



مقایسه نتایج دما- فشارسنجی دگرگونی با استفاده از ترموکالک و تریاک - دومینو جهت مطالعه هورنفلس‌های کالک - سیلیکات منطقه چشین، همدان

هاله قربانی^{۱*}، محسن مؤذن^۱ و عادل ساکی^۲

(۱) گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

(۲) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۲۰، پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۵

چکیده

منطقه مورد بررسی در اطراف روستای چشین و جنوب همدان واقع شده است. هورنفلس‌های کالک-سیلیکات در نتیجه نفوذ باتولیت الوند در سنگ میزبان آهکی تشکیل شده است. این پژوهش با هدف مقایسه نتایج دما-فشارسنجی حاصل از دو نرم‌افزار تریاک-دومینو و ترموکالک انجام شده است. داده‌های مورد استفاده در نرم‌افزار تریاک-دومینو شیمی کل سنگ است که به وسیله آن به بررسی روابط فازی به روش شبه‌مقاطع پرداخته شده است و فشار دگرگونی برای هورنفلس‌های کالک-سیلیکات مورد بررسی تخمین زده شده است. با استفاده از نرم‌افزار ترموکالک نیز تعادلات ترمودینامیکی کانی‌ها و واکنش‌های تعادلی چندگانه بررسی و فشار و دمای دگرگونی محاسبه شده است. مدل‌سازی انجام شده با استفاده از این دو نرم‌افزار، ضمن تأیید یکدیگر، دما را در حدود ۵۰۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار را در حدود ۲/۵ تا ۳/۵ کیلو بار نشان می‌دهد. دما و فشار دگرگونی بر اساس کسر مولی کلسیم و منیزیم برای گارنت و کلینوپیروکسن، دمای محاسبه شده را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: هورنفلس‌های کالک-سیلیکات، شبه‌مقاطع، دما و فشار، ترموکالک، تریاک-دومینو، همدان

مقدمه

اهمیت قابل ملاحظه‌ای دارند (Spear, 1993). سنگ‌های کالک-سیلیکات دارای فازهای سیال H_2O و CO_2 حاصل از فرایندهای دگرگونی پیش‌رونده بوده که این ویژگی آنها متفاوت از دگرگونی سنگ‌های رسی و متابازیک با تنها فاز سیال H_2O است. مجموعه کانی‌ها در سنگ‌های کالک-سیلیکات، به مقدار H_2O و CO_2 در سیالات دگرگونی بسیار حساس هستند و این نشان‌دهنده اهمیت ترکیب سیالات در طول دگرگونی این سنگ‌هاست. بر اساس واکنش‌های بین کانی‌ها می‌توان شرایط دما و فشار تشکیل هورنفلس‌های کالک-

مطالعه و بررسی فرایند دگرگونی، کلیدی برای شناخت سرگذشت و تکامل پوسته زمین محسوب می‌شود. از این رو، سنگ‌شناسان دگرگونی، تفاسیر همه جانبه‌ای برای درک تکامل پوسته‌ای انجام می‌دهند (Kerrick, 1991). سنگ‌های آهکی مقادیر نسبتاً کمی از پوسته زمین را تشکیل می‌دهند؛ ولی به دلیل اینکه دگرگونی آنها اطلاعات مهمی را در مورد ترکیب فاز سیال دگرگونی و تأثیر آن بر پایداری مجموعه کانی‌های دگرگونی و شرایط حرارت و فشار در اختیار ما قرار می‌دهند،

موقعیت زمین‌شناسی

منطقه مورد بررسی در غرب ایران، در اطراف چشین واقع در استان همدان (شکل ۱) بین طول‌های جغرافیایی $48^{\circ}47'$ تا $28^{\circ}49'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $34^{\circ}00'$ تا $35^{\circ}44'$ شمالی قرار دارد (شکل ۱). ناحیه همدان از دیدگاه زمین‌شناختی ساختاری (Stocklin, 1968) در محدوده زون سنندج-سیرجان جای گرفته است. زون دگرگونی سنندج-سیرجان به صورت نواری کشیده با طول حدود ۱۵۰۰ کیلومتر و عرض تقریبی ۲۰۰ کیلومتر از شمال‌باختر تا جنوب‌خاور کشیده شده است. زون سنندج-سیرجان پرتکاپوترین پهنه ساختاری ایران است که فازهای دگرگونی و ماگماتیسیم مهمی را پشت سر گذاشته است. وجود سنگ‌های گوناگون رسوبی، دگرگونی و آذرین - که بیشتر آنها بدون فسیل، متبلور و دگرگونی است - و تغییر شکل یافتن واحدهای سنگی، موجب پیچیدگی زمین‌شناسی این منطقه شده است. علوی (Alavi, 2004)، زون سنندج-سیرجان را جزئی از کوه‌زاد زاگرس دانسته و آن را زون زاگرس فلس مانند نامیده است. سنگ‌ها و واحدهای رسوبی منطقه در طی بسته شدن نئوتیس و برخورد قاره اورازیا و گندوانا تحت تأثیر فعالیت‌های موجود در حاشیه قاره دچار دگرگونی شده‌اند. افزایش فشار و گرما در منطقه باعث رخداد یک دگرگونی دیناموترمال در منطقه شده است که سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای را ایجاد کرده‌اند. ادامه روند برخورد قاره‌ای و تکامل فرایند کوه‌زایی باعث شروع فعالیت‌های پلوتونیزم و ایجاد باتولیت الوند شده است. انتشار گرمای ماگما سبب شده است که سنگ‌های دگرگونی مجاورتی در منطقه ظاهر شود. مجموعه پلوتونیک الوند در بخش شمالی نوار دگرگونی سنندج-سیرجان یکی از توده‌های نفوذی مهم به‌شمار می‌آید (Mohajjel et al., 2003) (شکل ۱). این مجموعه از گرانیتوئیدهای پورفیری، گرانیتوئیدهای لوکوکراتیک و سنگ‌های مافیک تشکیل شده است (Sepahi et al., 2004). نفوذ این توده و انتشار سیالات و گرمای حاصل از ماگما در سنگ میزبان رسی و آهکی سبب ایجاد دگرگونی مجاورتی در

سیلیکات حاصل از دگرگونی حرارتی را پیدا کرد. روش شبه‌مقاطع که نخستین بار توسط هنس (Hensen, 1971) ارائه شد، امروزه توسط دانشمندان برای تعیین شرایط ترمودینامیکی تبلور کانی‌ها و مدل‌سازی‌ها در سنگ‌شناسی دگرگونی استفاده می‌شود (Hoschek, 2004; Omrani et al., 2013). اساس این روش بر مبنای شیمی کل یک نمونه سنگی با کانی‌های مشخص در حال تعادل و تنها با یک دما و فشار تعادلی استوار بوده است. چنان‌که شیمی سنگ ثابت باشد، تغییر کانی‌ها، تغییر دما و فشار و شرایط جدید ترمودینامیکی را نشان می‌دهد. برتری روش استفاده از شبه‌مقاطع، عدم وابستگی محاسبه دما و فشار به دانستن ترکیب کانی‌هاست (داده‌های ریزپردازشی) و با اطلاع از شیمی کل سنگ و نوع کانی‌های موجود در سنگ می‌توان گستره دما و فشار تشکیل سنگ‌ها را مشخص کرد. هرچند در دست داشتن داده‌های شیمی کانی‌ها و داده‌های ریزپردازشی می‌تواند ما را در محاسبات و مدل‌سازی‌های پیشرفته‌تر کمک کند. دسترسی به داده‌های وابسته به شیمی کل سنگ آسان‌تر است و نیز محاسبه دما و فشار با استفاده از روش شبه‌مقاطع قابلیت‌های بالایی دارد (Moazzen et al., 2015). سنگ‌های آذرین و دگرگونی در همدان همواره مورد توجه زمین‌شناسان بسیاری قرار گرفته و تاکنون درباره کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی این منطقه پژوهش‌های بسیاری انجام شده است (Ahmadi Khalaji and Tahmasbi, 2016; Saki and Pourkaseb, 2012; Maanijou et al., 2016; Haghighi Bardineh et al., 2019). در این پژوهش به بررسی نتایج حاصل از این روش برای هورنفلس‌های کالک-سیلیکات منطقه چشین همدان پرداخته شده است.

