

بررسی ترکیب شیمیایی و شرایط T-P تشکیل دیوپسید، گارنت و کانی‌های همراه در هورنفلس‌های کالک - سیلیکات در هاله دگرگونی الوند، همدان، باختر ایران

هاله قربانی^۱، محسن مؤذن^۲ و عادل ساکی^۳

^۱ دانشجوی دکترا، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ استاد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهیدچمران، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۲۶

چکیده

هورنفلس‌های کالک-سیلیکات همدان حاصل گرمای باتولیت الوند روی سنگ‌های آهکی بوده است. مجموعه کانی‌های دگرگونی در این سنگ‌ها عبارت است از وزوویانیت + گارنت + کلینوپروکسن + ترمولیت/اکتینولیت + کوارتز + کلسیت ± اپیدوت. سنگ‌های مورد مطالعه طی دو مرحله دگرگونی پیش‌رونده و پس‌رونده تشکیل شده‌اند. ترکیب شیمیایی کانی‌های کلینوپروکسن و گارنت در هورنفلس‌های کالک-سیلیکات مورد مطالعه با استفاده از تجزیه EPMA نشان می‌دهد که این کانی‌ها بیشتر از نوع دیوپسید و گروسولار هستند. داماسنجی بر پایه ترکیب شیمیایی کانی‌های دیوپسید و گارنت همزیست با ترمولیت/اکتینولیت، کوارتز و... دمای تشکیل حدود ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. فشار دگرگونی در حدود ۳/۵ کیلو بار به دست آمد. ترکیب سیال برای این سنگ‌ها XCO₂ را در حدود ۰/۲ به دست می‌دهد که مشخص می‌کند در طول واکنش‌های دگرگونی پیش‌رونده تشکیل دهنده این سنگ‌ها، کانی‌های کربناتی واکنش داده‌اند و مقدار آنها کاهش یافته است.

کلیدواژه‌ها: باتولیت الوند، هورنفلس کالک-سیلیکات، ترکیب سیال، دما-فشار، همدان.

*نویسنده مسئول: هاله قربانی

E-mail: haleh_ghorbani@tabrizu.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

آمفیبولیت‌ها تشکیل شده است (بهاری‌فر و سپاهی‌گرو، ۱۳۷۵؛ صادقیان، ۱۳۷۳؛ فرهور، ۱۳۷۶؛ ۱۳۸۱؛ Berberian and Berberian, 1981؛ Berberian and King, 1981). این سنگ‌ها طی بسته شدن نوتیس و برخورد قاره اوراسیا و گندوانا تحت تأثیر فعالیت‌های موجود در حاشیه قاره دچار دگرگونی شده‌اند. افزایش فشار و گرما در منطقه سبب رخداد یک دگرگونی دینامو ترمال در منطقه شده که سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای را ایجاد کرده است. سنگ‌های دگرگونی مجاورتی به دنبال نفوذ باتولیت الوند در منطقه ایجاد شده‌اند (ساکی و پورکاسب، ۱۳۹۱).

بیشترین پژوهش‌ها در منطقه همدان روی سنگ‌های آذرین گوناگون باتولیت الوند، سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای موسوم به شیست‌های همدان و سنگ‌های دگرگونی مجاورتی رسی در هاله دگرگونی الوند بوده است؛ ولی هورنفلس‌های کالک-سیلیکات موجود در هاله دگرگونی باتولیت الوند مورد توجه قرار نگرفته‌اند. با توجه به این مهم و با در نظر داشتن رخنمون این سنگ‌ها در پیرامون باتولیت الوند، در این پژوهش سعی شده است که با استفاده از مجموعه کانیایی تشکیل شده در طول فرایند دگرگونی مجاورتی، روابط سنگ‌شناختی و بافتی کانی‌های دگرگون در هورنفلس‌های کالک-سیلیکات دارای کلینوپروکسن و گارنت منطقه همدان بررسی شود؛ ترکیب شیمیایی کانی‌های کلسیت، کلینوپروکسن و گارنت نیز در نمونه‌های Che 9 و Che 1D با روش EPMA توسط دستگاه GEOL-JXA-8800 Superprobe با ولتاژ ۱۵ KV و جریان ۲۰-۱۰ nA در آزمایشگاه دانشگاه پتسدام آلمان تعیین شده است. بر پایه داماسنجی و فشارسنجی با استفاده از ترکیب شیمیایی دیوپسید همزیست با گارنت و ترمولیت/اکتینولیت شرایط تقریبی دما و فشار و ترکیب سیال در تشکیل سنگ‌های مورد مطالعه تعیین شد.

۲- زمین‌شناسی منطقه همدان

هورنفلس‌های کالک-سیلیکات در منطقه مطالعاتی در مجاورت شیست‌ها، آمفیبولیت‌ها و هورنفلس‌های رسی - نیمه‌رسی رخنمون دارند. سنگ‌های آذرین و دگرگونی در منطقه همدان و به‌ویژه در مجاورت باتولیت الوند مورد توجه

منطقه مطالعاتی از دید تقسیمات جغرافیایی در استان همدان در باختر کشور قرار دارد. این منطقه در تقسیم‌بندی ساختاری ایران بخشی از پهنه سندج - سیرجان در نظر گرفته شده است (Alavi, 2004). این پهنه به صورت نوار طویل شده‌ای در امتداد و به موازات روراندگی زاگرس گسترش دارد. سنگ‌ها و واحدهای رسوبی منطقه در طی بسته شدن نوتیس و برخورد قاره اوراسیا و گندوانا تحت تأثیر فعالیت‌های موجود در حاشیه قاره دچار دگرگونی شده‌اند. ادامه روند برخورد قاره‌ای و تکامل فرایند کوهزایی سبب شروع فعالیت‌های پلوتونیزم و ایجاد باتولیت الوند شده است. فعالیت ماگمایی در منطقه که سبب شکل‌گیری این هاله مجاورتی شده است در ارتباط با ادامه روند برخورد قاره‌ای و تکامل فرایند کوهزایی است که سبب شروع فعالیت‌های پلوتونیزم و ایجاد باتولیت الوند با سن ژوراسیک شده است. این توده از گرانیتوئیدهای پورفیری، گرانیتوئیدهای لوکوکرات و سنگ‌های مافیک تشکیل شده است (سپاهی، ۱۳۷۸). منشأ بخش‌های گرانیتی و گابرویی توده توسط پژوهشگران مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. توده‌های آذرین مافیک تا حدواسط شامل الیون گابرو، گابرو، گابرونوریت، دیوریت، کوارتز دیوریت و تونالیت است (Valizadeh and Cantagrel, 1975). سپاهی (۱۳۷۸) منشأ سنگ‌های گابرویی، دیوریتی و تونالیتی الوند را ماگمای توله‌ای با منشأ گوشته‌ای و منشأ گرانیت‌های پورفیری را پوسته‌ای در نظر گرفته است. مجموعه‌های دگرگونی در منطقه همدان فرآورده دگرشکلی و دگرگونی سنگ‌های اولیه بیشتر رسی هستند. این مجموعه‌ها دچار رخداد‌های دگرگونی پیچیده‌ای شده‌اند که اصلی‌ترین آنها دگرگونی ناحیه‌ای و دگرگونی مجاورتی است. هاله‌های دگرگونی مجاورتی پیرامون مجموعه‌های نفوذی الوند با پهنای برونزد از یک تا هشت کیلومتر در دو مرحله متمایز از هم تکوین یافته‌اند (اقلیمی، ۱۳۷۹):

(۱) مرحله نفوذ توده‌های گابرویی، که توده گابرویی چشمه قصابان نمونه‌ای از آن است.
(۲) مرحله نفوذ گرانیت‌ها و پگماتیت‌های وابسته به آن.

