

بررسی خاستگاه تورمالین و گارنت در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی - شمال غرب ایران؛ تعیین سنگ‌زایی سنگ اولیه

معصومه آهنگری

دانشگاه ارومیه، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

(دریافت مقاله: ۹۵/۹/۳، نسخه نهایی: ۹۵/۱۲/۷)

چکیده: میلونیت‌گرانیتهای مورد بررسی در پژوهش حاضر به صورت توده‌های کوچکی در منطقه غرب قوشچی واقع در استان آذربایجان غربی رخنمون یافته‌اند. ارتوکلاز، میکروکلین، پلاژیوکلاز، مسکویت‌های ماهی‌شکل، تورمالین $\pm$ گارنت پورفیروکلاست‌های این سنگ‌ها را تشکیل می‌دهند. کوارتزهای باز تبلور یافته، مسکویت‌های ریزدانه به همراه اندکی اپیدوت کانی‌های موجود در زمینه را تشکیل می‌دهند. بررسی سنگ‌شناسی، تصاویر BSE و شیمی کانی‌های تورمالین و گارنت بیانگر وجود منطقه‌بندی ترکیبی در این کانی‌ها است. مطالعه شیمی کانی قسمت مرکزی این کانی‌ها نشان‌دهنده خاستگاه ماگمایی برای آن‌ها است. در حالیکه کناره‌ها به‌ویژه در گارنت دارای خصوصیات دگرگونی است. حضور مجموعه کانیاپی تورمالین + مسکویت $\pm$ گارنت غنی از منگنز در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی و نیز رخنمون این سنگ‌ها به صورت توده‌های کم حجم درون سنگ‌های رسوبی دگرگون شده بیانگر تشکیل این مجموعه در اثر جدایش مقدار اندک گدازه در طی ذوب بخشی درجه پایین سنگ‌های دگرگونی است. بر اساس مجموعه کانیاپی موجود در سنگ‌های مورد بررسی بنظر می‌رسد که این سنگ‌ها از نوع لویکوگرانیتهای پرآلومینوس با مقادیر اندک منیزیم هستند.

واژه‌های کلیدی: میلونیت‌گرانیته؛ تورمالین؛ گارنت؛ پرآلومینوس؛ قوشچی؛ شمال غرب ایران.

مقدمه

از نظر ترکیب شیمیایی لویکوگرانیته‌ها سنگ‌هایی هستند که بیشتر از عنصر آلومینیوم غنی بوده و شاخص ASI (شاخص غنی‌شدگی آلومینیوم) در این سنگ‌ها بالا است (بیش از ۱/۱). آلومینیوم مازاد موجود در ترکیب این سنگ‌ها بیشتر در ایجاد کانی‌های حاوی Al همچون مسکویت، بیوتیت، تورمالین، گارنت، کردیریت و چندشکلی‌های Al_2SiO_5 شرکت می‌کند [۱]. این مجموعه کانیاپی حساس به فشار، دما و ترکیب شیمیایی سنگ کل بوده و از اینرو اطلاعات ارزشمندی را درباره شرایط تبلور و گستره پایداری ماگمای میزبان در اختیار قرار می‌دهند [۲].

تورمالین به عنوان یک کانی بوروسیلیکاته پیچیده در

ترکیب انواع گوناگونی از سنگ‌ها بویژه گرانیته‌ها، پگماتیت گرانیته‌ها، رگه‌های گرمایی، سنگ‌های دگرنهادی و دگرگونی و سنگ‌های رسوبی یافت می‌شود [۳-۵]. به عقیده بسیاری از محققان [۶، ۷] تورمالین مانند یک لوح فشرده زمین‌شیمیایی محسوب شده و قابلیت ثبت و نگهداری خصوصیات زمین شیمی محیطی که از آن متبلور شده است، را دارا است. گارنت نیز از جمله دیگر کانی‌های غیرمعمول است که امکان حضور در سنگ‌های گرانیتهی پرآلومینوس را دارد و با بررسی شیمی آن می‌توان به اطلاعات مفیدی در ارتباط با سنگ‌زایی سنگ‌های موجود در آن دست یافت [۸]. عوامل متعددی همچون بی‌دوامی اکسیژن، فعالیت H_2O ، قلیائیت ماگما و مقدار محتوای عناصر Al-Fe-Mg در تعیین گستره

استفاده در این مقاله توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی JEOL, JXA-8200 با ولتاژ شتابدهنده ۱۵KV، شدت جریان ۲۰nA و قطر باریکه الکترونی ۲ میکرومتر در دانشگاه پتسدام در کشور آلمان انجام شده است.

زمین‌شناسی عمومی منطقه

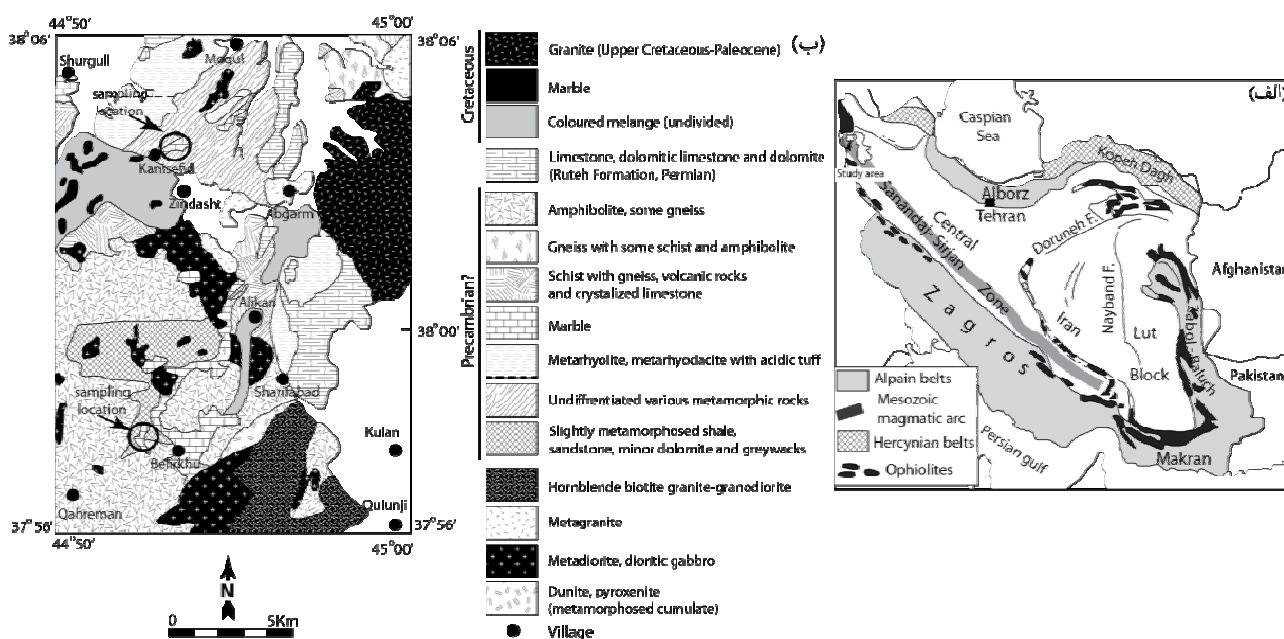
منطقه مورد بررسی بین مختصات ۳۷° ۵۶' و ۳۸° ۰۶' عرض شمالی و ۴۴° ۵۰' تا ۴۵° ۰۰' طول شرقی استان آذربایجان-غربی و غرب قوشچی واقع شده است. زمین‌شناسان مختلف این منطقه را با توجه به ویژگی‌های سنگ‌شناختی سنگ‌های رخنمون یافته و نیز ساختارهای زمین‌شناسی موجود به منطقه‌های مختلف همچون منطقه سهندج-سیرجان [۱۴-۱۷]، محل تقاطع منطقه‌های سهندج-سیرجان و ایران مرکزی [۱۸]، منطقه آمیزه رنگین و افیولیتی [۱۹] و منطقه خوی-مهاباد [۲۰] نسبت داده‌اند. در شکل ۱ الف موقعیت منطقه مورد بررسی در نقشه تقسیم‌بندی ساختارهای زمین‌شناسی ایران برگرفته از مرجع [۱۷] نشان داده شده است. سنگ‌های رخنمون یافته در این منطقه از تنوع بسیاری برخوردارند و شامل انواع سنگ‌های دگرگونی (همچون آمفیبولیت‌ها با سن احتمالی پرکامبرین) آذرین (مانند گرانیت قوشچی با سن کرتاسه پسین - پالئوسن) و رسوبی (همچون سازند روته به سن پرمین) هستند (شکل ۱ب).

پایداری تورمالین با دیگر کانی‌های دارای Al-Fe-Mg (همچون گارنت، بیوتیت، مسکویت، کلدیریت و کانی‌های آلومینوسیلیکاته) در سنگ‌های گرانیتی نقش مهمی ایفا می‌نماید [۹-۱۳].

میلونیت‌گرانیت‌های موجود در منطقه غرب قوشچی موضوع پژوهش حاضر هستند. این سنگ‌ها دارای مقادیر زیادی از کانی تورمالین به همراه مسکویت و مقادیر اندکی از گارنت در ترکیب خود هستند. هدف از انجام این پژوهش بررسی ویژگی‌های سنگ‌شناختی و شیمی کانی‌های موجود در این سنگ‌ها به ویژه کانی‌های تورمالین و گارنت و استفاده از آن‌ها در شناسایی خاستگاه این کانی‌ها و نیز شرایط تشکیل آن‌ها در سنگ‌های مورد بررسی است.

روش کار

در تحقیق حاضر به منظور بررسی شیمی کانی‌های موجود در میلونیت‌گرانیت‌های غرب قوشچی، مطالعات سنگ‌نگاری گسترده‌ای بر روی این سنگ‌ها انجام شده است و کانی‌های مناسب (به‌ویژه کانی‌های تورمالین و گارنت) جهت انجام بررسی‌های نقطه‌ای انتخاب شدند. به منظور درک بهتر این تغییرات، تصاویر الکترون‌های پس پراکنده (BSE Back Scattered Electron Images) متعددی نیز از کانی‌های تورمالین و گارنت مورد بررسی تهیه شد. تجزیه‌های مورد



شکل ۱ الف) موقعیت منطقه مورد بررسی در نقشه تقسیم‌بندی ساختارهای زمین‌شناسی ایران برگرفته از [۱۷]. ب) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی. برگرفته از [۲۲، ۲۱]. موقعیت نمونه‌ها بر روی نقشه نشان داده شده است.

با اندازه‌ای ریزتر از بقیه کانی‌ها در این سنگ‌ها قابل مشاهده است. پورفایروکلاست‌ها معمولاً توسط بریدگی دور زده شده‌اند (شکل ۳ الف، ب، ت، ح و خ). کوارتز، مسکویت‌های ریزدانه و به مقدار کمتر اپیدوت کانی‌های موجود در زمینه سنگ را تشکیل می‌دهند.

