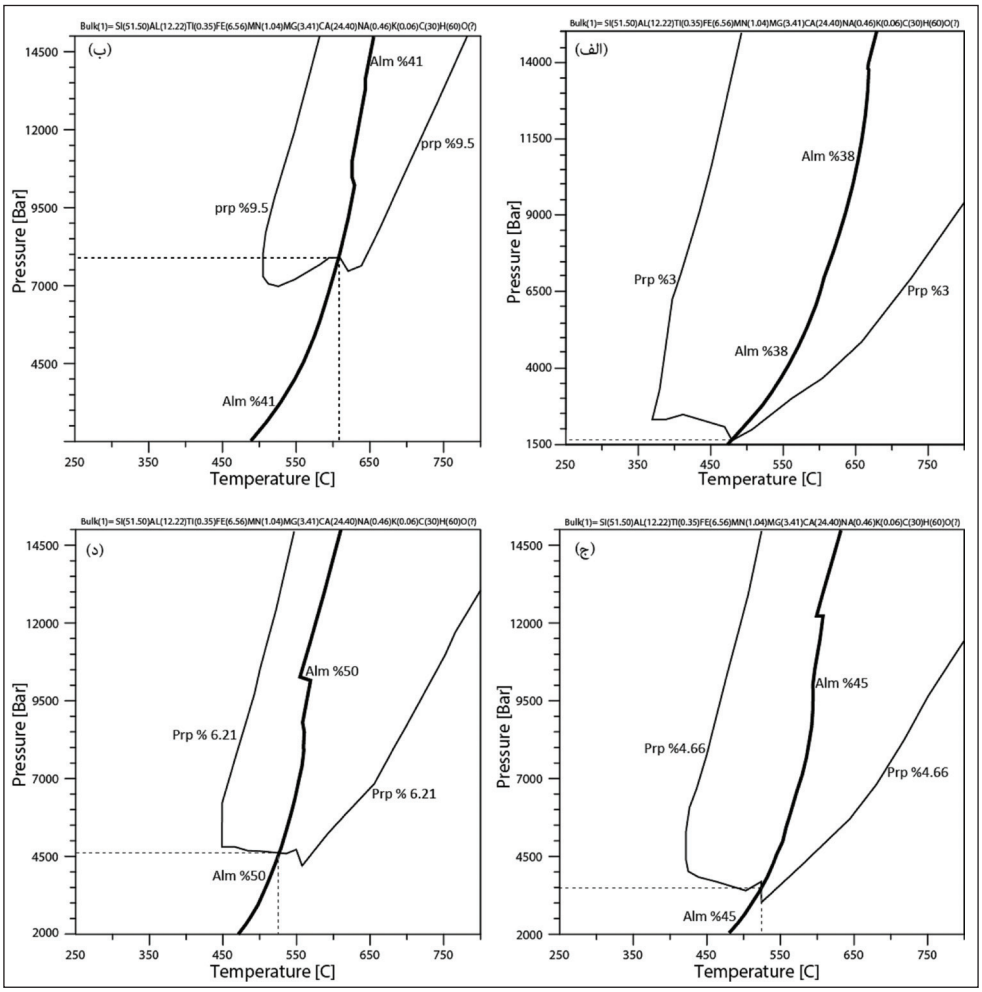
شکل ۱۰- ایزوپلت مقادیر عضو انتهایی آلماندین در کانی گارنت و نمونه اپیدوت- آمفیبول- گارنت شیست.



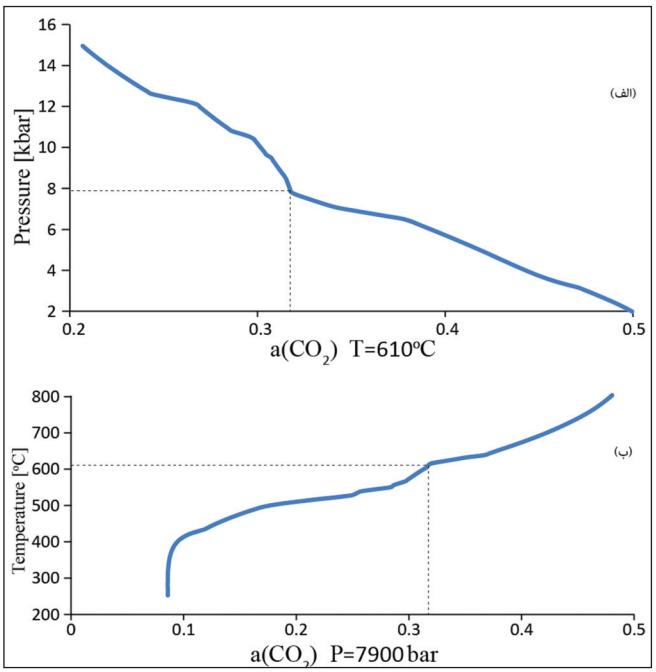
شکل ۱۱- ایزوپلت مقادیر عضو انتهایی پیروپ در کانی گارنت و نمونه اپیدوت- آمفیبول- گارنت شیست.