سنگ‌های دگرگونی در منطقه همدان از انواع سنگ‌های دگرگونی شامل هورنفلس‌های کالک - سیلیکات، هورنفلس‌های رسی و بازیک، شیست‌ها و

کانی‌های بدون آب مانند گارنت، کلینوپیروکسن، وزوویانیت تشکیل شده‌اند.

- دگرگونی پسرونده: این دگرگونی به دنبال اوج دگرگونی رخ داده و ناشی از سرد شدن توده و نفوذ سیال‌ها بوده است. کانی‌های تشکیل شده در این مرحله معمولاً از نوع آب‌دار مانند اپیدوت و ترمولیت هستند. در درجات دگرگونی پایین‌تر، معروف‌ترین شاهد برای عمل دگرگونی پسرونده، دگرسانی گارنت به اپیدوت است. همچنین، تشکیل سیمپلکتیت معمولاً با افت دما همراه است (شکل ۳- الف).

۵- شیمی کانی‌ها

سنگ‌های مورد مطالعه که مقاطع میکروسکوپی آنها پیش‌تر به‌طور دقیق مطالعه و روابط بافتی و مجموعه کانی‌ها در آنها مشخص شده بود، توسط EPMA به وسیله دستگاه GEOL-JXA-8800 Superprobe تجزیه شد (Che9 و Che1D). در تجزیه مقاطع میکروسکوپی همه نمونه‌ها سعی شده است که تا حد امکان از هر فاز چندین تجزیه انجام شود. داده‌های معرف تجزیه کانی‌ها در جدول ۲ آورده شده است. نسبت Fe^{2+}/Fe^{3+} در کانی‌های فرومنیزین با استفاده از موازنه کاتیون‌ها در ساختمان کانی‌ها (Droop, 1987) به دست آمده است. کانی‌های تجزیه شده شامل گارنت و کلینوپیروکسن هستند. همه کانی‌های نام برده شده بدون منطقه‌بندی شیمیایی بوده‌اند. کانی‌های گارنت و پیروکسن در نمونه‌های تجزیه شده تغییرات قابل ملاحظه‌ای در نسبت $Mg/(Mg+Fe)$ و درصد پایانی کانی‌ها نشان نمی‌دهند که بیشتر به دلیل تشابه در ترکیب شیمیایی سنگ‌های اولیه و تشابه شرایط دگرگونی آنهاست.

۵-۱. کلینوپیروکسن

فرمول کلینوپیروکسن به ازای ۶ اتم اکسیژن به دست آمده است ($M_1M_2T_2O_6$). همه کلینوپیروکسن‌ها از دید ترکیبی همگن هستند. مقدار Ca به‌طور میانگین ۰/۸۹۹-۱/۱۱۸ apfu (Atom per formula unit) مقدار Mg در حدود ۰/۶۶۴-۰/۴۲۹ و مقدار Fe میان ۰/۴۰۴-۰/۲۵۱ است. Ti, Mn و Cr در کلینوپیروکسن‌ها پایین است و Na و K وجود ندارد (جدول ۲). ترکیب کلینوپیروکسن‌ها در نمودار En-Wo-Fs (Morimoto and Kitamara, 1988) نشان می‌دهد که بیشتر نقاط تجزیه شده در محدوده دیوپسید و مقادیر کمتری در محدوده ولاستونیت جانمایی می‌شوند (شکل ۴- الف). بر پایه تقسیم‌بندی کلینوپیروکسن‌ها با توجه به متغیر Q در برابر Q (Morimoto and Kitamara, 1988)، همه کلینوپیروکسن‌ها در هورنفلس‌های کالک-سیلیکات در محدوده کلینوپیروکسن‌های غنی از منیزیم، کلسیم و آهن (Quad) و روی محور Y قرار می‌گیرند (شکل ۴- ب). مقدار $Mg/Mg+Fe$ در نمونه‌ها میان ۰/۶۰۹-۰/۴۷۹ است (جدول ۲). تجزیه‌های صورت گرفته در کلینوپیروکسن‌ها نشان می‌دهد که تغییرات CaO% در برابر TiO₂% و CaO% برابر ۳% Al₂O₃ پایین است (شکل‌های ۵- الف و ب).

۵-۲. گارنت

۶ نقطه از گارنت‌های موجود در نمونه‌های هورنفلس کالک-سیلیکات تجزیه شد. فرمول ساختمانی گارنت بر پایه ۲۴ اتم اکسیژن به دست آمده است ($X_3Y_2Z_3O_{12}$). در این کانی مقدار Al ۳/۱۴۶ تا ۳/۷۷۷، مقدار Ca میان ۵/۵۶۸ تا ۶/۱۷۳ و مقدار Fe میان ۰/۱۰۲ تا ۰/۳۹۶ است (جدول ۲). شکل‌های ۶- الف و ب تغییرات ترکیبی گارنت‌ها را در محدوده گروسولار نشان می‌دهند. همان‌طور که در این دو شکل دیده می‌شود گارنت‌ها از اعضای پایانی پیروپ، آلماندین و اسپسارتین فقیر هستند.

۶- معرفی سامانه مناسب برای مطالعه سنگ‌های کالک-سیلیکات

انتخاب سامانه شیمیایی مناسب برای نمایش ترکیب شیمیایی کانی‌های تجزیه شده در سنگ‌های کالک-سیلیکات منطقه همدان و نمایش کانی‌های در نمودار ترکیبی مشکل از اجزای CaO, Na₂O, Fe₂O₃, FeO, Al₂O₃, CO₂, H₂O, TiO₂, MgO و SiO₂ پیچیده است. برای ساده‌تر شدن سامانه می‌توان بر طبق

زمین‌شناسان بسیاری قرار گرفته و تاکنون درباره کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه همدان پژوهش‌های زیادی انجام شده است (مانند: صادقیان، ۱۳۷۳؛ بهاری‌فر، ۱۳۸۳؛ سپاهی، ۱۳۷۸؛ زریحان و همکاران، ۱۳۵۰؛ 2012؛ Saki et al., 2011; Saki et al., 2004; Sepahi et al.).

Alavi (1994) پهنه سندنجد-سیرجان را جزیی از کوهدار زاگرس دانسته و آن را پهنه زاگرس فلس مانند نامیده است. به باور Mohajjel et al. (2003) این محدوده احتمالاً در زیر پهنه با دگرشکلی پیچیده قرار دارد که شامل سنگ‌های آذرین و دگرگونی است. مجموعه پلوتونیک الوند در بخش شمالی نوار دگرگونی سندنجد-سیرجان یکی از توده‌های نفوذی مهم به شمار می‌آید (Mohajjel et al., 2003) (شکل ۱). باتولیت الوند در محیط زمین‌ساختی مرتبط با کمان‌قاره‌ای در یک رژیم کششی در طی فرورانش اقیانوس نوتیس به زیر سندنجد-سیرجان نفوذ کرده است (Shahbazi et al., 2010). نفوذ این توده و انتشار سیال‌ها و گرمای حاصل از ماگما در سنگ میزبان رسی و آهنکی سبب شکل‌گیری دگرگونی مجاورتی در یال خاوری توده شده است (شکل ۱؛ شکل ۲- ت). این سنگ‌ها شامل هورنفلس کردیریت‌دار، شیسیت‌های لکه‌دار، مرمرها و سنگ‌های دگرگونی کالک-سیلیکات هستند. سن تشکیل انواع سنگ‌های دگرگون و نفوذ باتولیت الوند تاکنون به‌طور دقیق مشخص نشده است؛ ولی همه نفوذی‌ها در طی ژوراسیک شکل گرفته‌اند (Shahbazi et al., 2010). مطالعات جدید بر پایه نتایج سن سنجی U-Pb روی کانی زیرکن نشان داده است که باتولیت الوند در حدود ۱۶۵ ma به وجود آمده است (Mahmoudi et al., 2011).