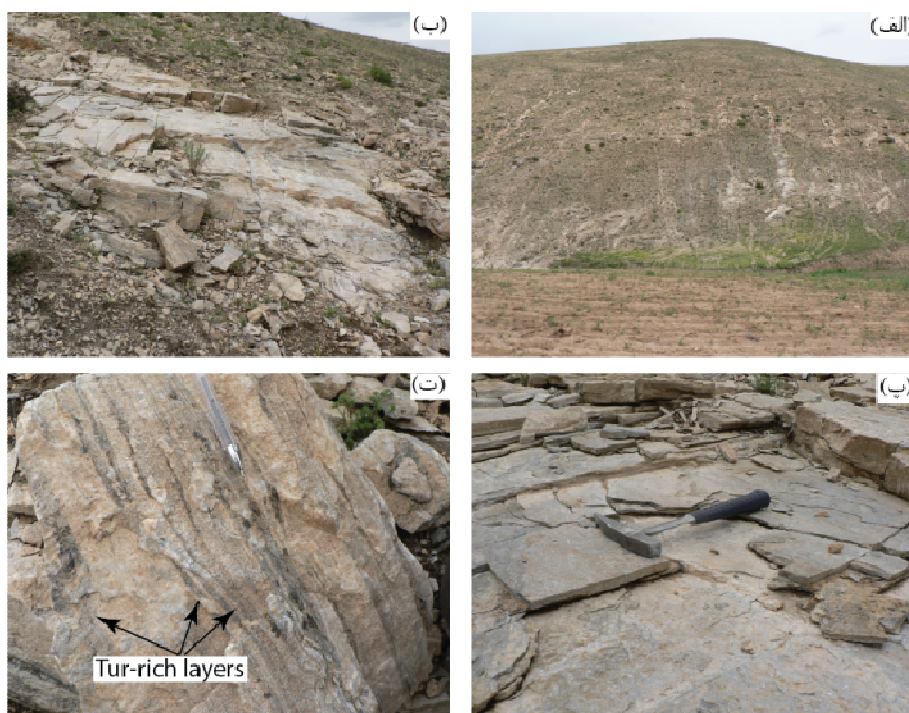
ارتوکلاز بیشتر بافت پرتیتی است به طوری که تیغه‌های جدایشی آلبیتی در آن‌ها قابل مشاهده است. پلاژیوکلاز در مقایسه با فلدسپار پتاسیم دارای فراوانی کمی است. این کانی بیشتر دارای ماکل پری‌کلین بوده و آثار دگرشکلی از خود نشان می‌دهد (شکل ۳ ت). میکروکلین با فراوانی کمتر از ارتوکلاز نیز در سنگ‌های مورد بررسی دیده می‌شود. این کانی دارای ماکل مشبک بوده و اغلب دارای شکستگی‌های فراوان در اثر تحمل دگرشکلی است.

مسکویت در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی به دو صورت دیده می‌شود. نوع اول شامل ذرات نسبتاً درشت مسکویت است که بیشتر نیز به صورت میکای ماهی شکل هستند (شکل ۳ ب و پ). نوع دوم ریز بوده و ثانویه هستند. مسکویت‌های ریزدانه در مناطق برشی و نیز سایه‌فشارهای اطراف پورفایروکلاست‌ها یافت می‌شوند (شکل ۳ ت).

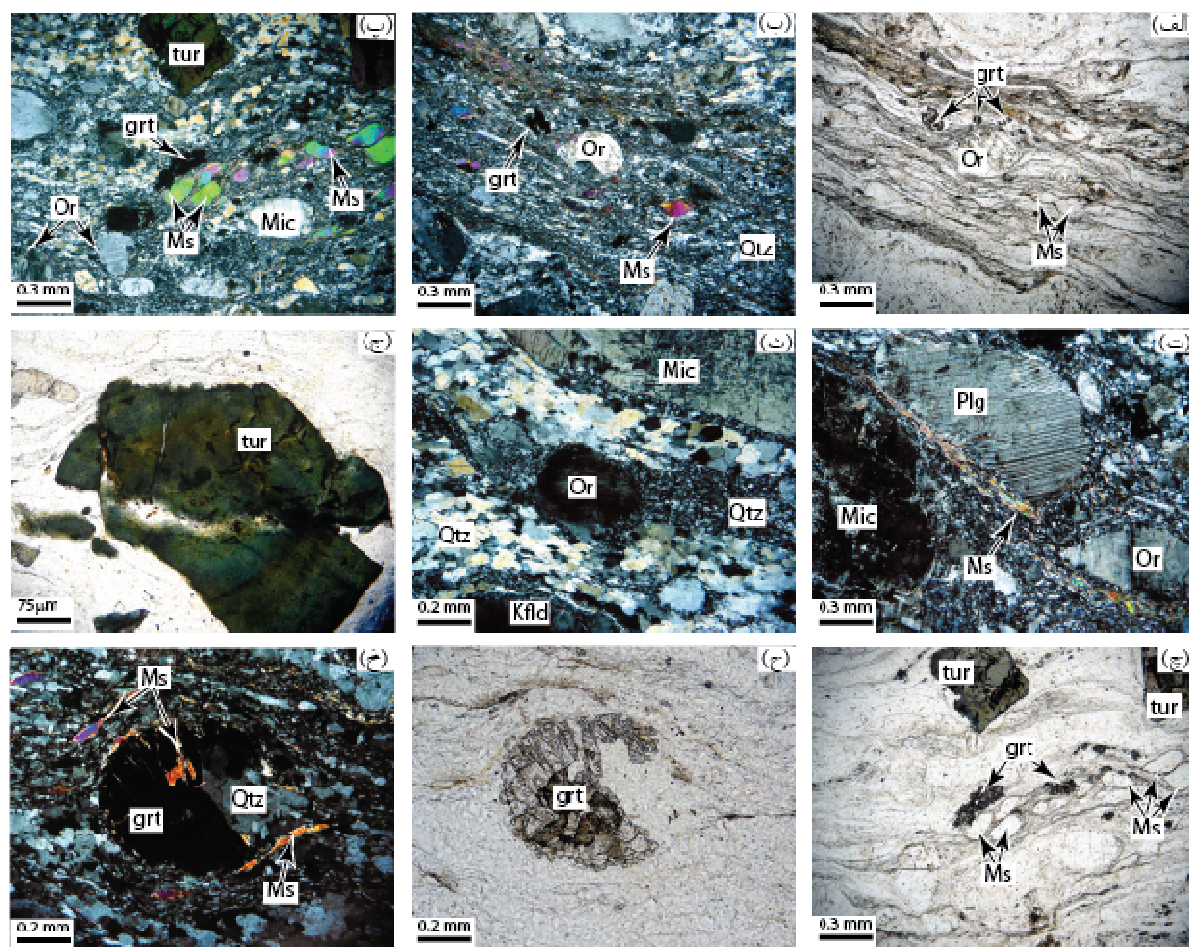
میلونیت‌گرانیتهای مورد بررسی در این پژوهش دارای گستردگی کمی بوده و به صورت توده‌های کوچک در اطراف روستاهای کانی‌سفید و بلارغو رخنمون دارند (شکل ۲ الف). این توده‌ها سفید رنگ هستند و در برخی موارد به دلیل عملکرد نیروهای زمین‌ساختی در منطقه به شدت دچار دگرشکلی شده‌اند. در نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سلماس [۲۱] و سرو [۲۲] این توده‌ها با توجه به گستردگی کم و خصوصیات ظاهریشان همچون رنگ سفید، به صورت مرمر و همراه با توده‌های مرمر که اغلب در نزدیکی این توده‌ها رخنمون دارند، نشان داده شده‌اند. توده‌های مورد بررسی به طور معمول دارای سه دسته درزه عمود برهم هستند که منجر به جدایش بخش‌هایی از این سنگ‌ها به صورت قطعه‌های مکعبی شکل شده است (شکل ۲ ب و پ). در این سنگ‌ها کانی‌های تورمالین به صورت لایه‌های نازک و سیاهرنگ دیده می‌شوند (شکل ۲ ت).

سنگ‌شناسی

بررسی‌های سنگ‌نگاری صورت گرفته بر روی سنگ‌ها نشان دهنده از دگرشکلی نسبتاً بالا و بافت میلونیتی آنها است (شکل ۳). پورفایروکلاست‌ها بیشتر متشکل از کانی‌های ارتوکلاز، میکروکلین، پلاژیوکلاز، تورمالین و مسکویت هستند. گارنت نیز



شکل ۲ الف) و ب) نمای دور از میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی (پ) درزه‌های موجود در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی (ت) لایه‌های غنی از تورمالین در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی.

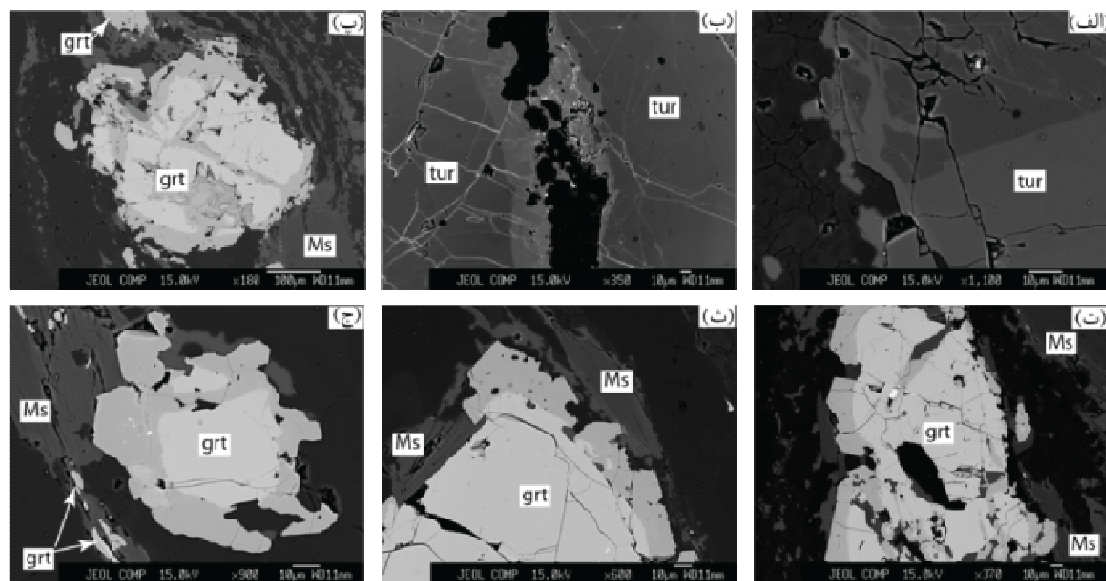


شکل ۳ (الف) و (ب) بافت میلونیتی در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی. تصویر (الف) در نور PPL و شکل (ب) در نور XPL تهیه شده است. دور زده شدن پورفیروکلاست‌ها توسط زمینه در این تصاویر مشهود است. (پ) مسکویت‌های باقیمانده از سنگ مادر که به صورت میکای ماهی شکل درآمدند. در قسمت بالای تصویر بلور خودریخت تورمالین که توسط زمینه دور زده شده است قابل مشاهده است (نور XPL). (ت) پلاژیوکلاز دگرشکل شده در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی (نور XPL). (ث) کوارتزهای باز تبلور یافته با بافت پرخش ریزدانه‌ای و برآمده و خاموشی موجی. (ج) بلور نیمه خودریخت تورمالین در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی. کوارتز شکستگی‌های موجود در این کانی را پر کرده است. (چ) بلورهای ریز گارنت به همراه مسکویت‌های ماهی شکل و تورمالین‌های خودریخت (نور PPL). (ح) و (خ) بلور گارنت که توسط زمینه دور زده شده است. فضای بین شکستگی‌ها در این بلور توسط کوارتز و مسکویت پر شده است (تصاویر به ترتیب در نورهای PPL و XPL تهیه شده‌اند). tur: تورمالین، grt: گارنت، Ms: مسکویت، Mic: میکروکلین، Or: ارتوکلاز، Qtz: کوارتز، Plg: پلاژیوکلاز.