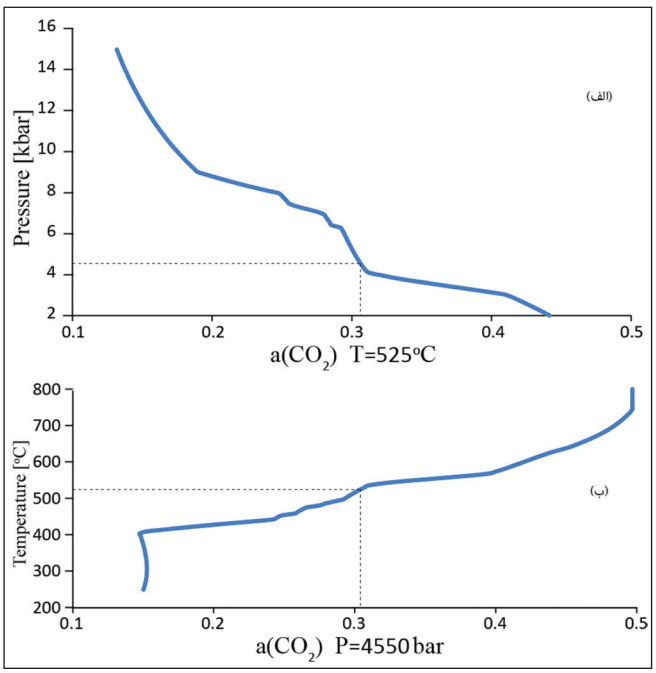
شکل ۱۲- نیمرخ رسم شده از تغییرات اعضای انتهایی تشکیل دهنده کانی گارنت. محور افقی نشان دهنده قطر کانی گارنت بر حسب میلی‌متر و محور عمودی بیانگر درصد اعضای انتهایی تشکیل دهنده کانی گارنت است. Alm: آلماندین؛ Grs: گروسولار؛ Sps: اسپسارتین؛ Py: پیروپ.



شکل ۱۳- نمایش محل تلاقی دو ایزوپلت آلماندین و پیروپ. الف) در شروع هسته بندی: کانی گارنت در دمای ۴۸۰ درجه سانتی گراد و فشار ۱/۶۵ کیلوبار، ب) در شرایط اوج دگرگونی: در دمای ۶۱۰ درجه سانتی گراد و فشار ۷/۹ کیلوبار؛ ج) در شرایط دگرگونی برگشتی اولیه: در دمای ۵۲۵ درجه سانتی گراد و فشار ۳/۵ کیلوبار؛ د) در شرایط دگرگونی برگشتی پایانی: در دمای ۵۲۵ درجه سانتی گراد و فشار ۴/۵۵ کیلوبار.



شکل ۱۴- نمایش تغییرات کسر مولی CO_2 ($a(CO_2)$) در شرایط اوج دگرگونی در نمودارهای: الف) هم دما؛ ب) هم فشار. کسر مولی در هر دو نمودار در حدود ۰/۳۱۸ است.



شکل ۱۵- نمایش تغییرات کسر مولی CO_2 ($a(CO_2)$) در شرایط دگرگونی برگشتی، در نمودارهای: الف) هم دما؛ ب) هم فشار. کسر مولی در هر دو نمودار در حدود ۰/۳۰۶ است.

