

بررسی شیمی کانی ها و برآورد دما و فشار دگرگونی گارنت آمفیبولیت های منطقه ی همدان

فرهاد آلیانی، میرمحمد میری*، علی اصغر سپاهی، محمد معانی جو

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

(دریافت مقاله: ۹۵/۳/۱۸، نسخه نهایی: ۹۵/۷/۳)

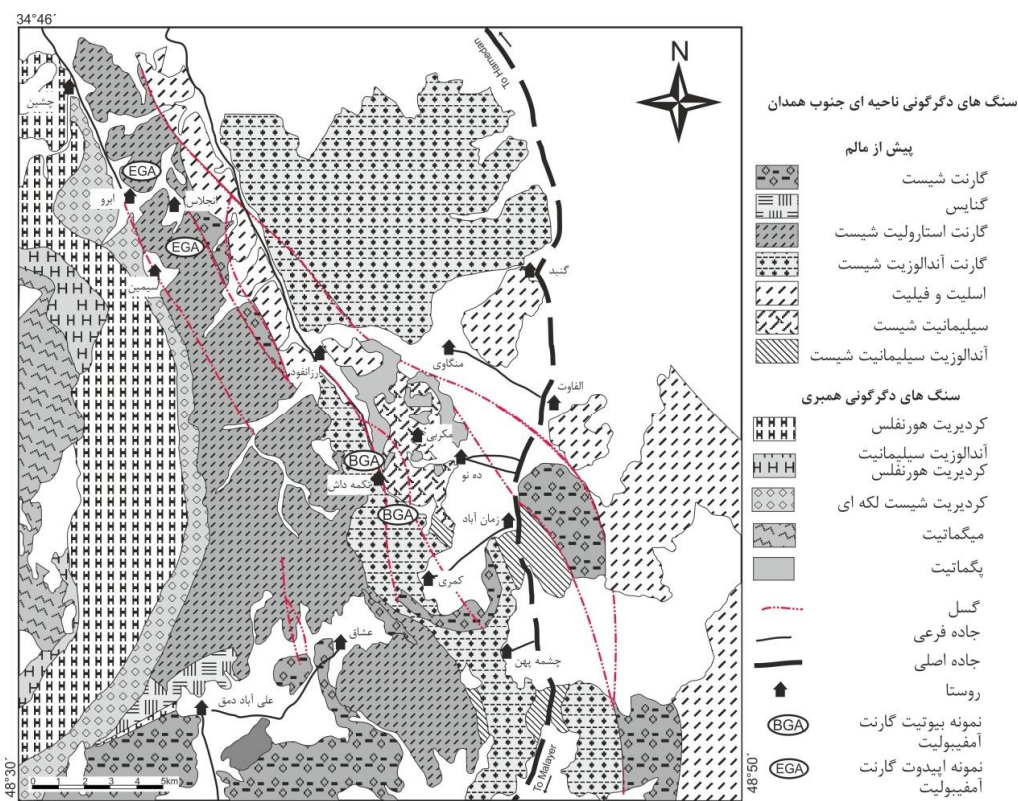
چکیده: گارنت آمفیبولیت بخشی از سنگ های دگرگون ناحیه ای منطقه ی همدان (پهنه ی سنندج- سیرجان) را تشکیل می دهد. این بررسی نخستین گزارش از ترکیب شیمیایی کانی ها و مقادیر دما و فشار دگرگونی گارنت آمفیبولیت های همدان است. بر اساس محتوای کانی شناسی، این گارنت آمفیبولیت ها را می توان به دو گروه اپیدوت گارنت آمفیبولیت و بیوتیت گارنت آمفیبولیت رده بندی کرد. نتایج آنالیز ریزکاو الکترونی نشان می دهد که این سنگ ها محتوای منیزیم و هورنبلند، آندزین و بیوتیت سیدروفیلیتی بوده و گارنت های هر دو نمونه دارای منطقه بندی شیمیایی با افزایش آلماندین و پیروپ به سمت حاشیه هستند. بر اساس بررسی های دما و فشارسنجی، این نمونه ها در حد رخساره ی آمفیبولیت پائینی تا میانی دگرگون شده اند اما نمونه های بیوتیت دار درجات بالاتری را تحمل کرده اند که با مجموعه های کانیایی این سنگ ها سازگاری مناسبی دارد. اگرچه با توجه به تفاوت اندک بین مقادیر به دست آمده می بایستی عامل اختلاف در ترکیب سنگ مادر این نمونه ها را نیز در تعیین مجموعه ی نهایی کانیایی آن ها دخیل دانست. داده های آنالیز سنگ کل به همراه مجموعه های کانیایی نشان می دهند که هردوی این نمونه ها از نوع پارامفیبولیت هستند و تفاوت اصلی آن ها در مقدار بالای پتاسیم نمونه های بیوتیت دار است که می توان آنرا به ناخالصی سنگ مادر آن ها نسبت داد. به طور کلی نتایج دما و فشارسنجی با رخداد دگرگونی دمای بالا- فشار پائین (سری آندالوزیت سیلیمانیت) که سرشتی پهنه سنندج- سیرجان است، سازگاری دارد.

واژه های کلیدی: گارنت آمفیبولیت؛ پارامفیبولیت؛ دما - فشارسنجی؛ سنندج- سیرجان؛ همدان.

مقدمه

آندالوزیت سیلیمانیت شیست، آندالوزیت گارنت شیست و اسلیت و فیلیت (شکل ۱). بخشی از این سنگ ها، پس از شکل گیری، تحت تاثیر دگرگونی مجاورتی حاصل از نفوذ توده ی گرانیوتوئیدی الوند نیز قرار گرفته اند و به کردیریت هورنفلس، آندالوزیت سیلیمانیت هورنفلس و میگماتیت های با فشار پائین تبدیل شده اند [۱]. علاوه بر سنگ های دگرگونی ناحیه ای یاد شده در بالا، لایه هایی از گارنت آمفیبولیت نیز به صورت میان لایه ای بین گارنت استارولیت شیست ها و آندالوزیت گارنت شیست های منطقه برونزد دارند (شکل ۲ الف). لایه های گارنت آمفیبولیت ضخامت اندکی داشته (معمولاً کمتر از ۱ متر) و بیرون زدگی های آن ها پیوسته نیست، از این رو

در جنوب منطقه ی همدان، مجموعه ای از سنگ های دگرگون ناحیه ای شامل سنگ های دگرگونی با درجه ی پائین (میکا شیست) تا درجه ی بالا (گنیس) رخنمون دارند که جزء پهنه ی دگرگونی سنندج- سیرجان به حساب می آیند. منطقه ی همدان تاریخچه ی دگرگونی پیچیده ای داشته و در اثر چندین رخداد دگرگونی ناحیه ای و مجاورتی، تحت تاثیر قرار گرفته است که موجب شکل گیری انواع مختلفی از سنگ های دگرگونی در این منطقه شده است [۱-۳]. به طور کلی، سنگ های دگرگونی منطقه ی همدان عبارتند از میکاشیست، استارولیت شیست، گارنت استارولیت شیست، گارنت شیست، سیلیمانیت شیست،



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی ساده شده‌ی منطقه‌ی مورد بررسی (برگرفته از [۸]) با تاکید بر سنگ‌های دگرگونی. مکان‌های نمونه برداری، نمونه‌های بیوتیت گارنت آمفیبولیت و اپیدوت گارنت آمفیبولیت نیز مشخص شده‌اند.

شده برای این نوع از سنگ‌ها، برآوردی از دما و فشار دگرگونی آن‌ها به‌دست آورده و پیشینه‌ی دگرگونی آن‌ها را بررسی کنند.

خاستگاه زمین‌شناسی

در رده‌بندی پهنه‌های ساختاری ایران، منطقه‌ی همدان در پهنه‌ی سنندج - سیرجان قرار می‌گیرد. سنندج - سیرجان نواری متشکل از سنگ‌های دگرگونی و سنگ‌های آذرین درونی اسیدی تا حدواسط و سنگ‌های آتشفشانی با سن مزوزوئیک تا پالئوزوئیک است که بین شهرهای سیرجان در جنوب شرقی ایران و سنندج در شمال غربی آن قرار گرفته است [۵،۴]. کوتاه شدگی پوسته و برخورد ناشی از فروانش اقیانوس نئوتتیس به زیر خرده قاره‌ی ایران و بسته شدن آن موجب دگرشکلی و دگرگونی رسوب‌های پالئوزوئیک بالایی و مزوزوئیک در ایران شده و دنباله‌ی ضخیمی از شیست، فیلیت و اسلیت را در منطقه‌ی همدان ساخته است [۳-۶]. سرگذشت بخش شمالی این پهنه اندکی متفاوت از بخش جنوبی آن است ولی به هر روی در تمام آن حضور سنگ‌های دگرگون ناحیه

تاکنون بر روی نقشه‌های زمین‌شناسی این منطقه ترسیم نشده‌اند. این گارنت آمفیبولیت‌ها را بر اساس محتوای کانی-شناسی می‌توان به دو نوع بیوتیت‌دار و اپیدوت‌دار رده‌بندی کرد که تفاوت اصلی آن‌ها در وجود و یا عدم وجود بیوتیت و اپیدوت است. علاوه بر این، انواع اپیدوت‌دار در گارنت استارولیت شیست‌ها رخنمون داشته اما نمونه‌های بیوتیت‌دار در درون آندالوزیت گارنت شیست‌های منطقه برونزد یافته‌اند که این می‌تواند پیشینه دگرگونی آن‌ها را تحت تاثیر قرار دهد. سنگ‌های دگرگون منطقه‌ی همدان تاکنون توسط پژوهشگران بسیاری از نظر نوع دگرگونی و شرایط دگرشکلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند، مانند [۱-۳]، ولی تاکنون بررسی ویژه‌ای روی کانی‌شناسی و برآورد دما و فشار دگرگونی گارنت آمفیبولیت-های منطقه‌ی همدان صورت نگرفته است. از این رو، نویسندگان این مقاله سعی دارند که در آغاز گزارشی درباره‌ی ترکیب کانی‌شناسی کانی‌های شاخص گارنت آمفیبولیت‌ها شامل آمفیبول، گارنت، پلاژیوکلاز، اپیدوت و بیوتیت ارائه داده و سپس با استفاده از روش‌های دما و فشارسنجی متداول ارائه

کانی‌ها برخی نمونه‌ها اپیدوت و برخی دیگر بیوتیت دارند که بر این اساس می‌توان آن‌ها را به دو نوع اپیدوت گارنت آمفیبولیت و بیوتیت گارنت آمفیبولیت رده‌بندی کرد.

بیشتر حجم نمونه‌های مورد بررسی با هورنبلند اشغال شده است (بیش از ۶۰ درصد حجمی) که به صورت بلورهای درشت (۱ تا ۱۰ میلی متر)، منشوری و دوکی شکل‌دار تا نیمه شکل-دار و سبز رنگ با چند رنگی سبز تا قهوه‌ای کمرنگ حضور دارند و میانبراهای کوچکی از کوارتز را در خود جای داده‌اند (شکل ۲ ب). هورنبلندها دارای جهت یافتگی مناسبی بوده و بافت نمائوبلاستیک این سنگ‌ها را ایجاد می‌کنند، اگرچه در نمونه‌های نزدیک تر به توده‌ی الوند این جهت‌یافتگی اندکی آشفته شده و بلورها یکدیگر را قطع می‌کنند. پلاژیوکلاز در بیشتر نمونه‌ها به صورت بلورهای ریز (۰/۱ تا ۰/۵ میلیمتر) و بی شکل دیده می‌شود که با آمفیبول‌ها در برخی نقاط در تماس هستند. کوارتز نیز در بیشتر نقاط این سنگ‌ها به چشم می‌خورد ولی در بخش‌های خاصی انباشته شده است. کوارتزها به صورت دانه‌های ریز (۰/۱ تا ۱ میلی‌متر) و بی شکل در زمینه-ی سنگ و به صورت میانبر در گارنت‌ها و آمفیبول‌ها دیده می‌شوند (شکل ۲ ب، پ و ث) و به‌طور کلی فراوانی آن‌ها بیشتر از پلاژیوکلاز است.