کانی در برخی موارد در اثر تحمل دگرشکلی دچار شکستگی شده است و در فضای بین شکستگی‌ها کوارتز رشد نموده است (شکل ۳ ج).

گارنت در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی به صورت بلورهای بسیار ریزدانه دیده می‌شود (شکل‌های ۳ ج، ح و خ). در تصاویر BSE تهیه شده از این کانی منطقه‌بندی ترکیبی به خوبی قابل مشاهده است (شکل ۴ پ، ت، ث و ج). گارنت‌های مورد بررسی فاقد میانبار بوده و به صورت اشکال نیمه خودریخت تا بی‌شکل بوده و توسط بریدگی دور زده شده‌اند.

کوارتز موجود در زمینه سنگ دچار باز تبلور شده و به صورت بافت‌های چرخش ریزدانه‌ای و برآمده و با خاموشی موجی قابل مشاهده است (شکل ۳ ث). تورمالین‌های موجود در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی بیشتر به صورت نیمه خودریخت تا بی‌شکل هستند (شکل‌های ۳ ب، ج و چ). این کانی در سنگ‌های مورد بررسی به صورت پورفیروکلاست بوده و اغلب توسط بریدگی دور زده شده‌اند. بر اساس تصاویر BSE تهیه شده، تورمالین‌های موجود در سنگ‌های مورد بررسی دارای منطقه‌بندی ترکیبی هستند (شکل‌های ۴ الف و ب). این



شکل ۴ تصاویر BSE از (الف) و (ب) تورمالین با منطقه‌بندی ترکیبی ضعیف و (پ)، (ت)، (ث) و (ج) گارنت با منطقه‌بندی ترکیبی. Grt: گارنت، Ms: مسکویت، tur: تورمالین.

شیمی کانی

تورمالین

فرمول ساختاری تورمالین بر اساس ۳۱ آنیون و با استفاده از نرم‌افزار WinTcac [۲۳] محاسبه شده است. تمامی آهن موجود در ترکیب تورمالین‌های بررسی شده به صورت Fe^{2+} در نظر گرفته شده است. داده‌های حاصل از تجزیه این کانی در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار F و Cl اندازه‌گیری شده در ترکیب تورمالین‌های مورد بررسی بسیار اندک (تقریباً برابر با صفر) است و از این‌رو، تورمالین‌های موجود در میلوئیت‌گرانیت‌های غرب قوشچی از نوع هیدروتورمالین در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به بررسی‌های سنگ‌نگاری و نیز نتایج حاصل از تجزیه کانی‌ها به وسیله میکروسکوپ الکترونی، تورمالین‌های مورد بررسی دارای منطقه‌بندی ترکیبی ساده هستند و از این‌رو، به منظور بررسی ترکیب این کانی تجزیه‌های نقطه‌ای از قسمت‌های مرکز و کناره آن صورت گرفته است (جدول ۱).

ترکیب بیشتر تورمالین‌های مورد بررسی در نمودار سه تایی Ca-X-vacancy site- Na+K [۲۴] در گستره‌ی تورمالین‌های قلیایی (غنی از Na و K) واقع شده‌اند (شکل ۵). بر اساس بررسی‌های مختلف (برای مثال [۲۵، ۲۶]) تورمالین‌های قلیایی در شرایط اسیدی و در دمای به نسبت پایین تشکیل می‌گردند. به منظور تعیین نوع تورمالین‌های موجود در میلوئیت‌گرانیت‌های غرب قوشچی از نمودارهای X-vac/(X-vac+ Na+ K) نسبت به $Mg/(Mg+Fe)$ [۲۴] و $Na/(Na+Ca)$ نسبت به $Fe/(Fe+Mg)$ [۲۷] استفاده شده است (شکل‌های ۶ الف و

ب). در این نمودارها، همه تورمالین‌های مورد بررسی از نوع شورل هستند. مجموع کاتیون‌های موجود در جایگاه X (Na+Ca+K) در تورمالین‌های مورد بررسی به صورت apfu $0.63 - 0.48$ برای قسمت مرکزی و $0.84 - 0.67$ برای کناره کانی است. این تغییرات بیانگر وجود تهجا در جایگاه X در ساختار تورمالین است. نسبت $Mg/(Mg+Fe)$ برای قسمت مرکزی تورمالین‌های مورد بررسی از 0.250 تا 0.284 و برای قسمت کناره‌ای از 0.237 تا 0.296 در تغییر است. وجود تغییر در نسبت عدد منیزیم در تورمالین‌ها می‌تواند بیانگر وجود جانشینی $FeMg_1$ (بین اعضای انتهایی شورل و دراویت) باشد. گرچه بررسی مجموع Fe و Mg موجود در ترکیب تورمالین‌های مورد بررسی کمتر از ۳ اتم در واحد فرمولی (apfu) $2.094 - 1.989$ برای مرکز و $2.645 - 2.455$ برای کناره است. این امر نشان‌دهنده وجود Al و جانشینی این عنصر در جایگاه Y در ترکیب تورمالین‌های مورد بررسی است (شکل ۶پ). به‌منظور بررسی اهمیت جانشینی Al در ساختار تورمالین از نمودار X-Vac نسبت به Al_{tot} [۲۸] استفاده شده است (شکل ۶ ت). در این نمودار نمونه‌های کناره‌ای دارای تطابق مثبت بوده و به موازات بردار جانشینی AlX- $vac(R^{2+}Na)_1$ ترسیم شده‌اند. در صورتیکه نمونه‌های تجزیه شده از قسمت مرکزی روند قابل توجهی نشان نمی‌دهند. این امر بیانگر تأثیر بردار جانشینی دیگری در جایگاه Y است. از این‌رو برای بررسی بیشتر، از نمودار R2 نسبت به Al^Y [۲۹] استفاده شده است (شکل ۶ ث). در این نمودار همه نمونه‌های

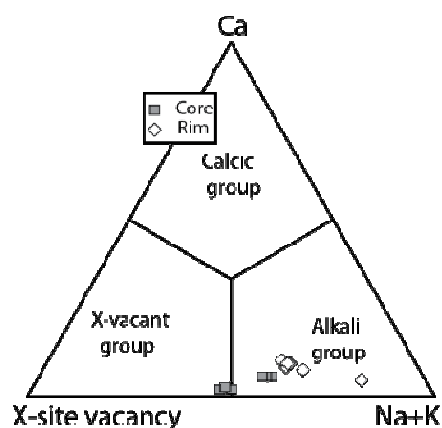
تهیجای موجود در جایگاه X در تغییرات ترکیبی مشاهده شده در تورمالین‌های مورد بررسی، از نمودارهای $X\text{-Vac}+Al^*$ نسبت به Na^*+Mg^* (شکل ۶ چ) و $Na+K$ نسبت به $X\text{-Vac}$ (شکل ۶ ج) استفاده شده است. در این نمودارها همه نمونه‌های مورد بررسی (قسمت مرکزی و کناره‌ای) دارای تطابق منفی خوبی هستند. در نمودار $X\text{-Vac}+Al^*$ نسبت به Na^*+Mg^* نمونه‌های مورد بررسی به موازات بردارهای جانشینی $\square AlNa$ و ${}_{-1}R^{2+}$ و $\square(OH)Na_{-1}O_{-1}$ قرار گرفته‌اند ($\square$: تهیجا در جایگاه X).

مورد بررسی دارای تطابق مثبت بوده و به موازات بردار جانشینی $AIO(R^{2+}OH)_{-1}$ قرار گرفته‌اند. بر اساس نتایج حاصل از بررسی این نمودارها به نظر می‌رسد که مقدار Al در جایگاه Y توسط ترکیبی از بردارهای جانشینی $AIX\text{-vac}(R^{2+}Na)_{-1}$ ، $AIO(R^{2+}OH)_{-1}$ و $FeMg_{-1}$ کنترل می‌شود. جانشینی Al در جایگاه Y منجر به کمبود پروتون در ساختار تورمالین می‌گردد [۳۰]. این ویژگی در تورمالین‌های مورد بررسی در نمودار $R1+R2$ نسبت به $R3$ [۳۰] به خوبی مشهود است (شکل ۶ ج). در این نمودار همه نمونه‌ها در نزدیکی خط کمبود پروتون واقع شده‌اند. به منظور بررسی نقش