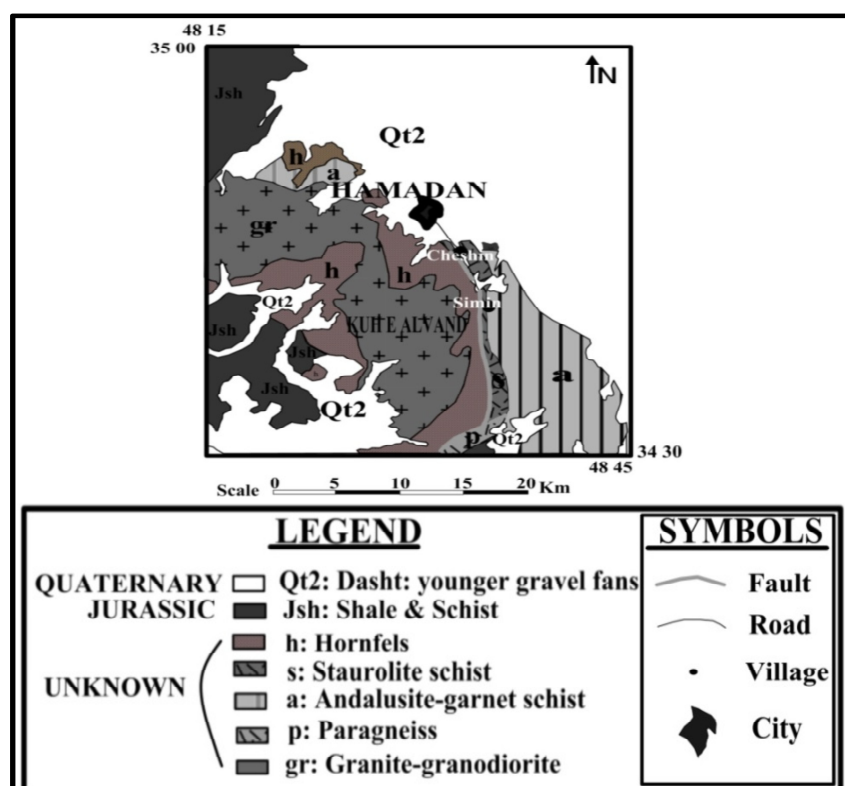
در این پژوهش از برنامه تریاک-دومینو به همراه بانک اطلاعاتی داده‌های ترمودینامیکی کانی‌ها از پاول و هلند (Powell and Holland, 1988) استفاده شده است. در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از دو نرم‌افزار ترموکالک و تریاک-دومینو به تعیین دما و فشار برای سنگ‌های مورد بررسی پرداخته شود. علاوه بر آن منطقه‌بندی شیمیایی گارنت و کلینوپیروکسن با استفاده از روش شبه‌مقاطع مورد بررسی قرار گرفته است.

یال شرقی توده شده است (شکل های ۱ و ۲- A). این سنگ ها شامل هورنفلس کردیریت دار، شیت های لکه دار، مرمرها و هورنفلس های کالک- سیلیکات و رسی است. سنگ های مجموعه دگرگونی همدان در مراحل مختلف دگرگونی ناحیه ای و مجاورتی تشکیل شده اند.

سنگ های دگرگونی ناحیه ای: سنگ های دگرگونی ناحیه ای به سن پالئوژوئیک تا اوایل ژوراسیک قدیمی ترین سازندهای زمین شناسی منطقه را تشکیل داده اند که اغلب شامل اسلیت، فلیت و انواع شیت ها هستند. بر پایه پژوهش صادقیان (Sadeghian, 1994)، دگرگونی ناحیه ای همدان، از نوع دگرگونی دما و فشار متوسط، نوع باروین (کیانیت- سیلمانیت) است. بهاری فر (Baharifar, 2004) نوع دگرگونی ناحیه ای سنگ های منطقه همدان را فشار پایین- دما بالا و مربوط به

کمانی ماگمایی می داند.

سنگ های دگرگونی مجاورتی: سنگ های دگرگونی مجاورتی (شکل ۲- A) شامل انواع شیت های لکه دار، هورنفلس ها و میگماتیت ها هستند و در اطراف توده نفوذی الوند قرار دارند. شیت های لکه ای و هورنفلس ها تنوع زیادی دارند. این سنگ ها در نتیجه تأثیر حرارتی توده های بازیک و اسیدی بر روی سنگ های قدیمی تر به وجود آمده اند (Saki and Pourkaseb, 2012; Ahmadi Khalaji and Tahmasbi, 2016; Ghorbani et al., 2015a; Sepahi et al., 2004). حداکثر فشار برای تشکیل سنگ های سیلیکات آلومین دار، حدود ۴ کیلو بار و دما در حدود ۶۰۶ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است و متوسط گرادیان زمین گرمایی را در منطقه حدود ۴۹ درجه سانتی گراد بر کیلومتر تخمین زده اند (Baharifar, 2004).



شکل ۱. نقشه زمین شناسی باتولیت الوند و هاله دگرگونی اطراف آن. سنگ های کالک- سیلیکات در قسمت شمال شرقی باتولیت الوند در منطقه چشین رخنمون دارند.

Fig. 1. Geological map of the Alvand batholith and metamorphic aureole on the surrounding. Calc-silicate rocks in the northeastern the Alvand batholith are outcropped in the Cheshin area.

بررسی‌های صحرایی

سنگ‌های دگرگونی مجاورتی در منطقه چشین همدان انواع متنوعی از هورنفلس‌های کالک-سیلیکات و رسی هستند که با فاصله گرفتن از توده نفوذی الوند، درجه دگرگونی این سنگ‌ها کاسته می‌شود (شکل ۲- A). این سنگ‌ها شامل انواع شیست‌های لکه‌دار، هورنفلس‌ها (شکل ۲- A) و میگماتیت‌ها هستند که در اطراف توده نفوذی الوند قرار دارند. وجود مسئله دگرگونی ناحیه‌ای و زمین‌ساخت فعال (به علت وجود راندگی‌های متعدد) موجب پیچیدگی وضع ساختمانی در منطقه همدان شده است و از لحاظ وضع زمین‌ساختی خاص این زون ساختاری، ارتباط واحدهای رسوبی به‌طور معمول گسله است. گسل موجود در منطقه برداشت نمونه‌ها، گسل چشین-سیمین است که این گسل با روند کلی شمال‌باختری-جنوب‌خاوری و به درازای ۱۵ کیلومتر تا روستای سیمین، مرز میان دگرگونی ناحیه‌ای و مجاورتی امتداد دارد (شکل ۱)؛ ولی در دره ارزان فود با گسل دیگر با راستای NE-SW هم‌جهت می‌شود. شیب گسل NE ۷۰° و سازوکار آن معکوس است (Eghlimi, 2000).

هورنفلس‌های کالک-سیلیکات

هورنفلس‌های کالک-سیلیکات به وسعتی در حدود چندین متر مربع در مجاورت شیست‌ها، هورنفلس‌های رسی (شکل ۲- A) و بازیک در منطقه مطالعاتی رخنمون دارند. در منطقه مورد بررسی، مرز بین دو پروتولیت رسی و آهکی از نظر تنوع کانی‌شناسی مشخص و واضح است؛ به‌طوری‌که کانی‌های گارنت، ترمولیت-اکتینولیت و زوئیزیت در هورنفلس‌های کالک-سیلیکات در اندازه‌های مختلف دیده می‌شوند (شکل ۲- B, C و D). رگه‌های زوئیزیت-کلینوزوئیزیت‌دار، درون سنگ‌های کربناته و بلافصل سنگ‌های رسی و آهکی دیده می‌شود. رنگ سبز در بعضی هورنفلس‌های کالک-سیلیکات به دلیل حضور کانی‌های فرومیزین اپیدوت، ترمولیت/اکتینولیت (شکل ۲- C) است.

پتروگرافی

سنگ‌های کالک-سیلیکات بررسی شده، علاوه بر داشتن کلسیت و کوارتز دارای مقادیر بالایی از کانی‌های سیلیکات آلومینیم مانند اپیدوت، وزوینیت، ترمولیت/اکتینولیت، گارنت، اپیدوت، کلینوپروکسن حاصل دگرگونی مجاورتی هستند (شکل ۲). بافت میکروسکوپی در این نمونه‌ها اغلب گرانوبلاستیک است؛ ولی در بعضی نمونه‌ها بافت پوئی کیلوبلاستیک (شکل ۲- E و H)، پورفیروبلاستیک (شکل ۲- G)، ایدیوبلاستیک و زینوبلاستیک نیز دیده می‌شود و همچنین در بعضی از نمونه‌های مورد بررسی، بافت سیمپلکتیت به چشم می‌خورد. در تمامی مقاطع گرافیت حضور دارد که مقدار گرافیت در بعضی از نمونه‌ها زیاد و در بعضی دیگر کم است (شکل ۲- F). به‌طور کلی گرافیت کانی مشخصی در سنگ‌های دگرگونی مانند شیست‌های دگرگونی، گنیس، اسلیت‌ها و سنگ‌های آهکی دگرگون‌شده است و به عبارت دیگر رنگ خاکستری خیلی از سنگ‌های دگرگونی به علت وجود همین کانی است (Sarabi, 1973). مقادیر اندکی کانی فرعی هماتیت در تعدادی از نمونه‌های سنگی به صورت پراکنده دیده می‌شود.

کوارتز: در این سنگ‌ها، کوارتز به صورت دانه ریز و بی شکل حضور دارد. کوارتزها با بافت دندانه‌دار در بین کانی‌های دیگر قرار گرفته‌اند.

کلسیت: در این سنگ‌ها، کانی کلسیت دارای اندازه متغیر از ریزبلور تا درشت‌بلور بوده و دارای شکل‌های متفاوتی از ایدیوبلاستی تا زینوبلاستی است (شکل ۲- F). بلورهای کلسیت در زمینه گرانوبلاستیک دارای نقطه اتصال سه‌تایی هستند. در مرز این بلورها، در نتیجه پدیده درشت‌شدگی در کانی کلسیت، زاویه ۱۲۰ درجه ایجاد شده است.