۳- مطالعات صحرایی

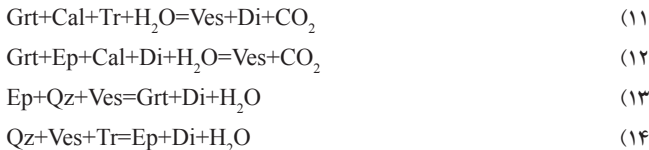
هورنفلس‌های کالک-سیلیکات منطقه همدان به‌صورت میان‌لایه‌ای با شیسیت‌ها و هورنفلس‌های رسی برونزد دارند (شکل ۲- الف). مرز میان دو پروتولیت آهنکی و رسی از دید گوناگونی کانی‌شناسی بسیار جالب است. سنگ‌های کالک-سیلیکات به رنگ خاکستری تا خاکستری تیره و دارای ناخالصی Al و Si در قالب کانی‌های سیلیکات آلومینیم (مانند گارنت) هستند. بلورهای درشت گارنت و ترمولیت/اکتینولیت و زوئیزیت در نمونه‌های دستی این سنگ‌ها دیده می‌شود (شکل‌های ۲- ب و پ). سوگیری موازی کانی‌های ترمولیت/اکتینولیت در این سنگ‌ها دیده می‌شود که از دگرگونی پیشین در سنگ باقی مانده است. در این سنگ‌ها اپیدوت و کانی‌های اکسیدی نیز دیده می‌شود.

۴- سنگ‌نگاری

سنگ‌های کالک-سیلیکات دارای مقادیر بالایی کانی‌های سیلیکات آلومینیم‌دار شامل گارنت و آمفیبول هستند. جدول ۱ مجموعه کانی‌های دگرگونی در هورنفلس‌های کالک-سیلیکات را نشان می‌دهد. نشانه‌های اختصاری استفاده شده برای کانی‌ها از Whitney and Evans (2010) است. آثار دگرگونی مجاورتی افزون بر افزایش اندازه بلور کلسیت و در نتیجه کاهش شمار بلورهای آن، شامل ظهور کانی‌های سیلیکاته ریز مانند اپیدوت، ترمولیت/اکتینولیت، کلینوپیروکسن، گارنت و وزوویانیت است (شکل‌های ۳- ب و ت). این سنگ‌ها تمام‌بلورین و دانه‌درشت تا دانه‌ریز هستند و بافت میکروسکوپی آنها گرانوبلاستیک (شکل ۳- ت)، پوئی کیلوبلاستیک (شکل ۳- ب)، پورفیروبلاستیک، ایدیوبلاستیک و زینوبلاستیک است؛ همچنین در برخی از نمونه‌های مورد مطالعه بافت سیمپلکتیک میان کوارتز و زوئیزیت به چشم می‌خورد (شکل ۳- الف) (قربانی، ۱۳۹۳). با توجه به مطالعات سنگ‌نگاری (جدول ۱) و پاراژنرها مشخص شد که دگرگونی در منطقه مورد مطالعه طی دو مرحله صورت گرفته است (قربانی، ۱۳۹۲):

- دگرگونی پیش‌ونده: در مرحله اول که اوج دگرگونی است و به‌صورت پیش‌ونده رخ داده است، اثرهای گرمایی همزمان با جایگیری و تبلور توده نفوذی سبب دگرگونی ایزوشیمیایی سنگ‌های کالک-سیلیکات شده است و در نتیجه آن

شده است؛ واکنش‌های ۱۱ و ۱۲). بر اثر دگرگونی پسرونده بلورهای وزوویانیت به گارنت، دیوپسید و ترمولیت شکسته می‌شود (واکنش‌های ۱۳ و ۱۴).



۸- دما- فشارسنجی

برای دما فشارسنجی سنگ‌های کالک- سیلیکات از روش دماسنجی و فشارسنجی به روش منحنی‌های تعادلی چندگانه (Multiple equilibrium) استفاده شد. شرایط P-T در طی دگرگونی با استفاده از روش‌های زمین‌دما فشارسنجی معمول و برنامه ترمودینامیکی (version 2.4) (1995 update) THERMOCALC، تعیین شد (Holland & Powell, 1985). محل تقاطع منحنی‌های تعادل چندگانه، دما و فشار را مشخص می‌کند. پاراژنز سنگ‌های مورد مطالعه به صورت $\text{Cal} + \text{Qz} + \text{Tr} + \text{Ep} + \text{Di} + \text{Dol} + \text{Grt}$ دارای بالاترین تعداد کانی‌های دگرگونی در حالت تعادل کانی‌شناسی است. با فرض اینکه همه کانی‌های محلول جامد به صورت اعضای پایانی خالص باشند و با فرض اکتیویته واحد برای فازهای محلول جامد (مانند دیوپسید و گارنت) و فازهای خالص (مانند کوارتز)، واکنش‌های تعادلی توسط THERMOCALC به دست آمد و روی نمودارهای P-T و XCO_2 رسم شد (شکل‌های ۱۱- الف و ب). محل تقاطع منحنی‌های چند واکنشی (Multi reaction) مقدار کسر مولی CO_2 در سنگ‌ها را مشخص می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که XCO_2 مستقل از فشار و مقدار آن در ۳/۵ کیلو بار برابر در حدود ۰/۲ است (شکل ۱۱- ب). با توجه به فشار به دست آمده از دما فشارسنجی سنگ‌های کالک- سیلیکات، فشار حدود ۳/۵ Kbar و دمای دگرگونی حدود ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد برآورد می‌شود (شکل ۱۱- الف).

۹- نتیجه‌گیری

هدف اصلی از این مطالعه بررسی سیستماتیک هورنفلس‌های کالک- سیلیکات در هاله دگرگونی الوند به منظور شناسایی واکنش‌های دگرگونی، تعیین دما، فشار، XCO_2 در هاله دگرگونی الوند است. تجزیه شیمیایی کانی‌ها با میکروپروب نشان می‌دهد که گارنت از نوع گروسولار و کلینوپیروکسن بیشتر از نوع دیوپسید است. شواهد کانی‌شناسی نشان می‌دهد که دگرگونی در منطقه طی دو مرحله پیشرونده و پسرونده رخ داده است. دگرگونی پیشرونده در هورنفلس‌های کالک- سیلیکات منطقه همدان به دنبال نفوذ باتولیت الوند و در شرایط افزایش دما و فشار رخ داده است. ظهور کلینوپیروکسن و کم شدن مقدار کلسیت در مجموعه کانی‌های این سنگ‌ها نشان‌دهنده افزایش فعالیت XCO_2 به دلیل تأثیر فاز فقیر از H_2O در منطقه مورد مطالعه است (دگرگونی پیشرونده). دگرگونی پسرونده در هورنفلس‌های کالک- سیلیکات به دنبال اوج دگرگونی و پس از سرد شدن توده و نفوذ سیال‌ها رخ داده است (تشکیل فازهای آب‌دار مانند آمفیبول و اپیدوت). دمای به دست آمده برای تعادل کانی‌های کوارتز، دیوپسید، گارنت و فاز سیال ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد است. فشار به دست آمده برای هاله دگرگونی با استفاده از تعادلات کانی‌شناسی و برنامه THERMOCALC حدود ۳/۵ کیلو بار است که معادل ژرفای تقریبی ۱۱ کیلومتری پوسته زمین است. این فشار، هاله دگرگونی به نسبت ژرفی را مشخص می‌کند. ترکیب سیال برای سنگ‌های با درجه بالا و دربردارنده وزوویانیت در حدود $\text{XCO}_2 = 0.2$ را به دست می‌دهد. این ترکیب سیال مشخص می‌سازد که پیوسته در طول واکنش‌های دگرگونی تشکیل‌دهنده سنگ‌های کالک- سیلیکات هاله دگرگونی الوند، کانی‌های کربناتی واکنش داده و مقدار آنها در سنگ‌های دما بالا