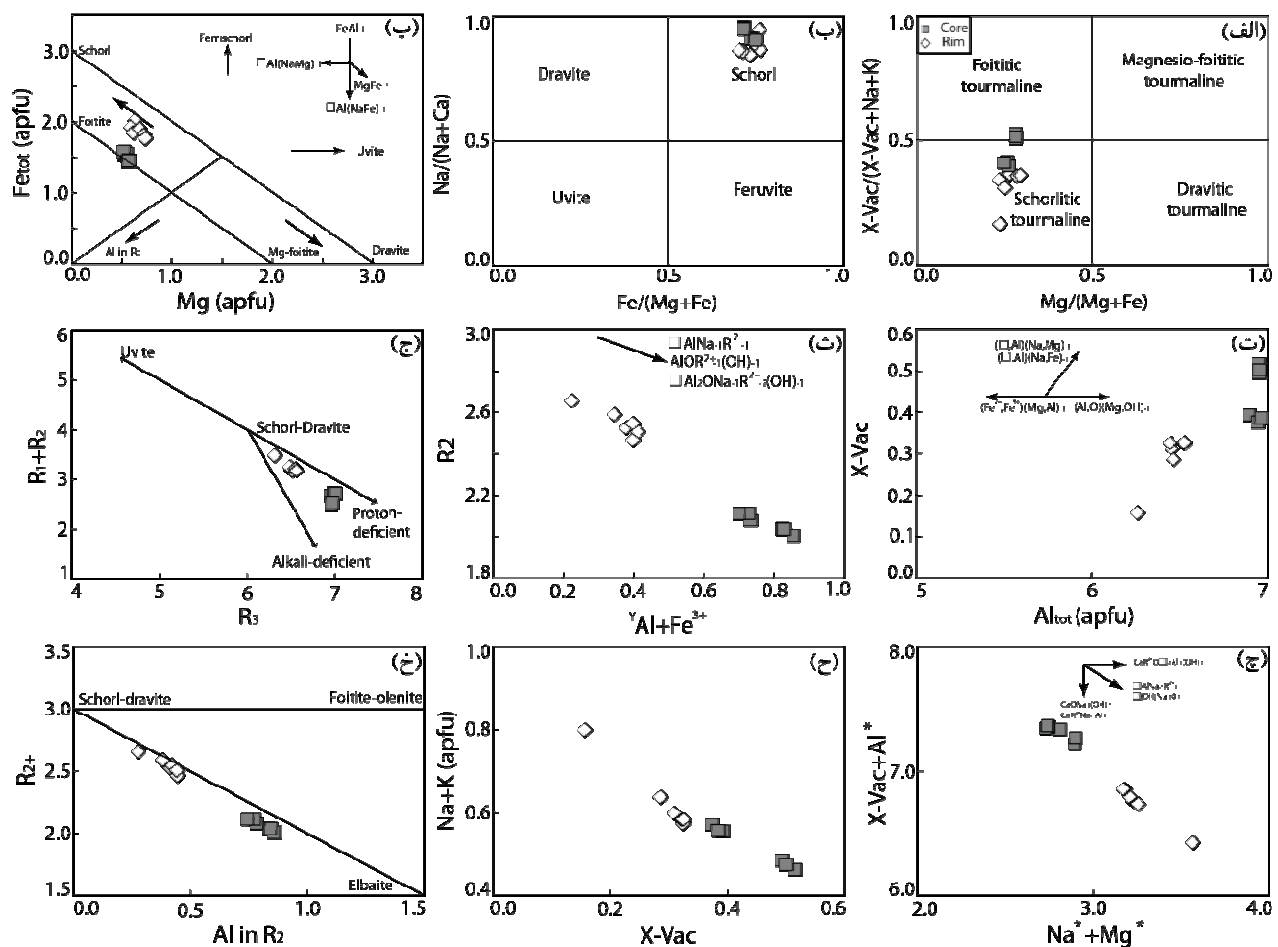
جدول ۱ نتایج حاصل از تجزیه نقطه‌ای تورمالین‌های موجود در میلونیت‌گرانیته‌های غرب قوشچی.

کناره	مرکز									
	۱۱۵	۱۱۶	۱۱۷	۱۲۱	۱۲۲	۱۲۳	۱۱۸	۱۱۹	۱۲۰	۱۲۴
SiO ₂	۳۵٫۷۸	۳۵٫۸۱	۳۵٫۸۱	۳۵٫۷۳	۳۵٫۳۹	۳۵٫۶۹	۳۶٫۰۰	۳۵٫۵۵	۳۵٫۱۷	۳۶٫۳۴
TiO ₂	۰٫۳۳	۰٫۲۳	۰٫۳۰	۰٫۲۲	۰٫۱۵	۰٫۲۰	۰٫۳۰	۰٫۲۷	۰٫۲۸	۰٫۰۷
Al ₂ O ₃	۳۱٫۹۱	۳۳٫۱۶	۳۳٫۱۷	۳۳٫۱۶	۳۳٫۴۳	۳۳٫۶۴	۳۶٫۱۴	۳۶٫۲۹	۳۶٫۲۸	۳۶٫۵۷
FeO	۱۴٫۴۵	۱۳٫۸۹	۱۳٫۲۷	۱۳٫۷۵	۱۳٫۰۴	۱۲٫۷۶	۱۱٫۲۷	۱۱٫۳۸	۱۱٫۵۳	۱۰٫۷۵
MnO	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۴	۰٫۰۹	۰٫۰۵	۰٫۱۳	۰٫۱۳	۰٫۱۳	۰٫۱۱
MgO	۲٫۵۵	۲٫۴۲	۲٫۵۱	۲٫۷۸	۲٫۹۳	۳٫۰۲	۲٫۲۰	۲٫۲۶	۲٫۱۵	۲٫۳۸
CaO	۰٫۲۵	۰٫۵۱	۰٫۴۴	۰٫۵۸	۰٫۵۳	۰٫۵۱	۰٫۳۰	۰٫۳۲	۰٫۳۳	۰٫۱۳
Na ₂ O	۲٫۴۲	۱٫۸۴	۱٫۹۵	۱٫۷۷	۱٫۸۰	۱٫۸۱	۱٫۷۴	۱٫۷۸	۱٫۷۳	۱٫۵۳
K ₂ O	۰٫۰۸	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۳
Li ₂ O	۰٫۱۲	۰٫۱۰	۰٫۱۵	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۰۸	۰٫۲۳	۰٫۱۹	۰٫۱۴	۰٫۱۸
H ₂ O	۳٫۳۹	۳٫۲۸	۳٫۲۷	۳٫۳۰	۳٫۲۹	۳٫۲۹	۳٫۲۰	۳٫۲۳	۳٫۲۴	۳٫۱۵
B ₂ O ₃	۱۰٫۴۳	۱۰٫۵۱	۱۰٫۵۰	۱۰٫۵۳	۱۰٫۴۸	۱۰٫۵۵	۱۰٫۷۳	۱۰٫۷۰	۱۰٫۶۶	۱۰٫۷۷
Total	۱۰۱٫۷۸	۱۰۱٫۸۷	۱۰۱٫۵۱	۱۰۱٫۹۶	۱۰۱٫۲۳	۱۰۱٫۶۲	۱۰۲٫۳۰	۱۰۲٫۱۵	۱۰۲٫۱۹	۱۰۲٫۰۶۳

فرمول براساس ۳۱ آنیون										
Si	۵٫۹۶	۵٫۹۲	۵٫۹۳	۵٫۹۰	۵٫۸۷	۵٫۸۸	۵٫۸۳	۵٫۷۸	۵٫۷۳	۵٫۸۷
Ti	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۰۹
Al	۶٫۲۶	۶٫۴۶	۶٫۴۷	۶٫۴۵	۶٫۵۳	۶٫۵۳	۶٫۹۰	۶٫۹۵	۶٫۹۷	۶٫۹۶
Fe ²⁺	۲٫۰۱	۱٫۹۲	۱٫۸۴	۱٫۹۰	۱٫۸۱	۱٫۷۶	۱٫۵۳	۱٫۵۵	۱٫۵۷	۱٫۴۵
Mn ²⁺	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲
Mg	۰٫۶۳	۰٫۶۰	۰٫۶۲	۰٫۶۸	۰٫۷۳	۰٫۷۴	۰٫۵۳	۰٫۵۵	۰٫۵۲	۰٫۵۳
Ca	۰٫۰۴	۰٫۰۹	۰٫۰۸	۰٫۱۰	۰٫۰۹	۰٫۰۹	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۰۲
Na	۰٫۷۸	۰٫۵۹	۰٫۶۳	۰٫۵۷	۰٫۵۸	۰٫۵۸	۰٫۵۵	۰٫۵۶	۰٫۵۵	۰٫۴۸
K	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Li	۰٫۰۲	۰٫۰۷	۰٫۱۰	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۶	۰٫۱۵	۰٫۱۳	۰٫۰۹	۰٫۱۲
B	۳٫۰۰	۳٫۰۰	۳٫۰۰	۳٫۰۰	۳٫۰۰	۳٫۰۰	۳٫۰۰	۳٫۰۰	۳٫۰۰	۳٫۰۰



شکل ۵ ترکیب تورمالین‌های موجود در میلونیت‌گرانیته‌های غرب قوشچی در نمودار مثلثی Ca-X-site vacancy-Na+K (برگرفته از [۲۴]).



شکل ۶ (الف) و (ب) نمودارهای $X\text{-Vac}/(X\text{-Vac}+Na+K)$ نسبت به $Mg/(Mg+Fe)$ (برگرفته از [۲۴]) و $Na/(Na+Ca)$ نسبت به $Fe/(Mg+Fe)$ (برگرفته از [۳۷]) برای رده‌بندی تورمالین‌های مورد بررسی. ترکیب تورمالین‌های مورد بررسی از نوع شورل است. (پ) نمودار Fe_{tot} نسبت به Mg (برگرفته از [۹]). در این نمودار همه نمونه‌های مورد بررسی پایین‌تر از خط شورل-دراویت واقع شده‌اند. (ت) نمودار $X\text{-vac}$ نسبت به Al_{tot} [۲۸]. نمونه‌های تجزیه شده از قسمت کناره‌ای دارای تطابق مثبت ضعیف و نمونه‌های تجزیه شده از قسمت مرکزی فاقد روند خاصی هستند. (ث) نمودار R_2 نسبت به $YAl+Fe^{3+}$ [۲۹]. تورمالین‌های مورد بررسی بموازات بردارهای جانشینی نشان داده شده در شکل قرار گرفته‌اند ($R_2=Fe+Mg+Mn$). (ج) نمودار R_1+R_2 نسبت به R_3 [۳۰]. در این نمودار تورمالین‌های مورد بررسی در نزدیکی خط کمبود پروتون واقع شده‌اند. (ح) نمودارهای $X\text{-vac}+Al^*$ نسبت به Na^*+Mg^* و $Na+K$ نسبت به $X\text{-vac}$ (ج) و (ح) نمودارهای $X\text{-vac}+Al^*$ نسبت به Na^*+Mg^* و $Na+K$ نسبت به $X\text{-vac}$ (خ) نمودار R_2+ نسبت به Al در جایگاه X است. (خ) نمودار R_2+ نسبت به Al در جایگاه X است. (خ) نمودار R_2+ نسبت به Al در جایگاه X است. (خ) نمودار R_2+ نسبت به Al در جایگاه X است.

های T و Z به ترتیب به طور کامل توسط عناصر $Si+Al$ و Al پر شده‌اند. مقدار Al در جایگاه T برای تورمالین‌های مورد بررسی به نسبت پایین بوده و 0.13 تا 0.27 اتم در واحد فرمولی برای مرکز و کمتر از 0.13 اتم در واحد فرمولی برای کناره در تغییر است. از این رو نقش جانشینی در جایگاه‌های T و Z در ایجاد تغییرات ترکیبی در تورمالین‌های مورد بررسی ناچیز و قابل چشم‌پوشی است.