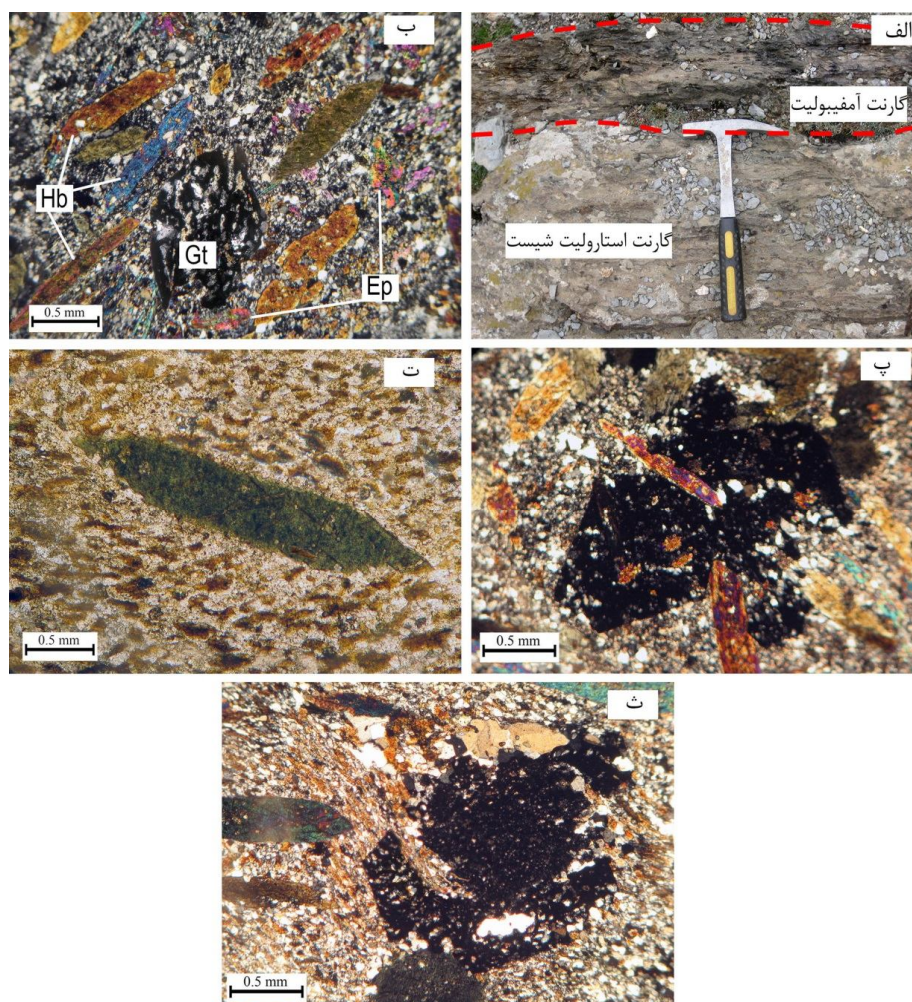
بلورهای گارنت نیز عموماً نیمه‌شکل‌دار بوده و دارای میانبراهای کوارتز و گاهی هورنبلند هستند (شکل ۲ پ). این نشان می‌دهد که گارنت پس از این کانی‌ها طی روند دگرگونی پیشرونده شکل گرفته است. شکل پورفایرولاست‌های آنها عموماً تحت تاثیر میزان سیالات میان دانه‌ای و ارتباط آن‌ها با کانی‌های همجوار کنترل می‌شود [۱۰] که با توجه به رشد دیر هنگام گارنت‌ها و نبود فضا و سیال کافی سبب بی‌نظمی برخی از سطوح آنها شده است. گارنت‌های نمونه‌های بیوتیت دار در بخش‌های بیرونی خود بخشی از برگوارگی سنگ را در بر می‌گیرند (شکل ۲ ث) که نشان می‌دهد که رشد آنها احتمالاً در دو مرحله صورت گرفته است، یکی همزمان با برگوارگی و دیگری پس از آن. اپیدوت نیز به صورت دانه‌هایی بی‌شکل در انواع اپیدوت‌دار حضور داشته و می‌توان آنها را به صورت میانبر در گارنت و هورنبلند نیز مشاهده کرد، ولی نمونه‌های بیوتیت-دار فاقد اپیدوت هستند. کلینوزویت نیز به همراه اپیدوت در بیشتر نمونه‌ها به چشم می‌خورد ولی فراوانی آن‌ها بسیار کمتر از اپیدوت است.

غالب است که طی دوره‌های بعد تحت تاثیر فعالیت‌های آذرین قرار گرفته و بخشی از آن‌ها به هورنفلس و میگماتیت تبدیل شده‌اند [۷]. این دنباله‌ی سنگ‌های دگرگون ناحیه‌ای و سنگ-های دگرگونی مجاورتی در اطراف توده‌ی گرانیتوئیدی الوند در منطقه‌ی همدان نیز قابل مشاهده‌اند.

بنابر نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی همدان [۸]، سنگ‌های دگرگون منطقه که در بالا به آن‌ها اشاره شد پیش از مالم دگرگون شده‌اند. [۹] بر اساس روش سن‌سنجی اورانیوم-سرب سن توده‌ی الوند تا ۱۶۰ میلیون سال برآورد شد [۹] که بر این اساس شیست‌های منطقه که گرانیت الوند در آن‌ها نفوذ کرده است باید سنی بیش از ۱۶۰ میلیون سال داشته باشند. نفوذ توده‌ی الوند سبب تبدیل بخشی از شیست‌های منطقه به هورنفلس و تبدیل آندالوزیت به سیلیمانیت در شیست‌ها شده است [۳، ۲]. لایه‌های نسبتاً باریک گارنت آمفیبولیت نیز به همراه سنگ‌های دگرگونی گارنت استارولیت شیست و آندالوزیت گارنت شیست (دارای سیلیمانیت) با روند شمال غربی جنوب شرقی و در مناطق چشین، ابرو، سیمین، تکمه داش، ینگ کندی، مکرپی، ازندریان، زمان آباد، کمری و چشمه پهن برونزد دارند (شکل ۱ و ۲) اما روی نقشه‌ی زمین‌شناسی ترسیم نشده‌اند. نمونه‌های بیوتیت‌دار به صورت میان لایه در آندالوزیت گارنت شیست و در گستره‌ی روستاهای مکرپی تا چشمه پهن رخداد دارند (شکل ۱) که آندالوزیت‌های آن‌ها تاحدی به سیلیمانیت تبدیل شده‌اند. از طرف دیگر نمونه‌های اپیدوت‌دار از فراوانی بیشتری برخوردارند و در گارنت استارولیت شیست‌ها دیده می‌شوند (شکل ۱). این لایه‌های گارنت آمفیبولیت با سنگ‌های دربرگیرنده‌ی خود همشیب بوده و به صورت یکسان دگرشکل شده و جهت یافتگی کانی‌های آن‌ها همسو هستند که نشان می‌دهد دگرگونی آن‌ها با یکدیگر در ارتباط است. البته همیشه لایه‌ی اصلی به دلیل ضخامت اندک قابل پیگیری نیست ولی واریزه‌های آن‌ها در دامنه‌ها به فراوانی به چشم می‌خورند. اختلاف در سنگ‌های دربرگیرنده‌ی آمفیبولیت‌ها از یک نقطه به نقطه‌ای دیگر نشان از گوناگونی شرایط دگرگونی آن‌ها در نقاط مختلف منطقه‌ی مورد بررسی دارد.

سنگ‌نگاری

تمامی نمونه‌های بررسی شده گارنت آمفیبولیت دارای هورنبلند، گارنت، کوارتز و پلاژیوکلاز هستند. علاوه بر این



شکل ۲ تصاویری از بیرونزدگی و مقاطع نازک نمونه‌های گارنت آمفیبولیت مورد بررسی در منطقه‌ی همدان. الف) تصویر بیرونزدگی لایه‌ی گارنت آمفیبولیت به صورت میان لایه ای بین گارنت استارولیت شیست منطقه. ب) جهت گیری بلورهای آمفیبول و ایجاد بافت نماتوبلاستیک در اپیدوت گارنت آمفیبولیت. بلورهای گارنت و هورنبلند دارای میانبارهای کوارتز هستند، پ) میانبارهای کوارتز و هورنبلند در گارنت در نمونه اپیدوت گارنت آمفیبولیت. ت) ورقه‌های ریز بیوتیت که همسو با بلور هورنبلند جهت گیری کرده‌اند، ث) بلور گارنت که برگوارگی کانی‌های بیوتیت را در بخش‌های حاشیه ای خود در بر گرفته است. علائم اختصاری کانی ها، Ep: اپیدوت، Gt: گارنت و Hb: هورنبلند [۱۱].

کلسیم‌دار در انواع بیوتیت‌دار است که به صورت بلورهای ریز و بی‌شکل در سنگ پراکندگی دارد. نمونه‌های برداشت شده از منطقه‌ی مکرپی (شکل ۱) دارای فیبرولیت‌های بسیار اندکی نیز هستند. با توجه به فراوانی کانی کوارتز در نمونه‌ها می‌توان این سنگ‌ها را گارنت آمفیبولیت‌های غنی از کوارتز دانست تا ویژگی‌های کانی‌شناسی آن‌ها آشکارتر شوند.

روش بررسی

تعداد ۲۰ نمونه گارنت آمفیبولیت که در نقاط مختلف منطقه برنزد داشتند جمع‌آوری شدند. بین این نمونه‌ها، تعداد دو

بیوتیت، پس از هورنبلند و کوارتز فراوان ترین کانی در نمونه‌های بیوتیت گارنت آمفیبولیت محسوب می‌شوند. این بیوتیت‌ها به صورت بلورهایی ریز و بی‌شکل دیده می‌شوند که دارای جهت یافتگی نسبتاً خوبی بوده و در سنگ، برگوارگی ایجاد کرده‌اند. این برگوارگی با جهت گیری هورنبلندها کمابیش همسو است و در اطراف آن‌ها پیچ و تاب می‌خورد (شکل ۲) که نشان می‌دهد در زمان دگرشکلی هردوی این کانی‌های حضور داشته‌اند. بر این اساس بافت این سنگ‌ها را می‌توان پورفیرو لیپیدو نماتوبلاستیک نام گذاری کرد. اسفن کانی دیگر

(New Brunswick) کانادا تعیین شد (جدول‌های ۱ تا ۳). همچنین از بلورهای گارنت نیز پروفیل‌های ژئوشیمیایی از مرکز بلور به حاشیه تهیه شدند تا تغییرات این کانی‌ها طی دگرگونی بهتر مورد بررسی قرار گیرند (جدول ۲). علاوه بر این، مقادیر اکسید عناصر اصلی این چهار نمونه نیز با دستگاه XRF در شرکت کانپوزه ایران تعیین گردید (جدول ۴) که در ادامه به بررسی هریک از آن‌ها پرداخته می‌شود.