اپیدوت: اپیدوت اولین کانی تشکیل شده به دلیل دگرگونی حرارتی است. کانی‌های اپیدوت به صورت بلورهای بسیار کوچک در محل مرز دانه‌های کلسیت و یا در گارنت به صورت

هم‌رشدی و یا در حاشیه‌های آن تشکیل شده است (شکل ۲-۲). اپیدوت در اثر آلتراسیون گارنت در اطراف این کانی رشد کرده است. در درجات پایین دگرگونی اپیدوت به همراه کلسیت و کوارتز به صورت گرانوبلاستیک دیده می‌شود. علاوه بر کانی اپیدوت در این سنگ زوئیزیت و کلینوزوئیزیت نیز وجود دارد. با حرکت به سمت توده اپیدوت جای خود را به ترمولیت می‌دهد. در مقاطعی که اپیدوت از آلتراسیون ثانویه گارنت و ترمولیت حاصل می‌شود، جزو همیافت محسوب نمی‌شود.

ترمولیت / اکتینولیت: این بلورها را معمولاً با توجه به رخ و شکل کشیده‌ای که دارند، می‌توان به خوبی تشخیص داد. در بعضی موارد ترمولیت در امتداد رخنمون‌ها به کلسیت تبدیل شده است و این کانی به صورت سودومورف به جای ترمولیت نشست است. این کلینوآمفیبول باعث تشکیل بافت نماتوبلاستیک شده است.

کلینوپیروکسن: بلورهای کلینوپیروکسن به صورت دانه‌ای بی‌شکل تا نیمه شکل‌دار و از نوع دیوپسید هستند. این بلورها به صورت دانه‌ای در زمینه‌ای گرانوبلاستیک و در محل اتصال با کانی‌های دیگر قرار دارند و به سمت توده بر اندازه بلورها افزوده می‌شود. در برخی نمونه‌ها دیوپسید بر اثر دگرگونی پس‌رونده به ترمولیت تبدیل شده است. کلینوپیروکسن‌ها دارای اندازه ریزبلور تا متوسط بلور هستند که معمولاً در حاشیه یا در داخل بلورهای گارنت قرار گرفته‌اند (شکل ۲-۲ و H). این بلورها در تعادل بافتی با کوارتز و گارنت در زمینه گرانوبلاستیک است.

وزوویانیت: بلورهای دانه‌ریز تا متوسط هستند. بلورهای وزوویانیت در مجاورت بلورهای کلسیت و کوارتز و گارنت قرار دارند. این بلورها معمولاً به صورت بی‌شکل و در زمینه گرانوبلاستیک است.

گارنت: بلورهای گارنت در این مجموعه کانی‌ها به صورت شکل‌دار تا بی‌شکل و دارای اندازه متغیر از درشت‌بلور تا متوسط

بلور هستند (شکل ۲-۲، E، F، G و H). گارنت از مرکز و حاشیه‌ها شروع به تغییر به اپیدوت کرده است (شکل ۲-۲، G). در بعضی قسمت‌ها این جانشینی به قدری پیشرفت کرده است که تمام بلور گارنت جانشین شده است. پورفایرولاست‌های گارنت با اندازه متوسط دارای بافت پوئی کیلوبلاستیک با مقادیر فراوان از اینکلوژن‌های کلینوپیروکسن و اپیدوت هستند (شکل ۲-۲ و H).

روش مطالعه

پس از بررسی دقیق منطقه تعدادی نمونه برداشت شد. نمونه‌برداری بر پایه گردآوری بهترین نمونه‌ها که نشان‌دهنده کل سنگ‌های مورد مطالعه است، انجام شد. پس از تهیه مقاطع نازک از نمونه‌های مناسب، با توجه به هدف مطالعه، سه نمونه از هورنفلس‌های کالک-سیلیکات منطقه همدان برای تجزیه شیمیایی عناصر اصلی انتخاب شد. در طی نمونه‌برداری سعی شده است که نمونه‌ها از بخش‌های تازه و غیرهوازده سنگ‌ها و گونه‌ای انتخاب شود که نشان‌دهنده تغییرات واقعی ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی آنها باشد. این نمونه‌ها، برای تجزیه به شرکت کانپزوه ارسال شد. عناصر اصلی به روش فلورسانس پرتو ایکس^۱ تجزیه شدند. علاوه بر این، در این پژوهش از داده‌های حاصل از شیمی کانی‌ها که در پژوهش قربانی و همکاران آمده، استفاده شده است (جدول ۲) (Ghorbani et al., 2016b).

شیمی سنگ کل

اکسیدهای اصلی تجزیه‌شده در سه نمونه از هورنفلس‌های کالک-سیلیکات در جدول ۱ آمده است. فراوان‌ترین اکسید در این نمونه‌ها SiO_2 است که به طور متوسط، حدود ۴۵/۰۴ آن را تشکیل می‌دهد. در مرتبه دوم CaO قرار دارد که مقدار آن از ۳۰/۶۵ تا ۲۷/۳۶ تغییر می‌کند. مقدار تشکیل‌دهنده‌های TiO_2 ، Na_2O ، K_2O ، MnO ، P_2O_5 بسیار کم است.

شیمی کانی

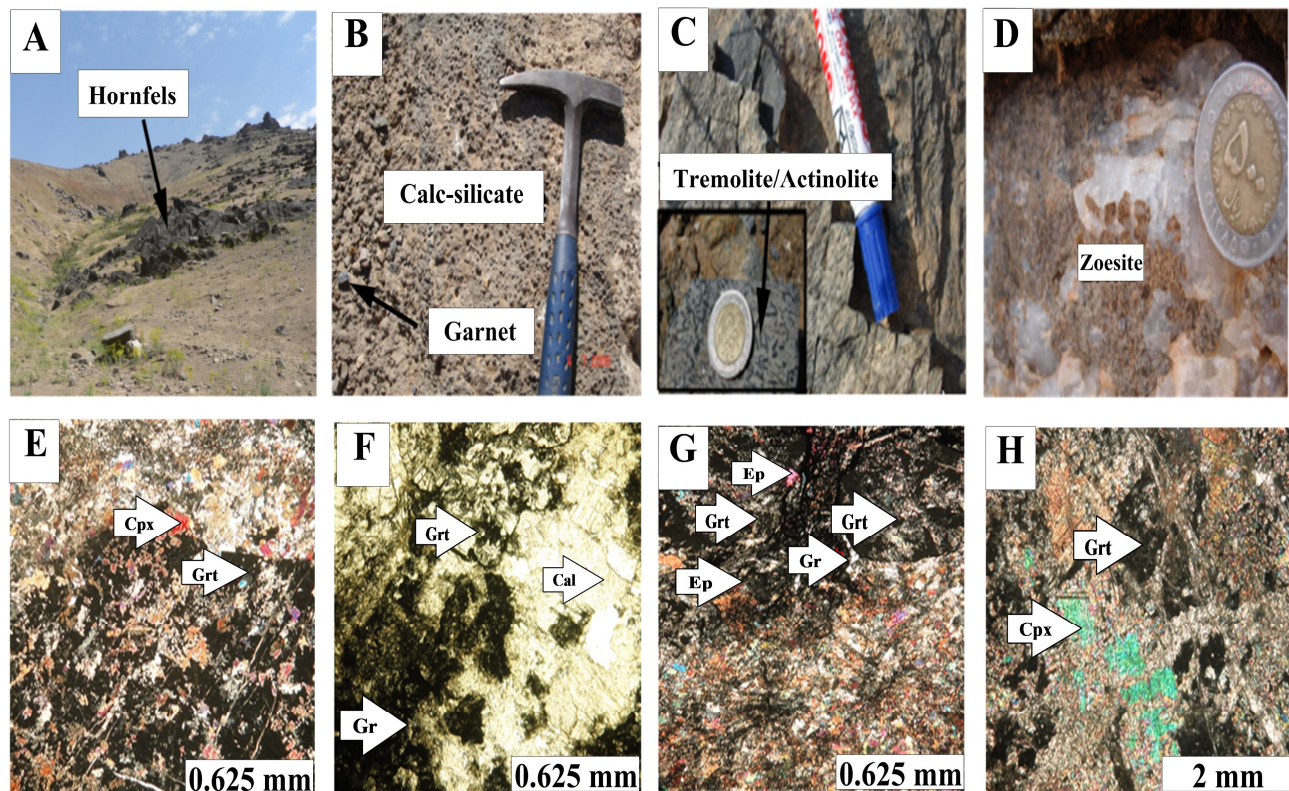
داده‌های مربوط به تجزیه شیمیایی کانی‌های گارنت و کلینوپیروکسن در جدول ۲ آمده است (Ghorbani et al., 2016b). بررسی‌های انجام‌شده در بلورهای گارنت نشان می‌دهد که تغییرات درصد وزنی اکسیدهای عناصر CaO، MgO، FeO و MnO از حاشیه به سمت مرکز کم است که این عدم تغییرات در طی رشد گارنت، نشان‌دهنده نبود منطقه‌بندی شیمیایی در بلور گارنت است (شکل ۳-A). تنها به مقدار جزئی

مقدار کلسیم از حاشیه به سمت مرکز کاهش می‌یابد. کاهش کلسیم آهسته بوده است. شکل ۳-B تغییرات ترکیبی گارنت‌ها را در محدوده گروسولار نشان می‌دهد. چنان‌که در این شکل مشاهده می‌شود، گارنت‌ها از اعضای نهایی پیروپ، آلماندین و اسپسارترین فقیر هستند. ترکیب کلینوپیروکسن‌ها در نمودار En-Wo-Fs نشان می‌دهد که بیشتر نقاط آنالیزشده در محدوده دیوپسید واقع می‌شوند (شکل ۳-C) (Ghorbani et al., 2016b).

جدول ۱. ترکیب شیمیایی سنگ کل هورنفلس‌های کالک-سیلیکات در منطقه همدان به همراه درصد مولی کاتیون‌های محاسبه‌شده در سیستم CMASH که ورودی برنامه تریاک-دومینو است.

