

## سنگ‌شناسی و دما فشارسنجی میکاشیست‌های خلیج (جنوب مشهد)

رامین صمدی<sup>۱\*</sup>، حسن میرزاد<sup>۲</sup>، علی‌اکبر بهاری‌فر<sup>۳</sup> و سید جمال شیخ‌ذکریایی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دکتر، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

<sup>۲</sup>دانشیار، پردیس علوم، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup>استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران

<sup>۴</sup>استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۳/۰۳

### چکیده

در شمال باختری منطقه خلیج واقع در جنوب مشهد، واحدهای دگرگونی فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست و استارولیت گارنت میکاشیست در امتداد جنوب خاوری تا شمال باختری و به موازات مجموعه دگرگونی کوه معجونی رخنمون دارند. کانی‌شناسی این دو واحد دگرگونی مشابه بوده و دارای کوارتز، بیوتیت، استارولیت، آلماندین، مسکوویت، زیرکن و ایلمنیت هستند؛ افزون بر این، فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست دارای فیبرولیت و استارولیت گارنت میکاشیست دارای کلریت و تورمالین است. نتایج فشارسنج GBMAQ و دماسنج گارنت - بیوتیت بیانگر دماهای ۵۶۰ و ۶۰۵ درجه سانتی‌گراد برای فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست در فشار ۳/۵ و ۵ کیلوبار و دمای ۴۸۹ و ۵۴۷ درجه سانتی‌گراد (در محدوده فشار ۳/۵ تا ۵ کیلوبار) برای استارولیت گارنت میکاشیست است. روند افزایش دما و فشار در هنگام رشد گارنت بیانگر تأثیر رخداد دگرگونی ناحیه‌ای و حرارتی بر تشکیل این سنگ‌ها است. بر اساس بررسی و مقایسه مجموعه‌های کانی‌شناسی در سیستم KFMASH، درجه دگرگونی ناحیه‌ای در حد اوایل رخساره آمفیبولیت (در استارولیت گارنت میکاشیست) تا رخساره آمفیبولیت میانی (در فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست) است. نفوذ توده گرانیتوئیدی خلیج و انتشار حرارتی آن موجب افزایش دمای دگرگونی به اوایل رخساره آمفیبولیت (در استارولیت گارنت میکاشیست) و رخساره آمفیبولیت میانی (در فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست) و در نتیجه پایداری و تشکیل فیبرولیت در نمونه‌های نزدیک‌تر به توده (فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست) شده است.

**کلیدواژه‌ها:** شیمی کانی، دماسنجی، فشارسنجی، متاپلیت، خلیج، مشهد.

**\*نویسنده مسئول:** رامین صمدی

E-mail: rsamadi@hotmail.com

### ۱- پیش‌نوشتار

که به عنوان فیلیت‌های مشهد شناخته می‌شوند. دگرگونی ناحیه‌ای رسوبات فلیشی تریاس موجب تشکیل میکاشیست، گارنت شیست، استارولیت گارنت شیست و آمفیبولیت به همراه آهک و ماسه‌سنگ دگرگون شده است (Alavi, 1991). بر اساس مطالعات (Razavi et al., 2008)، در نزدیکی روستای خلیج، زون‌های این دگرگونی عبارت‌اند: از (۱) زون بیوتیت؛ این زون با ظهور بیوتیت در متاپلیت‌ها مشخص می‌شود و شامل مجموعه کانی‌های کلریت + بیوتیت + مسکوویت + کوارتز ± اکسیدهای آهن ± کلسیت است؛ (۲) زون گارنت؛ این زون در جنوب‌خاوری MMC دیده می‌شود و غنی از گارنت آلماندین است. کانی‌شناسی این زون از میکاشیست‌های زون بیوتیت متفاوت بوده و شیب‌توزیته مشخص‌تری دارد. این زون به وسیله مجموعه کانی‌های گارنت + بیوتیت + مسکوویت + کوارتز ± کلریت قابل تشخیص است و (۳) زون استارولیت؛ این زون که بیانگر بالاترین درجه دگرگونی در منطقه است در ناحیه خلیج تشخیص داده می‌شود. این زون شامل مجموعه کانی‌شناسی استارولیت + بیوتیت + مسکوویت + کوارتز ± گارنت است.

در نوشتار حاضر سنگ‌شناسی واحدهای فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست و استارولیت گارنت میکاشیست‌های کوه معجونی واقع در شمال باختری منطقه خلیج توصیف و بر اساس کانی‌شناسی و ترکیب عناصر اصلی کانی‌ها به دماسنجی واحدهای سنگی پرداخته شده و به‌طور ویژه، گارنت موجود در این سنگ‌ها از نظر ترکیب عناصر اصلی در بخش حاشیه و مرکز بلور مطالعه شده است.

### ۲- روش مطالعه

ترکیب شیمیایی کانی‌های مورد مطالعه توسط مؤسسه مطالعه تحولات کره زمین، بخش علوم و فناوری زمین - دریا (IFREE)، در کشور ژاپن، با استفاده از ریزپردازنده JEOL مدل JXA-8500F و JXA-8800 (WDS) با اختلاف پتانسیل الکتریکی ۱۵ kV و ۱۵ nA و در دانشگاه کیپ‌تاون با استفاده از ریزپردازنده مدل

منطقه خلیج در حدود ۵ کیلومتری جنوب باختری مشهد، در ناحیه‌ای حد فاصل میان کوه‌های بینالود و هزار مسجد، در محدوده‌ای به طول‌های جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۳۷ دقیقه خاوری و عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۸ دقیقه شمالی و در اطراف کوه معجونی واقع شده و نام آن برگرفته از نام روستای خلیج است. منطقه مورد مطالعه از نظر سنگ‌شناسی شامل انواع سنگ‌های آذرین و دگرگونی است (شکل ۱).

در بخش‌های خاور و جنوب خاوری منطقه مونزوگرنیت‌های خواجه‌مراد و ده‌غیبی رخنمون دارند. داده‌های سن‌سنجی به روش اورانیم - سرب بیانگر سن اواخر نورین در تریاس پسین (۱۹۹ تا ۲۰۵ میلیون سال پیش) برای این مونزوگرنیت‌هاست (Mirnejad et al., 2013). مجموعه دگرگونی مشهد (MMC=Metamorphic Mashhad Complex) با روند شمال باختری - جنوب خاوری، در زون جوش‌خورده با ورقه توران، در شمال و شمال خاوری بلوک ایران قرار دارد و از سنگ‌های دگرگون شده در پرمین و تریاس تشکیل شده است. سنگ‌شناسی و طبقه‌بندی سنگ‌های دگرگونی منطقه خلیج و توده نفوذی پیرامون آن، تخمین دمای منطقه‌ای و تعیین حدود رخساره‌های دگرگونی، دو مرحله دگرگونی ناحیه‌ای و یک مرحله دگرگونی حرارتی حاصل از نفوذ توده گرانیتوئیدی را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد (صمدی، ۱۳۹۲). بر اساس مطالعات (Razavi et al., 2008)، سنگ‌های دگرگونی پرمین موجود در این مجموعه عبارت‌اند: از (۱) سنگ‌های مافیک و اولترامافیک شامل متاهارزبورگیت، متالزولیت، سرپانتینیت، متاگابرو و کمی متابازالت؛ (۲) متابازالت‌های اسپیلیتی شده با ساختار گدازه بالشی؛ (۳) آهک با تبلور دوباره با آثاری از فسیل‌های پرمین؛ (۴) ماسه‌سنگ‌های دگرگون شده و (۵) مجموعه‌ای از فیلیت، اسلیت، مرمرشیست‌ها، متاکنگلومراها و متاتوف‌ها. سنگ‌های دگرگونی تریاس شامل متاپلیت‌های درجه پایین تا متوسطی هستند

JEOL Superprobe با اختلاف پتانسیل الکترونیکی ۱۵ kV و ۱۵ nA مورد آنالیز نقطه‌ای قرار گرفت و سپس تصحیحات استاندارد بر روی داده‌ها انجام شد.

### ۳- بحث و بررسی ۳-۱- سنگ‌نگاری

بر اساس ترکیب مودال، نمونه‌های مورد مطالعه عبارت‌اند از فیرولیت گارنت استارولیت میکاشیست و استارولیت گارنت میکاشیست که به ترتیب در امتداد جنوب خاوری تا شمال باختری کوه معجون در شمال باختری منطقه خلج و در امتداد مجموعه دگرگونی مشهد برداشت شده‌اند.

**۳-۱-۱- فیرولیت گارنت استارولیت میکاشیست:** بافت کلی سنگ پورفیرولیدوبلاستی است. کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ شامل کوارتز، مسکوویت، بیوتیت، گارنت، استارولیت، فیرولیت، ایلمنیت و زیرکن هستند. زمینه بسیار دانه‌ریز و متشکل از کوارتزهای نیمه‌شکل‌دار و خرد شده با اندازه تقریباً ۶۰ تا ۷۰ میکرون و میکا (بیوتیت و مسکوویت) است. جهت‌یابی ترجیحی کانی‌ها سبب شیستوزیته سنگ شده و تا حدودی کوارتزها در امتداد این شیستوزیته کشیدگی نشان داده‌اند. بیوتیت‌ها در اندازه تقریبی یک میلی‌متر یا کمتر در فضای بین آنها پراکنده هستند که موجب ایجاد بافت لپیدوبلاستی در سنگ شده‌اند. بیوتیت‌ها دارای ادخال‌های فراوان زیرکن با هاله پلئوکرویک هستند. پورفیروبلاست‌ها شامل گارنت و استارولیت هستند. شکل و شیستوزیته کانی‌های میکایی تحت تأثیر شکل پورفیروبلاست‌ها قرار گرفته است. گارنت‌ها با فراوانی کمتری نسبت به استارولیت و به صورت پورفیروبلاست‌های شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با قطر ۱ تا ۴ میلی‌متر بوده و به صورت پراکنده دارای ادخال‌های عمدتاً کوارتز هستند. تبلور گارنت‌ها به صورت پس از زمین‌ساخت بوده زیرا فابریک بیرونی اطراف پورفیروبلاست گارنت منحرف نبوده و سایه‌فشاری نیز تشکیل نشده است و شکستگی‌های درونی گارنت نیز عمدتاً به صورت عمود بر شیستوزیته سنگ قرار دارند (شکل‌های ۲-۱ تا ۲-۳). استارولیت هم با فراوانی کمتری نسبت به گارنت و به صورت پورفیروبلاست‌هایی با ابعاد ۱ تا ۳ میلی‌متر دیده می‌شود. استارولیت‌ها غالباً پس از زمین‌ساخت بوده و بر شکل و حالت کانی‌های میکایی اطراف تأثیر نگذاشته‌اند؛ اما در اطراف برخی از آنها، جهت‌گیری کانی‌های میکایی اندکی تحت تأثیر شکل پورفیر قرار گرفته (شکل ۲-۲) که بیانگر تبلور آنها به‌طور همزمان تا پس از زمین‌ساخت است. در برخی نمونه‌ها که در فاصله نزدیک‌تری نسبت به توده نفوذی مونوزوگرانیته منطقه قرار دارند، فیرولیت به رنگ قهوه‌ای و در امتداد جهت‌یافتگی دیگر کانی‌ها در اطراف پورفیروبلاست‌های گارنت و استارولیت با فراوانی نسبتاً بالا (بیشتر از ۵ درصد حجمی) تشکیل شده است. از این‌رو، این گروه از میکاشیست‌ها را می‌توان فیرولیت گارنت استارولیت میکاشیست نامید. ادخال‌هایی از ایلمنیت به صورت تیغه‌های کوچک مستطیل‌شکل و گاه نیمه‌شکل‌دار در تمام مقاطع و کانی‌ها (گارنت، استارولیت و زمینه کوارتز - میکایی)، به صورت بافت پویی کیلوبلاستیک، پراکنده است (شکل‌های ۲-۲ و ۲-۳).