در نمودار R_2+ نسبت به Al in R_2 [۹] همه نمونه‌ها در راستای خط شورل-دراویت-البائیت (بردار جانشینی $LiAl(Fe,Mg)_2^{2+}$) واقع شده‌اند (شکل ۶ خ). با توجه به این نمودار به نظر می‌رسد که در ساختار تورمالین‌های مورد بررسی مقداری Li وجود دارد که همراه با Al جانشین عناصر Fe و Mg در جایگاه Y شده‌اند.

بررسی داده‌های به دست آمده از تجزیه کانی تورمالین‌های مورد بررسی به روش ریزپردازشگر، بیانگر این است که جایگاه-

گارنت

فرمول ساختاری گارنت بر اساس ۱۲ اتم اکسیژن محاسبه شده است. با توجه به نتایج حاصل از محاسبات عنصرسنجی به منظور تعیین نسبت Fe^{2+}/Fe^{3+} همه آهن موجود در ترکیب گارنت‌های مورد بررسی به صورت Fe^{2+} است. تصاویر BSE بدست آمده از گارنت‌های موجود در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی بیانگر وجود منطقه‌بندی ترکیبی در این کانی است. از اینرو گارنت‌های مورد بررسی از قسمت‌های مرکز و کناره‌ای توسط ریزپردازشگر تجزیه شده‌اند. نتایج حاصل از تجزیه گارنت‌های مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده است. قسمت مرکزی گارنت‌های مورد بررسی غنی از اعضای انتهایی آلماندین

و اسپسارتین است، در حالیکه قسمت کناره‌ای این کانی از اعضای انتهایی آلماندین، گروسولار و اسپسارتین غنی شده است. ترکیب قسمت مرکزی به صورت $Alm_{74.5-79.37}Sps_{14.41-20.36}Pyp_{2.62-4.96}Grss_{1.36-1.80}$ و قسمت کناره‌ای به صورت $Alm_{40.62-49.72}Sps_{10.06-20.66}Pyp_{0.48-0.93}Grss_{37.13-41.38}$ است. مقادیر SiO_2 و Al_2O_3 موجود در کناره و مرکز گارنت‌های تجزیه شده تقریباً مشابه است. مقدار این اکسیدها به ترتیب برای مرکز به صورت $37.41 - 37.06$ و $22.33 - 22.03$ درصد وزنی اکسیدها و برای کناره برابر با $38.38 - 37.93$ و $22.44 - 22.31$ درصد وزنی اکسیدها است.

جدول ۲ نتایج حاصل از تجزیه نقطه‌ای گارنت‌های موجود در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی.

	کناره					مرکز					
	۲۷	۱۰۵	۱۱۰	۱۱۱	۱۱۲	۲۲	۲۴	۱۰۶	۱۰۷	۱۰۸	۱۰۹
SiO ₂	۳۷٫۹۳	۳۸٫۳۰	۳۸٫۱۴	۳۸٫۳۳	۳۸٫۳۸	۳۷٫۲۰	۳۷٫۰۶	۳۷٫۴۱	۳۷٫۱۵	۳۷٫۲۲	۳۷٫۱۹
TiO ₂	۰٫۰۶	۰٫۰۲	۰٫۰۴	۰٫۰۸	۰٫۰۴	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۹	۰٫۰۰	۰٫۰۱
Al ₂ O ₃	۲۲٫۳۱	۲۲٫۳۲	۲۲٫۴۴	۲۲٫۳۳	۲۲٫۴۰	۲۲٫۳۳	۲۲٫۲۲	۲۲٫۰۸	۲۲٫۲۴	۲۲٫۱۷	۲۲٫۰۳
Cr ₂ O ₃	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰
FeO	۲۲٫۴۶	۲۱٫۰۶	۱۷٫۵۹	۱۹٫۲۲	۲۱٫۸۶	۳۲٫۸۶	۳۵٫۰۲	۳۴٫۵۸	۳۴٫۷۸	۳۴٫۳۶	۳۱٫۹۷
MnO	۴٫۵۰	۶٫۳۸	۹٫۲۸	۶٫۶۴	۵٫۰۹	۸٫۸۷	۶٫۶۴	۶٫۳۶	۶٫۴۵	۶٫۶۷	۸٫۸۶
MgO	۰٫۲۰	۰٫۲۱	۰٫۱۲	۰٫۱۳	۰٫۲۴	۰٫۸۸	۰٫۲۳	۱٫۲۰	۰٫۱۹	۱٫۱۰	۰٫۶۵
CaO	۱۳٫۹۰	۱۳٫۲۲	۱۳٫۵۷	۱۴٫۷۶	۱۳٫۷۷	۰٫۶۲	۰٫۵۰	۰٫۵۰	۰٫۵۰	۰٫۵۴	۰٫۶۲
Na ₂ O	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۲
K ₂ O	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۷	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۸
Total	۱۰۱٫۴۵	۱۰۱٫۵۳	۱۰۱٫۱۸	۱۰۱٫۵۲	۱۰۱٫۷۸	۱۰۲٫۷۶	۱۰۲٫۳۸	۱۰۲٫۱۳	۱۰۲٫۴۱	۱۰۲٫۰۷	۱۰۱٫۳۲
فرمول براساس ۱۲ اکسیژن											
Si	۲٫۹۶	۲٫۹۸	۲٫۹۷	۲٫۹۸	۲٫۹۸	۲٫۹۵	۲٫۹۴	۲٫۹۷	۲٫۹۵	۲٫۹۶	۲٫۹۷
Al iv	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۳	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۳
Al vi	۲٫۰۲	۲٫۰۴	۲٫۰۴	۲٫۰۳	۲٫۰۳	۲٫۰۴	۲٫۰۳	۲٫۰۴	۲٫۰۴	۲٫۰۵	۲٫۰۶
Fe ²⁺	۱٫۵۰	۱٫۴۲	۱٫۲۰	۱٫۲۹	۱٫۴۶	۲٫۲۳	۲٫۳۷	۲٫۳۵	۲٫۳۶	۲٫۳۴	۲٫۲۲
Mn	۰٫۳۰	۰٫۴۲	۰٫۶۱	۰٫۴۴	۰٫۳۳	۰٫۶۰	۰٫۴۳	۰٫۴۳	۰٫۴۳	۰٫۴۵	۰٫۶۰
Mg	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۱۰	۰٫۱۵	۰٫۱۴	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۰۸
Ca	۱٫۱۷	۱٫۱۰	۱٫۱۳	۱٫۲۳	۱٫۱۵	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۵	۰٫۰۵
Total	۸٫۰۱	۸٫۰۰	۸٫۰۱	۸٫۰۰	۸٫۰۱	۸٫۰۲	۸٫۰۲	۸٫۰۱	۸٫۰۲	۸٫۰۱	۸٫۰۱
اعضای انتهایی											
Almandine	۴۹٫۷۲	۴۷٫۸۵	۴۰٫۶۲	۴۳٫۴۰	۴۹٫۲۸	۷۴٫۵۰	۷۹٫۱۱	۷۹٫۳۷	۷۹٫۰۸	۷۸٫۸۶	۷۵٫۲۱
Grossular	۳۹٫۳۶	۳۷٫۱۳	۳۸٫۲۳	۴۱٫۳۸	۳۸٫۵۴	۱٫۷۸	۱٫۴۳	۱٫۴۱	۱٫۳۶	۱٫۵۵	۱٫۸۰
Pyrope	۰٫۷۹	۰٫۸۳	۰٫۴۸	۰٫۵۲	۰٫۹۳	۳٫۵۱	۴٫۹۶	۴٫۷۸	۴٫۷۸	۴٫۳۹	۲٫۶۲
Spessartine	۱۰٫۰۶	۱۴٫۱۷	۲۰٫۶۶	۱۴٫۷۰	۱۱٫۲۵	۲۰٫۲۰	۱۴٫۴۹	۱۴٫۴۱	۱۴٫۷۱	۱۵٫۱۹	۲۰٫۳۶
Uvarovite	۰٫۰۸	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۰۶	۰٫۰۱	۰٫۰۰

بحث و بررسی

خاستگاه تورمالین در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی

شیمی کانی تورمالین حساس به محیطی است که در آن متبلور شده است [۳۱-۳۵]. بر اساس روابط بافتی موجود در سنگ‌های مورد بررسی (همچون دور زده شدن تورمالین توسط کانی‌های زمینه و توسعه ریز شکستگی‌ها در ساختار کانی، شکل‌های ۳ ب و ج) به نظر می‌رسد که پورفیروکلاست‌های تورمالین پیش از دگرشکلی و همچنین دگرگونی متبلور شده و بقایایی از کانی‌های اولیه موجود در سنگ مادر هستند.

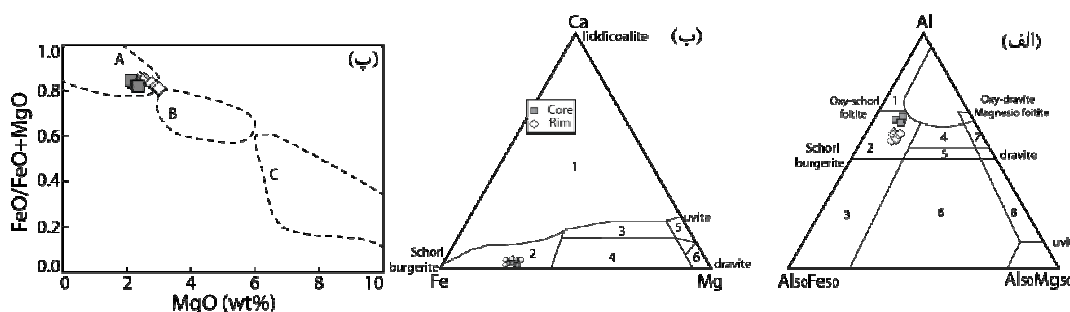
تورمالین‌های مورد بررسی اغلب نیمه‌خودریخت هستند که در مواردی در اثر تحمل دگرشکلی دچار شکستگی و خرد شدگی از کناره و جدا شدن ذرات کوچک‌تر از بلورهای درشت‌تر شده‌اند. بررسی‌های انجام شده توسط محققان مختلف بر روی کانی تورمالین، بیانگر این است که تورمالین‌های ماگمایی بیشتر با اشکال خودریخت [۳۶]، مقادیر بالای آلومینیوم و مقدار بالای فضای تهیجا در جایگاه X [۳۷] و مقادیر بالای آهن [۱۱] مشخص می‌شوند. این ویژگی‌ها با تورمالین‌های موجود در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی همخوانی دارد. البته گفتنی است که تورمالین‌های ماگمایی اغلب فاقد منطقه‌بندی ترکیبی و دارای ترکیب همگن هستند، در صورتیکه تورمالین‌هایی با خاستگاه گرمایی، اغلب دارای منطقه‌بندی ظریف، جانشینی شیمیایی وسیع و در برخی موارد غنی‌شدگی Mg به سمت کناره هستند [۳۸، ۳۹]. بررسی‌های شیمی‌کانی و نیز تصاویر BSE تهیه شده از تورمالین‌های مورد بررسی (شکل‌های ۴ الف و ب) بیانگر وجود منطقه‌بندی ترکیبی ضعیف در این کانی‌ها است. منطقه‌بندی ترکیبی مشاهده شده برای تورمالین‌های مورد بررسی بیانگر کاهش مقادیر Al_2O_3 و MnO و افزایش مقادیر FeO، MgO و به مقدار کمتر CaO و Na_2O در کناره است. این ویژگی‌ها بیشتر در تورمالین‌های ماگمایی دیده می‌شود [۹، ۳۷].