نمونه اپیدوت‌دار و دو نمونه بیوتیت‌دار که دارای کمترین میزان هوازدگی بودند و با اهداف مطرح در این پژوهش سازگاری بیشتری داشتند به منظور آنالیز شیمیایی به روش ریزکاوش الکترونی انتخاب شدند. ترکیب شیمیایی کانی‌های آمفیبول، پلاژیوکلاز، اپیدوت و بیوتیت این نمونه‌ها با استفاده از ریزکاوش الکترونی مدل JEOL JXA-733 با ولتاژ شتاب دهنده ۱۵kV و جریان ۳۰nA در دانشگاه نیوبرانسیک

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آمفیبول‌های آنالیز شده از گارنت آمفیبولیت‌های همدان. فرمول ساختاری آمفیبول‌ها بر اساس ۲۳ اکسیژن محاسبه شده و با استفاده از روش [۱۲] با ۱۳ کاتیون بهنجار شده است. علامت (x) نشان دهنده آمفیبول‌هایی است که در تماس با گارنت قرار داشته‌اند. EGA: گارنت آمفیبولیت و BGA: بیوتیت گارنت آمفیبولیت، Mg-Hb: منیزیهورنبلند.

نمونه	EGA1a	EGA1b*	EGA2a	EGA2b*	BGA1a	BGA1c*	BGA2b	BGA2c
SiO ₂	۴۸,۲۴	۴۸,۱۲	۴۷,۷۹	۴۷,۸۲	۴۵,۸۴	۴۵,۷۷	۴۵,۹۳	۴۶,۵۷
TiO ₂	۰,۳۶	۰,۳۶	۰,۳۴	۰,۳۶	۰,۳۲	۰,۳۴	۰,۲۵	۰,۴۴
Al ₂ O ₃	۸,۲۲	۸,۳۸	۸,۹۲	۸,۲۵	۱۰,۲۴	۱۰,۱۴	۹,۷۲	۹,۱۹
Cr ₂ O ₃	۰,۰۹	۰,۰۰	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۰۳	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۲
FeO	۱۶,۰۳	۱۶,۵۲	۱۶,۴۸	۱۶,۷۵	۱۶,۶۸	۱۶,۴۶	۱۶,۹۸	۱۷,۵۵
MnO	۰,۲۵	۰,۲۸	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۵	۰,۵۸	۰,۳۶	۰,۴۵
NiO	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱
ZnO	۰,۰۵	۰,۰۷	۰,۰۵	۰,۰۴	۰,۰۷	۰,۰۱	۰,۰۳	۰,۰۰
MgO	۹,۱۷	۹,۴۲	۹,۸۳	۱۰,۰۰	۹,۷۲	۹,۱۴	۹,۷۸	۹,۹۱
CaO	۱۲,۱۱	۱۲,۰۴	۱۲,۱۷	۱۲,۱۸	۱۲,۱۶	۱۲,۱۳	۱۲,۱۱	۱۲,۲۵
BaO	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۵	۰,۰۰	۰,۰۳	۰,۰۰
Na ₂ O	۰,۷۸	۰,۸۸	۰,۴۶	۰,۴۸	۰,۴۵	۰,۸۸	۰,۵۹	۰,۴۸
K ₂ O	۰,۲۸	۰,۳۷	۰,۷۴	۰,۷۴	۰,۷۴	۱,۲۳	۰,۴۷	۰,۸۴
F	۰,۰۷	۰,۰۷	۰,۰۸	۰,۰۷	۰,۰۹	۰,۰۸	۰,۱۰	۰,۰۸
Cl	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۰
Total	۹۶,۶۸	۹۶,۵۴	۹۷,۴۰	۹۷,۲۱	۹۶,۸۴	۹۶,۷۹	۹۶,۳۸	۹۷,۷۸
T site								
Si	۷,۳۳	۷,۲۴	۷,۱۱	۷,۱۳	۶,۸۵	۶,۹۳	۶,۸۹	۶,۹۱
Al	۰,۶۷	۰,۷۶	۰,۰۹	۰,۸۷	۱,۱۵	۱,۰۷	۱,۱۱	۱,۰۹
Total T	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰
C site								
Al	۰,۸	۰,۷۲	۰,۶۷	۰,۵۸	۰,۶۵	۰,۷۴	۰,۶	۰,۵۲
Ti	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۵
Fe ³⁺	۰,۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۳	۰,۲۶		۰,۳۰	۰,۲۷
Cr	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۰		۰,۰۰	۰,۰۰
Mg	۲,۰۸	۲,۱۱	۲,۱۸	۲,۲۲	۲,۱۶	۲,۰۶	۲,۱۹	۲,۱۹
Fe ²⁺	۲,۰۴	۲,۰۸	۲,۰۵	۲,۰۶	۱,۸۲	۲,۰۸	۱,۸۳	۱,۹۱
Mn ²⁺	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۰۶	۰,۰۶	۰,۰۶	۰,۰۷	۰,۰۵	۰,۰۶
Total C	۵,۰۰	۵,۰۰	۵,۰۰	۵,۰۰	۵,۰۰	۵,۰۰	۵,۰۰	۵,۰۰
B site								
Ca	۱,۹۷	۱,۹۴	۱,۹۴	۱,۹۵	۱,۹۵	۱,۹۷	۱,۹۵	۱,۹۵
Na	۰,۰۳	۰,۰۶	۰,۰۶	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۳	۰,۰۵	۰,۰۵
Total B	۲,۰۰	۲,۰۰	۲,۰۰	۲,۰۰	۲,۰۰	۲,۰۰	۲,۰۰	۲,۰۰
A site								
Na	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۷	۰,۰۹	۰,۰۸	۰,۲۳	۰,۱۲	۰,۰۹
K	۰,۰۶	۰,۰۷	۰,۱۴	۰,۱۴	۰,۱۴	۰,۲۴	۰,۰۹	۰,۱۶
Total A	۰,۲۶	۰,۲۷	۰,۲۲	۰,۲۳	۰,۲۲	۰,۴۶	۰,۲۱	۰,۲۵
Mg#	۰,۵۱	۰,۵	۰,۵۲	۰,۵۲	۰,۵۴	۰,۵۰	۰,۵۴	۰,۵۴
Class	Mg-Hb	Mg-Hb	Mg-Hb	Mg-Hb	Mg-Hb	Mg-Hb	Mg-Hb	Mg-Hb

جدول ۲ ترکیب شیمیایی نماینده مرکز و حاشیه گارنت‌های آنالیز شده از منطقه مورد بررسی و ترکیب شیمیایی اپیدوت‌های نمونه‌های اپیدوت گارنت آمفیبولیت. EGA: گارنت آمفیبولیت و BGA: بیوتیت گارنت آمفیبولیت.

نمونه	Garnet								Epidote				
	EPA1	EPA1	EPA2	EPA2	BGA1	BGA1	BGA2	BGA2	نمونه	EPA1a	EPA1b	EPA2a	EPA2b
	هسته	حاشیه	هسته	حاشیه	هسته	حاشیه	هسته	حاشیه					
SiO ₂	۳۸,۲۷	۳۷,۴۶	۳۸,۱۷	۳۷,۵۱	۳۷,۱۲	۳۷,۴۴	۳۷,۵۰	۳۶,۹۴	SiO ₂	۳۷,۱۹	۳۷,۴۴	۳۸,۴۱	۳۸,۱۶
TiO ₂	۰,۱۲	۰,۰۱	۰,۱۹	۰,۰۳	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۱۴	۰,۰۱	TiO ₂	۰,۴۹	۰,۴۸	۰,۴۳	۰,۴۴
Al ₂ O ₃	۲۰,۶۲	۲۰,۳۰	۲۱,۰۳	۲۰,۶۲	۲۰,۵۶	۲۰,۷۹	۲۰,۵۹	۲۰,۱۸	Al ₂ O ₃	۲۳,۲۱	۲۲,۶۶	۲۲,۳۵	۲۲,۹۰
FeO	۱۹,۹۱	۲۱,۶۸	۲۰,۸۰	۲۰,۷۰	۲۲,۱۲	۲۴,۹۷	۱۹,۵۰	۲۴,۴۴	Cr ₂ O ₃	۰,۰۷	۰,۰۷	۰,۰۶	۰,۰۵
MnO	۶,۲۳	۷,۳۶	۴,۳۳	۸,۱۳	۷,۰۲	۶,۳۹	۹,۱۲	۶,۰۵	FeO	۱۵,۵۶	۱۵,۴۱	۱۴,۷۸	۱۴,۹۳
MgO	۰,۶۵	۰,۹۴	۰,۸۳	۰,۸۹	۱,۰۷	۱,۶۴	۰,۸۸	۱,۶۷	MnO	۰,۴۹	۰,۴۹	۰,۴۸	۰,۴۸
CaO	۱۳,۶۳	۱۲,۰۸	۱۴,۷۴	۱۱,۷۹	۱۱,۱۱	۱۰,۱۷	۱۲,۴۵	۱۰,۳۸	MgO	۰,۸۱	۰,۶۲	۰,۶۷	۰,۸۶
Total	۹۹,۴۳	۹۹,۸۳	۱۰۰,۰۹	۹۹,۶۷	۹۹,۰۴	۱۰۰,۴۶	۱۰۰,۱۸	۹۹,۶۷	CaO	۱۹,۰۷	۱۹,۶۴	۲۰,۱۶	۱۹,۵۹
Si	۳,۰۵	۳,۰۰	۱,۰۳	۰,۰۰	۲,۹۹	۲,۹۶	۲,۹۹	۲,۹۷	Na ₂ O	۰,۲۴	۰,۲۳	۰,۱۸	۰,۱۹
Al ^{IV}	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۴	۰,۰۱	۰,۰۳	K ₂ O	۰,۳۹	۰,۳۴	۰,۱۴	۰,۱۹
Al ^{VI}	۱,۹۴	۱,۹۲	۱,۹۶	۱,۹۵	۱,۹۵	۱,۹۰	۱,۹۲	۱,۸۹	Total	۹۷,۵۰	۹۷,۳۵	۹۷,۶۳	۹۷,۷۸
Ti	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰					
Fe ³⁺	۰,۰۱	۰,۰۷	۰,۰۲	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۹	۰,۰۶	۰,۱۰	Si	۲,۹۴	۲,۹۷	۳,۰۲	۳,۰۰
Fe ²⁺	۱,۳۲	۱,۳۸	۱,۳۶	۱,۳۴	۱,۴۵	۱,۵۶	۱,۲۴	۱,۵۴	Ti	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۳
Mn	۰,۴۲	۰,۵۰	۰,۲۹	۰,۵۵	۰,۴۸	۰,۴۳	۰,۶۲	۰,۴۱	Al	۲,۱۶	۲,۱۲	۲,۰۷	۲,۱۲
Mg	۰,۰۸	۰,۱۱	۰,۱۰	۰,۱۱	۰,۱۳	۰,۱۹	۰,۱۰	۰,۲۰	Fe ³⁺	۱,۰۳	۱,۰۲	۰,۹۷	۰,۹۸
Ca	۱,۱۶	۱,۰۴	۱,۲۵	۱,۰۱	۰,۹۶	۰,۸۶	۱,۰۶	۰,۸۹	Mn	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۳
Total	۷,۹۷	۸,۰۱	۷,۹۹	۸,۰۱	۸,۰۱	۸,۰۴	۸,۰۱	۸,۰۳	Mg	۰,۰۹	۰,۰۷	۰,۰۸	۰,۱۰
									Ca	۱,۶۱	۱,۶۷	۱,۷۰	۱,۶۵
Almandine	۴۳,۰۹	۴۴,۷۷	۴۴,۷۶	۴۴,۰۴	۴۷,۶۳	۴۹,۹۱	۴۰,۳۴	۴۹,۲۶	Na	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۳
Pyrope	۲,۶۴	۳,۷۶	۳,۲۹	۳,۵۶	۴,۲۸	۶,۵۳	۳,۴۹	۶,۷۵	K	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۱	۰,۰۲
Grossular	۳۹,۳۸	۳۱,۰۷	۴۱,۳۹	۳۱,۷۸	۲۹,۹۴	۲۴,۷۸	۳۲,۵۸	۲۵,۰۴	Total	۷,۹۸	۷,۹۷	۷,۹۵	۷,۹۵
Andradite	۰,۴۹	۳,۶۷	۰,۷۶	۲,۱۳	۲,۱۳	۴,۳۲	۲,۹۹	۵,۰۷	X Czo	۰,۱۴	۰,۱۰	۰,۰۷	۰,۱۱
Spessartine	۱۴,۴	۱۶,۷۳	۹,۷۹	۱۸,۴۹	۱۶,۰۲	۱۴,۴۶	۲۰,۶۰	۱۳,۸۷	X Ep	۰,۸۶	۰,۹۰	۰,۹۳	۰,۸۹

کمتری هستند اما اکسیدهای دیگر آنها کمابیش مشابهند.