**۳-۱-۲- استارولیت گارنت میکاشیست:** این سنگ‌ها در نمونه دستی دارای شیستوزیته بوده و در زیر میکروسکوپ با توجه به وجود کانی‌های میکایی با جهت‌یافتگی نسبی دارای بافت پورفیرولیدوبلاستی است. زمینه سنگ دانه‌ریز (اندازه بلورها تقریباً ۱۰۰ میکرون) و شامل مجموعه‌ای از ریزبلورهای نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل مسکوویت، بیوتیت، تورمالین، کلریت، کوارتز و ایلمنیت است که پورفیروبلاست‌های درشت‌بلور گارنت و به مقدار کمتر استارولیت در آن قرار دارند (شکل‌های ۳-۱ و ۳-۲). بیوتیت‌ها که در اندازه تقریبی یک میلی‌متر یا کمتر در فضای بین آنها پراکنده‌اند دارای جهت‌گیری نسبی و دارای ادخال‌های زیرکن با هاله پلئوکرویک هستند. شکل و شیستوزیته کانی‌های میکایی تحت تأثیر شکل پورفیروبلاست‌های گارنت قرار گرفته است (شکل‌های ۳-۳ و ۳-۴). افزون بر بیوتیت،

مسکوویت نیز به مقدار کمتر در سنگ وجود دارد (شکل‌های ۳-۳ و ۳-۴). گارنت‌ها به صورت پورفیروبلاست‌هایی نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار با قطر نزدیک به یک میلی‌متر بوده و ادخال‌های کمی دارند. گارنت‌ها در پوششی از بیوتیت‌ها قرار گرفته‌اند و با توجه به تأثیر آنها بر شکل میکاها، پیش از زمین‌ساخت هستند، اما در برخی از آنها می‌توان سایه‌های فشاری به صورت فابریک S یا اشکال زیگموئیدال را مشاهده کرد که نشانه تأثیر نیروهای برشی و تشکیل پورفیروبلاست به صورت همزمان با زمین‌ساخت است (شکل ۳-۳). استارولیت هم با فراوانی کمتری نسبت به گارنت و به صورت پورفیروبلاست‌های شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار، با ابعاد یک تا سه میلی‌متر، دیده می‌شود (شکل ۳-۳ و ۳-۴). وجود مقادیر اندکی بلورهای ریز و نیمه‌شکل‌دار تورمالین بیانگر وجود عناصری مانند بور و عملکرد سیالات در هنگام دگرگونی است (شکل‌های ۳-۳ و ۳-۴). ایلمنیت به صورت تیغه‌های کوچک مستطیل‌شکل و گاه بی‌شکل در درون گارنت، استارولیت و زمینه کوارتز - میکایی به صورت پراکنده دیده می‌شود (شکل‌های ۳-۳، ۳-۴ و ۳-۵). در شکل ۳-۳ مشاهده می‌شود که ادخال ایلمنیت درون گارنت با شیستوزیته سنگ تقریباً هم‌جهت است.

### ۳-۲- شیمی کانی‌ها

نتایج آنالیز ریزکاوش الکترونی بر روی کانی‌های بیوتیت، مسکوویت، استارولیت، گارنت و ایلمنیت در جدول‌های ۱ تا ۴ آورده شده است. در ادامه به بررسی و مقایسه ترکیب این کانی‌ها در دو واحد سنگی فیرولیت گارنت استارولیت میکاشیست و استارولیت گارنت میکاشیست پرداخته می‌شود.

**۳-۲-۱- میکا:** با توجه به طبقه‌بندی (Deer et al. 1992) و محاسبه فرمول ساختاری بر اساس  $22 \text{ atm}$  اکسیژن، بیوتیت‌ها دارای  $\text{Al}^{\text{IV}}=2.68-2.88$  و  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})=0.51-0.66$  بوده و همگی از نوع آئیت هستند. همچنین، بیوتیت موجود در فیرولیت گارنت استارولیت میکاشیست نسبت به استارولیت گارنت میکاشیست دارای میزان آهن و تیتانیوم بیشتر و منیزیم کمتر است (جدول ۱). در نمونه فیرولیت گارنت استارولیت میکاشیست، میکای سفید دارای  $\text{Fe}\#$  برابر  $0/6$  تا  $0/7$  و  $X_{\text{Mg}}$  در حدود  $0/02$  است.

**۳-۲-۲- استارولیت:** فرمول ساختاری استارولیت بر اساس  $48 \text{ atm}$  اکسیژن محاسبه شده است (جدول ۲). استارولیت در نمونه فیرولیت گارنت استارولیت میکاشیست دارای آلومینیم، منگنز و منیزیم کمتر و آهن بالاتری نسبت به نمونه استارولیت گارنت میکاشیست است. افزون بر درجه دگرگونی، مقدار بالاتر محتوای آهن در سنگ مادر با پایداری و تشکیل استارولیت در فیرولیت گارنت استارولیت میکاشیست مرتبط است. با افزایش پایداری استارولیت از استارولیت گارنت میکاشیست به سوی فیرولیت گارنت استارولیت میکاشیست مقدار منیزیم در استارولیت افزایش نسبی نشان می‌دهد.

**۳-۲-۳- گارنت:** ترکیب میانگین گارنت‌ها آلماندین (- اسپسارتین) با منطقه‌بندی شیمیایی بوده و در نمونه فیرولیت گارنت استارولیت میکاشیست  $\text{Alm}_{70.81-84.55} \text{Sps}_{4.50-20.15} \text{Grs}_{5.05-9.81} \text{Pyr}_{0.75-4.16}$  و در نمونه استارولیت گارنت میکاشیست به صورت  $\text{Alm}_{52.08-71.31} \text{Sps}_{10.89-28.40} \text{Grs}_{7.74-14.81} \text{Pyr}_{4.71-10.06}$  است (جدول ۳). بنابراین، گارنت درون فیرولیت گارنت استارولیت میکاشیست نسبت به استارولیت گارنت میکاشیست دارای مقدار آلماندین بیشتر و اسپسارتین، پیروپ و گروسولار کمتری است.

بر اساس داده‌های جدول ۳، ترکیب هسته و حاشیه بلورهای گارنت موجود در میکاشیست‌های منطقه خلج نشان می‌دهد که میزان درصد مولی آلماندین و پیروپ به سمت حاشیه افزایش می‌یابد و درصد مولی اسپسارتین و گروسولار در بخش‌های مرکزی گارنت بالاتر است. البته اختلاف ترکیبی هسته تا حاشیه گارنت در فیرولیت گارنت استارولیت میکاشیست به مراتب کمتر از استارولیت گارنت میکاشیست است (به‌ویژه از نظر میزان اسپسارتین، آلماندین و گروسولار) (شکل ۴). بر اساس (Harangi et al. 2001) و (Samadi et al. 2014)، این گارنت‌ها دارای مقدار CaO

پایین ( $wt\% \leq 4$ ) و مقادیر متغیری از MnO و با منشأ متاپلیتی هستند (شکل ۵). در شکل ۵، اگرچه در مقایسه با دیگر نمونه‌های خلج (و نیز ترکیب گارنت‌های دگرگونی درون متاپلیت‌ها، برگرفته از Harangi et al. (2001) و Samadi et al. (2014))، ترکیب هسته گارنت‌های درون استارولیت گارنت میکاشیست‌ها دارای CaO نسبتاً بالاتری ( $wt\% \geq 4$ ) است؛ اما میزان MnO آنها نیز به‌مراتب بالاتر است ( $wt\% 10-15$ ).

**ایلمنیت:** کانی کدر موجود در میکاشیست‌های مورد مطالعه دارای ترکیب ایلمنیت ( $FeTiO_3$ ) است. مقدار آهن نسبتاً بالاتر و منگنز کمتر ایلمنیت در نمونه فیروولیت گارنت استارولیت میکاشیست ( $wt\% FeO \sim 45/7 - 47/8$ ،  $wt\% MnO \sim 1/07$ ) نسبت به استارولیت گارنت میکاشیست ( $wt\% FeO \sim 47/4 - 44/5$ ،  $wt\% MnO \sim 1/52$ ) (جدول ۴) نشان‌دهنده مقدار کمتر آهن در سنگ مادر استارولیت گارنت میکاشیست است که بر پایداری و فراوانی استارولیت در گارنت استارولیت میکاشیست نیز مؤثر بوده است. ایلمنیت در این متاپلیت‌ها می‌تواند محصول دگرگونی در رخساره شست سبز باشد.

**تورمالین:** در منطقه خلج، از حضور بلورهای ریز و فراوان تورمالین در نمونه استارولیت گارنت میکاشیست و نبود آن در نمونه‌های دارای نسبت استارولیت به گارنت بالاتر (یعنی فیروولیت گارنت استارولیت میکاشیست) می‌توان به عنوان یک کانی کلیدی در تفکیک ترکیب شیمی سنگ کل دو واحد سنگی استفاده کرد. طبق تحقیقات پژوهشگران، گستره پایداری تورمالین افزون بر دما به عوامل دیگری مانند وجود عناصر لازم برای تشکیل تورمالین در رسوبات اولیه (مانند بور، آهن، منیزیم، فلور و فسفر)، فعالیت آلومینیم و آب نیز بستگی دارد که البته نقش بور و آلومینیم از همه مهم‌تر است (Wolf & London, 1997). در حقیقت، با توجه به فاصله این سنگ‌ها تا توده نفوذی خلج، می‌توان گفت تشکیل تورمالین در میکاشیست‌های خلج بیشتر از آنکه به دما و آب‌گون‌های مرتبط با توده نفوذی مرتبط باشد، به شیمی رسوبات اولیه و ترکیب محلی سنگ‌ها وابسته بوده است.