به منظور تعیین خاستگاه تورمالین‌های مورد بررسی از نمودار Al-Fe-Mg که بیانگر رابطه بین ترکیب تورمالین و سنگ میزبان است [۴]، استفاده شده است (شکل ۷ الف). نمونه‌های مورد بررسی در ناحیه این نمودار ۲ که نشان‌دهنده گرانیتهای فقیر از Li و پگماتیت‌ها و آپلیتهای وابسته به آن است، واقع شده‌اند. نتیجه‌ای مشابه برای نمونه‌های مورد بررسی در نمودار Ca-Fe-Mg [۴] نیز قابل مشاهده است (شکل ۷ ب). نتایج حاصل از این نمودارها با مشاهدات سنگ‌شناسی و

نیز ترکیب شیمیایی تورمالین‌های مورد بررسی همخوانی دارد. همچنین برای تعیین خاستگاه و تورمالین‌های موجود در سنگ‌های مورد بررسی می‌توان از نسبت $FeO/(FeO+MgO)$ استفاده کرد [۴۰]. بر این اساس ترکیب تورمالین‌های ماگمایی بیشتر دارای مقادیر بالای نسبت $FeO/(FeO+MgO)$ (بیش از ۰/۸) هستند، در صورتیکه نسبت‌های کمتر از ۰/۶ بیانگر تأثیر خاستگاه خارجی برای تأمین B در تبلور تورمالین است. نسبت $FeO/(FeO+MgO)$ برای تورمالین‌های مورد بررسی از ۰/۸۲ تا ۰/۸۴ برای مرکز و از ۰/۸۱ تا ۰/۸۵ برای کناره در تغییر است. مقادیر محاسبه شده برای تورمالین‌های مورد بررسی با ترکیب تورمالین‌های ماگمایی همخوانی دارد. این امر را می‌توان در نمودار $FeO/(FeO+MgO)$ نسبت به MgO [۴۰] نیز مشاهده نمود (شکل ۷ پ). در این نمودار همه نمونه‌های تجزیه شده در گستره تورمالین‌های درون گرانیتهای نزدیک به توده گرانیتهی واقع شده‌اند. در این نمودار تعدادی از نمونه‌های تجزیه شده از کناره تورمالین‌های مورد بررسی در گستره نزدیک به توده گرانیتهی تا حدواسط قرار گرفته‌اند.

خاستگاه گارنت در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی

گارنت در سنگ‌های آذرین اسیدی (گرانیته و ریولیت-داسیت) نوع S که از نظر زمین‌شیمی به شدت پراآلومینوس هستند، در شرایط فشار پایین و در بخش بالا پسته متبلور می‌شود [۴۱-۴۷]. بر اساس نتایج این پژوهش‌ها، ترکیب گارنت‌های متبلور شده در سنگ‌های آذرین اسیدی دارای مقادیر بالایی از FeO (بیش از ۳۰٪ وزنی اکسیدها) هستند. برای وجود گارنت در سنگ‌های آذرین معمولاً دلایل متعددی مطرح می‌شود از جمله: فاز دیرگداز باقیمانده در ذوب‌بخشی [۴۸]، تبلور از گدازه به شدت جدایش یافته گرانیتهی پراآلومینوس در شرایط فشار پایین [۴۹]، به عنوان کانی فرعی در لویکوگرانیته‌ها، پگماتیت‌های گرانیتهی و/یا آپلیته‌ها که در مراحل نهایی متبلور می‌شود [۵۰]. از این‌رو تعیین خاستگاه دقیق این کانی در سنگ‌های آذرین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌منظور تعیین خاستگاه گارنت موجود در سنگ‌های آذرین می‌توان از معیارهای گوناگونی همچون ترکیب گارنت، الگوی منطقه‌بندی ترکیبی و روابط بافتی استفاده نمود. ترکیب گارنت‌های گزارش شده برای سنگ‌های گرانیتهی و آپلیته‌ها و پگماتیت‌های گرانیتهی بیشتر به صورت محلول جامد بین آلماندن و اسپسارتین است [۵۱-۵۳].

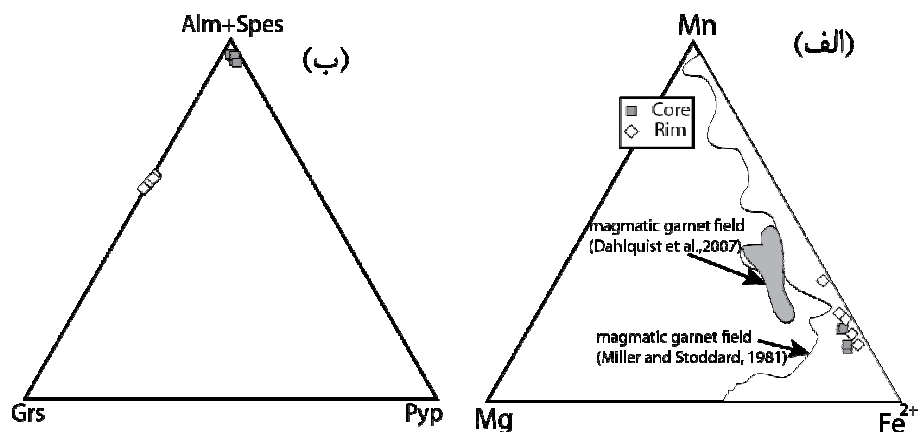


شکل ۷ (الف) نمودار مثلثی $Al-Al_{50}Fe_{50}-Al_{50}Mg_{50}$ [۴] به منظور تعیین سنگ خاستگاه تورمالین. همه تورمالین‌های تجزیه شده از میلونیت-گرانیت‌های غرب قوشچی در ناحیه ۲ واقع شده‌اند. در این نمودار ناحیه ۱: گرانیتوئیدهای غنی از Li و پگماتیت‌ها و آپلیت‌های وابسته به آن، ۲-گرانیتوئیدهای فقیر از Li و پگماتیت‌ها و آپلیت‌های وابسته به آن، ۳-سنگ‌های کوارتز-تورمالین غنی از Fe^{3+} ، ۴-متاپلیت‌ها و متاسامیت‌های همراه با فاز اشباع از Al، ۵-متاپلیت‌ها و متاسامیت‌های فاقد فاز غنی از Al، ۶-سنگ‌های کوارتز-تورمالینی غنی از Fe^{3+} ، سنگ‌های آهکی-سیلیکاته و متاپلیت‌ها، ۷-فرامافیک‌های دگرگون شده با میزان Ca کم و متاسدیمیت‌های غنی از Cr و V، ۸-کربنات‌ها و پیروکسنیت‌های دگرگون شده. (ب) نمودار مثلثی $Ca-Fe-Mg$ [۴] برای تعیین سنگ خاستگاه تورمالین. همه نمونه‌های مورد بررسی در ناحیه ۲ واقع شده‌اند. اعداد موجود در این نمودار عبارتند از: ۱-گرانیتوئیدهای غنی از Li و پگماتیت‌ها و آپلیت‌های وابسته به آن، ۲-گرانیتوئیدهای فقیر از Li و پگماتیت‌ها و آپلیت‌های وابسته به آن، ۳-متاپلیت‌های غنی از Ca، متاسامیت‌ها و سنگ‌های آهکی سیلیکاتی، ۴-متاپلیت‌های فقیر از Ca، متاسامیت‌ها و سنگ‌های کوارتز-تورمالینی، ۵-کربنات‌های دگرگون شده، ۶-فرامافیک‌های دگرگون شده. (پ) نمودار $FeO/(FeO+MgO)$ نسبت به MgO [۴] برای تعیین سنگ خاستگاه تورمالین در سنگ‌های گرانیتی. نمونه‌های تجزیه شده از قسمت مرکزی بطور کامل در ناحیه A و نمونه‌های تجزیه شده از بخش کناره در مرز ناحیه‌های A و B واقع شده‌اند. در این نمودار ناحیه A: تورمالین‌های درون گرانیتی تا نزدیک به توده گرانیتی، B: نزدیک به توده گرانیت تا حد واسط و C: تورمالین‌های دور از توده گرانیتی، هستند.

کناره فقیر از Mn و غنی از آلماندن گزارش نموده‌اند. آنها کنترل نسبت $Mn/(Mn+Fe)$ در گدازه توسط گارنت را دلیل اصلی ایجاد چنین الگوی منطقه‌بندی ترکیبی در گارنت‌های مورد بررسی بیان کرده‌اند. بررسی منطقه‌بندی ترکیبی در گارنت‌های موجود در میلونیت گرانیت‌های غرب قوشچی بیانگر کاهش ناگهانی اعضای انتهایی آلماندن، اسپسارتین و پیروپ و افزایش چشمگیر ناگهانی عضو انتهایی گروسولار در کناره است. مقدار عضو انتهایی گروسولار در قسمت مرکزی ۱۸۰٪-۱۳۶٪ و در حاشیه برابر با ۴۱۳٪-۳۷۱٪ است. افزایش Ca در قسمت کناره‌ای گارنت‌های سائوالپ-کورالپ (Saualpe-Koralpe) واقع در آلپ شرقی را به تأثیر دگرگونی نسبت داده‌اند [۵۸].

ترکیب قسمت کناره‌ای گارنت‌های مورد بررسی تقریباً مشابه با گارنت‌های حاصل از دگرگونی گزارش شده از گرانیت-های دگرگون شده منطقه گرن پارادیسو [۵۹، ۶۰] و ارتوگنیس‌های مونته‌رزا [۶۱] است. بر اساس برخی پژوهش‌های صورت گرفته (برای مثال [۶۲، ۶۳]) مقدار X_{Grs} موجود در ترکیب گارنت وابسته به فشار بوده و با افزایش فشار افزایش می‌یابد. ترکیب گارنت‌های مورد بررسی در نمودار مثلثی $Alm+Spes-Grs-Pyp$ نشان داده شده است (شکل ۸ ب). در این نمودار تفاوت ترکیب قسمت مرکز و کناره گارنت‌های مورد بررسی به‌خوبی مشهود است.