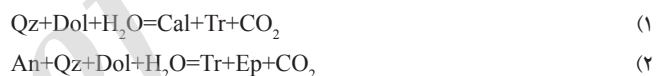
قانون فاز، تشکیل‌دهنده‌هایی که تنها در شمار محدودی از فازها وجود دارند و نیز تشکیل‌دهنده‌هایی که مقادیر آنها در فازهای دگرگونی بسیار کم است از سامانه حذف کرد؛ بدون اینکه تغییری در روابط فازهای باقیمانده ایجاد شود. بنابراین می‌توان از نمودارهای فازی ساده شده ACM-CH یا ACM (Ernest, 1976) برای مطالعه سامانه دگرگونی سنگ‌های آهکی استفاده کرد. CO_2 و Qz ، H_2O در همه مجموعه کانی‌ها حضور دارند و فازهای اضافی سامانه هستند. نمودار ACM یک مثلث کسر مولی است و متغیرهای تشکیل‌دهنده در سامانه مطالعاتی سنگ‌های کالک- سیلیکات عبارتند از: A: Al_2O_3 , C: $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}$, M: $\text{MgO} + \text{FeO}$.

۷- واکنش‌های دگرگونی در کالک- سیلیکات‌ها

بررسی واکنش‌های دگرگونی سنگ‌های کالک- سیلیکات در هاله دگرگونی الوند در سامانه‌های دگرگونی بسته فرض شده است. در هاله دگرگونی الوند با پیشرفت دگرگونی کانی‌های ظاهر می‌شوند که در ادامه به‌طور خلاصه به شرح هر یک پرداخته می‌شود (قربانی و همکاران، ۱۳۹۳):

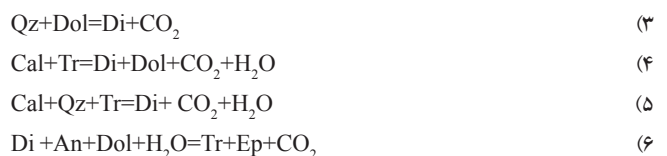
۷-۱. ظهور اپیدوت و ترمولیت

اپیدوت و ترمولیت کانی‌های دگرگونی معمول در سنگ‌های کالک- سیلیکات درجه پایین هستند. کلسیت و کوارتز به عنوان کانی‌های همراه با اپیدوت و ترمولیت در نمونه‌ها دیده می‌شوند. واکنش احتمالی تشکیل اپیدوت و ترمولیت به شرح زیر است (در نمودار ACM شکل ۷ نشان داده شده است؛ واکنش‌های ۱ و ۲):



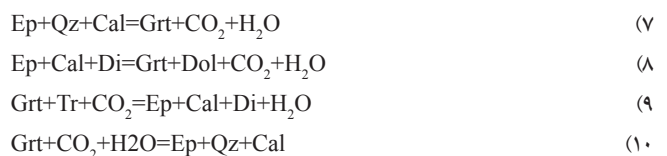
۷-۲. ظهور کلینوپیروکسن

با نزدیک شدن به توده الوند، کانی‌های با درجه دگرگونی کمتر به خرج کانی‌های دما فشار بالاتر مصرف شده‌اند. واکنش‌های احتمالی ظهور کلینوپیروکسن در سنگ‌های کالک- سیلیکات به صورت زیر پیشنهاد می‌شود (در شکل ۸ توالی مجموعه کانی‌ها در سامانه ACM نمایش داده شده است؛ واکنش‌های ۳، ۴ و ۵). در برخی نمونه‌ها در نتیجه واکنش دگرگونی پسرونده کلینوپیروکسن به ترمولیت و اپیدوت تجزیه شده است (واکنش ۶):



۷-۳. ظهور گارنت

با افزایش درجه دگرگونی، کلینوپیروکسن ناپدید و گارنت ظاهر می‌شود. واکنش‌های پیشنهادی عبارت است از واکنش‌های دگرگونی در شکل ۹ آورده شده است (واکنش‌های ۷ و ۸). در برخی از نمونه‌ها در نتیجه واکنش دگرگونی پسرونده، گارنت به اپیدوت و دیوپسید تجزیه شده است. این کانی‌ها حاصل تجزیه گارنت در دماهای پایین‌تر هستند. گارنت پسرونده با بافت پویی کیلوبلاستیک ادخال‌هایی از اپیدوت و دیوپسید دارد (واکنش‌های ۹ و ۱۰).



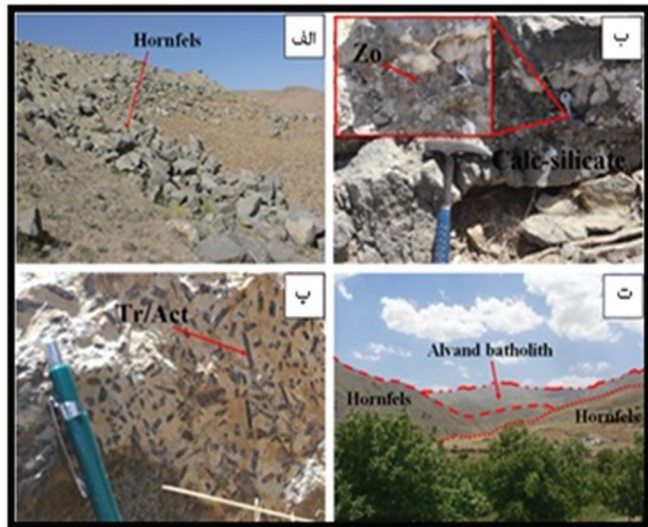
۷-۴. ظهور وزوویانیت

با افزایش درجه دگرگونی با مصرف دیوپسید، گارنت بلورهای وزوویانیت تشکیل می‌شوند. با توجه به مجموعه کانی‌ها، محتمل‌ترین واکنش‌های تشکیل وزوویانیت به صورت زیر هستند (روابط فازی میان کانی‌های دگرگونی در شکل ۱۰ آورده

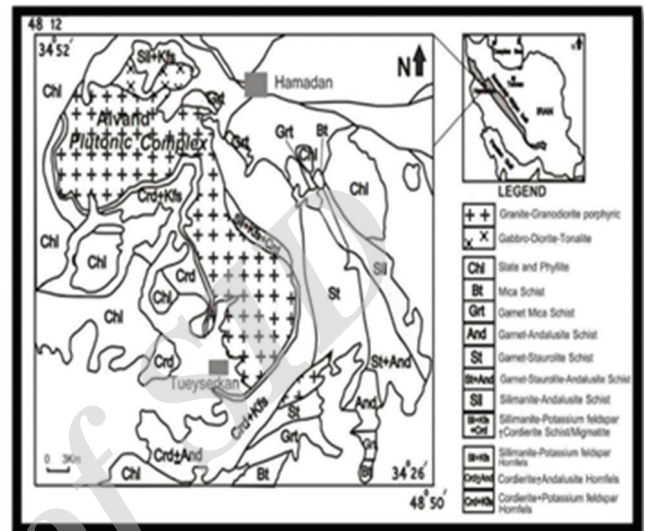
سپاسگزاری

از داوران محترم برای مطالعه دقیق این مقاله و ارائه نقطه نظرهای سازنده که سبب بهتر شدن کیفیت آن شده است سپاسگزاری می شود.