### ۳-۳. شرایط دما و فشار

**کاربرد زمین‌دماسنج گارنت - بیوتیت:** روش دماسنجی گارنت - بیوتیت در طی ۴۰ سال گذشته با ارائه بیش از ۳۰ معادله در حال گسترش بوده است. میزان تبادل آهن و منیزیم بین گارنت و بیوتیت هم‌زیست، به دمای تعادل بستگی دارد. به دلیل حضور این زوج کانی در درجات گوناگون، از تبادل آهن و منیزیم به عنوان یک دماسنج، کاربرد بسیار گسترده‌ای در مطالعات سنگ‌شناسی شده است (صمدی و شیردشت‌زاده، ۱۳۸۹). برای محاسبه دمای دگرگونی با روش گارنت - بیوتیت، فرمول محاسباتی متنوعی توسط پژوهشگران ارائه شده است (Bhattacharya et al., 1992; Dasgupta et al., 1991; Ferry & Spear, 1987; Hodges & Spear, 1982; Perchuk & Lavrenteva, 1983; Thompson, 1976; Holdaway & Lee, 1977; Holdaway, 2000). بر اساس پیشنهاد (Wu & Cheng (2006) کالیبراسیون (1983) Perchuk & Lavrenteva و (2000) Holdaway از بهترین کالیبراسیون‌های دماسنج گارنت - بیوتیت برای متاپلیت‌ها هستند که دارای کمترین خطا و انحراف از معیار هستند. در روش (2000) Holdaway مقدار مناسب  $Al^{VI}$  بیوتیت برابر  $1/2$  در نظر گرفته شده است. بررسی داده‌های بیوتیت میکاشیست‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که مقدار  $Al^{VI}$  بیوتیت‌ها کمتر از  $1/2$  است (جدول ۱)، از این رو از روش (2000) Holdaway برای این سنگ‌ها صرف‌نظر می‌شود؛ اما در روش (1983) Perchuk & Lavrenteva مقدار  $Al^{VI}$  برابر با  $(Al-1)/2$  در نظر گرفته شده است که با داده‌های موجود از متاپلیت‌های مورد مطالعه تطابق بیشتری نشان می‌دهد. از این رو، از میان دماسنج‌های مختلف (جدول ۵)، تنها از روش (1983) Perchuk & Lavrenteva برای بررسی شرایط دمای دگرگونی متاپلیت‌های منطقه استفاده می‌شود. نتایج به‌دست آمده از این روش به‌طور میانگین ۱۵ درجه سانتی‌گراد کمتر از نتایج حاصل از روش (2000) Holdaway هستند. البته بر اساس (2006) Wu & Cheng، در این روش دما معمولاً در حدود ۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر از نتایج به‌دست آمده از روش‌های دیگر است. در این محاسبات از ترکیب میانگین در هسته و در حاشیه بیوتیت و گارنت هر واحد سنگی استفاده شد (جدول ۵). نتایج دماسنجی به روش (1983) Perchuk & Lavrenteva و دمای تعادلی برای تبادل آهن و منیزیم بین ترکیب میانگین گارنت و بیوتیت (در فشار  $3/5$  و  $5$  کیلوپار، بر اساس فشارسنج GBMAQ)، بیانگر دمایی در حدود ۵۶۰ درجه سانتی‌گراد برای هسته گارنت و در حدود ۶۰۵ درجه سانتی‌گراد برای حاشیه گارنت

از توزیع عناصر بین زوج کانی‌های دارای تعادل کانی‌شناسی و ترمودینامیک می‌توان به عنوان ابزاری برای دمافشارسنجی و همچنین معیاری برای اندازه‌گیری میزان تعادل شیمیایی در هنگام تشکیل سنگ استفاده کرد. بسیاری از جنبه‌های توزیع عناصر بین گارنت و زوج کانی دیگر توسط پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است که در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره می‌شود. در این سیستم‌ها اساس دمافشارسنجی نسبت توزیع کاتیون‌ها، به‌ویژه آهن و منیزیم در زوج کانی‌هایی است که تعادل کانی‌شناسی و ترمودینامیکی دارند. به دلیل اینکه نسبت توزیع تابعی از دما است، بنابراین با اندازه‌گیری مقدار کاتیون‌ها در زوج کانی‌ها و با استفاده از کالیبراسیون‌های مربوطه می‌توان دمای تشکیل سنگ را مورد مطالعه قرار داد. همچنین، بررسی ترکیب شیمیایی گارنت و پیدایش و حذف برخی کانی‌های دیگر مانند استارولیت، فیروولیت و کلریت، می‌تواند در تخمین شرایط فشار و دما و رخساره دگرگونی میکاشیست‌ها تعیین‌کننده باشد. البته بر اساس مطالعات (1998) Jiang et al.، تورمالین در همه درجات دگرگونی، یعنی دمای بالاتر از ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد تا دمای دگرگونی رخساره آمفیبولیت و در نهایت گرانولیت پایدار است. بنابراین بررسی تشکیل یا حذف آن از مجموعه کانی‌شناسی سنگ‌های مورد مطالعه کمک‌چندانی به ارزیابی شرایط دمایی دگرگونی این سنگ‌ها نمی‌کند.

در ادامه پدیده توالی پیدایش و حذف کانی‌ها در نمونه‌های مورد مطالعه در سیستم شش‌متشکل KFMASH شامل  $K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$  بررسی شده و با توجه به نتایج حاصل از دمافشارسنجی، رخساره دگرگونی سنگ‌ها مشخص می‌شود. کوارتز و آب فازهای اضافی این سیستم هستند.

**زمین فشارسنج گارنت - بیوتیت - مسکوویت - آلومینوسیلیکات - کوارتز:** فشارسنج گارنت - بیوتیت - مسکوویت - آلومینوسیلیکات - کوارتز یا GBMAQ

داده است؛ اما علت افزایش دما از هسته تا حاشیه گارنت‌ها، ناشی از نفوذ توده گرانیتوئیدی خلج به عنوان یک رویداد تأخیری و پس از دگرگونی ناحیه‌ای بوده است که به صورت سیستمی، هدایت دمایی آن تا فواصلی موجب ایجاد تبادلات منیزیم و آهن بین گارنت و بیوتیت‌های درون متاپلیت‌ها شده است. البته شدت تأثیر و نفوذ این تبادلات در گارنت درون فیروولیت گارنت استارولیت میکاشیست‌ها بیشتر بوده است. تأثیرات حرارتی نفوذ توده گرانیتوئیدی بر متاپلیت‌ها را می‌توان به صورت کاهش دما از سمت حاشیه به سوی هسته گارنت‌های درون آنها مشاهده کرد؛ اما با توجه به اینکه فیروولیت گارنت استارولیت میکاشیست در فاصله نزدیک‌تری نسبت به توده نفوذی قرار داشته است، تأثیرات دمایی و شدت و نفوذ بالاتر آن، تغییرات شیمیایی هسته تا حاشیه گارنت‌ها را بیشتر یکنواخت کرده است؛ بنابراین اختلاف دمایی به‌دست آمده برای هسته تا حاشیه این گارنت‌ها کمتر است (در حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد)؛ اما در مورد استارولیت گارنت میکاشیست‌ها که در فاصله نسبتاً دورتری نسبت به توده نفوذی قرار داشته‌اند، شدت و ضریب نفوذ تأثیرات دمایی به درون بخش‌های درونی‌تر گارنت به تدریج کاهش یافته و در نتیجه اختلاف دمایی ثبت شده در هسته و حاشیه گارنت‌ها تا حدودی بیشتر است (در حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد). بر اساس مطالعه شیمی گارنت، دمایی دگرگونی ناحیه‌ای مولد این سنگ‌ها دارای دمایی کمتری (در حدود ۴۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد) نسبت به دمایی دگرگونی حرارتی پس از آن بوده است. به این ترتیب می‌توان گفت دما و فشار دگرگونی ناحیه‌ای در حدود ۴۸۹ تا ۵۶۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۳/۵ تا ۵ کیلو بار متغیر بوده که معادل با اوایل رخساره آمفیبولیت است؛ اما رویداد همزمان دگرگونی حرارتی دما را به ۵۴۷ تا ۶۰۵ درجه سانتی‌گراد (رخساره آمفیبولیت میانی) افزایش داده است.

**شرایط دگرگونی ناحیه‌ای بر اساس سیستم شیمی متسکله KFMASH:** در این بخش مجموعه کانی‌ها و پدیده‌های توالی پیدایش و حذف کانی‌هایی مانند استارولیت، گارنت و بیوتیت در نمونه‌های مورد مطالعه بر اساس نمودار pseudosection دما - فشار در سیستم KFMASH بررسی شده است. این نمودار بر اساس شیمی سنگ کل نمونه استارولیت گارنت میکاشیست خلج (داده‌ها برگرفته از صمدی، ۱۳۹۲)، با کمک نرم‌افزار PerpleX و در محدوده دمایی ۳۰۰ تا ۸۰۰ و فشار ۱ تا ۵ کیلو بار رسم شده است. کوارتز و آب فازهای اضافی این سیستم هستند.

بر اساس Kretz (1959)، دمایی تشکیل بیوتیت از حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد شروع شده و تا دماهای بالا (در حدود ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) پایدار است. در نمودار دما - فشار رسم شده (شکل ۶) نیز پایداری بیوتیت تا بیش از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز امکان‌پذیر است. البته با توجه به گستردگی محدوده پایداری گارنت و اختلاف دمایی اندک دو واحد سنگی یادشده، ترکیب بیوتیت آنها (آنتیت) به هم شباهت بسیاری دارد. همچنین، با افزایش شرایط دمایی از میزان  $(MgSiAl_3Al_2)Tschermak$  در ساختار مولکولی میکای سفید پتاسیم‌دار کاسته شده و ترکیب میکاها (از سمت فنجیت) به عضو انتهایی مسکوویت‌دار نزدیک‌تر می‌شود (Bucher & Frey, 2002). در نمودار دما - فشار (شکل ۶)، نتایج دما فشارسنجی متاپلیت‌های مورد مطالعه در محدوده پایداری مسکوویت قرار دارند. البته مقدار بالاتر مودال میکای سفید درون فیروولیت گارنت استارولیت میکاشیست خلج و میزان چرماک بالای آن (میکای سفید از نوع مسکوویت است) نشان‌دهنده شرایط دمایی بالاتر فیروولیت گارنت استارولیت میکاشیست است. البته افزون بر دما، میزان کم pH (میزان بالای  $H^+$ ) و مقدار بالای  $fH_2O$  محیط در هنگام دگرگونی می‌تواند محدوده پایداری مسکوویت (و آلومینوسیلیکات‌ها) را افزایش دهد (Kornprobst, 2002). همچنین، با توجه به بالاترین محدوده دما - فشار پایداری کلریت در ترکیب سنگی مورد مطالعه (۴۷۵ تا ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد، شکل ۶)، وجود بقایایی از کلریت در استارولیت گارنت میکاشیست قابل توجه است.

در نمودار دما - فشار (شکل ۶)، تشکیل گارنت برای نخستین بار در رخساره

درون فیروولیت گارنت استارولیت میکاشیست است (جدول ۵). با توجه به فاصله مکانی نسبتاً کم، دما برای نمونه استارولیت گارنت میکاشیست نیز در محدوده فشاری ۳/۵ تا ۵ کیلو بار محاسبه شد و بر این اساس، دمایی تعادلی به‌دست آمده برای استارولیت گارنت میکاشیست، در حدود ۴۸۹ (~۴۸۷ تا ۴۹۰) درجه سانتی‌گراد برای هسته گارنت و در حدود ۵۴۷ (~۵۴۵ تا ۵۴۹) درجه سانتی‌گراد برای حاشیه گارنت است (جدول ۵). بنابراین، دمایی تبلور هسته و نیز دمایی تبلور حاشیه گارنت نیز گویای دمایی بالاتر دگرگونی فیروولیت گارنت استارولیت میکاشیست (نسبت به استارولیت گارنت میکاشیست) است. البته اختلاف دمایی به‌دست آمده برای هسته و حاشیه گارنت در فیروولیت گارنت استارولیت میکاشیست در حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد و در استارولیت گارنت میکاشیست در حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد است که این پدیده به دلیل اختلاف ترکیبی بیشتر هسته و حاشیه گارنت‌های درون فیروولیت گارنت استارولیت میکاشیست است (شکل ۴).