گارنت موجود در سنگ‌های مورد بررسی بیشتر دارای منطقه‌بندی ترکیبی ساده هستند. ترکیب قسمت مرکزی در این کانی‌ها به صورت محلول جامد آلماندن-اسپسارتین و بخش کناره‌ای به صورت آلماندن-گروسولار-اسپسارتین است. مقدار عضو انتهایی آلماندن برای قسمت مرکزی بین ۷۴/۵ و ۷۹/۳۷ درصد و مقدار اسپسارتین برابر با ۲۰/۳۶-۱۴/۴۱ است. مقدار اعضای انتهایی گروسولار و پیروپ برای قسمت مرکزی گارنت‌های مورد بررسی ناچیز است (کمتر از ۰/۷٪). ترکیب قسمت مرکزی گارنت‌های مورد بررسی تقریباً مشابه ترکیب بسیاری از گارنت‌های گزارش شده از گرانیت‌های پرآلومینوس و آپلیت‌ها و پگماتیت‌ها است (برای مثال [۵۴]). ترکیب قسمت مرکزی گارنت‌های مورد بررسی در نمودار مثلثی $Mn-Mg-Fe^{2+}$ در گستره‌ی گارنت‌های ماگمایی [۵۵] قرار گرفته است (شکل ۸ الف). گارنت‌های ماگمایی معمولاً فاقد منطقه‌بندی ترکیبی هستند ولی در مواردی منطقه‌بندی ترکیبی نیز دیده شده است [۵۶]. گارنت‌های ماگمایی که حاوی منطقه‌بندی ترکیبی هستند، بیشتر دارای حاشیه غنی از Mn در مقایسه با قسمت مرکزی هستند [۵۴]. در این گارنت-ها Fe و Mn دارای رابطه عکس با یکدیگر هستند. افزایش Mn در کناره گارنت‌های ماگمایی را به کاهش دما در طی تبلور گارنت نسبت داده‌اند [۵۴]. گرچه برخی از محققان همچون [۵۷] گارنت‌های ماگمایی را که دارای هسته غنی از Mn و



شکل ۸ ترکیب گارنت‌های موجود در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی در (الف) نمودار مثلی $Mn-Mg-Fe^{2+}$ به‌منظور تعیین خاستگاه آن‌ها. همه نمونه‌های مورد بررسی در گستره گارنت‌های ماگمایی واقع شده‌اند. (ب) نمودار مثلی Alm+Spes-Grs-Pyp. در این نمودار قسمت مرکزی گارنت‌های تجزیه شده در قطب Alm+Spes و گارنت‌های تجزیه شده از قسمت کناره‌ای بر روی ضلع Alm+Spes-Grs واقع شده‌اند. Alm+Spes: آلمان‌دین + اسپسارتین، Grs: گروسولار و Pyp: پیروپ.

شرایط تشکیل میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی

در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی تورمالین به عنوان کانی اصلی فرومنیزین حضور دارد. در این سنگ‌ها مقدار گارنت در مقایسه با تورمالین بسیار اندک بوده و به عنوان فاز فرعی محسوب می‌گردد. حضور و یا عدم حضور کانی‌های حاوی Al، Fe و Mg (همچون تورمالین، بیوتیت، مسکویت، کلدیریت، کانی‌های آلومینوسیلیکاته و گارنت) در ترکیب لویکوگرانیته‌ها به عوامل مختلفی بستگی دارد [۹-۱۳]. تورمالین، مسکویت و مقادیر اندک گارنت تنها فازهای حاوی عناصر Al-Fe-Mg در ترکیب میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی هستند. بر اساس بررسی‌های شیمی‌کانی قسمت مرکزی تورمالین و گارنت و مسکویت‌های درشت بلور دارای ماهیت ماگمایی هستند و از تبلور گدازه بوجود آمده‌اند. لذا از این کانی‌ها می‌توان در تعیین شرایط تشکیل میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی بهره برد.

ابتدایی‌ترین شرط تبلور تورمالین در گرانیته‌ها حضور B در ترکیب ماگما است. البته غنی‌شدگی ماگما از این عنصر به تنهایی شرط لازم در تبلور تورمالین نیست. بر اساس مطالعات تجربی (برای مثال [۱۰، ۱۱، ۶۴، ۶۵]) مقدار اندکی B_2O_3 برای تبلور تورمالین در ماگمای پرآلومینوس مورد نیاز است. بنابر عقیده [۱۰] شاخص غنی‌شدگی Al (ASI) دارای نقش عمده‌ای در تبلور و پایداری تورمالین در سنگ‌های گرانیته‌ای دارد. با توجه به اینکه میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی درون مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونی از جمله شیست‌های حاوی بیوتیت، مسکویت، آمفیبول به همراه مقداری تورمالین قرار گرفته‌اند. بر اساس نظر [۲] جدایش مقدار اندک گدازه در طی

ذوب‌بخشی گنیس‌ها و شیست‌ها منجر به تشکیل گدازه‌های غنی از B می‌شود. از تبلور چنین گدازه‌ای گرانیتهایی که حاوی تورمالین و مسکویت هستند، تشکیل می‌گردد. با در نظر گرفتن شرایط مشابه میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی با مسکویت-تورمالین‌های منطقه ایبرین مرکزی واقع در غرب اسپانیا [۲] به‌نظر می‌رسد که میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی از ذوب بخشی سنگ‌های دگرگونی بوجود آمده‌اند.

حضور گارنت در گرانیتهای پرآلومینوس وابسته به مقدار Mg و Mn در ترکیب گدازه است [۲]. بر اساس مطالعات [۲] سنگ‌های حاوی Mg بالا حاوی مجموعه کانیایی کلدیریت + بیوتیت ± تورمالین هستند. در مقابل، ترکیب سنگ‌هایی که حاوی Mg پایین هستند اغلب حاوی گارنت غنی از Mn + تورمالین است.

برداشت

میلونیت‌گرانیتهای مورد بررسی به صورت توده‌های کوچک در غرب قوشچی در استان آذربایجان غربی رخنمون یافته‌اند. این سنگ‌ها لویکوگرانیتهای حاوی کانی‌های ارتوکلاز + میکروکلین + پلاژیوکلاز + کوارتز به همراه تورمالین + مسکویت ± گارنت‌های غنی از منگنز به عنوان کانی‌های باقیمانده از سنگ آذرین اولیه هستند. مسکویت‌های حاصل از دگرگونی به همراه اپیدوت جزئی از فازهای حاصل از دگرگونی در سنگ‌های مورد بررسی به شمار می‌روند. کوارتز در این سنگ‌ها دچار باز تبلور شده و با خاموشی موجی همراه هستند. تورمالین‌های موجود در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی دارای منطقه‌بندی ضعیف هستند. با توجه به مشخصه‌های شیمی‌کانی، بخش

- [5] Ethier V.G., Campbell F.A., "Tourmaline concentrations in Proterozoic sediments of the southern Cordillera of Canada and their economic significance", Canadian Journal of Earth Sciences 14 (1977) 2348-2363.
- [6] Dutrow B. L., Henry D. J., "Tourmaline: A Geologic DVD", Elements 7(2011) 301-306.
- [7] van Hinsberg V. J., Schumacher J. C., "Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral in the Haut-Allier metamorphic suite, Massif Central, France", The Canadian Mineralogist 49 (2011) 177-194.
- [8] Yang J. -h., Peng J. t., Hu R. z., Bi X. w., Zhao J. h., Fu Y. z., Shen N. P., "Garnet geochemistry of tungsten-mineralized Xihuashan granites in South China", Lithos 177 (2013) 79-90.
- [9] London D., Manning D.A.C., "Chemical Variation and Significance of tourmaline from southwest England", Economic Geology 90 (1995) 495-519.
- [10] Wolf M.B., London D., "Boron in granitic magmas: Stability of tourmaline in equilibrium with biotite and cordierite", Contributions to Mineralogy and Petrology 130 (1997) 12-30.
- [11] Benard F., Moutou P., Pichavant M., "Phase-relations of tourmaline leucogranites and the significance of tourmaline in silicic magmas", Journal of Geology 93 (1985) 271-291.
- [12] Holtz F., Johannes W., "Effect of tourmaline on melt fraction and composition of first melts in quartzofeldspathic gneiss", European Journal of Mineralogy 3 (1991) 527-536.
- [13] Scaillet B., Pichavant M., Roux J., "Experimental crystallization of leucogranite magmas", Journal of Petrology 36 (1995) 663-705.
- [14] Stocklin J., "Structures history and tectonic of Iran: A review", American Association of Petroleum Geologist Bulletin 52 (1968) 1229-1258.
- [15] Alavi M., "Tectonic map of the Middle East, scale: 1:5,000,000", Tehran, Iran, Geological Survey of Iran (1991) one sheet.
- [16] Alavi M., "Tectonics of Zagros Orogenic belt of Iran, new data and interpretation", Tectonophysics 229 (1994) 211-238.
- [17] Berberian M., King G.C.P., "Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran", Canadian Journal of Earth Sciences 18 (1981) 210-265.
- [18] Alavi-Naini M., "Etude geologique de la region de Djam", Geological Survey of Iran, Reports 23 (1972) 1-288.
- [19] Eftekharnajad J., "Tectonic division of Iran with respect to sedimentary basins", Journal of

مرکزی تورمالین‌های مورد بررسی دارای ویژگی‌های ماگمایی بوده و به نظر می‌رسد که بخش کناره‌ای آن در مراحل انتهایی تبلور و یا در طی دگرگونی درجه پایین متبلور شده است. گارنت در سنگ‌های مورد بررسی دارای فراوانی اندکی بوده و همانند تورمالین دارای منطقه‌بندی ترکیبی ساده است. بخش مرکزی آن از اعضای انتهایی آلماندین و اسپسارتین و بخش کناره‌ای آن از اعضای انتهایی آلماندین، گروسولار و اسپسارتین تشکیل شده است. بخش مرکزی دارای خصوصیات ماگمایی بوده و بخش کناره‌ای آن در طی دگرگونی درجه پایین متبلور شده است.

حضور مجموعه کانیاپی تورمالین + مسکویت ± گارنت غنی از منگنز در میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی و نیز رخنمون این سنگ‌ها به صورت توده‌های کم حجم درون سنگ‌های رسوبی دگرگون شده بیانگر تشکیل مجموعه میلونیت‌گرانیتهای غرب قوشچی در اثر جدایش مقدار اندک گدازه طی ذوب بخشی درجه پایین سنگ‌های دگرگونی است. با توجه به عدم حضور دگرگونی دما بالا در منطقه مورد بررسی، ذوب‌بخشی به احتمال زیاد با حجم کم در اثر دگرگونی تنش آواری در منطقه برشی تشکیل شده است. بر اساس مجموعه کانیاپی موجود در سنگ‌های مورد بررسی به نظر می‌رسد که این سنگ‌ها از نوع لویکوگرانیتهای پرآلومینوس با مقادیر اندک Mg هستند.