کاهش یافته است در نتیجه مقدار آزاد شده در شرایط دمابالا و نزدیک توده به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است.

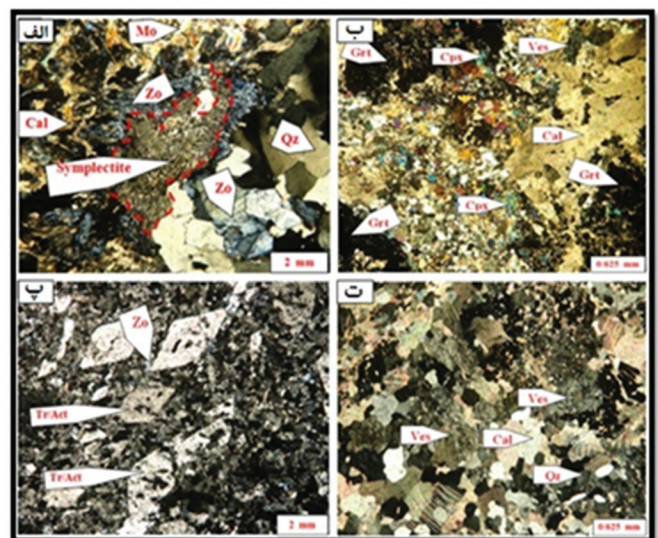
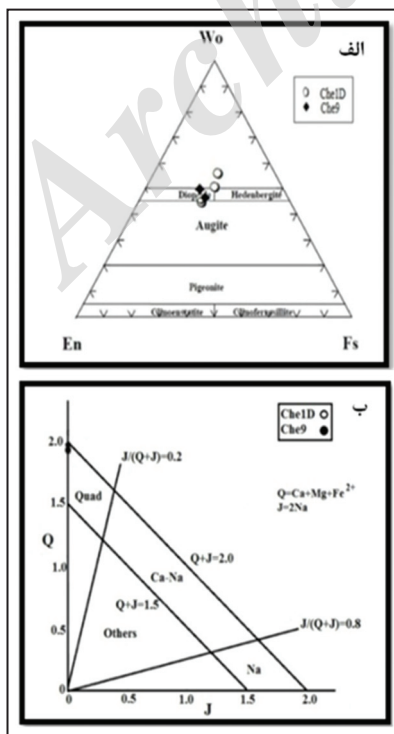


شکل ۲- الف) قطعات مختلف هورنفلس با شکستگی و خرد شدگی، دید به سوی باختر؛ ب) بلورهای به نسبت درشت زوئیزیت که در سنگ های کالک- سیلیکات شکل گرفته است؛ پ) بلورهای درشت ترمولیت/ اکتینولیت که به صورت لایه ای در حدود ۱۵ تا ۲۰ سانتی متر در سطح سنگ های کالک- سیلیکات قرار گرفته است؛ ت) تشکیل هورنفلس در هاله دگرگونی الوند، دید به سوی جنوب

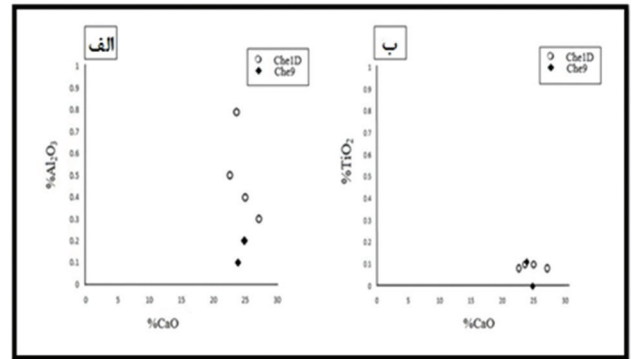
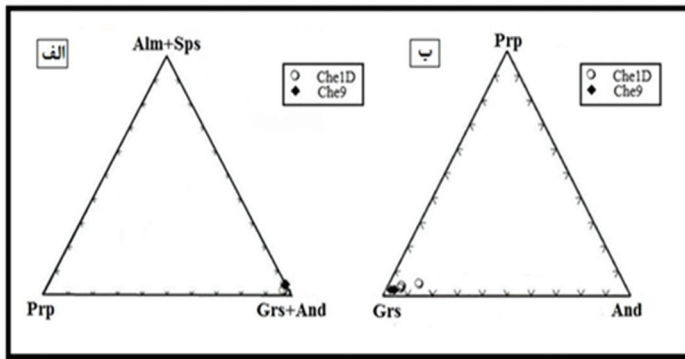


شکل ۱- موقعیت پهنه سندانج - سیرجان و منطقه مورد مطالعه و نقشه زمین شناسی توده الوند و هاله دگرگونی پیرامون آن (Sepahi, 2008).

شکل ۴- الف) ترکیب کلیوپروکسن های منطقه مورد مطالعه در نمودار En-Wo-Fs (Morimoto and Kitamaru, 1988) ب) تقسیم بندی کلیوپروکسن ها بر پایه متغیرهای Q در برابر J (Morimoto & Kitamaru, 1988) همان گونه که دیده می شود تجزیه کلیوپروکسن ها در هورنفلس های مورد مطالعه در محدوده کلیوپروکسن های غنی از کلسیم، منیزیم و آهن (Quad) و روی محور عمودی جانمایی شده اند (نمونه های 9 Che, Che 1D) تجزیه میکروپروپ شده است.

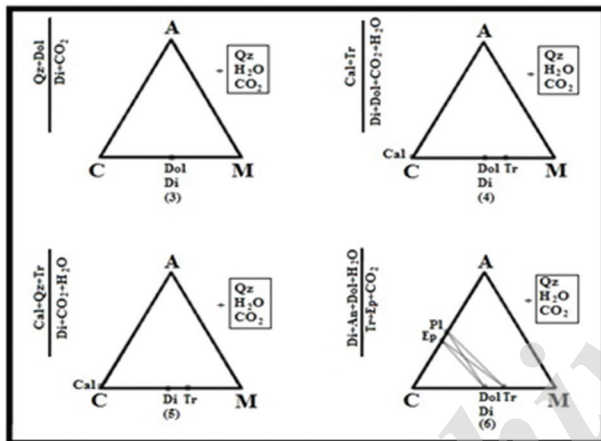


شکل ۳- سنگ نگاری هورنفلس های کالک- سیلیکات. الف) تشکیل بافت سیمپلکتیت در مجاورت بلورهای کلسیت، کوارتز، زوئیزیت و مسکوویت (XPL)؛ ب) تشکیل بافت پویکیلوبلاستیک در گارنت، همراه با اجتماعی از بلورهای کلسیت، کلیوپروکسن و وزوویانیت (XPL)؛ پ) جهت گیری ترمولیت/ اکتینولیت ها در یک زمینه گرانوبلاستیک ریزدانه، که سبب تشکیل بافت نماتوبلاستیک شده است (XPL)؛ ت) بلورهای بی شکل وزوویانیت که در محل اتصال با بلورهای کلسیت و کوارتز در یک زمینه گرانوبلاستیک دیده می شود (XPL).