Table 1. The chemical composition of the whole rock of the calc-silicate hornfelses in Hamadan region with the percentage of molar cations calculated in the CMASH system, which is the input of the theriak-domino program.

Sample	che1 Wt. %	che1 Molar cation %	che2 Wt. %	Che2 Molar cation %	che3 Wt. %	Che3 Molar cation %
SiO ₂	45.03	Si (37.226)	45.11	Si (36.728)	44.49	Si (36.55)
TiO ₂	0.27	-	0.28	-	0.29	-
Al ₂ O ₃	5.72	Al (5.56)	6.65	Al (6.366)	7.57	Al (7.233)
Fe ₂ O ₃	4.36	Fe (2.683)	4.66	Fe (2.84)	4.49	Fe (2.737)
MnO	0.20	-	0.24	-	0.21	-
MgO	3.81	Mg (4.67)	3.62	Mg (4.358)	3.71	Mg (4.496)
CaO	30.65	Ca (27.137)	28.26	Ca (24.63)	27.36	Ca (23.802)
Na ₂ O	0.02	-	0.01	-	0.02	-
K ₂ O	0.02	-	0.02	-	0.01	-
P ₂ O ₅	0.13	-	0.14	-	0.11	-
LOI	9.59	-	10.81	-	11.06	-
Total	99.81	-	99.81	-	99.83	-



شکل ۲. A: هورنفلس‌های دارای آندالوزیت و کوردیریت در اطراف باتولیت الوند، B: تجمعی از بلورهای گارنت در سنگ‌های کالک-سیلیکات، C: بلورهای درشت ترمولیت/اکتینولیت که به صورت لایه‌ای با ضخامت ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر در سطح سنگ‌های کالک-سیلیکات قرار گرفته است، D: بلورهای درشت زوئیزیت در رگه‌های کوارتزی که در سنگ‌های کالک-سیلیکات شکل گرفته است، E: تجزیه شدن تقریباً کامل بلور گارنت به پیروکسن، تشکیل بافت پوئیکلوبلاستیک (XPL)، F: بلورهای گارنت در مجاورت درشت‌بلورهای کلسیت که در این نمونه مقادیر زیادی گرافیت پیروکسن، تشکیل بافت پوئیکلوبلاستیک (XPL)، G: بلورهای درشت گارنت که در زمینه ریزدانه قرار گرفته‌اند و باعث تشکیل بافت پورفایروبلاستیک شده‌اند (XPL) و H: اینکلوزن‌های کلینوپیروکسن در درون بلور گارنت که باعث ایجاد بافت پوئیکلوبلاستیک شده است (XPL). Cpx: کلینوپیروکسن، Grt: گارنت، Ep: اپیدوت، Cal: کلسیت، Gr: گرافیت) علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است.

Fig. 2. A: Hornfels with andalusite and cordierite in the surrounding alvand batholith, B: Cumulative of garnet crystals in calc-silicate rocks, C: Tremolite/ actinolite crystals as layer with 15 to 20 cm thickness are located on the surface of calc- silicate rocks, D: Coarse crystals zoisite in the quartz layers is formed in the calc- silicate rocks, E: The crystalline garnet decomposition into pyroxene, the formation of Poiikiloblastic texture (XPL), F: The Garnet crystals adjacent to coarse calcite crystals, in which large amounts of graphite are found (PPL), G: The Garnet coarse grains within fine-grained groundmass making the porphyroblastic tissue form (XPL), and H: Clinopyroxene inclusions in the garnet crystal, which causes the Poiikiloblastic texture. (Cpx: clinopyroxene, Grt: garnet, Ep: epidote, Cal: calcite, Gr: Graphite) Abbreviations after Whitney and Evans (2010)

ترموکالک: محاسبات ترموکالک با انتخاب مقادیر فشار و دما در معادله ۱ انجام می‌شود. در این پژوهش از (1995 update)، THERMOCALC (version 2.4) استفاده شده است.

حرارت‌سنجی و فشارسنجی

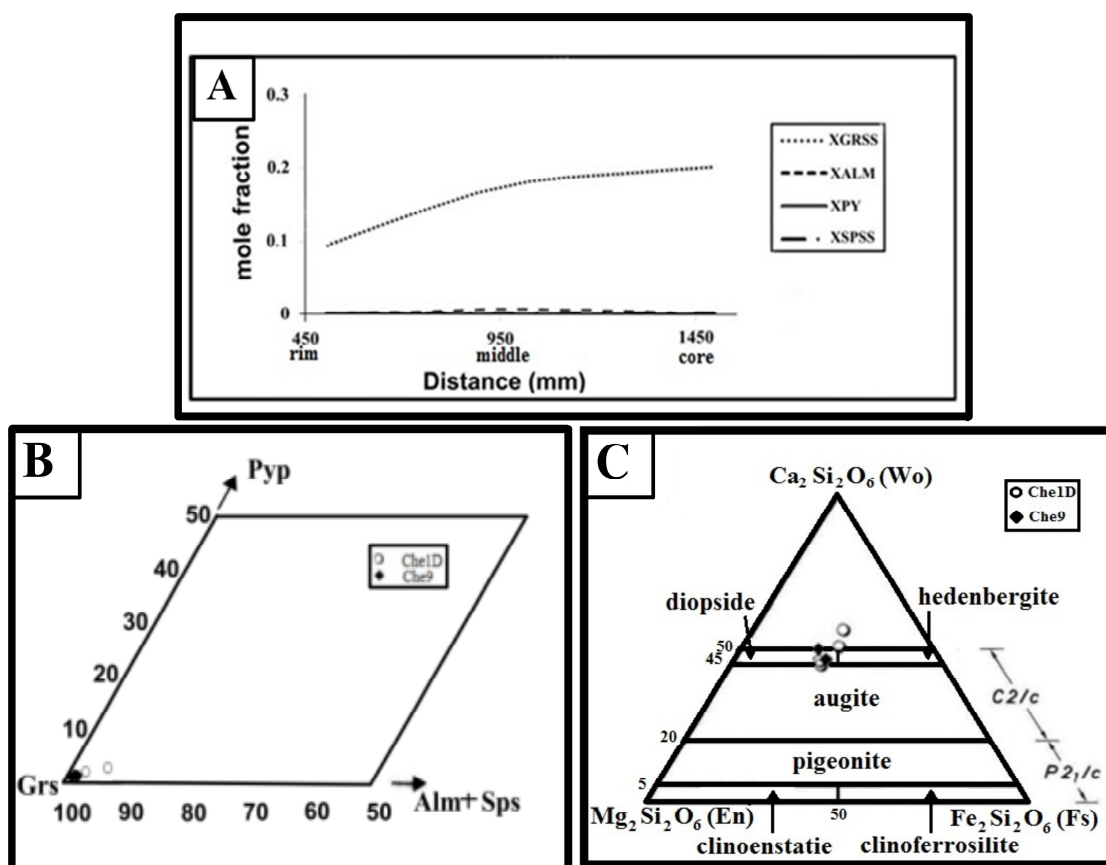
روش‌های حرارت و فشارسنجی که در این پژوهش از آن استفاده شده است، عبارتند از: استفاده از برنامه‌های ترموکالک و تریاک- دومینو که به طور جداگانه به بررسی هریک از این روش‌ها پرداخته شده است.

(۱)

$$0 = \Delta G^0_{(r)1,T} + (P-1)((\Delta V_s + \Delta(\alpha V)(T-298)) - \Delta(\beta V P/2) + n_i RT \ln f_i + RT \ln K$$

تریاک-دومینو: نرم افزار تریاک-دومینو شامل چندین برنامه برای محاسبات ترمودینامیکی و ترسیم شبه مقاطع است (De Capitani and Petrakakis, 2010). داده‌های ترمودینامیکی مورد استفاده در این برنامه از پاول و هلند (Powell and Holland, 1988) است. داده‌های ورودی در این برنامه باید

به صورت درصد مولی مورد استفاده قرار گیرد. نرم افزار تریاک-دومینو می‌تواند مدل سازی دقیقی از تحول مجموعه کانی‌ها در حین پیشرفت دگرگونی انجام دهد. همچنین این نرم افزار می‌تواند با دسترسی به مدل ترمودینامیکی مناسب، شامل مدل‌های محلول جامد، برای تمام فازها با میدان پایداری مشخصی در منطقه به تعیین شرایط P-T دست یابد. با استفاده از برنامه تریاک-دومینو (De Capitani and Petrakakis, 2010) مجموعه‌های پایدار کانی‌ها برای هر نقطه در یک نمودار P-T برای ترکیبات شیمی سنگ کل داده شده، محاسبه می‌شود.