گارنت

ترکیب مرکز و حاشیه تعدادی از گارنت‌های آنالیز شده در جدول ۲ ارائه شده‌اند. فرمول ساختاری گارنت‌ها بر اساس ۱۲ اکسیژن و ۸ کاتیون محاسبه شدند. مقادیر هریک از اعضای انتهایی آلماندین، پیروپ، گروسولار و اسپسارتین نیز در انتهای جدول آورده شده‌اند. در کل، می‌توان گفت که نمونه‌های بیوتیت‌دار دارای آلماندین و پیروپ بیشتر و گروسولار و اسپسارتین کمتری نسبت به اپیدوت‌دارها هستند (شکل ۲ ب [۱۳]). برای تمامی نمونه‌های آنالیز شده، مقادیر آلماندین و پیروپ به سمت حاشیه افزایش یافته و گروسولار کاهش می‌-

ترکیب شیمیایی کانی‌ها

آمفیبول

فرمول ساختاری آمفیبول‌های آنالیز شده به روش ارائه شده توسط [۱۲] بر اساس ۲۳ اکسیژن محاسبه شده و با ۱۳ کاتیون به استثنای کلسیم، سدیم و پتاسیم (13eCNK) به‌نحیج شدند (جدول ۱). تمامی نمونه‌های بررسی شده دارای $Ca_B > ۱/۵$ و $(Na+K)_A < ۰/۵$ بوده و بنابراین در گروه آمفیبول‌های کلسیک قرار گرفته و در گستره‌ی منیزوهورنبلند ترسیم می‌شوند (شکل ۳ الف). تفاوت‌های اندکی بین این آمفیبول‌ها دیده می‌شود و به طور کلی می‌توان گفت که آمفیبول‌های نمونه‌های بیوتیت‌دار دارای Al_2O_3 بالاتر و SiO_2

آلومینیوم هستند و از این رو محتوای اپیدوت آنها ($X_{EP} = Fe^{+3}/Fe^{+3} + Al + Cr - 2$) [۱۶] نیز بالاتر از محتوای کلینوزوئیزیت ($X_{Czo} = Al - 2/Fe^{+3} + Al + Cr - 2$) [۱۶] است ولی بخشی از آنها را کلینوزوئیزیت تشکیل می‌دهد.

ترکیب شیمیایی سنگ کل

ترکیب شیمیایی سنگ کل اپیدوت گارنت آمفیبولیت‌ها و بیوتیت گارنت آمفیبولیت‌ها در جدول ۴ ارائه شده‌اند. تفاوت زیادی بین مقادیر اکسیدهای عناصر اصلی این نمونه‌ها به چشم نمی‌خورد و تنها اختلاف چشمگیر، محتوای بالای K_2O نمونه‌های بیوتیت‌دار و محتوای CaO کمتر آنها نسبت به نمونه‌های اپیدوت‌دار است که این نشان از حضور فازهای غنی از پتاسیم در سنگ مادر آنهاست. نمونه‌های آنالیز شده در نمودار سه تایی $MgO-FeO-CaO$ [۱۷] در گستره‌ی پارامفیبولیت قرار می‌گیرند (شکل ۳ ث) که این موضوع با محتوای کانی‌شناسی آنها سازگاری خوبی دارد. مقدار بالای SiO_2 می‌تواند این سنگ‌ها را شبیه به کوارتز آرنایت درآورد، ولی کمبود مشخص پلاژیوکلاز در این سنگ‌ها از یک طرف و بالا بودن مقدار CaO و Fe_2O_3 از طرف دیگر این ادعا را رد می‌کند. مقادیر بالای CaO و Fe_2O_3 نمونه‌ها آنها را از گری وک‌ها نیز متمایز می‌سازد. نمودار $ACF = [Al_2O_3] + [Fe_2O_3] - ([Na_2O] + [K_2O])$ ، $A = [Al_2O_3] + [Fe_2O_3] - ([Na_2O] + [K_2O])$ ، $F = [MgO] + [MnO] + [FeO]$ و $C = [CaO] - 3.3[P_2O_5]$ ارائه شده در [۱۹، ۱۸] برای رده‌بندی سنگ‌های رسوبی بر اساس ژئوشیمی آنها، برای تعیین سنگ مادر احتمالی نمونه‌ها به کار رفته و در آن همه‌ی نمونه‌ها در گستره‌ی مارن ترسیم می‌شوند (شکل ۳ ج) ولی با توجه به محتوای بالای SiO_2 بهتر است که سنگ مادر این نمونه‌ها را یک مارن رسی غنی از سیلیس (سنگی با محتوای بالای کانی رسی و کوارتز و محتوای کمتر کربناتی) بدانیم تا حضور فراوان کوارتز و کانی‌های کلسیم، آهن و منیزیم‌دار قابل توجیه باشد. غنی بودن اپیدوت‌های این سنگ‌ها در آلومینیوم نسبت به آهن نیز از ویژگی‌های اپیدوت‌های با سنگ مادر متا مارن و یا شیل‌های غنی از کلسیم است که البته با افزایش درجات دگرگونی مقدار آهن این گونه از اپیدوت‌ها نیز افزایش می‌یابد [۲۰]. شایان یادآوری است که رسوب‌های مارنی با ترکیب ژئوشیمیایی پیچیده در رخساره‌ی آمفیبولیت تمامی کلسیت خود را برای ایجاد کانی-

یابد. محتوای اسپسارتین در کل بی‌نظمی نشان داده و برای نمونه‌های اپیدوت‌دار به سمت حاشیه افزایش می‌یابد ولی در نمونه‌های بیوتیت‌دار عکس این فرایند رخ می‌دهد. بالا بودن میزان گروسولار در این گارنت‌ها نشان می‌دهد که سنگ مادر آنها دارای مقادیر فراوانی کلسیم بوده است که علاوه بر ایجاد هورنبلند و اپیدوت گروسولار قابل توجهی نیز ایجاد کرده است.

پلاژیوکلاز

هشت بلور پلاژیوکلاز که در تماس با بلورهای هورنبلند آنالیز شده قرار داشتند مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۳) و فرمول ساختاری آنها بر اساس ۸ اکسیژن محاسبه شد. روی هم رفته، پلاژیوکلاز نمونه‌های بیوتیت‌دار SiO_2 و Na_2O کمتری نسبت به نمونه‌های اپیدوت‌دار دارند و از این رو محتوای آنورتیت آنها به ترتیب برابر با ۰/۴۱ تا ۰/۴۵ و ۰/۳۷ تا ۰/۴۱ است (جدول ۳). در نمودار رده‌بندی پلاژیوکلازها [۱۴]، تمامی این نمونه‌ها در گستره‌ی آندزین قرار می‌گیرند (شکل ۲ پ) ولی پلاژیوکلازهای نمونه‌های بیوتیت‌دار بیشتر به سمت لابرادوریت تمایل دارند.

بیوتیت

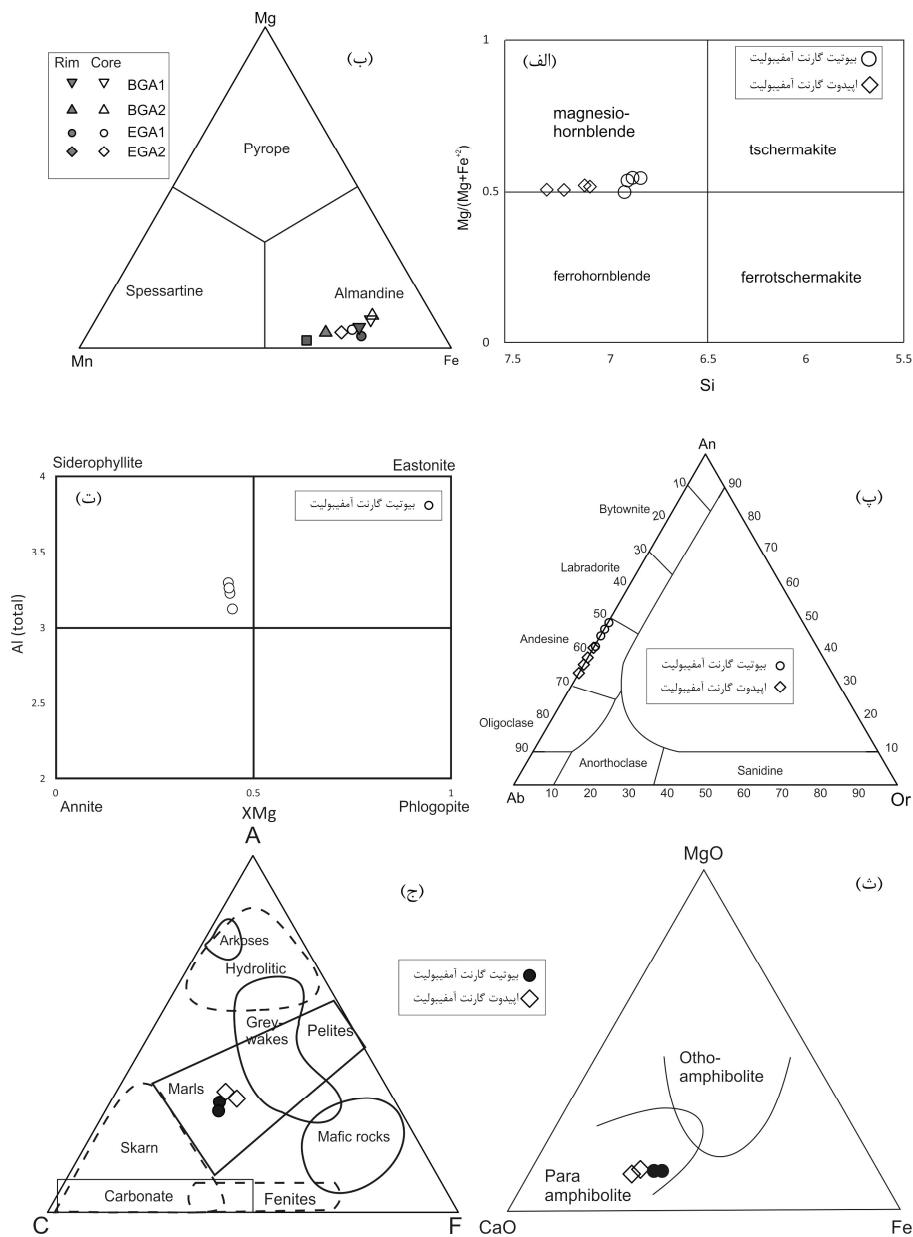
تعداد چهار بلور بیوتیت که در تماس مستقیم با هورنبلندهای بررسی شده در بالا قرار داشتند آنالیز شدند (جدول ۲). هدف از این کار استفاده بهینه از ترکیب بیوتیت‌های در تعادل با این کانی‌ها برای دماسنجی بیوتیت-هورنبلند است. فرمول ساختاری این بیوتیت‌ها بر اساس ۱۱ اکسیژن محاسبه شده و چنانکه از داده‌های جدول ۲ مشخص است، تمامی نمونه‌ها دارای $Mg/(Mg+Fe) > 0.5$ و $Al_{total} > 3$ بوده و در نمودار رده‌بندی بیوتیت‌ها [۱۵] در گستره‌ی سیدروفیلیت و نزدیک به مرز ایستونیت قرار می‌گیرند (شکل ۲ ت). بیوتیت‌های دارای منیزیم و آلومینیوم بالا معمولاً در دگرگونی‌های با درجه‌ی متوسط دیده می‌شوند [۱۵].