۸- بررسی تغییرات دما و فشار کمپلکس بجگان

به منظور بررسی شرایط مختلف دگرگونی در کمپلکس بجگان، سه نمونه متاپلیتی (گارنت شیست روتیل دار)، متابازیتی (گلوکوفان شیست) و کالک سیلیکاته (اپیدوت- آمفیبول- گارنت شیست) (شکل ۲) مورد مقایسه قرار گرفته اند. هر کدام از نمونه‌های مورد مطالعه مراحل مختلف دگرگونی پیشرونده، اوج دگرگونی و دگرگونی برگشتی را تجربه نموده اند. این سنگ ها، در شرایط اوج دگرگونی، دما و فشار متفاوتی را نشان می دهند که نشان دهنده تفاوت درجه دگرگونی در بخش‌های مختلف کمپلکس بجگان در گذر زمان است. به طوری که دما و فشار اوج دگرگونی برای متاپلیت‌ها، متابازیت‌ها و کالک سیلیکات‌ها به ترتیب، ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۹ کیلوبار (درانی، ۱۳۹۶)، ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۴ کیلوبار (درانی، ۱۳۹۶) و ۶۱۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۷/۹ کیلوبار است.

بر اساس موقعیت تکتونیکی کمپلکس بجگان، روند فرورانش در منطقه مورد مطالعه از جنوب به شمال است. از این رو، می‌توان متابازیت‌های رخنمون یافته در بخش‌های جنوبی این کمپلکس را که در محدوده رخساره شیست آبی (فشار بالا- دما پایین) قرار می‌گیرند، در ارتباط با فرایند فرورانش در نظر گرفت (شکل ۲). با گذر از بخش جنوبی به قسمت‌های شمالی کمپلکس، دما و فشار دگرگونی تغییر می‌یابد و سنگ‌های متاپلیتی و کالک سیلیکاته، در شرایط اوج دگرگونی، در محدوده رخساره آمفیبولیت (دما و فشار متوسط) قرار می‌گیرند (شکل ۲).

تغییر رخساره‌های دگرگونی از سمت جنوب به شمال کمپلکی بجگان ممکن است در ارتباط با یک مرحله گذر (Transition stage) از فرورانش به برخورد باشد. به طوری که، آثار دگرگونی فشار بالا در سنگ‌های متابازیتی، نشانگر این حقیقت بوده که حاشیه قاره‌ای در طی فرایند فرورانش تحت تأثیر دگرگونی قرار گرفته است. پس از آن، با ادامه روند فرورانش، برخورد میان خرده قاره بجگان- دورکان آغاز شده و شرایط ترمودینامیکی از فرورانش (زمین دمای سرد؛ Cold geotherm) به برخورد (زمین دمای گرم؛ Warm geotherm) تغییر یافته است.

۹- نتیجه گیری

- سنگ‌های کالک سیلیکاتی موجود در کمپلکس بجگان، به انواع اپیدوت شیست‌های آمفیبول دار، اپیدوت-آمفیبول شیست‌ها، اپیدوت-آمفیبول-گارنت شیست‌ها و میکا شیست‌های کربنات دار تقسیم بندی می شوند. اپیدوت -آمفیبول -گارنت شیست‌ها بالاترین درجه دگرگونی را در بین کالک سیلیکات‌ها نشان می دهند و شامل کانی‌های گارنت، آمفیبول، اپیدوت، کلسیت، کوارتز، کلریت ثانویه و مقادیر فرعی و پراکنده تیتانیت، آپاتیت، میکای سفید ومگنتیت هستند.

- بر اساس داده های شیمی کانی ها بر روی اپیدوت -آمفیبول -گارنت شیست‌ها، کانی‌های گارنت دارای انحلال جامد آلماندین، گروسولار، اسپسارتین و پیروپ (Alm_{35-50}, Grs_{23-31}, $Sps_{14.6-36}$, $Prp_{2.6-9.8}$; mol%) و منطقه‌بندی رشدی هستند، به طوری که آلماندین و اسپسارتین، به ترتیب، افزایش و کاهش چشمگیری از مرکز به سمت حاشیه کانی نشان می دهند. کانی‌های آمفیبول در گروه آمفیبول‌های سدیک- کلسیک قرار می‌گیرند و از نوع باروسیت هستند. کانی‌های کلریت در گروه ریپیدولیت قرار می‌گیرند و کانی‌های گروه اپیدوت در زیر گروه کلینوزوئیزیت تقسیم بندی می شوند.