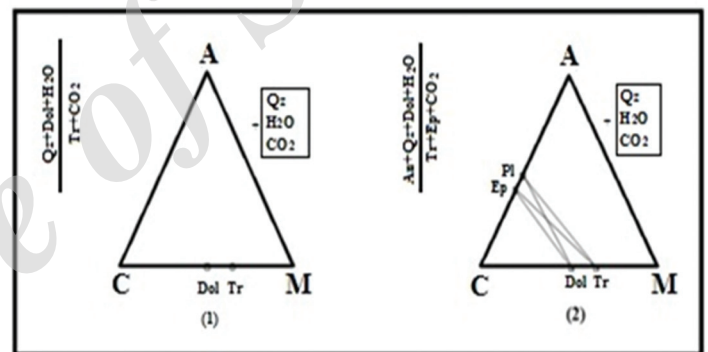


شکل ۶- الف و ب) نمایش تغییرات ترکیبی گارنت در نمودارهای مثلثی Alm+Sps-Prp-Grs+And و Prp-Grs-And و مقدار اعضای پایانی آلماندین، اسپستارین و پیروپ کم است؛ در حالی که مقدار عضو پایانی گروسولار بسیار زیاد است (نمونه‌های Che 9، Che1D تجزیه میکروپروپ شده است).

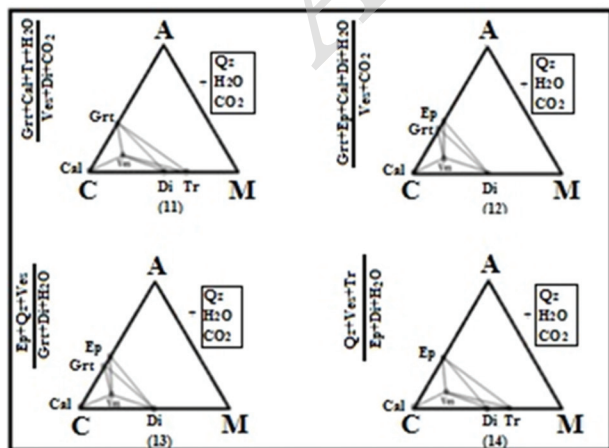
شکل ۵- الف) نمودار تغییرات %CaO به %Al₂O₃ در کلیتوپیروکسن‌های منطقه؛ ب) نمودار تغییرات %CaO به %TiO₂ در کلیتوپیروکسن‌ها (نمونه‌های Che 9، Che1D تجزیه میکروپروپ شده است).



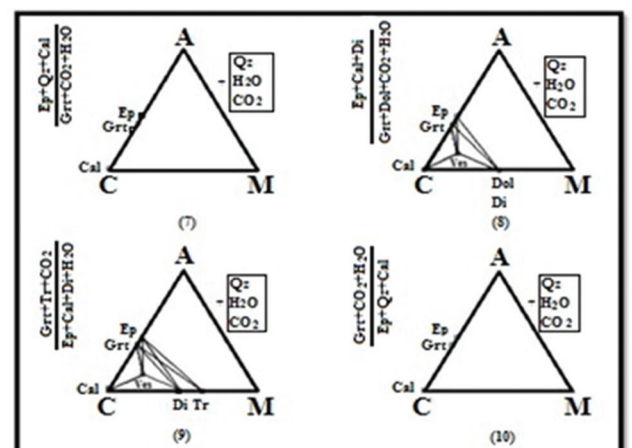
شکل ۸- توالی مجموعه کانی‌های سنگ‌های کالک-سیلیکات در سامانه ACM (Qz, H₂O, CO₂) به صورت فاز اضافی در نظر گرفته شده است. واکنش‌های ۳، ۴ و ۵ به صورت پیش‌رونده و واکنش ۶ به صورت پس‌رونده است.



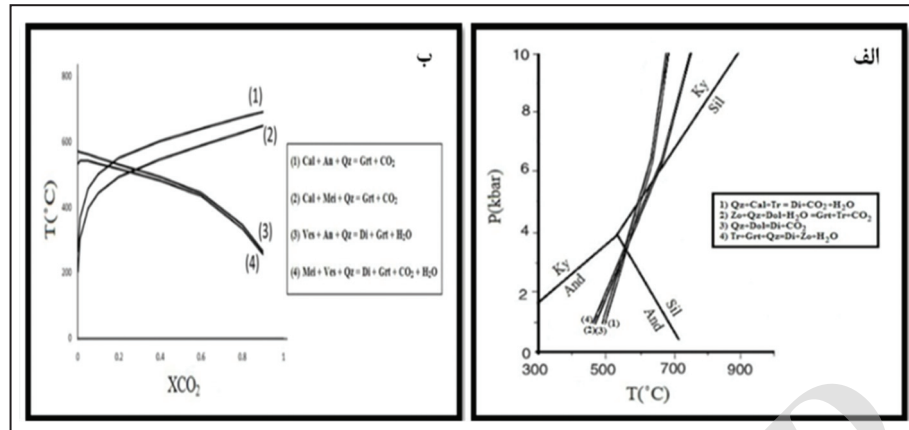
شکل ۷- ترکیب شیمیایی و روابط فازی کانی‌های دگرگونی در سنگ‌های کالک-سیلیکات را در سامانه (Qz, H₂O, CO₂)-ACM.



شکل ۱۰- ترکیب شیمیایی و روابط فازی کانی‌های دگرگونی در سنگ‌های کالک-سیلیکات در سامانه (Qz, H₂O, CO₂)-ACF. واکنش‌های ۱۱ و ۱۲ به صورت پس‌رونده و واکنش‌های ۱۳ و ۱۴ به صورت پیش‌رونده است.



شکل ۹- نمایش مجموعه کانی‌ها و روابط فازی میان آنها در نمودار ACM که در آن CO₂, H₂O، Qz به صورت فاز اضافی در نظر گرفته شده است. واکنش‌های ۷ و ۸ به صورت پیش‌رونده و واکنش‌های ۹ و ۱۰ به صورت پس‌رونده است.



شکل ۱۱- الف) منحنی P-T که واکنش‌های تعادلی چندگانه حاصل از برنامه THERMOCALC (version 2.4) روی آن رسم شده است. بیشترین فشار دگرگونی در هاله الوند ۳/۵ کیلو بار و دما حدود ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد است. در شکل منحنی پایداری آلومینوسیلیکات‌ها برای مقایسه نشان داده شده است؛ ب) XCO₂ و دمای دگرگونی برای واکنش‌های دگرگونی رخ داده در هاله دگرگونی الوند، با فرض اکتیویته واحد برای همه فازها در برنامه توسط THERMOCALC (version 2.4) برآورد شده است. نمودارها نشان می‌دهند که منحنی‌های تعادلی واکنش‌ها در حدود ۰/۲ است (مقدار XCO₂ مستقل از فشار است). با در نظر گرفتن فشار ۳/۵ کیلو بار، دمای دگرگونی در هاله حدود ۵۳۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد برآورد می‌شود.

جدول ۱- مجموعه کانی‌های دگرگونی در سنگ‌های کالک - سیلیکات در همدان (نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans (2010) است؛ نمونه‌ای که با نشانه * مشخص شده تجزیه میکروپروب شده است) (A= Alteration, O= Minor phase (<5%), X= Major phase (>5%))

Sample No	Gr	Cal/Dol	Qz	Ep	Cpx	Hbl	Grt	Zo	Mo	Ves	Tr/Act	Hem	Texture	Rocktype
Che1A	X	X		AX		O	X						Poikiloblastic - orphyroblastic	Grt calc-silicate
Che1B	O	X	X	AX		X		X					Poikiloblastic - orphyroblastic - granoblastic	Cpx-Grt calc- silicate
Che1D*	O	X	X	AX	X		X			O			Poikiloblastic - orphyroblastic	Cpx calc-silicate
Che1G	O	X	X	AX	X		X					O	Poikiloblastic - orphyroblastic	Cpx-Grt calc- silicate
Che1J	X	X	X	X				X	O			O	Granoblastic	Zo- Ep calc- silicate
Che1K	X	X	X	AX	X		X	X				O	Poikiloblastic - granoblastic	Cpx- Grt- Zo calc-silicate
Che3	O	X	X	AX		O		X	O		X	O	Granoblastic -symplectic- nematoblastic	Tr/Act- Zo calc-silicate
Che5	O	X	X	AX	X		X					O	Poikiloblastic - orphyroblastic - granoblastic	Cpx- Grt calc- silicate
*Che9	O	X	X	AX	X		X	X		X		O	Poikiloblastic - granoblastic	Ves- Cpx- Grt calc-silicate

جدول ۲- ترکیب شیمیایی و فرمول ساختمانی کلینوپروکسن و گارنت در هورنفلس های کالک- سیلیکات (نمونه های Che 9, Che 1D, تجزیه میکروپروب شده است).