اپیدوت

چهار بلور اپیدوت نیز از نمونه‌های اپیدوت‌دار مورد بررسی قرار گرفتند و فرمول ساختاری آنها بر اساس ۱۲/۵ اکسیژن و فرض تمام آهن به صورت Fe^{+3} تعیین شد (جدول ۲). تمامی اپیدوت‌ها دارای مقادیر بالای آهن و منیزیم و مقادیر پائین

مورد بررسی کانی‌های کربناتی دیده نمی‌شوند، البته مقدار CaO آنها نیز به حدی نبوده است (جدول ۳) که کلسیت امکان تشکیل داشته باشد.

های غنی از کلسیم مصرف می‌کنند و در نهایت ترکیب کانی-شناسی بسیار متنوعی یافته و شبیه به سنگ‌های آذرین دگرگون شده می‌شوند [۲۱، ۲۲] و به همین دلیل در نمونه‌های



شکل ۳ الف) رده بندی ژئوشیمیایی آمفیبول‌های مورد بررسی با استفاده از نمودار رده‌بندی آمفیبول‌های کلسیک [۱۲]، ب) رده‌بندی گارنت‌ها با استفاده از نمودار مثلثی Mg-Fe-Mn [۱۳]، پ) رده‌بندی پلاژیوکلازهای مورد بررسی با استفاده از مقادیر اعضای انتهایی آل‌بیت، آنورتیت و ارتوکلاز [۱۴]، ت) رده بندی ژئوشیمیایی بیوتیت‌های آنالیز شده از بیوتیت گارنت آمفیبولیت‌ها [۱۵]، ث) نمودار مثلثی MgO-CaO-FeO برای تفکیک پارآامفیبولیت و ارتوآامفیبولیت [۱۷]، ج) تعیین نوع سنگ مادر رسوبی نمونه‌های مورد بررسی با استفاده از نمودار سه تایی ACF، [۱۹، ۱۸] $(F = MgO + MnO + FeO$ و $C = CaO - 3.3 P_2O_5$ ، $A = (Al_2O_3) + (Fe_2O_3) - (Na_2O + K_2O)$

جدول ۳ ترکیب شیمیایی پلاژیوکلازها و بیوتیت‌های آنالیز شده از نمونه‌های گارنت آمفیبولیت. EGA: اپیدوت گارنت آمفیبولیت و BGA: بیوتیت گارنت آمفیبولیت.

نمونه	Plagioclase								Biotite				
	EGA1a	EGA1b	EGA2a	EGA2b	BGA1a	BGA1b	BGA2a	BGA2b	نمونه	BGA1a	BGA1b	BGA2a	BGA2b
SiO ₂	۵۸۰۲	۶۰۴۳	۵۸۱۲	۵۹۳۱	۵۶۹۵	۵۷۱۲	۵۷۴۹	۵۷۲۲	SiO ₂	۳۷۴۸	۳۷۳۱	۳۶۴۹	۳۶۹۰
Al ₂ O ₃	۲۵۱۵	۲۲۲۳	۲۵۰۵	۲۴۷۴	۲۶۵	۲۶۶۹	۲۶۵۹	۲۶۲	TiO ₂	۱۰۲۸	۱۰۶۱	۱۰۶۸	۱۰۶۴
FeO	۰۰۱۳	۰۰۳۰	۰۰۹۳	۰۰۴	۰۰۳۶	۰۰۲۲	۰۰۴۱	۰۰۳۵	Al ₂ O ₃	۱۷۹۸	۱۸۵۷	۱۸۷۷	۱۸۶۷
MnO	۰۰۰	۰۰۴	۰۰۱	۰۰۱	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	Cr ₂ O ₃	۰۰۴	۰۰۴	۰۰۷	۰۰۵
CaO	۹۳۲	۸۰۲	۸۵۵	۸۲۹	۱۰۳۲	۹۸۰	۸۷۵	۹۳	FeO	۲۲۷۰	۲۲۰۰	۲۲۱۸	۲۲۰۹
Na ₂ O	۷۳۹	۸۹۶	۷۳۵	۷۷۷	۵۸۷	۶۰۴	۶۹۲	۶۲۲	MnO	۰۰۳۶	۰۰۲۹	۰۰۲۹	۰۰۲۹
K ₂ O	۰۰۰	۰۰۱	۰۰۲	۰۰۱	۰۰۴	۰۰۲	۰۰۱	۰۰۱	MgO	۱۰۲۸	۹۷۱	۹۶۳	۹۶۷
Total	۱۰۰۰۱	۹۹۹۹	۱۰۰۰۳	۱۰۰۰۱۷	۱۰۰۰۵	۹۹۹۲	۱۰۰۰۱۸	۹۹۳۲	CaO	۰۰۱۲	۰۰۱۰	۰۰۱۶	۰۰۱۳
									Na ₂ O	۰۰۱۰	۰۰۲۰	۰۰۱۳	۰۰۱۶
Si	۲۶۱	۲۷۲	۲۶۲	۲۶۵	۲۵۶	۲۵۷	۲۵۸	۲۵۹	K ₂ O	۸۷۹	۹۰۵	۸۳۵	۸۷۰
Al	۱۳۳	۱۱۸	۱۳۳	۱۳۰	۱۴۱	۱۴۱	۱۴۱	۱۴	BaO	۰۰۰	۰۰۳۳	۰۰۸	۰۰۱۰
Ti	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	F	۰۰۳۳	۰۰۲۷	۰۰۲۷	۰۰۲۷
Fe	۰۰۰	۰۰۱	۰۰۴	۰۰۰	۰۰۱	۰۰۱	۰۰۲	۰۰۱	Cl	۰۰۳	۰۰۴	۰۰۱	۰۰۳
Mn	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	Total	۹۹۳۶	۹۹۱۹	۹۷۹۹	۹۸۵۹
Ca	۰۰۴۵	۰۰۳۹	۰۰۴۱	۰۰۴۰	۰۰۵۰	۰۰۴۷	۰۰۴۲	۰۰۴۵					
Na	۰۰۶۴	۰۰۷۸	۰۰۶۴	۰۰۶۷	۰۰۵۱	۰۰۵۳	۰۰۶۰	۰۰۵۴	Si	۵۵۳	۵۵۰	۵۴۴	۵۴۷
K	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	Al iv	۲۴۷	۲۵۰	۲۵۶	۲۵۳
Total	۵۰۳	۵۰۸	۵۰۴	۵۰۲	۴۹۹	۴۹۸	۵۰۱	۴۹۹	Al vi	۰۰۶۵	۰۰۷۳	۰۰۷۴	۰۰۷۳
									Ti	۰۰۱۴	۰۰۱۸	۰۰۱۹	۰۰۱۸
Or	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۰	Cr	۰۰۰	۰۰۰	۰۰۱	۰۰۱
Ab	۰۰۵۹	۰۰۶۷	۰۰۶۱	۰۰۶۳	۰۰۵۱	۰۰۵۳	۰۰۵۹	۰۰۵۵	Fe	۲۸۰	۲۷۱	۲۷۷	۲۷۴
An	۰۰۴۱	۰۰۳۳	۰۰۳۹	۰۰۳۷	۰۰۴۹	۰۰۴۷	۰۰۴۱	۰۰۴۵	Mn	۰۰۵	۰۰۴	۰۰۴	۰۰۴
									Mg	۲۲۶	۲۱۳	۲۱۴	۲۱۴
									Ca	۰۰۲	۰۰۲	۰۰۳	۰۰۲
									Na	۰۰۳	۰۰۶	۰۰۴	۰۰۵
									K	۱۰۶۵	۱۰۷۰	۱۰۵۹	۱۰۶۵
									F	۰۰۱۵	۰۰۱۳	۰۰۱۳	۰۰۱۳
									Cl	۰۰۱	۰۰۱	۰۰۰	۰۰۱
									Total	۱۵۷۷	۱۵۷۲	۱۵۶۶	۱۵۶۹

جدول ۴ ترکیب شیمیایی سنگ کل نمونه‌های آنالیز شده با روش XRF. EGA: اپیدوت گارنت آمفیبولیت و BGA: بیوتیت گارنت آمفیبولیت.

	EGA1	EGA2	BGA1	BGA2
SiO ₂	۵۸۸۹	۵۶۲۲	۵۷۱۱	۵۸۲۲
Al ₂ O ₃	۱۶۳۸	۱۶۶۶	۱۶۸۶	۱۶۳۳
Fe ₂ O ₃	۶۱۹	۶۹۱	۶۱۷	۶۴۵
TiO ₂	۰۰۷	۰۰۷۱	۰۰۶۶	۰۰۵۶
CaO	۱۳۲۸	۱۳۴۹	۱۱۶۶	۱۱۱۵
MgO	۲۲۶	۲۵۲	۲۴۳	۲۲۲
Na ₂ O	۰۰۲۶	۰۰۳۷	۰۰۶۶	۰۰۷۲
K ₂ O	۰۰۱۸	۰۰۳۷	۲۶۲	۱۰۹۵
MnO	۰۰۲۵	۰۰۲۲	۰۰۱۷	۰۰۱۱
P ₂ O ₅	۰۰۱۴	۰۰۲	۰۰۱۷	۰۰۱
L.O.I	۱۳۱	۲۰۲	۱۳۹	۱۳۲
total	۹۹۸۴	۹۹۶۹	۹۹۸	۹۹۱۳

محاسبات دما-فشار سنجی

در طول دهه‌های گذشته، چندین روش برآورد دما و فشار گارنت آمفیبولیت‌ها ارائه شده‌اند که از آن جمله می‌توان به دماسنجی زوج گارنت-هورنبلند [۲۳]، آمفیبول-پلاژیوکلاز [۲۴] و بیوتیت - هورنبلند [۲۵] و فشارسنجی بر اساس مجموعه‌ی تعادلی گارنت-آمفیبول-پلاژیوکلاز-کوارتز [۲۶] اشاره کرد. همچنین، دما-فشارسنجی بر مبنای ترکیب آمفیبول [۲۷] را نیز می‌توان در مورد این سنگ‌ها به کار برد و امتیاز این روش در این است که مستقل از ترکیب کانی‌های دیگر عمل می‌کند. روش‌های یاد شده در بالا برای تعیین شرایط دما و فشار دگرگونی نمونه‌های آنالیز شده به کار رفته‌اند که در ادامه به جدایش مورد بررسی قرار می‌گیرند.

دماسنجی گارنت-هورنبلند

تبادل یونی آهن-منیزیم بین گارنت و هورنبلند توسط [۲۳] برای دماسنجی سنگ‌های گارنت آمفیبولیت زمینه‌بندی شده و از طریق رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود که نتایج این محاسبات در جدول ۵ ارائه شده‌اند. دمای برآورد شده برای نمونه‌های اپیدوت‌دار و بیوتیت‌دار به ترتیب از ۵۲۵ تا ۵۴۲ و ۵۵۶ تا ۵۶۷ درجه‌ی سانتیگراد تغییر می‌کند (جدول ۵). لازم به توضیح است که به منظور دریافت نتایج بهتر، در اینجا تنها هورنبلندهایی برای محاسبه به کار رفتند که در تماس با گارنت قرار داشتند (جدول ۱).

$$T(^{\circ}\text{K}) = \frac{2888 + 3280X_{\text{Ca.G}}}{\ln K_d + 426.2} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در این رابطه، T برابر با دما برحسب درجه‌ی کلونین، $X_{\text{Ca.G}}$ برابر با مقدار کلسیم در گارنت، و K_d ضریب توزیع آهن و منیزیم بین گارنت و هورنبلند است که از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$K_d = \frac{X_{\text{Fe}}^{\text{G}} / X_{\text{Fe}}^{\text{H}}}{X_{\text{Mg}}^{\text{G}} / X_{\text{Mg}}^{\text{H}}} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه X_{Mg}^{G} و X_{Fe}^{G} به ترتیب برابر با مقدار آهن و منیزیم گارنت و X_{Mg}^{H} و X_{Fe}^{H} به ترتیب برابر با مقدار آهن و منیزیم هورنبلند است.