- با استفاده از نتایج داده‌های XRF و داده‌های الکترون میکروپروب کانی گارنت، دما و فشار در نمونه سنگی اپیدوت- آمفیبول-گارنت شیست در شرایط اوج دگرگونی (۶۱۰ درجه سانتی گراد و ۷/۹ کیلوبار) و دگرگونی برگشتی (۵۲۵ درجه سانتی گراد و ۴/۵۵ کیلوبار) محاسبه شده است. شرایط اوج دگرگونی در اپیدوت- آمفیبول-

گارنت شیست ها همخوانی خوبی با زون گارنت متاپلیت ها در منطقه مورد مطالعه دارد. اکتیویته سیال‌ها در نمونه مورد مطالعه در شرایط اوج دگرگونی برابر با ۰/۳۱۸ کسر مولی CO_2 و ۰/۶۸۲ کسر مولی H_2O و در شرایط دگرگونی برگشتی برابر با ۰/۳۰۶ کسر مولی CO_2 و ۰/۶۹۴ کسر مولی H_2O است. با توجه داده های به دست آمده، کسر مولی CO_2 همزمان با افزایش دما و فشار، به ترتیب، افزایش و کاهش می یابد و به طور کلی با گذر از مرحله اوج دگرگونی به دگرگونی برگشتی، کسر مولی CO_2 کاهش می یابد. روند تغییرات دما و فشار در اپیدوت- آمفیبول-گارنت شیست‌ها، نشان دهنده یک مسیر ساعتگرد دما- فشار در طی دگرگونی پیشرونده و پسرونده این سنگ‌هاست.

- با مطالعه و مقایسه شرایط اوج دگرگونی در متاپلیت‌ها، متابازیت‌ها و کالک سیلیکات‌های کمپلکس بجگان، می‌توان چنین استنباط نمود که تغییر رخساره‌های دگرگونی از سمت جنوب به شمال کمپلکی بجگان ممکن است در ارتباط با یک مرحله گذر از فرورانش به برخورد باشد. به طوری که، در ابتدا حاشیه قاره‌ای در طی فرآیند فرورانش تحت تأثیر دگرگونی قرار گرفته است. پس از آن، با ادامه روند فرورانش، برخورد میان خرده قاره بجگان- دورکان آغاز شده و شرایط ترمودینامیکی از حالت فرورانش به شرایط برخورد تغییر یافته است.

سپاسگزاری

از داوران محترم تشکر می‌شود که با نظرات سازنده خود سبب ارتقای سطح علمی این مقاله شدند. همچنین از مسئولان محترم آزمایشگاه دانشگاه پتسدام آلمان، خانم ها کریستینا گانتر و آنتیه موسیول جهت انجام آزمایشات میکروپروب و XRF و از خانم کریستین فیشر جهت تهیه مقاطع میکروپروب تشکر و قدردانی می گردد.

کتابنگاری

درانی، م.، ۱۳۹۶- بررسی کانی‌شناسی، ژئوشیمی و جایگاه ژئودینامیکی کمپلکس بجگان، کهنوج، جنوب شرق ایران، رساله دکترا، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۳۰۳ ص.

References

Armbuster, T., Bonazzi, P., Akasaka, M., Bermanex, V., Chopin, C., Giere, R., Heuss-Assbichler, S., Liebscher, A., Menchettic, S., Pan, Y. and Pasero, M., 2006- Recommended nomenclature of epidote-group minerals. Eur. J. Mineral. 18: 551-567.

Berman, R. G., 1988- Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system Na2O-K2O-CaO-MgO-FeO-Fe2O3- Al2O3-SiO2-TiO2-H2O-CO2. J. Petrol. 29: 445-522.

Bucher, K. and Grapes, R., 2011- Petrogenesis of metamorphic rocks. 8th edition. Springer Heidelberg Dordrecht London New York.

Hawthorne, F. C., Oberti, R., Harlow, G. E., Maresch, W. V., Martin, R. F., Schumacher J. and Welch, M., 2012- Nomenclature of the amphibole supergroup. Am. Mineral. 97: 2031-2048.

Kananian, A., Juteau, T., Bellon, H., Darvishzadeh, A., Sabzehi, M., Whitechurch, H. and Ricou, L., 2001-Theophiolite massif of Kahnuj (western Makran, southern Iran); new geological and geochronological data. Earth and Planetary Sciences, 332: 543–552.

McCall, G. J. H. and Kidd, R. G. W., 1982- The Makran, southeastern Iran; the anatomy of a convergentplate margin active from the Cretaceous to Present. In: Leggett, J.K. (Ed.), Trench-Fore-arcGeology. Geological Society, London, 10: 387-397.