**تحولات دما - فشار:** با مطالعه ترکیب گارنت موجود در میکاشیست‌های خلج (جدول ۳) مشاهده می‌شود که گارنت موجود در آنها دارای میزان بالای  $Fe^{2+}$  و Mn و مقدار کمتر Mg و Ca است. بر اساس پیشنهاد (Green, 1977)، در گارنت ماگمایی سنگ‌های آذرین میزان اسپسارترین موجود نسبت به شرایط فشار و دما حساس است، به طوری که محتوای بالاتر Mn می‌تواند موجب پایداری گارنت در دماهای کمتر شود یعنی با کاهش دما میزان منگنز در گارنت در حال رشد، از هسته به حاشیه افزایش می‌یابد؛ اما در گارنت‌های دگرگونی درون متاپلیت‌ها با رشد بلور گارنت و کاهش دما، میزان منگنز در گارنت‌های دگرگونی کاهش می‌یابد (صمدی، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۲). در گارنت دگرگونی متاپلیت‌های مورد مطالعه نیز با توجه به روند کاهش منگنز از هسته به حاشیه گارنت‌ها (جدول ۳)، گارنت‌ها روند افزایش دما در هنگام رشد را در خود ثبت کرده‌اند. همچنین، بررسی نتایج به‌دست آمده از دماسنج گارنت - بیوتیت نیز افزایش دمایی دگرگونی از هسته به سوی حاشیه گارنت را نشان می‌دهد. افزون بر این، نتایج فشارسنجی نیز گویای افزایش فشار از هسته به حاشیه این گارنت‌ها است و بررسی تأثیر تغییرات منگنز بر روی کالیبراسیون به کار رفته نشان می‌دهد که در این کالیبراسیون، با کاهش منگنز، مقدار فشار افزایش می‌یابد. البته در بیشتر کالیبراسیون‌های مختلف روش دماسنجی گارنت - بیوتیت، تأثیر تغییرات منگنز ناچیز تا صفر در نظر گرفته شده است. تنها در کالیبراسیون‌های Bhattacharya et al. (1992) و Dasgupta et al. (1991) میزان منگنز بر میزان دمایی به‌دست آمده تا حدودی تأثیرگذار است و در این دو کالیبراسیون نیز همانند مطالعات صورت گرفته درباره گارنت ماگمایی سنگ‌های آذرین مانند (Green, 1977) و Samadi et al. (2014)، با کاهش میزان دمایی دگرگونی منگنز گارنت افزایش می‌یابد.

در حقیقت، افزون بر تغییرات دما و فشار، افزایش منگنز این گارنت‌ها مربوط به شیمی سنگ میزبان است. زیرا با توجه به اینکه گارنت یکی از کانی‌های عمده مصرف‌کننده منگنز در متاپلیت‌های مورد مطالعه است، تبلور گارنت می‌تواند به تدریج موجب کاهش محتوای منگنز سنگ میزبان شده و در نتیجه موجب روند کاهشی مقدار منگنز از هسته تا حاشیه گارنت شود. بنابراین، روند کاهش منگنز در گارنت‌های دگرگونی به دلیل کاهش دما یا فشار نیست بلکه متأثر از کاهش نسبی منگنز در ترکیب سنگ میزبان به دلیل تبلور گارنت است. بنابراین، با بررسی میزان منگنز در واحدهای سنگی مورد مطالعه می‌توان گفت میزان منگنز بالای این گارنت‌ها بر تبلور و پایداری آنها بسیار مؤثر بوده است، زیرا فراوانی نسبی مودال گارنت در نمونه استارولیت گارنت میکاشیست با میزان منگنز بالاتر این گارنت‌ها همخوانی نشان می‌دهد و از این رو می‌توان گفت که برخلاف تأثیر شرایط دما بر تبادلات منیزیم و آهن بین گارنت و بیوتیت هم‌زیست در متاپلیت‌های مورد مطالعه، میزان منگنز سنگ کل نقش مؤثرتری را در تبلور، رشد و هسته‌زایی گارنت نشان

می‌شود (Sassi et al., 2004). واکنش‌های آب‌زدایی که بیوتیت را تحت تأثیر قرار می‌دهند در تشکیل پلی‌مورف  $Al_2SiO_5$  در دمای بالا مؤثر هستند و در این حالت فیبرولیت به دلیل انرژی هسته‌زایی کمتر (نسبت به سیلیمانیت) تشکیل می‌شود (Sassi et al., 2004). برای این پدیده واکنش  $2K(Mg_xFe_{1-x})AlSi_3O_{10}(OH)_2 + 14HCl \rightarrow Al_2SiO_5 + 5SiO_2 + 2KCl + 6(Mg_xFe_{1-x})Cl_2 + 9H_2O$  توسط Kerrick (1987) ارائه شده است. در شکل ۶، شرایط دمایی به‌دست آمده از روش گارنت - بیوتیت برای حاشیه گارنت‌های درون فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست وارد محدوده تشکیل سیلیمانیت می‌شود. از این رو، تشکیل و یا پایداری فیبرولیت‌ها را می‌توان به شرایط دمایی حاصل از نفوذ توده گرانیتی نیز نسبت داد؛ اما با توجه به اینکه تشکیل فیبرولیت نیازمند شرایط فشار بالاتر از فشارهای منسوب به دگرگونی حرارتی است، می‌توان گفت در هنگام رخداد دگرگونی حرارتی شرایط فشار بالای دگرگونی ناحیه‌ای همچنان تداوم داشته است. به عبارت دیگر در اثر برخورد ورقه‌های قاره‌ای و رویداد دگرگونی ناحیه‌ای وسیع در منطقه؛ تشکیل، صعود و جایگیری توده نفوذی خلیج (محصول ذوب پوسته) نیز در تأمین فشار و حرارت کافی برای رویداد دگرگونی‌های ناحیه‌ای پیش‌رونده در این منطقه مؤثر بوده است.

بنابراین، بر اساس مطالعه مجموعه کانی‌شناسی این سنگ‌ها در سیستم KFMASH و دما - فشار به‌دست آمده از روش‌های دما فشارسنجی، رخساره دگرگونی حاکم بر واحدهای سنگی مورد مطالعه، از سمت استارولیت گارنت میکاشیست تا فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست از حدود ۴۹۰ تا ۵۶۰ درجه سانتی‌گراد (در فشار ۳/۵ تا ۵ کیلو بار در نمونه فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست) و از اوایل رخساره آمفیبولیت تا آمفیبولیت میانی متغیر بوده است (شکل ۶).

در فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست، فراوانی چیره کانی استارولیت در برابر کانی گارنت که به دلیل اوج گرفتن تشکیل استارولیت است و تشکیل مجموعه کانی‌شناسی، کوارتز + بیوتیت + مسکوویت + استارولیت + گارنت + فیبرولیت (شکل ۶، شماره‌های ۴ و ۵) بیانگر محدوده دمای تقریبی ۵۵۰-۶۲۵ درجه سانتی‌گراد (رخساره آمفیبولیت میانی) است که با محدوده دمایی به‌دست آمده برای حاشیه و هسته گارنت، توسط روش دماسنجی گارنت - بیوتیت (۵۶۰-۶۰۵ درجه سانتی‌گراد) و نیز نتایج فشارسنجی فشار ۳/۵ و ۵ کیلو بار تطابق دارد (شکل ۶، شماره ۴).

همچنین، در استارولیت گارنت میکاشیست، تشکیل مجموعه کانی‌شناسی، کوارتز + بیوتیت + مسکوویت + گارنت + استارولیت ± کلریت (شکل ۶، شماره‌های ۳ و ۴) بیانگر دمای دگرگونی در حدود ۴۷۵ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد بوده که با توجه به محدوده دمایی به‌دست آمده توسط روش دماسنجی گارنت - بیوتیت (۴۸۹ تا ۵۴۷ درجه سانتی‌گراد) و حضور و پایداری کلریت در این سنگ‌ها می‌توان محدوده فشار را در حدود ۳/۵ تا ۵ کیلو بار در نظر گرفت.

#### ۴ - نتیجه‌گیری

در شمال باختری خلیج و در امتداد مجموعه دگرگونی مشهد، واحدهای فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست و استارولیت گارنت میکاشیست به ترتیب در امتداد جنوب خاوری تا شمال باختری رخنمون دارند. نمونه فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست دارای کانی‌های کوارتز، بیوتیت (آنتیت)، استارولیت، گارنت (آلماندین)، فیبرولیت، مسکوویت، زیرکن و ایلمنیت و نمونه استارولیت گارنت میکاشیست دارای کانی‌های کوارتز، مسکوویت، بیوتیت (آنتیت)، گارنت (آلماندین)، استارولیت، تورمالین، کلریت، زیرکن و ایلمنیت هستند. نتایج فشارسنج GBMAQ و دماسنج گارنت - بیوتیت بیانگر دماهای ۵۶۰ و ۶۰۵ درجه سانتی‌گراد برای فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست در فشار ۳/۵ و ۵ کیلو بار و دماهای ۴۸۹ و ۵۴۷ درجه سانتی‌گراد در محدوده فشار ۳/۵ تا ۵ کیلو بار برای استارولیت گارنت میکاشیست