دماسنجی هورنبلند - پلاژیوکلاز

این روش دماسنجی بر اساس تبادلات یون‌های سیلیسیم،

آلومینیوم، کلسیم، سدیم و پتاسیم بین هورنبلند و پلاژیوکلاز همزیست زمینه‌بندی شده [۲۴] و در مورد نمونه‌های مورد بررسی به کار رفته است (جدول ۵). این دماسنج با استفاده از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود. در این محاسبات براساس مجموعه کانی‌های مشاهده شده در نمونه‌ها، مقدار فشار متوسط ۴٫۵ کیلوبار در نظر گرفته شده. نتایج، دمای ۴۹۰ تا ۵۴۴ درجه‌ی سانتیگراد را برای نمونه‌های اپیدوت‌دار و ۵۷۷ تا ۵۹۸ درجه‌ی سانتیگراد را برای نمونه‌های بیوتیت‌دار نشان می‌دهند (جدول ۵). این نتایج با نتایج روش گارنت - هورنبلند اندکی تفاوت دارند اما مقدار اختلاف‌ها در گستره‌ی خطای تخمینی این روش (± 40 درجه سانتیگراد) قرار می‌گیرند.

رابطه ۳

$$T(^{\circ}\text{K}) = \frac{-76.95 + 0.79p + Y_{\text{ab}} + 39.4X_{\text{Na}}^{\text{A}} + 22.4X_{\text{K}}^{\text{A}} + (41.5 - 2.89P) \times X_{\text{Al}}^{\text{M2}}}{-0.065 - R \ln \left(\frac{27 \times X_{\text{Al}}^{\text{M2}} \times X_{\text{Al}}^{\text{Pbs}}}{256 \times X_{\text{Na}}^{\text{A}} \times X_{\text{K}}^{\text{A}}} \right)}$$

که در این رابطه T برابر با دما، P برابر با فشار بر حسب کیلوبار، X_{Na}^{A} ، X_{K}^{A} ، $X_{\text{Al}}^{\text{M2}}$ و X_{Al}^{T} به ترتیب برابر با مقدار سدیم، پتاسیم و آلومینیوم در ساختار آمفیبول و $X_{\text{ab}}^{\text{Plag}}$ برابر با مقدار آلبرت پلاژیوکلاز، $Y_{\text{ab-an}}$ برای $X_{\text{ab}} > 0.5$ برابر با kj و برای $X_{\text{ab}} < 0.5$ برابر $kj + 3(1 - X_{\text{ab}})$ است. R نیز ثابت جهانی گازها برابر با ۸٫۳۱۴ است.

دماسنجی هورنبلند-بیوتیت

این روش از دماسنجی توسط [۲۵] ارائه شد و مقدار دما را براساس توزیع عناصر آهن و منیزیم بین کانی‌های هورنبلند و بیوتیت برآورد می‌کند. رابطه‌ی ۴ چگونگی محاسبه‌ی این روش دماسنجی را نشان می‌دهد. این دماسنج در مورد سنگ‌های دگرگونی رخساره‌های آمفیبولیت و گرانولیت کاربرد دارد. نتایج این محاسبه‌ی دماسنجی برای نمونه‌های بیوتیت‌دار دمای ۵۴۲ تا ۵۵۸ درجه‌ی سانتیگراد را نشان می‌دهد که بیشتر با دمای روش گارنت-هورنبلند سازگاری دارد.

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{8994 + 2p + 7824(X_{\text{Fe}}^{\text{Bi}} - X_{\text{Mg}}^{\text{Bi}})}{1 + 0.043R \ln kd} + \frac{-8.201X_{\text{Aliv}}^{\text{Bi}} + 3.1177X_{\text{Ti}}^{\text{Bi}} - 9.809(X_{\text{Fe}}^{\text{Hb}} - X_{\text{Mg}}^{\text{Hb}})}{1 + 0.043R \ln kd}$$

جدول ۵ تخمین دما و فشار دگرگونی نمونه‌های گارنت آمفیبولیت مورد بررسی به روش‌های مختلف دما-فشار سنجی. Gt-Hb: دماسنجی گارنت-هورنبلند [۲۳]، Hb-PL: دماسنجی هورنبلند-پلاژیوکلاز [۲۴]، Hb-Bi: دماسنجی هورنبلند-بیوتیت [۲۵]، Gt-Pl-Hb-Qz: فشارسنجی مجموعه گارنت-پلاژیوکلاز-هورنبلند-کوارتز [۲۶]، AmT و AmP به ترتیب دماسنجی و فشارسنجی بر اساس ترکیب آمفیبول [۲۷]، EGA: اپیدوت گارنت آمفیبولیت و BGA: بیوتیت گارنت آمفیبولیت. علامت (-) نشان می‌دهد که این روش برای این نمونه به کار نرفته است.

نمونه	T °C			P kb		
	Gt-Hb	Hb-PL ±۴۰ °C	AmT ±۳۷ °C	Hb-Bi ±۵۰ °C	Gt-Pl-Hb- Qz ±۱ kb	AmP ± ۱,۲ kb
EGA1a	-	۵۰۰	۴۸۶,۵	-	-	۴,۲
EGA1b	۵۴۲,۶	۵۴۴	۴۹۹,۸	-	۵,۰۷	۴,۲
EGA2a		۴۹۰	۵۱۴,۹	-	-	۴,۳
EGA2b	۵۲۵,۱	۵۱۸	۵۱۱,۹	-	۴,۸۰	۴,۱
BGA1a	-	۵۷۷	۵۵۰,۴	۵۴۴	-	۵,۰
BGA1b	۵۵۶,۱	۵۹۰	۵۵۳,۹	۵۴۲	۵,۳	۵,۱
BGA2a	-	۵۹۸	۵۴۴,۲	۵۴۷	-	۴,۹
BGA2b	۵۶۷,۱	۵۸۶	۵۴۲,۹	۵۴۳	۵,۵	۴,۷

می‌دادند. براساس این روش فشارسنجی، نمونه‌های اپیدوت‌دار در فشارهای ۴,۳ تا ۵ کیلو بار و نمونه‌های بیوتیت‌دار در فشارهای ۵,۳ تا ۵,۵ کیلو بار دگرگون شده‌اند (جدول ۵).

$$P(\text{kb}) = \frac{35327 + T(56.09 + 8.3144 \ln k)}{11.906} \quad \text{رابطه ۶}$$

که در این رابطه P برابر با فشار، T برابر با دما بر حسب کلوین و K ثابت واکنش بین کانی‌های به کار رفته در این روش بوده و با رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$K = \frac{(a_{\text{Grs}})^2 (a_{\text{Alm}})(a_{\text{Fe}} - T_{\text{sch}})^3 (a_{\text{Qtz}})^6}{(a_{\text{An}})^6 (a_{\text{Fe-Act}})^3} \quad \text{رابطه ۷}$$

که در این رابطه، a نشان دهنده‌ی فعالیت گروسولار، آلماندین، فروچرماکیت، کوارتز، آنورتیت و فرواکتینولیت در گارنت، پلاژیوکلاز و آمفیبول است.

دما-فشارسنجی براساس ترکیب آمفیبول

[۲۷] به صورت تجربی وابستگی آلومینیوم به فشار و سیلیسیم به دما را در آمفیبول‌های کلسیک موجود در مجموعه‌ی کانیایی آمفیبول + پلاژیوکلاز + کوارتز نشان دادند. این روش دما-فشارسنجی توسط [۲۷] اصلاح شد و می‌توان آنرا در گستره‌ی ترکیبی گسترده‌ای از آمفیبول‌های کلسیک به کار برد (روابط ۸ و ۹). نتایج حاصل از دماسنجی دماهای ۴۸۶ تا ۵۱۴ درجه‌ی

که در این رابطه T برابر با دما، P برابر با فشار بر حسب گیگاپاسکال، $X_{\text{Mg}}^{\text{Bi}}$ ، $X_{\text{Fe}}^{\text{Bi}}$ ، $X_{\text{Aliv}}^{\text{Bi}}$ به ترتیب برابر با مقدار آهن، منیزیم و آلومینیوم در ساختار بیوتیت، $X_{\text{Fe}}^{\text{Hb}}$ و $X_{\text{Mg}}^{\text{Hb}}$ به ترتیب برابر با مقدار آهن و منیزیم در ساختار هورنبلند، R نیز ثابت جهانی گازها برابر با ۸,۳۱۴ و K_d ضریب توزیع آهن و منیزیم بین هورنبلند و بیوتیت است و از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید.

$$K_d = \frac{X_{\text{Fe}}^{\text{Bi}}}{X_{\text{Mg}}^{\text{Bi}}} \times \frac{X_{\text{Mg}}^{\text{Hb}}}{X_{\text{Fe}}^{\text{Hb}}} \quad \text{رابطه ۵}$$

که در این رابطه $X_{\text{Fe}}^{\text{Bi}}$ و $X_{\text{Mg}}^{\text{Bi}}$ به ترتیب برابرند با مقدار آهن و منیزیم در بیوتیت و $X_{\text{Mg}}^{\text{Hb}}$ و $X_{\text{Fe}}^{\text{Hb}}$ به ترتیب برابر با مقدار منیزیم و آهن در هورنبلند هستند.

فشارسنجی گارنت-هورنبلند-پلاژیوکلاز-کوارتز

این روش فشار توسط [۲۶] به صورت تجربی کالیبره شده و برای نمونه‌های مورد بررسی به کار رفته است (جدول ۵). رابطه‌ی ۶ چگونگی محاسبه‌ی این روش را نشان می‌دهد. دماهای به دست آمده از روش هورنبلند-گارنت برای محاسبات به کار برده شده‌اند، دلیل این موضوع استفاده از ترکیب هورنبلند‌های به کار رفته در دماسنجی گارنت-هورنبلند در این روش فشارسنجی است. البته استفاده از این دماها نتایج مستدل تری نسبت به دماهای هورنبلند-پلاژیوکلاز نیز ارائه

باشد. نبود پیروکسن نیز نرسیدن به رخساره‌ی آمفیبولیت بالایی را مشخص می‌کند.

ترکیب شیمیایی کانی‌های دگرگون در پاسخ به تغییرات فشار و دما طی دگرگونی پیش و پس رونده تغییر می‌کند. محتوای بالاتر آلومینیوم، سدیم، پتاسیم و تیتانیوم آمفیبول‌های نمونه‌های بیوتیت‌دار و محتوای سیلیسیم کمتر آنها (جدول ۱) نشان می‌دهد که درجات بالاتری از دگرگونی را تحمل کرده‌اند [۳۰-۳۲]. افزایش محتوای آهن و منیزیم گارنت‌ها به سمت حاشیه نیز نشان می‌دهد که این کانی‌ها طی یک روند دگرگونی پیش‌رونده شکل گرفته‌اند و محتوای بالاتر آلوماندین و پیروپ گارنت‌های نمونه‌های بیوتیت‌دار نسبت به نمونه‌های اپیدوت‌دار نیز حاکی از تحمل درجات بالاتر دگرگونی توسط این کانی‌هاست [مانند ۳۳]. محتوای بالاتر آنورتیت پلاژیوکلازهای نمونه‌های بیوتیت‌دار نیز با دگرگون شدن در درجات بالاتر دما و فشار سازگاری دارد [۲۴، ۲۶]. بر اساس این برداشتها انتظار می‌رود که نتایج دما و فشارسنجی نیز درجات دگرگونی بالاتری را برای بیوتیت گارنت آمفیبولیت‌ها نشان دهند که این موضوع تا حدی در نتایج محاسبات دیده می‌شود (جدول ۴).