McCall, G. J. H., 1985a- Explanatory text of the Minab quadrangle map: 1 : 250,000, No. J13, Geological Survey of Iran, Tehran, 530 p.

McCall, G. J. H., 1985b- Area report, East Iran Project, Area No. 1, Geological Survey of Iran, Report No. 57, 634 p.

McCall, G. J. H., 2002- A summary of the geology of the Iranian Makran. Geological Society, London, Special Publications, 195: 237-258.

McCall, G. J. H., 2003- A critique of the analogy between Archaean and Phanerozoic tectonics based on regional mapping of the Mesozoic-Cenozoic plate convergent zone in the Makran,Iran. Precambrian Research. 127: 5-17.

Omrani, H., Moazzen, M., Oberhänsli, R., Altenberger, U. and Lange, M., 2013b- The Sabzevar blueschists of the North-Central Iranian micro-continent as remnants of the Neotethys-related oceanic crust subduction. International Journal of Earth Sciences 102: 1491-1512.

Omrani, H., Moazzen, M., Oberhänsli, R. and Moslempour, M. E., 2017- Iranshahr blueschist: subduction of the inner Makran oceanic crust. Journal of Metamorphic Geology 35: 373-392.

Omrani, H., Moazzen, M., Oberhänsli, R., Tsujimori, T., Bousquet, R. and Moayyed, M., 2013a- Metamorphic history of glaucophane-paragonite-zoisite eclogites from the Shanderman area, northern Iran. Journal of Metamorphic Geology 31: 791-812.

Spear, F. S., 1995- Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths. Mineralogical Society of America, Washington, DC, 799 pp.

Yardley, B. W. D., 1982- The early metamorphic history of the Haast schists and related rocks of New Zealand. Contrib. Mineralog. Petrol. 81: 317-327.

The study of mineral chemistry, detection of metamorphic P-T and fluid activity calculation of calcsilicate in the Bajgan complex, Kerman province

M. Dorani[1*], M. Arvin[2], R. Oberhänsli[3], H. Omrani[4] and S. Dargahi[5]

[1]Ph.D., Department of Geology, Faculty of Science, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

[2]Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

[3]Professor, Institute für Geowissenschaften, Universität Potsdam, Potsdam, Germany

[4]Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Golestan University, Gorgan, Iran

[5]Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Received: 2018 July 12 Accepted: 2019 February 03

Abstract

Bajgan Complex is a part of Iranian Makran including many kinds of metapelites, metabasites, calcsilicates, amphibolites, marbles, meta volcanosediments, felsic, mafic and ultramafic intrusives. The calcsilicates are divided into amphibole bearing epidote schist, epidote - amphibole schist, epidote – amphibole - garnet schist and carbonate bearing mica schist. Among of all calc silicates the epidote – amphibole - garnet schist shows the highest metamorphic condition and consists of garnet, amphibole, epidote, calcite, quartz, secondary chlorite and minor amount of titanite, apatite, white mica and magnetite. In this study the mineral chemical compositions, temprature, pressure and fluid activity in different metamorphic stages of epidote – amphibole - garnet schist were detected. In according to chemical data, garnet has almandine, grossular, spessartine and pyrope solid solution (Alm_{35-50}, Grs_{23-31}, $Sps_{14.6-36}$, $Prp_{2.6-9.8}$; mol%) and shows chemical zoning as almandine and spessartine have an increasing and decreasing trend, respectively, from core to rim. Amphiboles are classified in sodic- calcic group and are Barroisite. Chlorites are kown as Ripidolite and epidotes are classified in Clinozoisite subgroup. Peak metamorphic condition of epidote – amphibole - garnet schist has been estimated about 610° C and 8 kbar and molar fraction of Co_2 and H_2O have been calculated about 0.32 and 0.68, respectively. The retrograde metamorphic condition are about 525° C, 4.5 kbar and molar fraction of Co_2 and H_2O have been calculated about 0.31 and 0.69, respectively. The epidote – amphibole - garnet schist followed a ‘clockwise’ P–T path during prograde and retrograde metamorphism.

Keywords: Calcsilicate, Mineral chemistry, Thermo-barometry, Fluid activity, Bajgan Complex, Kerman.

For Persian Version see pages 39 to 52

*Corresponding author: M. Dorani; E-mail: maryamdorani@sci.uk.ac.ir