قدردانی

مقاله حاضر از طرح پژوهشی با کد ۹۴/ع/۱۳۰ و با حمایت مالی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه ارومیه برگرفته شده است. بدینوسیله از حمایت و کمک‌های آن معاونت تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

مراجع

- [1] Clarke D.B., "The mineralogy of peraluminous granites; a review", The Canadian Mineralogist 19 (1981) 3-17.
- [2] Pesquera A., Torres Ruiz J., Garcia-Casco A., Gil Crespo P. P., "Evaluating the controls on tourmaline formation in granitic systems: a case study on peraluminous granites from the Central Iberian Zone (CIZ), western Spain", Journal of Petrology 54 (2013) 609-634.
- [3] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., "Rock forming minerals. Volume 1B Disilicates and ring silicates", (1986), London: Longman. 629.
- [4] Henry D.J., Guidotti C.V., "Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine", American Mineralogist 70 (1985) 1-15.

- [32] Tartèse R., Boulvais P., "Differentiation of peraluminous leucogranites "en route" to the surface", *Lithos* 114 (2010) 353-368.
- [33] Henry D. J., Dutrow B. L., "Metamorphic tourmaline and its petrologic applications", *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 33 (1996) 503-557.
- [34] Jiang S. Y., Palmer M. R., Slack J. F., Shaw D. R., "Paragenesis and chemistry of multistage tourmaline formation in the Sullivan Pb-Zn-Ag deposit, British Columbia", *Economic Geology* 93 (1998) 47-67.
- [35] Jiang S.Y., Radvanec M., Nakamura E., Palmer M., Kobayashi K., Zhao H.X., Zhao K.D., "Chemical and boron isotopic variations of tourmaline in the Hnilec granite-related hydrothermal system, Slovakia: Constraints on magmatic and metamorphic fluid evolution", *Lithos* 106 (2008) 1-11.
- [36] Pesquera A., Torres Ruiz J., Gil Crespo P. P., Velilla N., "Chemistry and genetic implications of tourmaline and Li-F-Cs micas from the Valdeflores area (Caceres, Spain)", *American Mineralogist* 84 (1999) 55-69.
- [37] Trumbull R. B., Chaussidon M., "Chemical and boron isotopic composition of magmatic and hydrothermal tourmalines from the Sinceni granite-pegmatite system in Swaziland", *Chemical Geology* 153 (1999) 125-137.
- [38] Pivec E., Stempok M., Novak J. K., Lang M., "Tourmaline as a late-magmatic or postmagmatic mineral in granites of the Czech part of the Krusne hory - Erzgebirge batholith", *Journal of the Czech Geological Society* 43 (1998) 17-23.
- [39] Gaweda A., Pieczka A., Kraczk J., "Tourmalines from the Western Tatra Mountains (W-Carpathians, S-Poland): Their characteristics and petrogenetic importance", *European Journal of Mineralogy* 14 (2002) 943-955.
- [40] Pirajno F., Smithies R. H., "The FeO/(FeO+MgO) ratio of tourmaline: A useful indicator of spatial variations in granite-related hydrothermal mineral deposits", *Journal of Geochemical Exploration* 42 (1992) 371-381.
- [41] Zhang J., Ma C., She Z., "An Early Cretaceous garnet-bearing metaluminous A-type granite intrusion in the East Qinling Orogen, central China: Petrological, mineralogical and geochemical constraints", *Geoscience Frontiers* 3 (2012) 635-646.
- [42] René M., Stelling J., "Garnet-bearing granite from the Třebíč pluton, Bohemian Massif (Czech Republic)", *Mineralogy and Petrology* 91 (2007) 55-69.
- Iranian Petroleum Society 82 (1981) 19-28 (in Farsi).
- [20] Nabavi M.H., "An introduction to the geology of Iran", Geological survey of Iran (1976) (in Farsi).
- [21] Khodabandeh A. A., Soltanni G. A., Sartipi A. H., Emami M. H., "Geological map of Iran, 1:100,000 series sheet Salmas", Geological Survey of Iran, Tehran, (2002).
- [22] Sabzehi M., Mohammadi K., "Geological map of Gangejin (Serow), Scale 1:100000", Geological Survey of Iran (2003).
- [23] Yavuz F., Karakaya N., Yıldırım D. K., Karakaya M. C., "A Windows program for calculation and classification of tourmaline-supergroup (IMA-2011)", *Computers and Geosciences* 63 (2014) 70-87.
- [24] Henry D. J., Novák M., Hawthorne F. C., Ertl A., Dutrow B. L., Uher P., Pezzotta F., "Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals", *American Mineralogist* 96 (2011) 895-913.
- [25] Rosenberg P. E., Foit F. F., "Synthesis and characterization of alkali-free tourmaline", *American Mineralogist* 64 (1979) 180-186.
- [26] Collines A. C., "Mineralogy and geochemistry of tourmaline in contrasting hydrothermal system. Coplapo area, Northern Chile", (2010), University of Arizona.
- [27] Trumbull R. B., Chaussidon M., "Chemical and boron isotopic composition of magmatic and hydrothermal tourmalines from the Sinceni granite-pegmatite system in Swaziland", *Chemical Geology* 153 (1999) 125-137.
- [28] Henry D. J., Dutrow B. L., "Compositional zoning and element partitioning in nickeloan tourmaline from a metamorphosed karstbauxite from Samos, Greece", *American Mineralogist* 86 (2001) 1130-1142.
- [29] Novak M., Povondra P., Selway J. B., "Schorl-oxy-schorl to dravite-oxy-dravite tourmaline from granitic pegmatites; examples from the Moldanubicum, Czech Republic", *European Journal of Mineralogy* 16 (2004) 323-333.
- [30] Manning D. A. C., "Chemical and morphological Variation in tourmalines from the Hub Kapong batholith of Peninsular Thailand", *Mineralogical Magazine* 45 (1982) 139-147.
- [31] Miller C. F., Stoddard E. F., Bradfish L. J., Dollase W. A., "Composition of plutonic muscovite; genetic implications", *The Canadian Mineralogist* 19 (1981) 25-34.

- granite: *Petrogenesis of garnet-bearing granitoids*", Lithos 95 (2007) 177-207.
- [55] Miller C. F., Stoddard E. F., "The Role of Manganese in the Paragenesis of Magmatic Garnet: An Example from the Old Woman-Piute Range, California", The Journal of Geology 89 (1981) 233-246.
- [56] London D., "Pegmatites", The Canadian Mineralogist Special Publication (2008) 10.
- [57] Lima S. S. M., Neiva A. M. R., Ramos J. M. F., "Geochemistry of garnets from a tonalite and granitic aplite-pegmatite veins from Caborro – Aldeia da Serra, Ossa-Morena Zone, Southern Portugal", Estudos Geológicos 19 (2009) 193-197.
- [58] Habler G., Thöni M., Miller C., "Major and trace element chemistry and Sm-Nd age correlation of magmatic pegmatite garnet overprinted by eclogite-facies metamorphism", Chemical Geology 241 (2007) 4-22.
- [59] Massonne H.J., Chopin C., "P-T history of the Gran Paradiso (Western Alps) metagranites based on phengite geobarometry", Geological Society, London, Special Publications 43 (1989) 545-549.
- [60] Le Goff E., Ballèvre M., "Geothermobarometry in albite-garnet orthogneisses: A case study from the Gran Paradiso nappe (Western Alps)", Lithos 25 (1990) 261-280.
- [61] Frey M., Hunziker J. C., O'Neil J. R., Schwander H. W., "Equilibrium-disequilibrium relations in the Monte Rosa Granite, Western Alps: Petrological, Rb-Sr and stable isotope data", Contributions to Mineralogy and Petrology 55 (1976) 147-179.
- [62] Carswell D. A., Wilson R. N., Zhai M., "Metamorphic evolution, mineral chemistry and thermobarometry of schists and orthogneisses hosting ultra-high pressure eclogites in the Dabieshan of central China", Lithos 52 (2000) 121-155.
- [63] Proyer A., "The preservation of high-pressure rocks during exhumation: metagranites and metapelites", Lithos 70 (2003) 183-194.
- [64] London D., "Experimental synthesis and stability of tourmaline: A historical overview", Canadian Mineralogist 49 (2011) 117-136.
- [65] Spicer E. M., Steven G., Buick I. S., "The low-pressure partial-melting behaviour of natural boron-bearing metapelites from the Mt. Stafford area, central Australia", Contributions to Mineralogy and Petrology 148 (2004) 160-179.
- [43] Clemens J. D., Wall V. J., "Origin and evolution of a peraluminous silicic ignimbrite suite: The Violet Town Volcanics", Contributions to Mineralogy and Petrology 88 (1984) 354-371.
- [44] Clemens J. D., Wall, V. J., "Origin and crystallization of some peraluminous (S-type) granitic magmas", The Canadian Mineralogist 19 (1981) 111-131.
- [45] Gilbert J. S., Rogers N. W., "The significance of garnet in the Permo-Carboniferous volcanic rocks of the Pyrenees", Journal of the Geological Society 146 (1989) 477-490.
- [46] Lackey J. S., Valley J. W., Hinke H. J., "Deciphering the source and contamination history of peraluminous magmas using $\delta^{18}\text{O}$ of accessory minerals: examples from garnet-bearing plutons of the Sierra Nevada batholith", Contributions to Mineralogy and Petrology 151 (2005) 20-44.
- [47] Mirnejad H., Blourian G. H., Kheirkhah M., Akrami M. A., Tutti F., "Garnet-bearing rhyolite from Deh-Salm area, Lut block, Eastern Iran: anatexis of deep crustal rocks", Mineralogy and Petrology 94 (2008) 259-269.
- [48] Stone J., "The significance of almandine garnets in the Lundy and Dartmoor granites", Mineralogical Magazine 52 (1988) 651-658.
- [49] Harrison T.N., "Magmatic garnets in the Cairngorm granite, Scotland", Mineralogical Magazine 52 (1988) 659-667.
- [50] Pe-Piper G., "Origin of S-type granites coeval with I-type granites in the Hellenic subduction system, Miocene of Naxos, Greece", European Journal of Mineralogy 12 (2000) 859-875.
- [51] Whitworth M. P., Feely M., "The compositional range of magmatic Mn-garnets in the Galway Granite, Connemara, Ireland", Mineralogical Magazine 58 (1994) 163-168.
- [52] Manning D. A. C., "Chemical variation in garnets from aplites and pegmatites, peninsular Thailand", Mineralogical Magazine 47 (1983) 353-358.
- [53] du Bray E.A., "Garnet compositions and their use as indicators of peraluminous granitoid petrogenesis- southeastern Arabian Shield", Contributions to Mineralogy and Petrology 100 (1988) 205-212.
- [54] Dahlquist J. A., Galindo C., Pankhurst R. J., Rapela C. W., Alasino P. H., Saavedra J., Fanning C. M., "Magmatic evolution of the Peñón Rosado