شکل ۳. A: منطقه‌بندی شیمیایی برای بلور گارنت در سنگ‌های کالک-سیلیکات منطقه همدان، B: نمایش تغییرات ترکیبی گارنت در نمودارهای مثلثی Alm+Sps-Prp-Grس. مقدار اعضای نهایی آلماندین، اسپسارتین و پیروپ کم است؛ درحالی‌که مقدار عضو نهایی گروسولار بسیار زیاد است، و C: ترکیب کلینوپیروکسن‌های هورنفلس‌های کالک-سیلیکات در نمودار En-Wo-Fs (Ghorbani et al., 2016b)

Fig. 3. A: Zoning for crystalline garnet in calc-silicate rocks of Hamedan area, B: Displaying the combined garnet variations in triangular charts Alm + Sps-Prp-Grs. The amount of final members of the almandine, spessartine and pyrope is low, while the amount of the final members of the grossular is very high, and C: composition of the calc-silicate hornfelses clinopyroxenes in the En-Wo-Fs diagram (Ghorbani et al., 2016b)

جدول ۲. ترکیب شیمیایی و فرمول ساختمانی کلینوپیروکسن و گارنت در هورنفلس‌های کالک- سیلیکات منطقه همدان (Ghorbani et al., 2016b)

Table 2. Chemical composition and formulation of clinopyroxene and garnet in calc-silicate hornfels, Hamadan area (Ghorbani et al., 2016b)

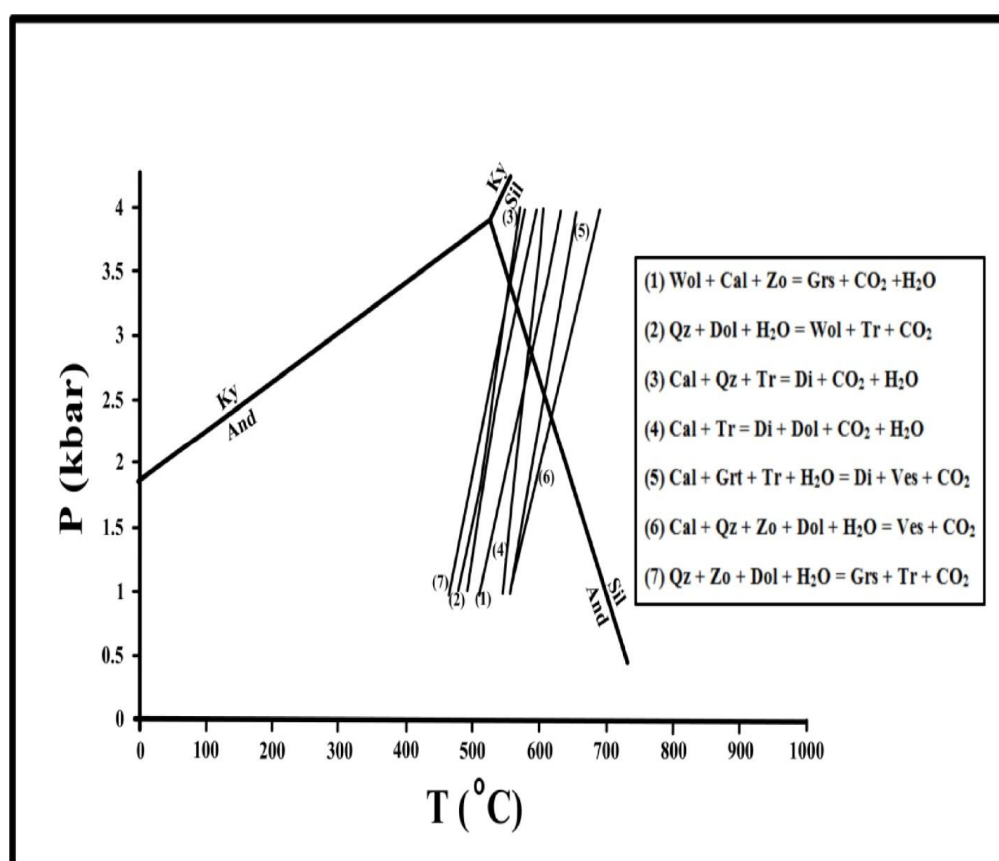
Sample	Cpx, che1D	Cpx, che1D	Cpx, che1D	Cpx, che1D	Cpx, che9	Cpx, che9	Grt1, che1D	Grt1, che1D	Grt1, che1D	Grt2, Che9	Grt3, Che9	Grt4, Che9
SiO ₂	55.11	52.36	53.84	55.30	53.63	55.16	40.5	40.25	40.33	41.36	41.04	41.27
TiO ₂	0.08	0.08	0.10	0.10	0.00	0.11	1.17	0.3	0	0	0.45	0
Al ₂ O ₃	0.50	0.30	0.40	0.79	0.20	0.10	20.67	19.17	17.35	21.33	20.91	20.53
FeO	9.08	12.58	10.59	8.11	10.30	9.46	2.63	0.8	3.03	2.71	2.8	3.14
MnO	0.62	0.00	0.64	0.00	0.00	0.00	0	0.9	1.36	0	0	0
MgO	11.99	7.50	9.00	12.04	11.05	11.30	0.2	0.4	0.73	0	0	0
CaO	22.59	27.16	25.00	23.62	24.82	23.87	34.83	37.89	36.85	34.6	34.8	35.06
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0	0
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0	0
Cr ₂ O ₃	0.03	0.02	0.07	0.04	0.00	0.00	0	0.29	0.35	0	0	0
Formul a	6(O)	6(O)	6(O)	6(O)	6(O)	6(O)	24(O)	24(O)	24(O)	24(O)	24(O)	24(O)
En	0.327	0.213	0.251	0.324	0.307	0.305						
Fs	0.230	0.232	0.247	0.219	0.197	0.232						
Wo	0.443	0.555	0.502	0.457	0.496	0.463						
Jd	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000						
Ac	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000						
Aug	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000						
Al ^{iv}							0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al ^{vi}							3.675	3.436	3.146	3.777	3.712	3.652
Alm(%)							5.4	0.0	0.0	5.8	5.9	5.5
Prp(%)							0.7	1.4	2.6	0.0	0.0	0.0
Sps(%)							0.0	1.8	2.8	0.0	0.0	0.0
sum							100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Grs(%)							96.4	95.3	87.9	100.0	98.6	98.3
Adr(%)							3.6	3.8	10.9	0.0	1.4	1.7
Uva(%)							0.0	1.0	1.2	0.0	0.0	0.0
Total							100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

(En: Enstatite), (Fs: Ferrosilite), (Wo: Wollastonite), (Jd: Jadeite), (Ac: Acmite), (Aug: Augite), (Al^{iv}: Tetrahedral Aluminum), (Al^{vi}: Octahedral Aluminum), (Alm: Almandine), (Prp: Pyrope), (Sps: Spessartine), (Grs: Grossular), (Adr: Andradite), (Uva: Uvarovite)

تخمین شرایط دما و فشار و منطقه‌بندی شیمیایی گارنت و کلینوپیروکسن

برای تعیین دما و فشار دگرگونی، با توجه به تعادل بافتی بین گارنت و کلینوپیروکسن، واکنش‌های تبادلی کلسیم و منیزیم بین گارنت و کلینوپیروکسن استفاده شده است. همیافت سنگ به صورت $\text{Cal} + \text{Qz} + \text{Tr} + \text{Ep} + \text{Di} + \text{Wol} + \text{Dol} + \text{Ves} + \text{Grt}$ دارای بالاترین تعداد کانی‌های دگرگونی در حالت تعادل کانی‌شناسی است. با فرض اینکه تمام کانی‌های محلول

جامد به صورت اعضای نهایی خالص باشند و با فرض اکتیویته واحد برای فازهای محلول جامد (مانند دیوپسید و گارنت) و فازهای خالص (مانند کوارتز)، واکنش‌های تعادلی در فشار ۳/۳ کیلو بار توسط ترموکالک محاسبه و بر روی نمودارهای P-T رسم شد (شکل ۴). بدین ترتیب دمای محاسبه‌شده برای مجموعه کانی‌های گارنت‌دار و کلینوپیروکسن‌دار، حدود ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد محاسبه‌شده و فشار محاسبه‌شده نیز ۲/۵ تا ۳/۵ کیلو بار بوده است (شکل ۴).