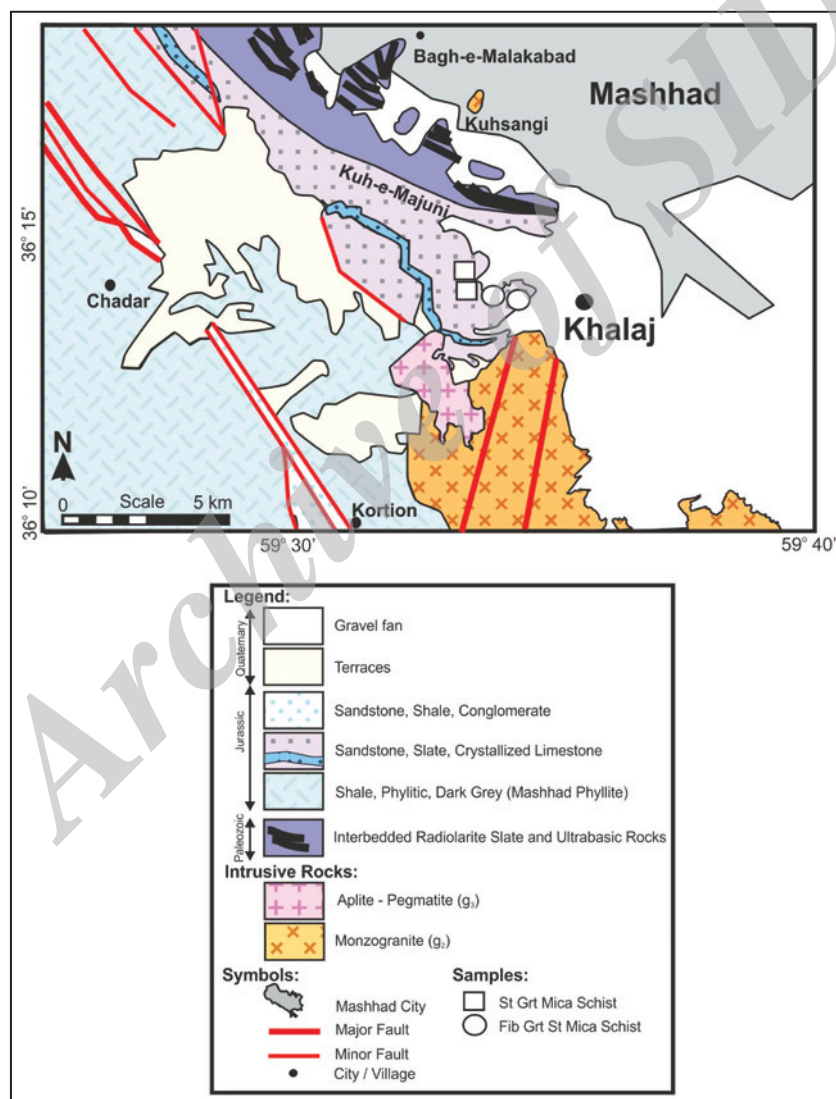
شیست سبز میانی (دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۵ کیلو بار) روی داده و تا دماهای بالاتر از ۸۰۰ درجه نیز پایدار است. بنابراین، دما و فشار حاصل از زمین‌دما فشارسنجی در محدوده پایداری گارنت قرار دارد. گارنت‌ها در محدوده گسترده‌ای از محیط‌های زمین‌شناسی شامل سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی یافت می‌شوند، بنابراین مطالعه کانی‌شناسی و شیمی گارنت و چگونگی تشکیل و رشد آن همواره مدنظر پژوهشگران بوده است و راهکارهای کاربردی بسیاری نیز در این زمینه ارائه شده است. با توجه به داده‌های شیمیایی گارنت از این کانی در بررسی و مقایسه دمای دگرگونی میکاشیست‌های خلیج استفاده شد. محدوده دمایی دگرگونی ناحیه‌ای منطقه (بر اساس نتایج دما فشارسنجی، جدول ۵، شکل ۶)، برای نمونه استارولیت گارنت میکاشیست در محدوده اواخر رخساره شیست سبز و تقریباً در محدوده نزدیک به دمای تشکیل گارنت و پیش از منحنی دمایی تشکیل استارولیت قرار دارد. از این رو، تشکیل گارنت نسبت به استارولیت بیشتر و مقدم‌تر بوده و مقدار نسبت، گارنت به استارولیت این نمونه افزایش یافته است؛ اما در مورد نمونه فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست دمای به‌دست آمده برای هسته تا حاشیه گارنت در محدوده دما - فشار تشکیل استارولیت قرار گرفته است. در نتیجه تشکیل و رشد استارولیت توسعه بالاتری نشان داده است. بر اساس شکل ۶، آغاز تشکیل استارولیت در دمای ۴۷۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲/۶ کیلو بار در اواخر رخساره شیست سبز با آمفیبولیت روی می‌دهد. استارولیت یکی دیگر از محصولات متداول در دگرگونی ناحیه‌ای دما متوسط (دمای ۵۰۰ تا ۶۷۰ درجه سانتی‌گراد) بوده و بر اساس (Bucher & Grapes (2011)، در دمای حدود ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند به خرج کلریتوبید و یا گارنت تبلور یابد. همچنین، بر اساس واکنش‌های مربوط به نمودارهای دما - فشار متاپلیت‌ها در (Bucher & Grapes (2011)، تبلور استارولیت نشان می‌دهد که حداقل فشار حاکم بر این سنگ‌ها در حدود ۳ کیلو بار و بیشتر، و دمای بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده و حضور استارولیت در کنار گارنت (آلماندین) بیانگر زون کیانیت - استارولیت و رخساره دگرگونی آمفیبولیت است. ظهور استارولیت در متاپلیت‌ها در ترکیبات غنی از آهن در دمای تقریباً ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد شروع می‌شود و نشان‌دهنده رخساره آمفیبولیت است. البته افزون بر شرایط دما، تشکیل استارولیت به ترکیب اولیه، سن، فشار و سیالات محیط نیز بستگی دارد. به‌طوری‌که استارولیت در سنگ‌های غنی از آلومینیم می‌تواند تشکیل شود. تشکیل استارولیت در میکاشیست‌های خلیج گویای شرایط دمای بالای آنها است؛ اما بررسی نمونه‌های خلیج نشان می‌دهد که مقدار استارولیت با فاصله گرفتن از سمت توده موزوگرانیتی خلیج کاهش یافته و بر پایداری گارنت افزوده می‌شود. زیرا در حقیقت، رویداد دگرگونی ناحیه‌ای و تشکیل استارولیت پیش از نفوذ توده گرانیتوبیدی خلیج بوده است و نفوذ توده گرانیتوبیدی بر تشکیل و هسته‌زایی این کانی‌ها تأثیر شاخصی نداشته است. از این رو، تشکیل این کانی می‌تواند گویای شرایط دمایی دگرگونی ناحیه‌ای پیش از نفوذ گرانیتوبید خلیج باشد و تنها منیزیم بیشتر و آهن کمتر استارولیت در نمونه فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست نسبت به نمونه استارولیت گارنت میکاشیست تا حدودی تحت تأثیر نفوذ توده گرانیتی خلیج قرار گرفته است. شرایط دمایی بالاتر به‌دست آمده از روش گارنت - بیوتیت برای نمونه فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست با فراوانی نسبتاً بالاتر استارولیت در این نمونه همخوانی دارد. رشد فیبرولیت بر روی بلورهای بیوتیت، یکی از پدیده‌های متداول در فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست‌های منطقه است (شکل ۲). مطالعه فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست‌های مورد مطالعه خلیج بیانگر وجود سوزن‌های فراوان فیبرولیت در این سنگ‌هاست که با نزدیک شدن به توده نفوذی بر مقدار فیبرولیت در واحدهای فیبرولیت‌دار افزوده می‌شود. فیبرولیت‌ها از نظر دمای تشکیل در محدوده وسیع‌تری نسبت به سیلیمانیت پایدار هستند. در برخی مطالعات فیبرولیت یکی از اشکال دما بالای  $Al_2SiO_5$  است که در شرایط پایداری سیلیمانیت متبلور

آمفیبولیت به آمفیبولیت میانی (در فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست) و در نتیجه پایداری و تشکیل فیبرولیت در نمونه‌های نزدیک‌تر به توده (فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست) شده است.

### سپاسگزاری

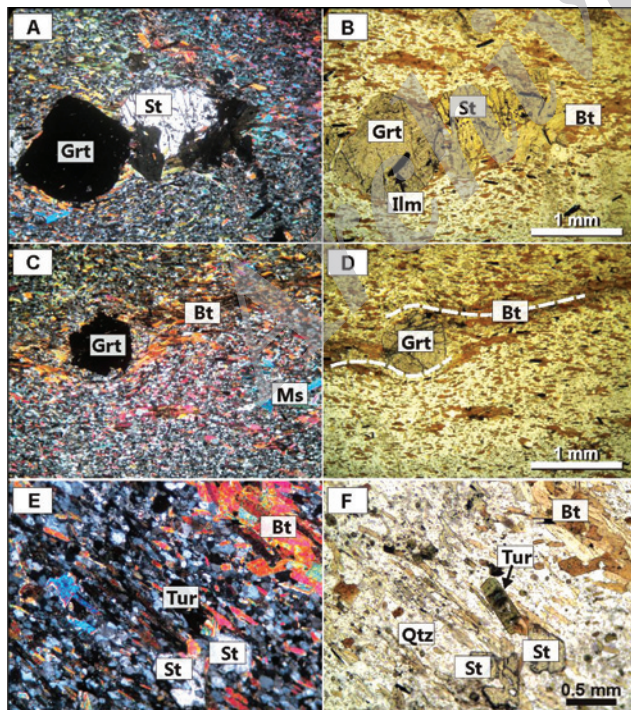
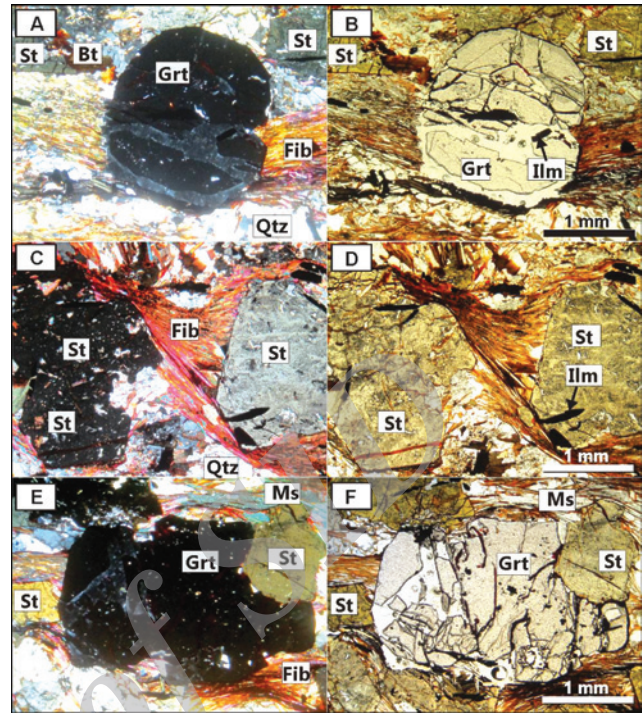
از همکاری‌های ارزنده دکتر هیروشی کاواباتا در مؤسسه مطالعه تحولات کره زمین، بخش علوم و فناوری زمین - دریا در کشور ژاپن و دکتر کریس هریس در دانشگاه کیپ‌تاون آفریقای جنوبی برای انجام آنالیزهای ژئوشیمیایی این پژوهش قدردانی می‌شود.

است. کاربرد روش‌های دمافاشارسنجی برای گارنت این سنگ‌ها گویای افزایش دما - فشار از هسته تا حاشیه این گارنت‌ها و در نتیجه رخداد دگرگونی ناحیه‌ای و حرارتی در منطقه است. بر اساس این نتایج و نیز بررسی و مقایسه مجموعه‌های کانی‌شناسی در دو واحد سنگی فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست و استارولیت گارنت میکاشیست در سیستم KFMASH، درجه دگرگونی ناحیه‌ای در حد اوایل رخساره آمفیبولیت تا اواسط آمفیبولیت (از استارولیت گارنت میکاشیست به سمت فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست) است، زیرا نفوذ توده گرانیتویدی خلیج و انتشار حرارتی آن موجب افزایش دمای دگرگونی از اواخر رخساره شست سبز به اوایل رخساره آمفیبولیت (در استارولیت گارنت میکاشیست) و از اوایل رخساره

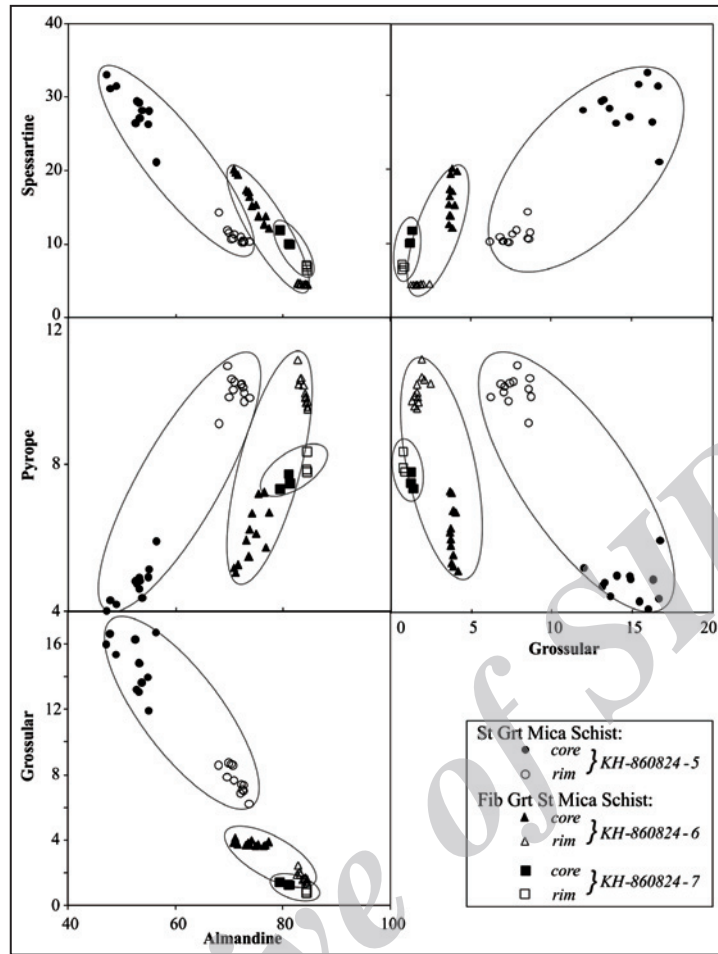


شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی و موقعیت مجموعه دگرگونی مشهد (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه مشهد توسط طاهری و قائمی (۱۳۷۳)، با تغییرات). سنگ‌های دگرگونی مورد مطالعه منطقه خلیج در جنوب خاوری کوه معجونی قرار دارند.