با توجه به میان لایه‌ای بودن گارنت آمفیبولیت‌های منطقه-ی همدان و نیز همشیب بودن آنها با سنگ‌های دربرگیرنده و شباهت بین جهت‌گیری کانی‌ها که نشان از ارتباط بین شرایط دگرگونی آنها دارد، می‌توان از سنگ‌های دربرگیرنده برای تایید مقادیر دما و فشارهای به دست آمده برای گارنت آمفیبولیت‌ها استفاده کرد. چنانکه پیش از این نیز به آن اشاره شد، همه‌ی نمونه‌های بیوتیت‌دار در لایه‌های آندالوزیت گارنت شیست (سیلیمانیت‌دار) قرار گرفته و نمونه‌های اپیدوت‌دار در گارنت استارولیت شیست‌ها رخداده‌اند. سنگ‌های دگرگونی منطقه‌ی همدان بارها مورد بررسی قرار گرفته‌اند و در برخی از آنها برآورد محاسباتی دما و فشارسنجی نیز صورت گرفته‌اند، ولی به دلیل عدم انجام آنالیزها در آزمایشگاه‌های معتبر، استفاده نکردن از نمونه‌های مناسب و پراکندگی زیاد نتایج به دست آمده، همه‌ی این نتایج قابل اعتماد نیستند. در یکی از بهترین این برآوردها، [۳] بر اساس مجموعه‌های کانیایی در تعادل، دمای ۶۲۸ درجه سانتیگراد و فشار ۴ کیلوبار را برای شرایط

سانتیگراد را برای نمونه‌های اپیدوت‌دار و ۵۴۲ تا ۵۵۳ درجه‌ی سانتیگراد برای نمونه‌های بیوتیت‌دار نشان می‌دهند. محاسبات فشارسنجی این روش نیز فشارهای ۴/۱ تا ۴/۴ کیلوبار را برای نمونه‌های اپیدوت‌دار و ۴/۷ تا ۵/۱ کیلوبار را برای نمونه‌های بیوتیت‌دار نشان می‌دهد. به طور کلی دماهای به دست آمده از این روش سازگاری بیشتری با روش‌های دماسنجی گارنت-هورنبلند و بیوتیت-هورنبلند دارد. فشارهای برآورد شده نیز پائین‌تر از فشارهای روش گارنت-هورنبلند-پلاژیوکلاز-کوارتز است، ولی در گستره‌ی خطای برآورد شده‌ی یکدیگر قرار می‌گیرند.

$$T(^{\circ}\text{K}) = \frac{(6119 - 28.4P + 114X_{\text{Hb}}^{\text{Mg}})}{8.181 - R \ln(8.489 - \text{Si}_{\text{Hb}})} \quad \text{رابطه ۸}$$

$$P(\text{kb}) = \frac{[2543 - 744.4T + 175X_{\text{Hb}}^{\text{Mg}} + RT \ln(\text{Al}_{\text{Hb}} + 433.1)]}{148.1} \quad \text{رابطه ۹}$$

که در این روابط T برابر با دما بر حسب کلین، P فشار بر حسب کیلوبار، $X_{\text{Hb}}^{\text{Mg}}$ ، Si_{Hb} و Al_{Hb} به ترتیب برابر با محتوای منیزیم، سیلیسیم و آلومینیوم هورنبلند هستند. R نیز ثابت جهانی گازها برابر با ۸،۳۱۴ است.

بحث و بررسی

مجموعه‌ی هورنبلند + پلاژیوکلاز مجموعه‌ای شاخص برای رخساره‌ی آمفیبولیت به حساب می‌آید که اپیدوت این مجموعه را در آمفیبولیت پائینی و پیروکسن آن را در آمفیبولیت بالایی همراهی می‌کنند. بیوتیت، از سوی دیگر، از اواسط رخساره‌ی شیست سبز ظاهر شده و تا رخساره‌ی آمفیبولیت بالایی پایدار می‌ماند [مانند ۲۸-۳۰]. بر این اساس، مجموعه کانیایی نسبتاً متفاوت گارنت آمفیبولیت‌های منطقه‌ی همدان نشان می‌دهند که آنها یا پیشینه دگرگونی متفاوتی داشته‌اند و یا سنگ مادرشان متفاوت از یکدیگر بوده است. مجموعه‌ی کانیایی نمونه‌های مورد بررسی شامل هورنبلند + پلاژیوکلاز + گارنت + اپیدوت مشابه با رخساره‌ی اپیدوت - آمفیبولیت تا آمفیبولیت پائین بوده و نبود اپیدوت در بیوتیت گارنت آمفیبولیت‌ها می‌تواند نشان‌دهنده‌ی گذر آنها از رخساره‌ی آمفیبولیت پائینی

بیشینه دگرگونی سنگ‌های آلومینوسیلیکات‌دار منطقه‌ی همدان برآورد کرده‌اند. [۲] نیز دما و فشار میانگین ۵۶۱ درجه-ی سانتیگراد و ۴/۷ کیلو بار را برای استارولیت شیست‌ها ارائه کرده است. علاوه بر این، تازه‌ترین بررسی روی این سنگ‌ها توسط [۳۴] صورت گرفت که دمای ۵۸۰ تا ۶۳۰ درجه‌ی سانتیگراد را به ترتیب برای سنگ‌های استارولیت-آندالوزیت‌دار و سیلیمانیت-آندالوزیت‌دار منطقه‌ی مورد بررسی برآورد کرده و پیشنهاد نموده‌اند که فشار هر دوی این سنگ‌ها در حدود ۴/۵ کیلو بار بوده و عامل اصلی گوناگونی کانی‌شناسی تغییرات دما است.

مقایسه‌ی این دماها و فشارها با مقادیر به دست آمده از روش‌های مختلف در این پژوهش نشان داد که دماهای به دست آمده با دماهای پیشنهاد شده کامبیش مشابه بوده و اختلافات عموماً در گستره‌ی خطاهای برآوردی روش‌ها قرار می‌گیرند که می‌توان آنها را یکسان فرض کرد. در واقع نمونه‌های بیوتیت‌دار که در سنگ‌های آندالوزیت و سیلیمانیت‌دار قرار گرفته‌اند دماهای بالاتری نسبت به نمونه‌های اپیدوت‌دار با سنگ میزبان استارولیت دار نشان می‌دهند.

در مورد فشار نیز اگرچه فشارهای روش گارنت-هورنبلند-پلاژیوکلاز-کوارتز بالاتر از مقادیر برآورد شده هستند، ولی بازم در گستره‌ی خطای برآوردی این روش قرار می‌گیرند. البته یادآوری این نکته لازم است که با توجه به رخداد تبدیل آندالوزیت به سیلیمانیت در فشارهای کمتر از ۵ کیلو بار [۲، ۳] و نیز در نظر گرفتن بررسی‌های پیشین، فشارهای بالاتر از ۵ کیلو بار از قطعیت کمتری برخوردارند. به هر روی فشارهای به دست آمده از روش ترکیب آمفیبول [۲۷] نزدیکی بیشتری با فشارهای پیشنهادی منطقه‌ی همدان دارد. این اختلاف می‌تواند به این علت باشد که مجموعه گارنت-هورنبلند-پلاژیوکلاز-کوارتز در مرحله‌ی نهایی دگرگونی به تعادل کامل دست نیافته‌اند. با توجه به اینکه دماهای به دست آمده از روش گارنت-هورنبلند با روش‌های دیگران سازگاری دارد، عدم تعادل می‌بایست بین پلاژیوکلاز و گارنت باشد که در محاسبات دما-فشارسنجی نمود می‌یابد. به هر حال گرچه نمونه‌های بیوتیت-دار در کل دما و فشار بالاتری نشان می‌دهند، ولی این اختلافات (به ویژه در مورد فشارهای برآوردی) خیلی زیاد نیست. همچنین حتی با فرض دما و فشار بالاتر نمونه‌های

بیوتیت‌دار باز هم این سوال مطرح می‌شود که چرا نمونه‌های اپیدوت‌دار با اینکه در درجات پائین‌تری دگرگون شده‌اند ولی دارای فازهای پتاسیم‌داری مانند موسکویت نیستند؟ از این رو باید عامل دیگری نیز در اختلافات آنها دخالت داشته باشد. با نگاهی دوباره به نتایج آنالیز ژئوشیمیایی این دو نوع گارنت آمفیبولیت، معلوم شد که اختلاف اصلی بین این دو نوع سنگ در محتوای K_2O بالای نمونه‌های بیوتیت‌دار و CaO بالاتر نمونه‌های اپیدوت‌دار است و در واقع نمونه‌های اپیدوت‌دار پتاسیم کافی برای تشکیل موسکویت نداشته‌اند. به عبارت دیگر سنگ مادر نمونه‌های بیوتیت‌دار دارای مقادیر بالای ناخالصی پتاسیم بوده (نه الزاماً کانی رسی) که سبب تشکیل بیوتیت شده است. قرارگیری این سنگ‌ها در سنگ میزبان‌های مختلف نیز می‌تواند گواهی بر تفاوت در شرایط تشکیل سنگ مادر آنها باشد. به هر روی، تفاوت در مقدار سدیم و پتاسیم تنها اختلاف چشمگیر ترکیب این سنگ‌ها به شمار می‌رود، زیرا تمامی واکنش‌های مصرف کننده موسکویت در مرز شیست سبز-آمفیبولیت سبب تولید بیوتیت می‌شوند و چنانچه نمونه‌های اپیدوت‌دار دارای موسکویت می‌بودند می‌بایستی در حد رخساره‌ی آمفیبولیت، بیوتیت در آنها شکل می‌گرفت که اینگونه نیست.

نتایج محاسبات دما و فشارسنجی نشان می‌دهند که دگرگونی نمونه‌های مورد بررسی در گرادیان زمین گرمایی ۳۸ تا ۴۰ درجه‌ی سانتیگراد به ازای هر کیلومتر رخ داده است. این مقادیر با مقادیر ارائه شده برای سری آندالوزیت-سیلیمانیت و یا به عبارتی دگرگونی نوع ابوکوما سازگاری دارد که در کمان‌های ماگمایی مناطق فرورانشی رایج است [۲۹، ۲۱]. با توجه به پیشینه زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد بررسی به عنوان یک کمان ماگمایی [مانند ۹]، رخداد این نوع دگرگونی دمای بالا-فشار پائین مورد انتظار است. به عقیده‌ی [۲]، رسوب‌های نهشته در منطقه‌ی همدان با گرادیان زمین گرمایی ۴۰ درجه‌ی سانتیگراد به ازای هر کیلومتر تا رخساره آمفیبولیت میانی دگرگون شده‌اند و سپس نفوذ ماگما به افق‌های بالاتر پوسته سبب بالارفتن این گرادیان تا ۴۹ درجه به ازای هر کیلومتر در این بخش‌ها و تبدیل کامل آندالوزیت به سیلیمانیت در شیست‌ها و تشکیل هورنفلس و میگماتیت در اطراف توده‌ی [۱] شده است. گرادیان زمین گرمایی گارنت آمفیبولیت‌های

مورد بررسی نیز مشابه با مرحله‌ی اول دگرگونی است که موجب دگرگونی آنها تا حد آمفیبولیت میانی شد، ولی کمتر تحت تاثیر گرمای حاصل از توده‌های نفوذی قرار گرفته‌اند که بافت و ساخت این سنگ‌ها نیز تا حدی این موضوع را آشکار نشان می‌دهد.