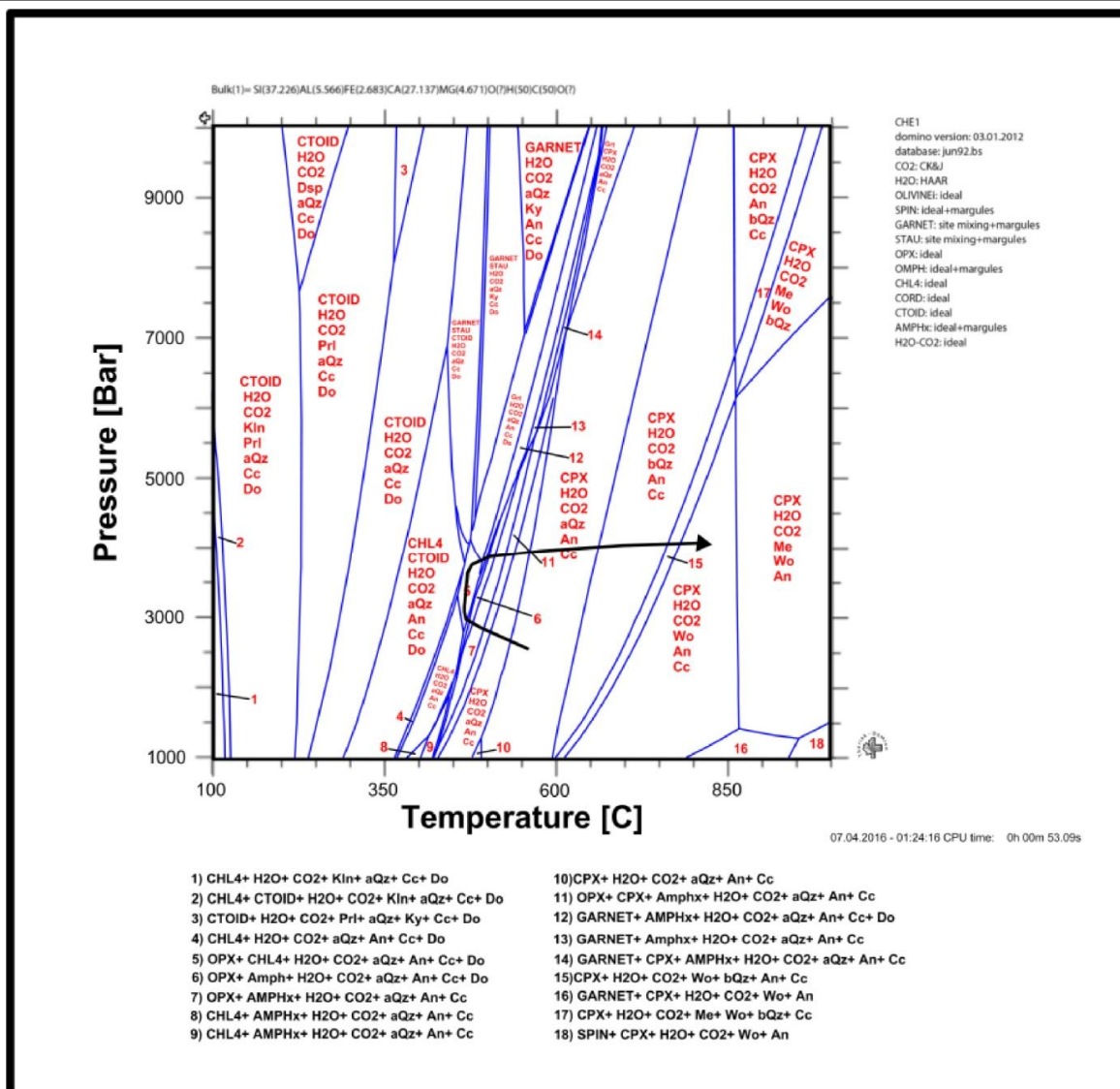


شکل ۴. تخمین فشار و دمای هاله دگرگونی الوند با استفاده از مجموعه‌ای از واکنش‌های دگرگونی (ترموکالک). فشار دگرگونی هاله از ۲/۵ تا ۳/۵ و دما از ۵۰۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد است.

Fig. 4. Estimation of the pressure and temperature of the Alvand metamorphic aureole using by a set of metamorphic reactions (thermocalc). The pressure of the alvand metamorphic aureole is 2.5 kb to 3.5 kb and the temperature is from 500°C to 550°C.

CMASH در هورنفلس‌های کالک-سیلیکات منطقه همدان را نشان می‌دهد.

شکل ۵، شبه‌مقاطع محاسبه‌شده با استفاده از برنامه تریاک-دومینو در سنگ‌های مورد بررسی و مجموعه کانی‌های سیستم



شکل ۵. شبه مقاطع محاسبه شده برای نمونه‌ای از سنگ‌های کالک- سیلیکات منطقه همدان با استفاده از برنامه تریاک- دومینو. پیکان مشکی چگونگی تغییر دما- فشار این سنگ‌ها را نشان می‌دهد. اعداد بالای شکل برای عناصر، نسبت مولی آنهاست که با استفاده از درصد اکسیدها محاسبه شده است. تقریباً تمام گستره‌ها دارای کوارتز و کلسیت هستند.

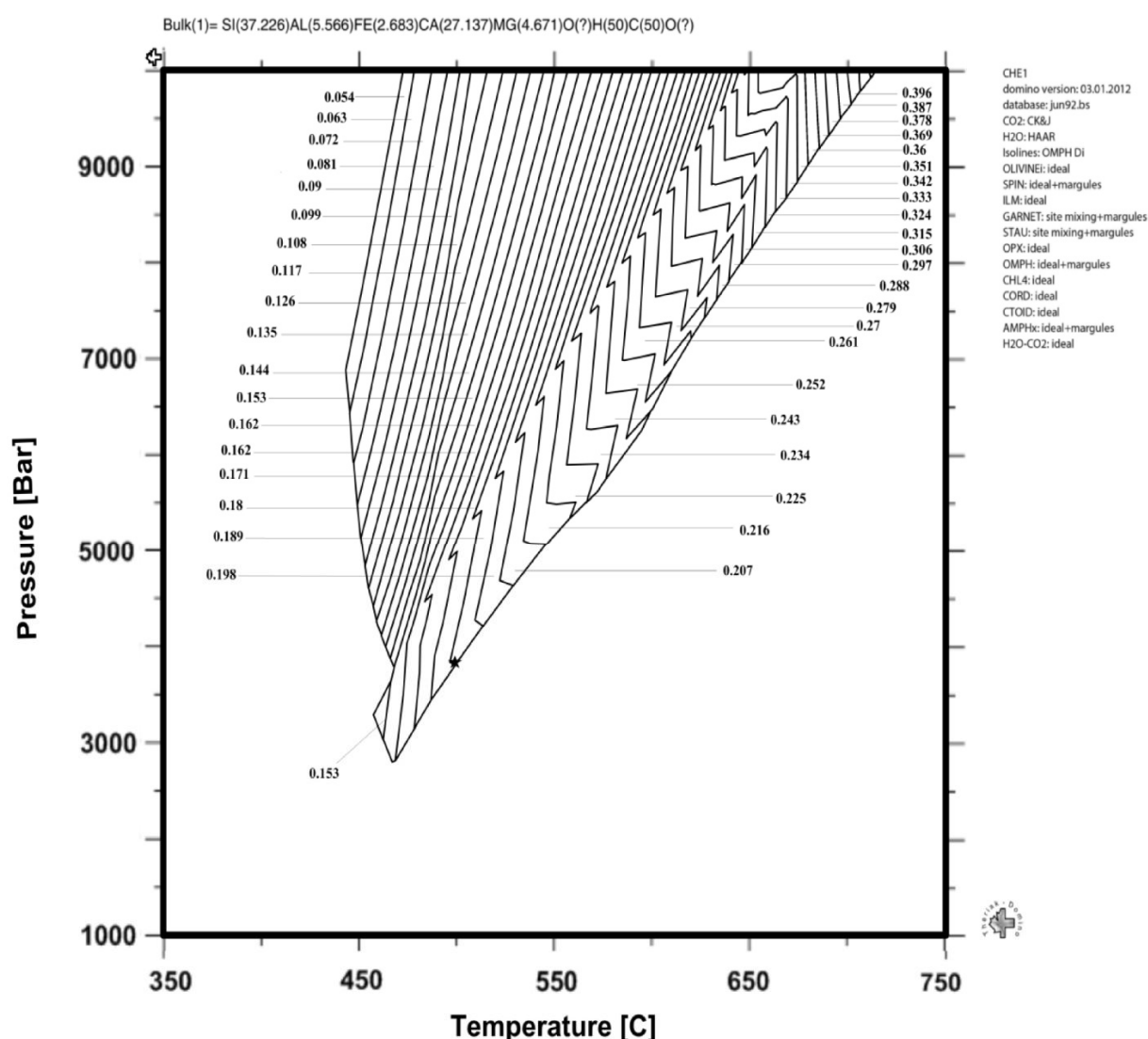
Fig. 5. Calculated pseudo-section for a sample of calc-silicate hornfelses of Hamedan area by using theriak-domino program. The black arrow shows how to change the temperature-pressure of these rocks. The high numbers for the elements are their molar ratio, which is calculated by using the percentage of oxides. Almost all the compartments contain quartz and calcite.

ترمولیت-اکتینولیت در سنگ‌های مورد بررسی، شروع دگرگونی از گستره پایداری ترمولیت/ اکتینولیت، زوئیزیت، کلسیت و کوارتز بوده است. این ویژگی‌ها مسیر دمایی و فشاری را روی نمودار شکل ۵ مشخص می‌کنند که با پیکان نشان داده شده است. مسیر دما- فشار مشخص شده، خیلی نزدیک به مسیر

محدوده‌های پایداری کانی‌های سیستم CMASH با توجه به مجموعه کانی‌های مشاهده شده در سنگ‌های مورد بررسی در شکل ۵ با یک پیکان مشکی به هم وصل شده‌اند. بدین ترتیب، مسیر دمایی و فشاری تجزیه شده به وسیله سنگ‌های کالک- سیلیکات منطقه همدان به دست می‌آید. با توجه به وجود