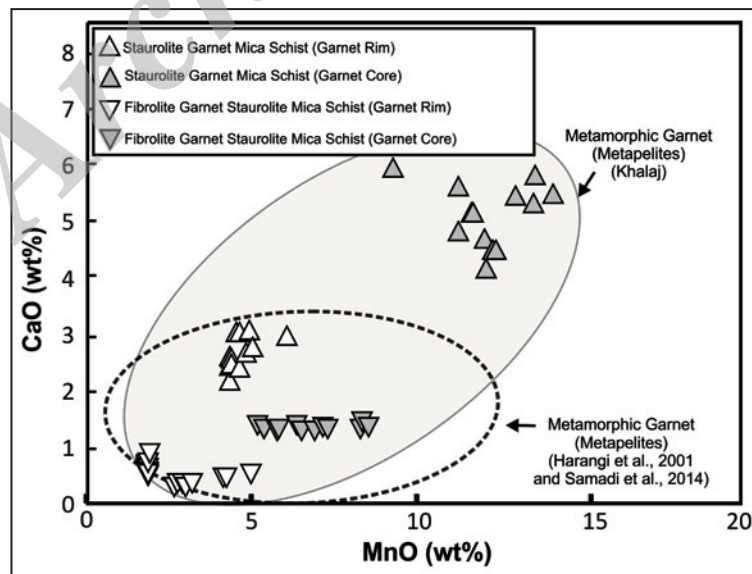
شکل ۲- تصویرهای میکروسکوپی از فیروولیت گارنت استارولیت میکاشیست خلج: پورفیرهای گارنت شکل دار، نیمه شکل دار تا گرد شده در کنار بلورهای شکل دار استارولیت در برش های طولی و عرضی، در زمینه ای دانه ریز از کوارتز و میکا (بیوتیت و مسکوویت) و فیروولیت ها که همگی در امتداد شیستوزیته سنگ هستند. تیغه های ایلمنیت نیز در سطح مقطع و کانی ها به صورت پراکنده دیده می شوند (تصاویر A، C و E در نور پلاریزه یا XPL و تصاویر B، D و F در نور عادی یا PPL).



شکل ۳- تصویرهای میکروسکوپی از استارولیت گارنت میکاشیست خلج: A و B) پورفیر شکل دار گارنت و استارولیت در زمینه دانه ریزی از کوارتز و میکا (بیوتیت و مسکوویت)؛ C و D) بیوتیت های اطراف گارنت شکل دار؛ E و F) بلور تورمالین در مقطع طولی (تصاویر A، C و E در نور پلاریزه یا XPL و تصاویر B، D و F در نور PPL).

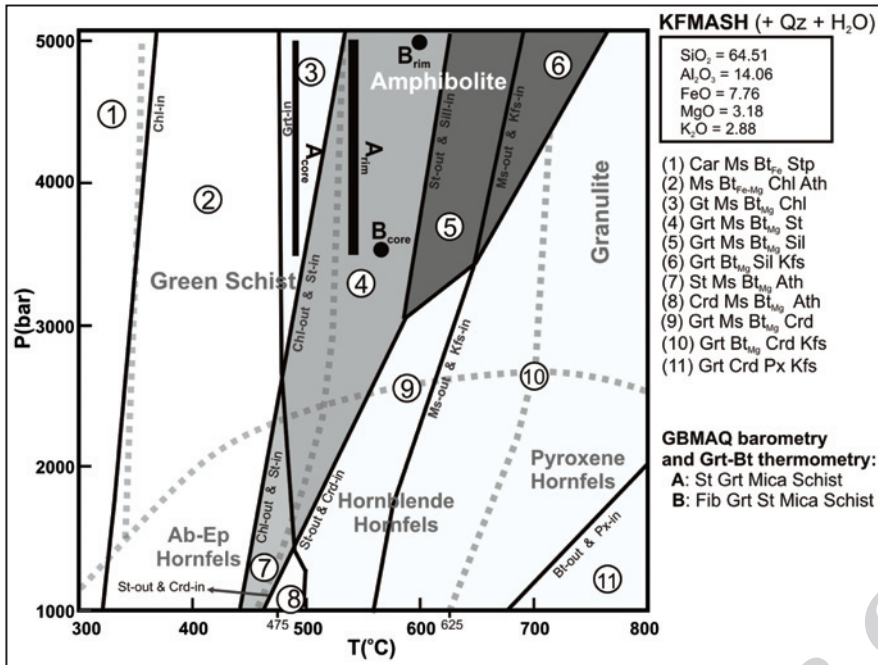


شکل ۴- مقایسه تغییرات اعضای نهایی گارنت در بخش هسته و حاشیه دانه‌های گارنت.



شکل ۵- نمودار تغییرات MnO در برابر CaO گارنت برای مرکز و حاشیه گارنت‌های درون فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست و استارولیت گارنت میکاشیست خلج (داده‌های مربوط به گارنت درون متاپلیت‌ها برگرفته از Harangi et al. (2001) و Samadi et al. (2014)).





شکل ۶- محدوده تقریبی دما - فشار تشکیل میکاشیست‌های منطقه خلیج بر روی نمودار سودوسکشن دما - فشار در سیستم KFMASH رخساره‌های دگرگونی (برگرفته از (Spear & Cheney 1989). محدوده دما - فشار به دست آمده از روش زمین‌دما فشارسنجی بر اساس شیمی هسته و حاشیه گارنت و بیوتیت (جدول ۵) بر روی نمودار با حروف A (استارولیت گارنت میکاشیست) و B (فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست) مشخص شده است.

جدول ۱- نتایج آنالیز ریزپر دانه‌های بیوتیت (Bt) و مسکوویت (Ms) موجود در فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست و استارولیت گارنت میکاشیست منطقه خلیج.

استارولیت گارنت میکاشیست			فیبرولیت گارنت استارولیت میکاشیست				نوع سنگ	
Bt	Bt	Bt	Ms	Ms	Ms	Bt	Bt	نوع کانی
		حاشیه				هسته	حاشیه	
۱۹	۱۸	۱۷	۲۹	۲۸	۲۷	۲۵	۴۱	شماره نمونه کانی
۳۴/۹۴	۳۵/۶۶	۳۳/۸۸	۴۶/۳۳	۴۶/۵۷	۴۵/۳۰	۳۵/۱۵	۳۵/۲۱	SiO <sub>2</sub>
۱/۵۶	۱/۴۵	۱/۴۷	۰/۴۰	۰/۴۷	۰/۴۵	۱/۶۰	۱/۷۷	TiO <sub>2</sub>
۲۰/۸۴	۲۰/۳۳	۲۰/۵۶	۳۷/۵۷	۳۸/۲۵	۳۷/۶۰	۲۰/۳۵	۲۰/۶۳	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۱۹/۵۲	۱۹/۴۷	۲۰/۶۴	۱/۲۶	۰/۹۸	۱/۴۳	۲۳/۰۷	۲۲/۵۴	FeO
۰/۱۷	۰/۱۰	۰/۱۳	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۹	MnO
۹/۷۸	۹/۵۷	۱۱/۰۲	۰/۳۹	۰/۳۶	۰/۲۵	۷/۲۸	۸/۱۸	MgO
۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۲	CaO
۰/۱۲	۰/۱۹	۰/۱۰	۱/۱۹	۱/۱۹	۱/۱۷	۰/۲۹	۰/۱۵	Na <sub>2</sub> O
۸/۸۴	۹/۲۴	۷/۸۳	۷/۴۴	۷/۳۱	۷/۲۷	۸/۳۷	۸/۳۲	K <sub>2</sub> O
۹۵/۸	۹۶/۱	۹۵/۷	۹۴/۶	۹۵/۲	۹۳/۵	۹۶/۲	۹۶/۹	Sum
۵/۲۳	۵/۳۲	۵/۱۲	۶/۱۰	۶/۰۷	۶/۰۳	۵/۳۱	۵/۲۶	Si
۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱۸	۰/۲۰	Ti
۳/۶۸	۳/۵۷	۳/۶۶	۵/۸۳	۵/۸۸	۵/۹۰	۳/۶۲	۳/۶۳	Al
۲/۷۷	۲/۶۸	۲/۸۸	۱/۹۰	۱/۹۳	۱/۹۷	۲/۶۹	۲/۷۴	Al <sup>IV</sup>
۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۷۸	۳/۹۲	۳/۹۵	۳/۹۴	۰/۹۴	۰/۸۹	Al <sup>VI</sup>
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	Cr
۲/۴۵	۲/۴۳	۲/۶۱	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۱۶	۲/۹۲	۲/۸۲	Fe
۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	Mn
۲/۱۸	۲/۱۳	۲/۴۸	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۵	۱/۶۴	۱/۸۲	Mg
۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	Ca
۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۰۸	۰/۰۴	Na
۱/۶۹	۱/۷۶	۱/۵۱	۱/۲۵	۱/۲۲	۱/۲۳	۱/۶۱	۱/۵۹	K
۱۹/۷۵	۱۹/۸۵	۱۹/۷۰	۱۳/۷۳	۱۳/۷۰	۱۳/۷۴	۱۹/۷۱	۱۹/۷۱	Sum
۰/۵۳	۰/۵۳	۰/۵۱	۰/۶۴	۰/۶۰	۰/۷۶	۰/۶۴	۰/۶۱	Fe#
۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۴۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۳۰	۰/۳۳	X <sub>Mg</sub>

جدول ۲- نتایج آنالیز ریزپردازشی استارولیت موجود در فیرولیت گارنت استارولیت میکاشیست و استارولیت گارنت میکاشیست.