برداشت

در منطقه‌ی همدان دو نوع گارنت آمفیبولیت غنی از کوارتز با ترکیب کانی‌شناسی نسبتاً متفاوت حضور دارند که شامل اپیدوت گارنت آمفیبولیت و بیوتیت گارنت آمفیبولیت می‌شوند. فراوانی کوارتز و کمیابی پلاژیوکلاز همراه با مجموعه کانیایی آمفیبول + کوارتز + پلاژیوکلاز + گارنت ± بیوتیت ± فیبرولیت این سنگ‌ها شبیه پارامفیبولیت‌ها می‌سازد. از سوی دیگر، حضور اپیدوت، اسفن، غلبه گروسولار و آمفیبول‌های کلسیک نشان دهنده‌ی این است که سنگ مادر آنها دارای مقادیر بالای کلسیم بوده است. نتایج آنالیز ژئوشیمیایی این نمونه‌ها نیز خاستگاه سنگ مادر رسوبی آنها را تایید می‌کند و با توجه به محتوای عنصری آنها می‌توان یک مارن رسی غنی از سیلیس را به عنوان سنگ مادر آنها در نظر گرفت تا توجیه کننده‌ی حضور مقادیر فراوان کوارتز و فازهای غنی از کلسیم در این سنگ‌ها باشد.

مجموعه‌ی کانیایی گارنت + هورنبلند + کوارتز + پلاژیوکلاز + اپیدوت نمونه‌های اپیدوت‌دار نشان دهنده‌ی دگرگونی در حد رخساره‌ی آمفیبولیت پائین و مجموعه گارنت + بیوتیت + هورنبلند + کوارتز + پلاژیوکلاز برای نمونه‌های بیوتیت‌دار نماینده‌ی دگرگونی در حد رخساره آمفیبولیت میانی می‌باشد. محاسبات دماسنجی بر اساس روش‌های مختلف [۲۳-۲۷] دمای ۴۸۶ تا ۵۴۴ درجه‌ی سانتیگراد را برای نمونه‌های اپیدوت‌دار و ۵۴۲ تا ۵۹۸ درجه سانتیگراد را برای نمونه‌های بیوتیت‌دار نشان می‌دهند. بین دو روش فشارسنجی به کار رفته در مورد این نمونه‌ها، روش فشارسنجی بر اساس ترکیب آمفیبول [۲۷] نتایج مناسب‌تری ارائه داده و فشارهای ۴/۱ تا ۴/۳ کیلوپار را برای اپیدوت گارنت آمفیبولیت‌ها و ۴/۷ تا ۵/۱ کیلوپار را برای بیوتیت گارنت آمفیبولیت‌ها نشان می‌دهد. فشارهای بالای برآورد شده از روش گارنت - هورنبلند -

پلاژیوکلاز - کوارتز [۲۶] به دلیل عدم حصول تعادل بین کانی‌های این مجموعه است. تمامی نتایج به دست آمده از محاسبات دما-فشارسنجی نشان می‌دهند که بیوتیت گارنت آمفیبولیت‌ها دستخوش درجات بالاتری از دما و فشار در طی دگرگونی شده‌اند و اختلاف در دمای آنها بر اختلاف فشار غلبه دارد و باید آنرا عامل مهمتری در دگرگونی این سنگ‌ها دانست. به جز اختلاف در درجات دما و فشار دگرگونی، اختلاف در ترکیب کانی‌شناسی سنگ مادر این نمونه‌ها نیز در تعیین کانی‌شناسی نهایی آنها موثر بوده است و در واقع ناخالصی‌های بالای پتاسیم در سنگ مادر این نمونه‌ها سبب شکل‌گیری بیوتیت طی دگرگونی آنها شده است. به بیان دیگر، اپیدوت گارنت آمفیبولیت‌ها حتی اگر درجات بالاتر دگرگونی را تحمل می‌کردند نیز نمی‌توانستند در خود بیوتیت داشته باشند.

گرادیان زمین گرمایی میانگین ۴۰ درجه‌ی به ازای هر کیلومتر این گارنت آمفیبولیت‌ها نشان دهنده‌ی رخداد دگرگونی دمای بالا-فشار پائین آندالوزیت-سیلیمانیت یا ابوکوما داشته که با موقعیت زمین‌ساختی منطقه‌ی همدان و پهنه سندانج-سیرجان به عنوان یک پهنه فرورانشی سازگاری دارد.

قدردانی

نگارندگان مقاله از پروفیسور داگلاس هال به خاطر همکاری در آنالیزهای این پژوهش کمال قدردانی را دارند. همچنین از پروفیسور برنارد شولتز به دلیل راهنمایی‌های صمیمانه و آقای مهدی صمدی تکنیسین کارگاه تهیه‌ی مقطع نازک دانشگاه بوعلی سینا سپاسگزاری می‌کنند.

مراجع

- [1] Sepahi A. A., Whiteny D. L., Baharifar A. A., "Petrogenesis of andalusite-kyanite-sillimanite veins and host rocks, Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, Hamadan, Iran", *Journal of metamorphic geology* 22 (2004) 119-134.
- [۲] بهاری فر، ع.ا، "پترولوژی سنگ های دگرگونی منطقه همدان"، پایان نامه دکتری، دانشگاه تربیت معلم، (۱۳۸۳).
- [3] Mohajjel M., Baharifar A., Moinevaziri H., Nozaem R., "Deformation history, micro-structure and P-T-t path in ALS-bearing schists, southeast Hamadan, Sanandaj-Sirjan zone, Iran", *Journal of Geological Society of Iran* 1 (2006) 11-19.

- [13] Grew E., Locock A., Mikks S. J., Galuskina I. O., Galuskin E. V., Halenius U., "Nomenclature of the garnet supergroup", *American Mineralogist* 98 (2013) 785–811.
- [14] Deer W. A., Howie R. A., Zussman J., "Rock forming minerals: Tectosilicates", John Wiley & Sons, New York (1963).
- [15] Deer W. A., Howie R. A., Zussman J., "Rock-forming minerals: Micas", Longman, London (1982).
- [16] Franz G., Liebscher A., "Physical and Chemical Properties of the Epidote Minerals – An Introduction", *Reviews in Mineralogy & Geochemistry* 56 (2004) 1-82.
- [17] Walker K. R., Joplin G. A., Lovering J. F., Green R., "Metamorphic and metasomatic convergence of basic igneous rocks and lime magnesia sediments of the Precambrian of north-western Queensland", *Journal of Geology Society Australia*, 6 (1960) 149-178.
- [18] Barton M. D., Ilchik R. P., Marikos M. A., "Metasomatism", In: Kerrick D. M., (Ed) *Contact Metamorphism*, *Reviews in Mineralogy* 26 (1991) 321-350.
- [19] Winter J. D., "Principles of Igneous and Metamorphic Petrology", Prentice Hall, (2010).
- [20] Grapes R. H., Hoskin P. W. O., "Epidote group minerals in low-medium pressure metamorphic terranes", *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 56 (2004) 301-345.
- [21] Bucher K., Grapes R., "Petrogenesis of metamorphic rocks", Springer, Berlin (2011).
- [22] Fry N., "The field description of metamorphic rocks", *Geological society of London handbook*, London (1984).
- [23] Graham C., Powell R., "A garnet-hornblende geothermometer: calibration, testing, and application to the Pelona Schist, Southern California", *Journal of metamorphic geology* 2 (1984) 13-31.
- [24] Holland T. J. B., Blundy J., "Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry", *Contribution to Mineralogy and Petrology* 116 (1994) 433–447.
- [25] Wu C. M., Pan Y. S., Wang K. Y., Zhang J., "A report on a Biotite – calcic hornblende geothermometer", *Acta Geologica Sinica*, 76 (2002) 126 – 131
- [4] Mohajjel M., Fergusson C. L., Sahandi M. R., "Cretaceous–Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj–Sirjan Zone, western Iran", *Journal of Asian Earth Sciences* 21 (2003) 397–412.
- [5] Berberian M., Alavitehrani N., "Structural analysis of Hamadan Metamorphic Tectonites", In: Berberian M., (Ed.), "Contribution to the Seismotectonics of Iran (part 3)", Geological Survey of Iran, Tehran, (1977) pp. 239–260.
- [6] Berberian M., "Three phases of metamorphism in Haji-Abad quadrangle (southern extremity of the Sanandaj-Sirjan structural Zone): a palaeotectonic discussion", Geological Survey of Iran, Tehran, (1977).
- [7] Ghasemi A., Talbot C.J., "A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran)", *Journal of Asian Earth Sciences* 26 (2006) 683–693.
- [۸] اشراقی ص.ع.، جعفریان م.ب.، اقلیمی ب.، نقشه زمین-شناسی 1:100000 سنقر، سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۷۵).
- [9] Shahbazi H., Siebel W., Pourmoafee M., Ghorbani M., Sepahi A.A., Shang C.K., Vousoughi Abedini M., "Geochemistry and U–Pb zircon geochronology of the Alvand plutonic complex in Sanandaj–Sirjan Zone (Iran): New evidence for Jurassic magmatism", *Journal of Asian Earth Sciences*, 39 (2010) 668-683.
- [10] Vernon R.H., "A practical guide to rock microstructure", Cambridge University Press, New York (2004).
- [11] Whitney D. L., Evans B. W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", *American Mineralogist* 95 (2010) 185–187.
- [12] Leake B. E., Woolley A. R., Arps C. E. S., Birch W. D., Gilbert M. C., Grice J. D., Hawthorne F. C., Kato F. C., Kisch H. J., Krichovichev V. G., Linthout K., Laird J., Mandarino J. A., Maresch W. V., Nickel E. H., Rock N. M. S., Schumacher J. C., Smith D. C., Stephenson N. C. N., Ungaretti L., Whittaker E. J. W., Youzhi G., "Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names", *American Mineralogist* 82 (1997) 1019–1037.

- experimental phase relations. Mineralogical Society of America, Washington, D.C., (1982) 1–227.
- [32] Schumacher J. C., “*Metamorphic amphiboles: composition and coexistence*”, *Reviews in Mineralogy & Geochemistry* 67 (2007) 359–416.
- [33] Tracy R., Robinson P., Thompson A. B., “*Garnet composition and zoning in the determination of temperature and pressure of metamorphism, central Massachusetts*”, *American Mineralogist* 61 (1976) 762-775.
- [34] Monfaredi B., Hauzenberger C., Neubauer F, Shakerardakani F., Halama R., “*Quantitative determination of the prograde P-T path by garnet zonation pattern from the Buchan-type pelitic schists of the Hamadan crystalline basement, Sanandaj-Sirjan zone, western Iran*”, 17th European Geosciences Union conference, Vienna, Austria April, 12-17 (2015).
- [26] Kohn M. J., Spear F. S., “*Two new geobarometers for garnet amphibolites, with applications to southeastern Vermont*”, *American Mineralogist* 75 (1990) 89-96.
- [27] Zenk M., Schulz B., “*Zoned Ca-amphiboles and related P-T evolution in metabasites from the classical Barrovian metamorphic zones in Scotland*”, *Mineralogical Magazine* 68 (2004) 769-786.
- [28] Gerya T. V., Perchuk L. L., Triboulet C., Audren C., Sez’ko A. I., “*Petrology of the Tumanshet Zonal Metamorphic Complex, Eastern Sayan*”, *Petrology* 5 (1997) 503–533.
- [29] Miyashiro A., “*Metamorphism and metamorphic belts*”, Allen & Unwin, London, England, (1973).
- [30] Apted M., Liuo J. G., “*Phase relations among greenschist, epidote-amphibolite, and amphibolite in a basaltic system*”, *American Journal of science* 283 (1983) 328-354.
- [31] Robinson P., Spear F. S., Schumacher J., Laird J., Klein C., Evans B., Doolan B., “*Phase relations of metamorphic amphiboles: natural occurrence and theory*”, In: Veblen, D.R., Ribbe, P.H. (Eds.), *Amphiboles: Petrology and*