کانی‌های تجزیه شده	Cpx, che1D	Cpx, che1D	Cpx, che1D	Cpx, che1D	Cpx, che9	Cpx, che9	Che9-Cal1	Che9-Cal2	che1D-Grt1, rim	che1D-Grt1, middle	che1D-Grt1, core	Che9-Grt2	Che9-Grt3	Che9-Grt4
SiO ₂	۵۵/۱۱	۵۲/۳۶	۵۳/۸۴	۵۵/۳۰	۵۳/۶۳	۵۵/۱۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۰/۵	۴۰/۲۵	۴۰/۳۳	۴۱/۳۶	۴۱/۰۴	۴۱/۲۷
TiO ₂	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۱۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۱۷	۰/۳	۰	۰	۰/۴۵	۰
Al ₂ O ₃	۰/۵۰	۰/۳۰	۰/۴۰	۰/۷۹	۰/۲۰	۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۰/۶۷	۱۹/۱۷	۱۷/۳۵	۲۱/۳۳	۲۰/۹۱	۲۰/۵۳
FeO	۹/۰۸	۱۲/۵۸	۱۰/۵۹	۸/۱۱	۱۰/۳۰	۹/۴۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۲/۶۳	۰/۸	۳/۰۳	۲/۷۱	۲/۸	۳/۱۴
MnO	۰/۶۲	۰/۰۰	۰/۶۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰	۰/۹	۱/۳۶	۰	۰	۰
MgO	۱۱/۹۹	۷/۵۰	۹/۰۰	۱۲/۰۴	۱۱/۰۵	۱۱/۳۰	۰/۳	۰/۲۷	۰/۲	۰/۴	۰/۷۳	۰	۰	۰
CaO	۲۲/۵۹	۲۷/۱۶	۲۵/۰۰	۲۳/۶۲	۲۴/۸۲	۲۳/۸۷	۹۹/۷	۹۹/۷۳	۳۴/۸۳	۳۷/۸۹	۳۶/۸۵	۳۴/۶	۳۴/۸	۳۵/۰۶
Na ₂ O	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
K ₂ O	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Cr ₂ O ₃	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰	۰/۲۹	۰/۳۵	۰	۰	۰
Total	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
Formula	(O) _۶	(O) _۶	(O) _۶	(O) _۶	(O) _۶	(O) _۶	(O) _{۰.۳۴}	(O) _{۰.۳۴}	(O) _{۲.۴}	(O) _{۲.۴}	(O) _{۲.۴}	(O) _{۲.۴}	(O) _{۲.۴}	(O) _{۲.۴}
Si	۲/۰۴۸	۲/۰۱۱	۲/۰۳۸	۲/۰۴۵	۲/۰۲۰	۲/۰۵۶	۶/۱۱۹	۶/۱۲۱	۶/۲۰۴	۶/۲۱۳	۶/۱۸۱	۶/۲۲۸	۶/۱۰۹	۶/۱۲۱
Ti	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۳	۰/۱۳۳	۰/۰۳۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۵۱	۰/۰۰۰	۰/۱۳۳	۰/۰۳۴
Al	۰/۰۲۲	۰/۰۱۴	۰/۰۱۸	۰/۰۳۴	۰/۰۰۹	۰/۰۴	۳/۶۷۵	۳/۴۳۶	۳/۱۴۶	۳/۷۷۷	۳/۷۱۲	۳/۶۵۲	۳/۶۷۵	۳/۴۳۶
Fe ⁺⁺	۰/۲۸۲	۰/۴۰۴	۰/۳۴۷	۰/۲۵۱	۰/۳۳۴	۰/۲۹۵	۰/۳۳۲	۰/۱۰۲	۰/۳۹۰	۰/۳۴۰	۰/۳۵۳	۰/۳۹۶	۰/۳۳۲	۰/۱۰۲
Mn	۰/۰۲۰	۰/۰۰۰	۰/۰۲۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۱۱۶	۰/۱۷۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۱۱۶
Mg	۰/۶۶۴	۰/۴۲۹	۰/۵۲۸	۰/۶۶۴	۰/۶۲۰	۰/۶۲۸	۰/۰۴۵	۰/۰۹۱	۰/۱۶۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۴۵	۰/۰۹۱
Ca	۰/۸۹۹	۱/۱۱۸	۱/۰۱۴	۰/۹۳۶	۱/۰۰۲	۰/۹۵۳	۵/۶۲۸	۶/۱۷۳	۶/۰۷۳	۵/۵۶۸	۵/۶۱۵	۵/۶۶۹	۵/۶۲۸	۶/۱۷۳
Na	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
K	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
Cr	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۳۵	۰/۰۴۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۳۵
Total	۲/۹۲۸	۳/۹۷۹	۳/۹۴۹	۳/۹۳۴	۳/۹۷۶	۳/۹۴۹	۱۵/۹۱۱	۱۶/۰۷۴	۱۶/۱۵۹	۱۵/۸۹۹	۱۵/۹۱۲	۱۵/۹۴۵	۱۵/۹۲۱	۱۶/۰۷۴
Mg/(Mg+Fe ₂)	۰/۵۸۷	۰/۴۷۹	۰/۵۰۵	۰/۵۹۷	۰/۶۰۹	۰/۵۶۸								
Fe ₂ /(Fetot)	۱/۶۵۵	۱/۱۵۴	۱/۴۲۸	۱/۸۷۷	۱/۲۲۶	۱/۶۲۱								
Al/(Al+Fe ₃ +Cr)	-۰/۱۳۵	-۰/۲۸۳	-۰/۱۳۵	-۰/۲۱۳	-۰/۱۳۸	-۰/۱۲۵								
En	۰/۳۲۷	۰/۲۱۳	۰/۲۵۱	۰/۳۲۴	۰/۳۰۷	۰/۳۰۵								
Fs	۰/۲۲۰	۰/۲۲۲	۰/۲۴۷	۰/۲۱۹	۰/۱۹۷	۰/۲۲۲								
Wo	۰/۴۴۳	۰/۵۵۵	۰/۵۰۲	۰/۴۵۷	۰/۴۹۶	۰/۴۶۳								
Jd	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰								
Ac	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰								
Aug	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰								
Aliv									۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
Alvi									۳/۶۷۵	۳/۴۳۶	۳/۷۱۲	۳/۷۷۷	۳/۶۲۸	۳/۶۵۲
Alm(%)									۵/۴	۰/۰	۰/۰	۵/۸	۵/۹	۵/۵
Prp(%)									۰/۷	۱/۴	۲/۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Sps(%)									۰/۰	۱/۸	۲/۸	۰/۰	۰/۰	۰/۰
GAU(%)									۹۳/۸	۹۶/۸	۹۴/۶	۹۴/۲	۹۴/۱	۹۴/۵
sum									۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰
Grs(%)									۹۶/۴	۹۵/۳	۸۷/۹	۱۰۰/۰	۹۸/۶	۹۸/۳
Adr(%)									۳/۶	۳/۸	۱۰/۹	۰/۰	۱/۴	۱/۷
Uva(%)									۰/۰	۱/۰	۱/۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Total									۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰

کتابنگاری

- اقلیمی، ب.، ۱۳۷۹- گزارش نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ همدان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی.
- بهاری فر، ع.، سپاهی گرو، ع.، ۱۳۷۵- بررسی ویژگی‌های مورفولوژی و شیمیایی بلورهای گارنت در شیست‌های زمان‌آباد (واقع در مسیر همدان- ملایر). خلاصه مقالات پنجمین سمینار بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، صص. ۱۸ تا ۱۹.
- بهاری فر، ع.، ۱۳۸۳- پترولوژی سنگ‌های دگرگونی منطقه همدان، رساله دکترا، دانشگاه تربیت معلم تهران.
- زرعیان، س.، فرقانی، ع. و فیاض، ه.، ۱۳۵۰- توده گرانیتی الوند و هاله دگرگونی آن، قسمت اول، نشریه دانشکده علوم دانشگاه تهران، شماره ۴، صص. ۳۷ تا ۴۷.
- ساک، ع. و پورکاسب، ه.، ۱۳۹۱- مطالعه شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل اسکارن‌ها در همبری باتولیت الوند با سنگ‌های آهکی دگرگون شده، همدان، شمال غرب ایران، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، شماره ۱، صص. ۱۲۳ تا ۱۳۴.
- سپاهی، ع.، ا.، ۱۳۷۸- پترولوژی مجموعه پلوتونیک الوند با نگرش ویژه بر گرانیتوئیدها، رساله دکترا، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت معلم تهران.
- صادقیان، م.، ۱۳۷۳- بررسی پترولوژی سنگ‌های آذرین و دگرگونی منطقه چشمه قصابان همدان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
- فرهپور، م.، ۱۳۷۶- تحلیل پتروفاوریتی سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای شرق باتولیت همدان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- قربانی، ه.، ۱۳۹۲- بررسی دگرگونی مجاورتی سنگ‌های کالک-سیلیکات در شرق باتولیت الوند، سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین‌المللی تخصص علوم زمین.
- قربانی، ه.، مؤذن، م.، ساکی، ع.، ۱۳۹۳- مطالعه سنگ‌های کالک-سیلیکات در هاله دگرگونی الوند، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز.
- قربانی، ه.، مؤذن، م.، ساکی، ع.، ۱۳۹۳- بررسی کانی‌شناسی و روابط فازی هورنفلس‌های کالک-سیلیکات در شرق باتولیت الوند، بیست و دومین همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دانشگاه شیراز.

References

- Alavi, M., 1994- Tectonics of the Zagros Orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 299: 211-238.
- Alavi, M., 2004- Regional stratigraphy of the Zagros Fold-Thrust belt of Iran and its proforelenad evolution", *American Journal of Science* 304: 1-20.
- Berberian, M. and Berberian, F., 1981- Tectono-Plutonic episodes in Iran. In: *Zagros- Hindu Kush- Himalaya Geodynamic Evolution*. Geodynamics series, vol. 3, copyright by the American Geophysical Union.
- Berberian, M. and King, G. C. P., 1981- Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran, *Cand. J. Earth. Sci.*, 18: 210- 265.
- Droop, G. T. R., 1987- A general equation for estimating Fe³⁺ Concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, 51: 431-435.
- Ernest, W. G., 1976- *Petrologic phase equilibria*. W. H. Freeman, San Francisco.
- Holland, T. J. B. and Powell, R., 1985- An internally consistent thermodynamic data set with uncertainties and correlations: 2 Data and results. *Journal of Metamorphic Geology*, 3(4): 343-370.
- Mahmoudi, Sh., Corfu, F., Masoudi, F., Mehrabi, B. and Mohajjel, M., 2011- U–Pb dating and emplacement history of granitoid plutons in the northern Sanandaj–Sirjan Zone, Iran, *Journal of Asian Earth Sciences*, 41: 238–249.
- Mohajjel, M., Fergusson, C. L. and Sahandi, M. R., 2003- Cretaceous- Tertiary convergence and continental, Sanandaj- Sirjan Zone, western Iran, *J. Asian Earth Sci*, 21: 397 – 412.
- Morimoto, N. and Kitamura, M., 1988- Q-J diagram for classification of pyroxenes. *Journal of the Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologist*, 78: 141. (in Japanese).
- Saki, A., 2011- Formation of Spinel- cordierite- plagioclase symplectites replacing andalusite in metapelitic of the Alvand aureole, Iran, *Geological Magazine* 148: 423- 434.
- Saki, A., Moazzen, M. and Baharifar, A. A., 2012- Migmatite microstructures and partial melting of Hamadan metapelitic rocks within the Alvand contact aureole, western Iran, *International Geology Review* in press.
- Sepahi, A. A., 2008- Typology and petrogenesis of granitic rocks in the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, Iran": With emphasis on the Alvand plutonic complex, *N. Jb. Geol. Palatou. Abn*, 247: 295-312.
- Sepahi, A. A., Whitney, D. L. and Baharifar, A. A., 2004- Petrogenesis of And-Ky-Sil veins and host rocks, Sanadaj- Sirjan metamorphic belt, Hamadan, Iran, *Jpurnal of Metamorphic Geology* 22: 119- 134.
- Shahbazi, H., Siebel, W., Pourmoafee, M., Ghorbani, M., Sepahi, A. A., Shang, C. K. and Vousoughi Abedini, M., 2010- Geochemistry and U-Pb zircon geochronology of the Alvand plutonic complex in Sanandaj- Sirjan (Iran): New evidence for Jurassic magmatism. *Journal of Asian Earth Sciences*, in press.
- Valizadeh, M. V. and Cantagrel, J. M., 1975- Premieres donnees radiometriques (K-Ar et Rb-Sr) sur les mica du complexe magmatique du Mont Alvand pres Hamadan (Iran Occidental), *Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de l' Academie des Sciences, Serie D. Sciences Naturelles* 281: 1083- 1086.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W., 2010- Abbreviation for names of rock – forming. *Minerals. American mineralogist*, volume 95: 185-187.

Investigations on mineral chemistry and P-T estimation for formation of diopside, garnet and coexisting minerals in the calc-silicate hornfelses from the Alvand metamorphic aureole, Hamadan, West of Iran

H. Ghorbani^{1*}, M. Moazzen² and A. Saki³

¹Ph.D. Student, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Professor, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³Associate Professor, Faculty of Geology, University of Shahid Chamran, Ahvaz, Iran

Received: 2015 October 28

Accepted: 2016 May 15

Abstract

Calc-silicate hornfelses are resulted from temperature excreted from the Alvand Batholith on the surrounding carbonate rocks. Metamorphic minerals in these rocks are vesuvianite + garnet+clinopyroxene+ tremolite/actinolite+quartz+calcite=epidote. Calc-silicate minerals occurred in two stages of prograde and retrograde metamorphism. Mineral chemistry of clinopyroxene and garnet in calc-silicate hornfelses determined by EPMA shows that these minerals are mainly diopside and grossular. Based on clinopyroxene-garnet thermometry with coexisting minerals such as tremolite/actinolite, quartz, . . . temperature of ~550°C was calculated for metamorphism of the calc-silicate hornfelses. Pressure of metamorphism was estimated to be about 3.5 Kbar. Fluid composition in the calc-silicate hornfelses had $X_{CO_2} = 0.2$ which indicates that during prograde metamorphism carbonate minerals reacted out and the amount of these minerals was reduced in the rocks.

Keywords: Alvand batholith, Calc-silicate hornfels, Fluid composition, Temperature-pressure, Hamedan.

For Persian Version see pages 139 to 146

*Corresponding author: H. Ghorbani; E-mail: haleh_ghorbani@tabrizu.ac.ir