استارولیت گارنت میکاشیست				فیرولیت گارنت استارولیت میکاشیست				نوع سنگ		شماره نمونه کانی
۱۵	۱۴	۱۳	۲۲	۱۳	۱۲	۴۰	۳۹	۳۸		
۲۷/۲۹	۲۷/۸۳	۲۷/۰۲	۲۷/۵۱	۲۷/۶۴	۲۷/۸۱	۲۷/۷۹	۲۸/۰۸	۲۷/۶۵	SiO <sub>2</sub>	
۰/۶۵	۰/۴۳	۰/۴۵	۰/۵۲	۰/۴۳	۰/۴۵	۰/۵۰	۰/۴۷	۰/۴۷	TiO <sub>2</sub>	
۵۷/۳۷	۵۶/۷۰	۷۵/۵۷	۵۶/۲۸	۵۵/۵۹	۵۵/۱۱	۵۵/۹۹	۵۵/۰۹	۵۶/۶۲	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
۱۳/۱۸	۱۳/۴۴	۱۳/۵۱	۱۵/۹۳	۱۴/۴۷	۱۴/۶۳	۱۴/۸۸	۱۴/۵۹	۱۴/۷۷	FeO	
۰/۴۵	۰/۳۷	۰/۴۱	۰/۲۰	۰/۲۱	۰/۱۵	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۱۱	MnO	
۱/۲۹	۱/۴۳	۱/۳۶	۱/۲۳	۱/۱۳	۱/۲۷	۱/۱۸	۱/۲۸	۱/۳۲	MgO	
۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	CaO	
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۰	Na <sub>2</sub> O	
۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	K <sub>2</sub> O	
۱۰۰/۳	۱۰۰/۲	۱۰۰/۵	۱۰۱/۷	۹۹/۵	۹۹/۴	۱۰۰/۵	۹۹/۷	۱۰۰/۹	Sum	

استارولیت گارنت میکاشیست				فیرولیت گارنت استارولیت میکاشیست				نوع سنگ		شماره نمونه کانی
۱۵	۱۴	۱۳	۲۲	۱۳	۱۲	۴۰	۳۹	۳۸		
۷/۶۹	۷/۸۵	۷/۶۱	۷/۷۴	۷/۸۹	۷/۹۵	۷/۸۶	۸/۰۰	۷/۷۸	Si	
۰/۱۴	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۱۰	Ti	
۱۹/۰۵	۱۸/۸۴	۱۹/۱۶	۱۸/۶۶	۱۸/۷۰	۱۸/۵۶	۱۸/۶۷	۱۸/۵۰	۱۸/۷۸	Al	
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	Cr	
۳/۱۱	۳/۱۷	۳/۱۸	۳/۷۵	۳/۴۵	۳/۵۰	۳/۵۲	۳/۴۸	۳/۴۸	Fe	
۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۳	Mn	
۰/۵۴	۰/۶۰	۰/۵۷	۰/۵۲	۰/۴۸	۰/۵۴	۰/۵۰	۰/۵۴	۰/۵۵	Mg	
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	Ca	
۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰	Na	
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	K	
۳۰/۶۵	۳۰/۶۴	۳۰/۷۲	۳۰/۸۲	۳۰/۶۷	۳۰/۶۸	۳۰/۷۰	۳۰/۶۶	۳۰/۷۳	Sum	
۰/۸۳	۰/۸۲	۰/۸۳	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۶	۰/۸۷	۰/۸۶	۰/۸۶	Fe#	

جدول ۳- خلاصه‌ای از نتایج آنالیز ریزپردازشی مرکز و حاشیه گارنت موجود در فیرولیت گارنت استارولیت میکاشیست و استارولیت گارنت میکاشیست بر اساس ۱۲ اتم اکسیژن (c: core, r: rim).

استارولیت گارنت میکاشیست								فیرولیت گارنت استارولیت میکاشیست								نوع سنگ		شماره نمونه کانی				
Gr <sub>r</sub>	Gr <sub>c</sub>	Gr <sub>r</sub>	Gr <sub>c</sub>	Gr <sub>r</sub>	Gr <sub>c</sub>	Gr <sub>r</sub>	Gr <sub>c</sub>	Gr <sub>r</sub>	Gr <sub>c</sub>	Gr <sub>r</sub>	Gr <sub>c</sub>	Gr <sub>r</sub>	Gr <sub>c</sub>	Gr <sub>r</sub>	Gr <sub>c</sub>	Gr <sub>r</sub>	Gr <sub>c</sub>		Gr <sub>r</sub>	Gr <sub>c</sub>		
۳۶/۱۸	۳۶/۹۱	۳۶/۹۸	۳۶/۹۷	۳۷/۱۳	۳۷/۰۵	۳۷/۲۷	۳۶/۹۶	۳۶/۵۵	۳۶/۲۶	۳۶/۷۷	۳۶/۵۵	۳۶/۲۸	۳۶/۹۲	۳۶/۹۶	۳۶/۴۴	۳۷/۰۵	۳۶/۳۸	۳۶/۶۶	۳۶/۸۵	۳۶/۷۵	۳۶/۷۴	SiO <sub>2</sub>
۰/۰۵	۰/۱۸	۰/۰۰	۰/۱۹	۰/۰۳	۰/۳۰	۰/۰۲	۰/۱۴	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	TiO <sub>2</sub>
۱۸/۷۱	۲۰/۹۶	۲۰/۹۹	۲۰/۸۳	۲۱/۰۶	۲۱/۰۹	۲۱/۳۰	۲۱/۱۳	۲۱/۰۳	۲۰/۸۶	۲۱/۱۳	۲۱/۱۵	۲۰/۸۵	۲۱/۲۰	۲۰/۹۰	۲۰/۸۹	۲۱/۱۵	۲۰/۹۲	۲۱/۱۵	۲۰/۹۳	۲۰/۵۶	۲۱/۲۰	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۴	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۲۹/۱۳	۲۱/۴۵	۲۲/۵۰	۲۱/۵۹	۲۲/۳۹	۲۰/۰۰	۳۱/۹۹	۲۵/۵۸	۳۶/۹۶	۳۵/۱۵	۳۶/۵۲	۳۵/۷۲	۳۶/۹۹	۳۵/۳۴	۳۶/۸۸	۳۱/۰۳	۳۷/۲۱	۳۰/۹۹	۳۷/۰۲	۳۲/۰۸	۳۷/۳۷	۳۲/۹۱	FeO
۳/۷۷	۱۳/۲۴	۴/۵۰	۱۳/۷۶	۴/۵۲	۱۴/۳۸	۴/۴۹	۹/۴۶	۲/۷۵	۵/۱۴	۲/۸۹	۴/۳۸	۳/۱۰	۴/۲۷	۱/۹۵	۸/۵۱	۱/۹۲	۸/۷۱	۱/۹۵	۷/۰۵	۱/۹۷	۶/۶۵	MnO
۲/۴۶	۱/۰۸	۲/۴۳	۱/۰۵	۲/۴۸	۰/۹۹	۲/۵۱	۱/۵۱	۲/۰۴	۱/۸۱	۱/۸۹	۱/۹۲	۱/۹۳	۱/۸۲	۲/۴۱	۱/۲۴	۲/۳۵	۱/۲۷	۲/۳۹	۱/۵۲	۲/۳۸	۱/۵۱	MgO
۲/۸۳	۵/۴۶	۲/۵۶	۵/۳۱	۲/۴۴	۵/۵۰	۲/۴۳	۵/۹۴	۰/۲۶	۰/۴۹	۰/۳۱	۰/۴۳	۰/۲۵	۰/۴۳	۰/۵۷	۱/۴۲	۰/۵۵	۱/۳۱	۰/۴۵	۱/۲۶	۰/۵۰	۱/۲۵	CaO
۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۰	Na <sub>2</sub> O
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱	K <sub>2</sub> O
۹۱/۱۵	۹۹/۲۸	۹۹/۹۹	۹۹/۷۷	۱۰۰/۱۱	۱۰۰/۰۵	۱۰۰/۰۱	۱۰۰/۷۳	۹۹/۶۱	۹۹/۸۴	۹۹/۵۵	۱۰۰/۲۴	۹۹/۴۶	۱۰۰/۰۵	۹۹/۷۲	۹۹/۵۸	۱۰۰/۲۶	۹۹/۶۶	۹۹/۶۷	۹۹/۷۵	۹۹/۶۲	۱۰۰/۳۳	Sum
۳/۰۲	۳/۰۰	۲/۹۹	۳/۰۰	۲/۹۹	۲/۹۹	۳/۰۰	۲/۹۷	۲/۹۹	۲/۹۷	۳/۰۰	۲/۹۷	۲/۹۸	۳/۰۰	۳/۰۰	۲/۹۹	۳/۰۰	۲/۹۸	۲/۹۸	۳/۰۰	۳/۰۰	۲/۹۸	Si
۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	Ti
۱/۹۵	۲/۰۱	۲/۰۰	۱/۹۹	۲/۰۰	۲/۰۱	۲/۰۲	۲/۰۰	۲/۰۲	۲/۰۱	۲/۰۳	۲/۰۳	۲/۰۲	۲/۰۳	۲/۰۰	۲/۰۲	۲/۰۲	۲/۰۲	۲/۰۳	۲/۰۱	۱/۹۸	۲/۰۳	Al
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	Cr
۲/۱۵	۱/۴۶	۲/۲۰	۱/۴۶	۲/۱۸	۱/۴۰	۲/۱۵	۱/۷۲	۲/۵۳	۲/۴۱	۲/۴۹	۲/۴۳	۲/۵۴	۲/۴۰	۲/۵۱	۲/۱۳	۲/۵۲	۲/۱۲	۲/۵۲	۲/۱۹	۲/۵۵	۲/۲۳	Fe
۰/۲۸	۰/۹۱	۰/۳۱	۰/۹۴	۰/۳۱	۰/۹۸	۰/۳۱	۰/۶۴	۰/۱۹	۰/۳۶	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۲۲	۰/۲۹	۰/۱۳	۰/۵۹	۰/۱۳	۰/۶۰	۰/۱۳	۰/۴۹	۰/۱۴	۰/۴۶	Mn
۰/۳۲	۰/۱۳	۰/۲۹	۰/۱۳	۰/۳۰	۰/۱۲	۰/۳۰	۰/۱۸	۰/۲۵	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۲۹	۰/۱۵	۰/۲۸	۰/۱۶	۰/۲۹	۰/۱۹	۰/۲۹	۰/۱۸	Mg
۰/۲۷	۰/۴۸	۰/۲۲	۰/۴۶	۰/۲۱	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۵۱	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۰۴	۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۱۱	Ca
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	Na
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	K
۸/۰۰	۷/۹۹	۸/۰۱	۸/۰۰	۸/۰۰	۷/۹۹	۷/۹۹	۸/۰۳	۸/۰۰	۸/۰۲	۷/۹۹	۸/۰۱	۸/۰۲	۷/۹۹	۸/۰۰	۸/۰۰	۷/۹۹	۸/۰۱	۸/۰۰	۷/۹۹	۸/۰۱	۸/۰۰	Sum
۷۱/۱۰	۴۹/۰۰	۷۲/۷۶	۴۸/۸۵	۷۲/۷۶	۴۶/۹۷	۷۲/۵۴	۵۶/۲۸	۸۴/۵۵	۷۹/۵۱	۸۴/۵۴	۸۰/۹۶	۸۴/۲۶	۸۱/۳۱	۸۴/۰۳	۷۱/۰۵	۸۴/۵۰	۷۰/۸۱	۸۴/۴۵	۷۳/۶۷	۸۴/۴۸	۷۴/۹۰	آلماندین
۹/۳۳	۳۰/۶۲	۱۰/۲۱	۳۱/۵۳	۱۰/۲۹	۳۳/۰۴	۱۰/۳۱	۲۱/۰۸	۶/۳۷	۱۱/۷۶	۶/۷۷	۱۰/۰۶	۷/۱۶	۹/۵۵	۴/۵۰	۱۹/۷۴	۴/۴۱	۲۰/۱۵	۴/۵۱	۱۶/۴۰	۴/۵۰	۱۵/۳۴	اسپارتین
۸/۸۵	۱۵/۹۸	۷/۳۳	۱۵/۴۰	۷/۰۱	۱۵/۹۷	۷/۰۷	۱۶/۷۴	۰/۷۵	۱/۴۱	۰/۹۱	۱/۲۴	۰/۷۴	۱/۲۸	۱/۶۷	۴/۱۶	۱/۵۹	۳/۸۵	۱/۳۲	۳/۷۰	۱/۴۴	۳/۶۵	گروسولار
۱۰/۷۲	۴/۴۰	۹/۷۰	۴/۲۱	۹/۴۴	۴/۰۲	۱۰/۰۹	۵/۹۰	۸/۳۳	۷/۳۱	۷/۷۸	۷/۷۴	۷/۸۵	۷/۴۷	۹/۸۱	۵/۰۵	۹/۵۰	۵/۱۹	۹/۷۱	۶/۲۳	۹/		

جدول ۴- نتایج آنالیز ریزپردازشی ایلمنیت موجود در فیروولیت گارنت استارولیت میکاشیست و استارولیت گارنت میکاشیست بر اساس اتم اکسیژن.