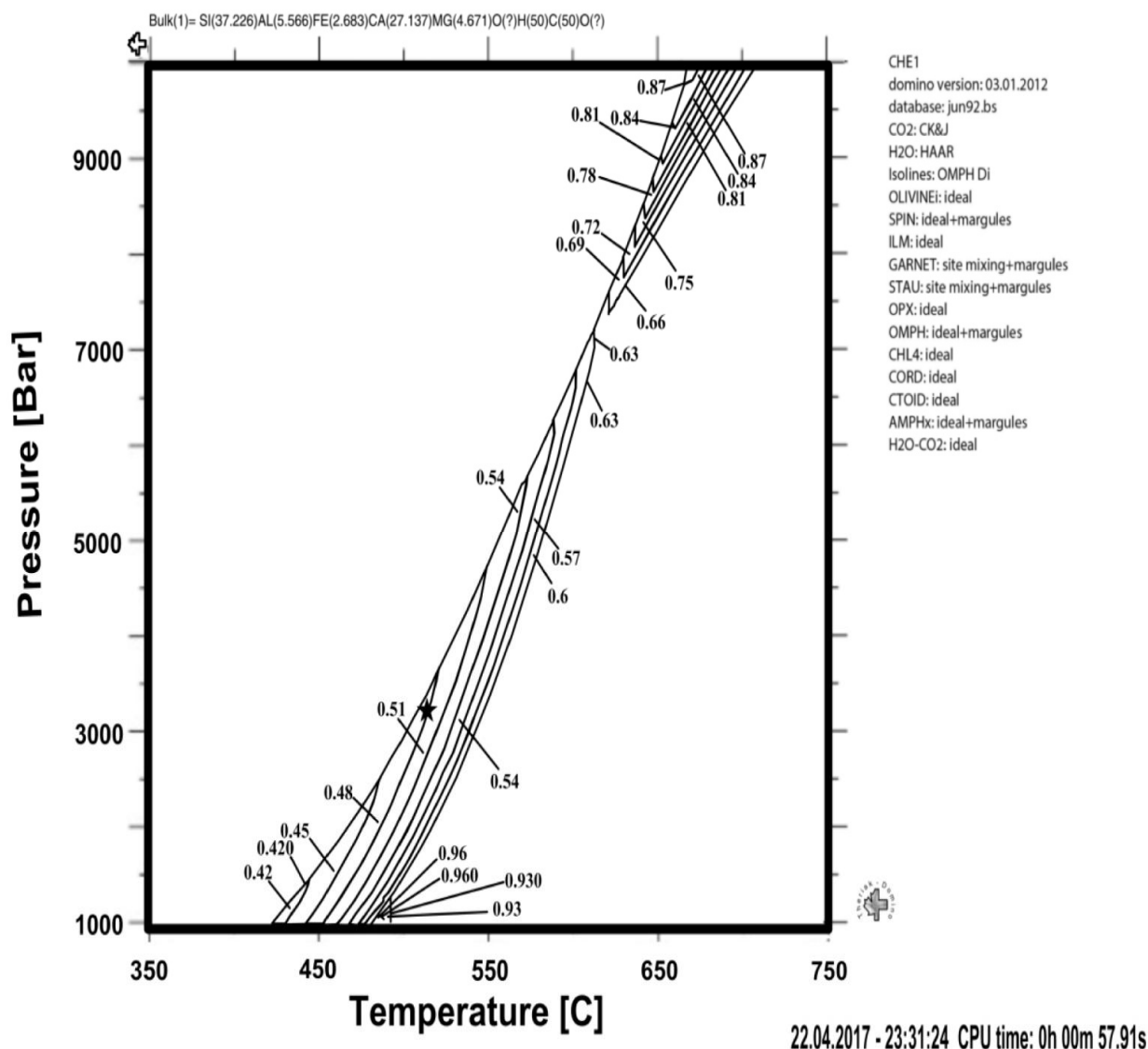
بررسی‌های ترموکالک، دما و فشار را برای نمونه مورد بررسی مشخص‌تر نشان می‌دهد. برای بررسی دقیق‌تر منطقه‌بندی در گارنت‌های موجود در سنگ‌های کالک-سیلیکات منطقه همدان نیز از محاسبات شبه‌مقاطع استفاده شده است. با توجه به تبادل کاتیونی برای آهن و منیزیم بین گارنت و دیوپسید، منطقه‌بندی شیمیایی این دو کانی در کنار هم بررسی شده‌اند (شکل‌های ۶ و ۷).

مشخص‌شده در نموداری است که به وسیله ترموکالک ترسیم شده است. اعداد بالای شکل برای عناصر مختلف، درصد مولی آنها در نمونه سنگ‌های کالک-سیلیکات منطقه همدان را نشان می‌دهند. فشار و دمای محاسبه شده توسط تریاک-دومینو به ترتیب از ۲/۵ تا ۳/۵ کیلو بار و ۵۰۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد است. در این پژوهش، نتایج به دست آمده از محاسبه دما و فشار با استفاده از روش شبه‌مقاطع، ضمن تأیید نتایج حاصل از



شکل ۶. منطقه‌بندی شیمیایی برای گارنت در سنگ‌های کالک-سیلیکات در منطقه همدان که با تریاک-دومینو محاسبه شده است. اعداد در شکل کسر مولی کلسیم در گارنت را نشان می‌دهند. علامت ستاره، دما و فشار دگرگونی را نشان می‌دهد.

Fig. 6. Zoning for garnet in calc-silicate rocks in Hamedan area, calculated with theriak-domino. The numbers in the form represent the calcium molar fraction in the garnet. The sign of the star indicates the temperature and pressure.



شکل ۷. منطقه‌بندی شیمیایی برای بلورهای کلینوپروکسن در سنگ‌های کالک-سیلیکات منطقه همدان که به‌وسیله تریاک-دومینو محاسبه شده است. اعداد در شکل کسر مولی کلسیم در کلینوپروکسن نشان داده شده است. علامت ستاره، دما و فشار دگرگونی را نشان می‌دهد.

Fig. 7. Zoning for clinopyroxene crystals in calc-silicate rocks of Hamedan area, which is calculated by theriak-domino. The numbers in the form of the fraction of calcium molar in clinopyroxene are shown. The star indicates the temperature and pressure.

کلسیم در گارنت و مقدار کلسیم و منیزیم در دیوپسید را نشان می‌دهند. به عبارت دیگر، گارنت و دیوپسید با این ترکیب در سنگ با شیمی کل مشخص شده (در بالای شکل به صورت مقادیر مولی عناصر) در فشار تقریبی ۳/۵ کیلو بار و دمای حدود ۵۲۰ درجه سانتی گراد به تعادل می‌رسد.

شکل‌های ۶ و ۷، منحنی‌های مقدار کلسیم در گارنت (کسر مولی کلسیم در گارنت یا X_{Ca}) و مقدار کلسیم و منیزیم در دیوپسید (کسر مولی کلسیم و منیزیم در دیوپسید یا X_{Ca} , X_{Mg}) را نشان می‌دهند. این مقادیر با تغییرات دما و فشار برای این کانی‌ها در چند نمونه از سنگ‌های دگرگونی منطقه همدان به نمایش درآمده‌اند. ستاره‌های نشان‌داده شده روی شکل‌ها، مقدار

نتیجه‌گیری

هورنفلس‌های کالک-سیلیکات منطقه همدان در نتیجه نفوذ باتولیت‌الوند در منطقه تشکیل شده‌اند. در نتیجه دگرگونی مجاورتی در سنگ‌های مورد بررسی، واکنش‌های متعددی بین مجموعه کانی‌ها صورت گرفته است. این بررسی، بر اساس مقایسه فازهای پایدار مجموعه کانی‌های مشخص شده برای شیمی سنگ کل ثابت در نمونه‌های هورنفلس‌های کالک-سیلیکات انجام شده است. علاوه بر این، سعی شد تا با استفاده از برنامه‌های رایانه‌ای مختلف به مدل‌سازی‌های ترمودینامیکی و دما-فشارسنجی در هورنفلس‌های کالک-سیلیکات با به کارگیری شیمی سنگ کل و مجموعه کانی‌های موجود در این سنگ‌ها پرداخته شود. پژوهش انجام شده با استفاده از برنامه‌های رایانه‌ای ترموکالک و تریاک-دومینو و بانک اطلاعات

ترمودینامیکی اعضای نهایی انجام شد که شرایط دمایی-فشاری تشکیل این سنگ‌ها را در منطقه بازسازی کرد. مقایسه نتایج حاصل از دو نرم‌افزار تریاک-دومینو و ترموکالک بر روی سنگ‌های کالک-سیلیکات منطقه همدان نشان می‌دهد که کیفیت نتایج صرفاً به کیفیت داده‌های ترمودینامیکی بستگی دارد. مدل‌سازی انجام شده با استفاده از دو نرم‌افزار برای سنگ‌های کالک-سیلیکات منطقه مورد بررسی، ضمن تأیید یکدیگر دما را حدود ۵۰۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار را حدود ۲/۵ تا ۳/۵ کیلو بار را نشان داد. علاوه بر این، در مطالعات سعی شد تا به بررسی منطقه‌بندی گارنت و کلینوپروکسن که نشان‌دهنده منطقه‌بندی هرچند جزئی این دو کانی در طی دگرگونی مجاورتی است، پرداخته شود.