استارولیت گارنت میکاشیست						فیروولیت گارنت استارولیت میکاشیست				نوع سنگ
۴	۲	۱	۲۰	۱۶	۱۲	۴	۲۳	۸	۷	شماره نمونه کانی
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	SiO <sub>2</sub>
۵۳/۷۱	۵۴/۳۰	۵۳/۴۹	۵۳/۱۲	۵۳/۵۸	۵۴/۱۵	۵۳/۴۹	۵۲/۸۵	۵۲/۶۷	۵۲/۷۲	TiO <sub>2</sub>
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۴۴/۵۳	۴۴/۶۴	۴۵/۷۵	۴۷/۴۵	۴۵/۶۳	۴۶/۰۲	۴۵/۷۵	۴۷/۸۳	۴۶/۴۳	۴۶/۷۵	FeO
۱/۸۸	۱/۶۴	۱/۷۸	۰/۶۷	۱/۸۹	۱/۶۲	۱/۷۸	۰/۷۰	۰/۵۰	۰/۵۱	MnO
۰/۱۹	۰/۲۴	۰/۲۱	۰/۲۰	۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۲۰	۰/۱۷	MgO
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	CaO
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	Na <sub>2</sub> O
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	K <sub>2</sub> O
۱۰۰/۳۱	۱۰۰/۸۵	۱۰۱/۳۱	۱۰۱/۵۰	۱۰۱/۳۰	۱۰۲/۱۰	۱۰۱/۳۱	۱۰۱/۵۵	۹۹/۸۱	۱۰۰/۱۵	Sum
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	Si
۲/۰۲	۲/۰۳	۲/۰۰	۱/۹۹	۲/۰۰	۲/۰۱	۲/۰۰	۱/۹۸	۲/۰۰	۲/۰۰	Ti
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	Al
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	Cr
۱/۸۶	۱/۸۵	۱/۹۰	۱/۹۸	۱/۹۰	۱/۹۰	۱/۹۰	۱/۹۹	۱/۹۶	۱/۹۷	Fe
۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	Mn
۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	Mg
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	Ca
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	Na
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	K
۳/۹۸	۳/۹۷	۴/۰۰	۴/۰۱	۳/۹۹	۳/۹۹	۴/۰۰	۴/۰۲	۴/۰۰	۴/۰۰	Sum

جدول ۵- نتایج کاربرد کالیبراسیون‌های مختلف دماسنج گارنت - بیوتیت برای نمونه‌های فیروولیت گارنت استارولیت میکاشیست و گارنت استارولیت میکاشیست خلیج (a)؛ Bhattacharya et al. (1992) (مدل HW و GS)؛ (b)؛ Dasgupta et al. (1991)؛ (c)؛ Ferry & Spear (1987)؛ (d)؛ Hodges & Spear (1982)؛ (e)؛ Perchuk & Lavrenteva (1983)؛ (f)؛ Thompson (1976)؛ (g)؛ Holdaway & Lee (1977)؛ (h)؛ Holdaway (2000).

							دما (°C)		نوع سنگ	
h	g	f	e	d	c	b	a	فشار (kbar)		
							GS	HW		
									هسته گارنت - هسته بیوتیت	
۵۸۰	۵۵۱	۵۵۹	۵۶۰	۵۳۹	۵۳۹	۵۲۶	۳۴۵	۴۴۴	۳/۵ Fib Grt St Mica Schist	
۵۵۲	۴۶۳	۴۶۰	۴۸۷	۴۷۱	۴۱۹	۴۵۸	۳۸۷	۴۴۰	۳/۵ St Grt Mica schist	
۵۵۵	۴۶۷	۴۷۰	۴۹۰	۴۲۳	۴۲۳	۴۱۹	۲۵۶	۳۶۱	۵	
									حاشیه گارنت - حاشیه بیوتیت	
۶۰۸	۶۰۶	۶۲۷	۶۰۵	۶۲۴	۶۱۸	۵۰۹	۵۹۱	۵۹۶	۵ Fib Grt St Mica Schist	
۵۸۱	۵۳۲	۵۳۸	۵۴۵	۵۴۳	۵۱۲	۵۱۴	۵۳۴	۵۴۱	۳/۵ St Grt Mica schist	
۵۸۵	۵۳۷	۵۴۸	۵۴۹	۵۱۸	۵۱۸	۵۰۸	۳۲۶	۴۲۷	۵	
							±۵۰	±۵۰	±۴۰	۰/۸ دقت محاسبه

### کتابنگاری

صمدی، ر.، ۱۳۸۷- بررسی منشأ مگاکریست‌های گارنت موجود در توانلیت دهنو، شمال غرب مشهد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۷۹ صفحه.  
صمدی، ر.، ۱۳۹۲- شیمی و خاستگاه گارنت در گرانیتوئیدها و سنگ‌های دگرگونی جنوب مشهد (خواجه‌مراد، خلیج و دهنو)، رساله دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، ۳۶۴ صفحه.

صمدی، ر. و شیردشت‌زاده، ن.، ۱۳۸۹- گارنت (مفاهیم کانی‌شناسی، خاستگاه و دما فشارسنجی)، ۱۰۶ صفحه.

طاهری، ج. و قائمی، ف.، ۱۳۷۳- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه مشهد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

## References

- Alavi, M., 1991- Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. Geological Society of America Bulletin, v. 103, p. 983-992.
- Bhattacharya, A., Mohanty, L., Maji, A., Sen, S. K. & Raith, M., 1992- Non-ideal mixing in the phlogopite annite binary: constraints from experimental data on Mg-Fe partitioning and a reformulation of the biotite-garnet geothermometer. Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 111, p. 87-93.
- Bucher, K. & Frey, M., 2002- Petrogenesis of Metamorphic Rocks. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 7th edition, 341p.
- Bucher, K. & Grapes, R., 2011- Petrogenesis of Metamorphic Rocks. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 428 p.
- Dasgupta, S., Sengupta, P., Guha, D. & Fukuoka, M., 1991- A refined garnet-biotite Fe-Mg exchange geothermometer and its application in amphibolites and granulites. Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 109, p. 130-137.
- Deer, W. A., Howie, R. A. & Zussman, J., 1992- An introduction to the rock-forming minerals. 2<sup>nd</sup> Edition. Longmans, London.
- Ferry, J. M. & Spear, F. S., 1987- Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet. Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 66, p. 113-117.
- Green, T. H., 1977- Garnet in Silicic liquids and its possible use as a P-T indicator. Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 65, p. 59-67.
- Harangi, S. Z., Downes, H., Kósa, L., Szabó, C. S., Thirwall, M. F., Mason, P. R. D. & Matthey, D., 2001- Almandine garnet in calc-alkaline volcanic rocks of northern Panonnian basin (east-central Europe): geochemistry, petrogenesis and geodynamic implications. Journal of Petrology, v. 42, p. 1813-1843.
- Hodges, K. V. & Spear, F. S., 1982- Geothermometry, geobarometry and  $Al_2SiO_5$  triple point at Mt. Moosilauke, New Hampshire. American Mineralogist, v. 67, p. 1118-1134.
- Holdaway, M. J. & Lee, S. M., 1977- Fe-Mg cordierite stability in high grade pelitic rocks based on experimental, theoretical and natural observations. Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 63, p. 175-193.
- Holdaway, M. J., 2000- Application of new experimental and garnet. Margules data to the garnet-biotite geothermometer. American Mineralogist, v. 85, p. 881-892.
- Holdaway, M. J., 2001- Recalibration of the GASP geobarometer in light of recent garnet and plagioclase activity models and versions of the garnet-biotite geothermometer. American Mineralogist, v. 86, p. 1117-1129.
- Jiang, S. Y., Palmer, M. R., Slack, J. F. & Shaw, R., 1998- Paragenesis and chemistry of multistage tourmaline formation in the Sullivan Pb-Zn-Ag deposit, British Columbia. Economic Geology, v. 93, p. 47-67.
- Kerrick, D. M., 1987- Fibrolite in contact aureoles of Donegal, Ireland. American Mineralogist, v. 72 (3-4), p. 240-254.
- Kornprobst, J., 2002- Metamorphic rocks and their geodynamic significance. Kluwer, Dordrecht.
- Kretz, R., 1959- Chemical study of garnet, biotite and hornblende from gneisses of southwestern Quebec, with emphasis on distribution of elements in coexisting minerals. Journal of Geology, v. 67, p. 371-403.
- Mirnejad, H., Lalonde, A. E., Obeid, M. & Hassanzadeh, J., 2013- Geochemistry and petrogenesis of Mashhad granitoids: An insight into the geodynamic history of the Paleo-Tethys in Northeast of Iran. Lithos, v. 170-171, p. 105-116.
- Perchuk, L. L. & Lavrenteva, I. V., 1983- Experimental investigation of exchange equilibria in the system cordierite-garnet-biotite. In: Saxena, S.K. (Ed.) Kinetics and Equilibrium in Mineral Reactions, Advances in Physical Geochemistry. Springer, New York, v. 3, p. 199-239.
- Razavi, M. H., Masoudi, F. & Alaminia, Z., 2008- Garnet-Biotite Chemistry for Thermometry of Staurolite Schist from South of Mashhad, NE Iran. Iranian Journal of Science, v. 19(3), p. 237-245.
- Samadi, R., Mirnejad, H., Kawabata, H., Valizadeh, M. V., Harris, C. & Gazel, E., 2014- Magmatic garnet in the Triassic (215 Ma) Dehnow pluton of NE Iran and its petrogenetic significance. International Geology Review, v. 56(5), p. 596-621.
- Sassi, R., Mazzoli, C., Spiess, R. & Cester, T., 2004- Towards a better understanding of the fibrolite problem: the effect of reaction overstepping and surface energy anisotropy. Journal of Petrology, v. 45(7), p. 1467-1479.
- Spear, F. S. & Cheney, J. T., 1989- A petrogenetic grid for pelitic schists in the system  $SiO_2-Al_2O_3-FeO-MgO-K_2O-H_2O$ . Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 101, p. 149-164.
- Thompson, A. B., 1976- Mineral reactions in pelitic rocks. II. Calculation of some P-T-X (Fe-Mg) phase relations. American Journal of Science, v. 276, p. 425-454.
- Wolf, M. B. & London, D., 1997- Boron in granitic magmas: stability of tourmaline in equilibrium with biotite and cordierite. Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 130, p. 12-30.
- Wu, C. M. & Cheng, B. H., 2006- Valid garnet-biotite (GB) geothermometry and garnet-aluminum silicate-plagioclase-quartz (GASP) geobarometry in metapelitic rocks. Lithos, v. 89, p. 1-23.
- Wu, C. M. & Zhao, G. C., 2006- Recalibration of the garnet-muscovite (GM) geothermometer and the garnet-muscovite-plagioclase-quartz (GMPQ) geobarometer for metapelitic assemblages. Journal of Petrology, v. 47, p. 2357-2368.
- Wu, C. M. & Zhao, G. C., 2007- The Metapelitic Garnet-Biotite-Muscovite-Aluminosilicate-Quartz (GBMAQ) Geobarometer. Lithos, v. 97, p. 365-372.