References

- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its pro foreland evolution. *American Journal of Science*, 304(1): 1–20.
- Ahmadi Khalaji, A. and Tahmasbi, Z., 2016. Mineral chemistry of garnet in pegmatite and metamorphic rocks in the Hamedan area. *Journal of Economic Geology*, 7(2): 243–258. (in Persian with English abstract)
- Baharifar, A., 2004. Petrology of metamorphic rocks in Hamedan region. Ph.D. thesis, Tarbiat Moallem University of Tehran, Tehran, Iran, 174 pp. (in Persian with English abstract)
- De Capitani, C. and Petrakakis, K., 2010. The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software. *American Mineralogist*, 95(7): 1006–1016.
- Eghlimi, B., 2000. Geological map of Hamadan, scale 1: 100000. Geological Survey and Mineral Exploration. (in Persian)
- Ghorbani, H., Moazzen, M. and Saki, A., 2016a. Investigate the retrograde metamorphism in calc- silicate rocks within the Alvand thermal aureole. *Iranian Journal of Geology*, 10(40): 33–43. (in Persian with English abstract)
- Ghorbani, H., Moazzen, M. and Saki, A., 2016b. Investigate the Mineral Chemistry and P-T Estimation of Formation of Diopside, Garnet and Coexisting Minerals in the Calc- silicate Hornfels from the Alvand Metamorphic Aureole, Hamadan, West of Iran. *Journal of Earth Science*, 26(101): 139–146. (in Persian with English abstract)
- Haghighi Bardineh, S.N., Zarei Sahamieh, R., Zamanian, H. and Ahmadi Khalaji, A., 2019. Petrology, geochemistry and tectonic setting studies in magmatic complex generating the Takht Fe-skarn deposit, NW Hamedan. *Journal of Economic Geology*, 10(2): 497–535. (in Persian with English abstract)
- Hensen, B.J., 1971. Theoretical phase relations involving cordierite and garnet in the system MgO-FeO- Al₂O₃-SiO₂. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 33(3): 191–214.
- Hoschek, G., 2004. Comparison of calculated P-T pseudosections for a kyanite eclogite from the Tauern Window, Eastern Alps, Austria. *European Journal of Mineralogy*, 16(1): 59–72.
- Kerrick, D.M., 1991. Contact metamorphism. *Mineralogical Society of America, United States*, 672 pp.

- Maanijou, M., Vafaei Zad, M. and Aliani, F., 2016. Fluid inclusion and sulfur stable isotope evidence for the origin of the Ahangran Pb-Ag deposit. *Journal of Economic Geology*, 7(2): 17–18. (in Persian with English abstract)
- Moazzen, M. and Oberhänsli, R., 2009. Whole rock and relict igneous clinopyroxene geochemistry of ophiolite-related amphibolites from NW Iran-Implication for protolith nature. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen. Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 185(1): 51–62.
- Moazzen, M., Torabi Asl, S. and Omrani, H., 2015. Temperature and pressure of metamorphism, phase stability and chemical zoning in garnet and biotite of metamorphic rocks of Jandag region using quasi-sectional method. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 23(4): 651–660. (in Persian with English abstract)
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L. and Sahandi, M.R., 2003. Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj- Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(1): 397–412.
- Omrani, H., Moazzen, M., Oberhänsli, R., Tsujimori, T., Bousquet, R. and Moayyed, M., 2013. Metamorphic history of glaucophane-paragonite-zoisite eclogites from the Shanderman area, northern Iran. *Journal of Metamorphic Geology*, 31(8): 791–812.
- Powell, R. and Holland, T.J.B., 1988. An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations. III. Application methods, worked examples and a computer program. *Journal of Metamorphic Geology*, 6(2): 173–204.
- Sadeghian, M., 1994. Petrology study of igneous rocks and metamorphic changes in Cheshmeh Ghasaban Hamadan region. M.Sc. thesis, Tehran University, Tehran, Iran, 268 pp. (in Persian with English abstract)
- Saki, A. and Pourkaseb, H., 2012. Physicochemical conditions of skarn formation in contact of the Alvand batholith with the meta-calcareous rocks, Hamedan, western Iran. *Journal of Economic Geology*, 4(1): 123–134. (in Persian with English abstract)
- Sarabi, F., 1973. Optical mineralogy. Publication and printing of Tehran University, Tehran, 453 pp.
- Sepahi, A.A., Whitney, D.L. and Baharifar, A.A., 2004. Petrogenesis of And-Ky-Sil veins and host rocks, Sanandaj- Sirjan metamorphic belt, Hamadan, Iran. *Journal of Metamorphic Geology*, 22(2): 119–134.
- Spear, F.S., 1993. Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths. Monograph. Mineralogical Society of America, Washington, 799 pp.
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran, a review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52(7): 1229–1258.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviation for names of rock-forming. Minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.



Comparison of the Thermometry-Barometry methods by using Thermocalc and Theriak-domino to study Calc-silicate Hornfelses in Cheshin, Hamedan

Haleh Ghorbani^{1*}, Mohsen Moazzen¹ and Adel Saki²

1) Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2) Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Submitted: July 11, 2017

Accepted: Feb. 04, 2018

Keywords: *Calc-silicate hornfelses, Pseudosection, Temperature and Pressure, Thermocalc, Theriak-domino, Hamadan*

Introduction

The pseudo-section method, first proposed by Hensen (1971), is used today by scientists to determine the thermodynamic conditions of mineral crystallization and modeling in metamorphic lithology (Hoschek, 2004; Omrani et al., 2013). The principle of this method is based on the fact that in order to have a complete chemistry of a rock sample with certain minerals in equilibrium, only one equilibrium pressure and temperature can be considered. However, the whole rock chemistry is fixed, mineral changes show some changes in temperature and pressure and new thermodynamic conditions. The superiority of using the pseudo-section method of temperature and pressure calculation is knowing the composition of minerals (microprobe data). By knowing the whole chemistry of the rock and the type of minerals found in the rock, the range of temperature and the pressure of rock formation can be determined. However, possession of mineral chemistry data and microprobe data can help us in more advanced computing and modeling. Accessing the whole rock's chemistry data is easier and calculating the temperature and pressure by pseudo-section methods has high capabilities (Moazzen et al., 2015). This paper investigates the results of this method for calc-silicate hornfelses of the Cheshne area of Hamedan. In this study, the theriak-domino program and the thermodynamic data database of minerals (Powell and Holland, 1988) have been used. In this research study, we tried to determine

the temperature and the pressure for the studied rocks by using the two software: Thermocalc and Theriak-domino. Furthermore, the zoning of garnet and clinopyroxene have been studied by the pseudo-section method.

Materials and methods

After a careful examination of the area, a number of samples were taken. Sampling was done based on the collection of the best samples that represent the whole of the studied rocks. After the preparation of thin sections of suitable samples, according to the objective of the study, three samples of calc-silicate hornfels of Hamedan area were selected for chemical decomposition of the main elements. During the sampling, samples were taken from fresh and non-rough sections of the rock and were selected such as to represent the actual changes in their chemical composition and mineralogy. These samples were sent to Kanpajoh for analysis. The main elements were analyzed by the X-ray fluorescence (XRF) method. In addition, it should be noted that the data from chemical minerals, which was presented in the article by Ghorbani et al. (2016)⁺, was used in this study (Ghorbani et al., 2016).

Results

The major oxidative disintegrations in three samples of calc-silicate hornfelses show that the most abundant oxide in these samples is SiO₂, which averages about 45.04. Decreasing calcium in the Grossular garnets can indicate a decrease in

*Corresponding authors Email: haleh_ghorbani@tabrizu.ac.ir

pressure. In fact, by describing the garnet in calc-silicate rocks in the Hamedan area, a prograde metamorphism has been created that has reduced the amount of this element after decreasing the temperature and pressure due to the retrograde metamorphism and the uplift and removal of pressure of the upper floors and the influence of the fluids. The combined variations of the garnets are in the Grossular range. The Garnets are the ultimate members of the Pyrope, the Almandine and the Spessartine poor (Ghorbani et al., 2016). The combination of clinopyroxenes in the En-Wo-Fs graph shows that most of the analyzed points are located within the diopside (Ghorbani et al., 2016).

Discussion

We supposed that all solid solution minerals were pure final members, and unit activity for solid solution phases (such as diopside and garnet) and pure phases (such as quartz). Then, the equilibrium reactions at 3.3 kb pressure were calculated by the Thermocalc software and plotted on P-T charts. The calculated temperature for the garnet and clinopyroxene minerals was calculated to be about 550 ° C and the calculated pressure was 2.5 to 3.5 kb. In this paper, using the whole rock chemistry and minerals chemistry, the method of calculating the temperature and pressure was applied to the pseudo-section method. For this purpose, the percentage of the main oxides was calculated as the molar percentage of the elements, then molar percentage of the elements was used as input for the Theriak-domino program. The pressure and temperature calculated by the Theriak-domino software package are from 2.5 to 3.5 kb and 500 to 550 degrees C, respectively.

References

- Ghorbani, H., Moazzen, M. and Saki, A., 2016. Investigate the Mineral Chemistry and P-T Estimation of Formation of Diopside, Garnet and Coexisting Minerals in the Calc-silicate Hornfelses from the Alvand Metamorphic Aureole, Hamadan, West of Iran. *Journal of Earth Science*, 26(101): 139–146. (in Persian with English abstract)
- Hensen, B.J., 1971. Theoretical phase relations involving cordierite and garnet in the system MgO-FeO- Al₂O₃-SiO₂. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 33(3): 191–214.
- Hoschek, G., 2004. Comparison of calculated P-T pseudosections for a kyanite eclogite from the Tauern Window, Eastern Alps, Austria. *European Journal of Mineralogy*, 16(1): 59–72.
- Moazzen, M., Torabi Asl, S. and Omrani, H., 2015. Temperature and pressure of metamorphism, phase stability and chemical zoning in garnet and biotite of metamorphic rocks of Jandag region using quasi-sectional method. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 23(4): 651–660. (in Persian with English abstract)
- Omrani, H., Moazzen, M., Oberhänsli, R., Tsujimori, T., Bousquet, R. and Moayyed, M., 2013. Metamorphic history of glaucophane-paragonite-zoisite eclogites from the Shanderman area, northern Iran. *Journal of Metamorphic Geology*, 31(8): 791–812.
- Powell, R. and Holland, T.J.B., 1988. An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations. III. Application methods, worked examples and a computer program. *Journal of Metamorphic Geology*, 6(2): 173–204.