



سازوکار شکل گیری ندول‌های تورمالین در منطقه‌ی بروجرد (دهگاه-سرسختی)

زهرا طهماسبی

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان

(دریافت مقاله: ۹۱/۱۱/۲۲، نسخه نهایی: ۹۲/۳/۱۳)

چکیده: بر اساس مشاهدات صحرایی، سنگ میزبان گرهک‌های تورمالین منطقه‌ی دهگاه، از دایک‌های اسیدی (آپلیت‌ها) و در منطقه سرسختی، از مونوزوگرانیت‌ها تشکیل شده‌اند. در این مناطق، گرهک‌ها از تورمالین، کوارتز و فلدسپار قلیایی به وجود آمده‌اند با این تفاوت که میزان کانی‌های روشن در گرهک‌های دهگاه کمتر است. بیهنجاری منفی Eu، غنی شدگی از LREE، کاهش HREE و الگوی جدایش یافته از عناصر نادر خاکی در سنگ‌های میزبان این دو منطقه دلالت بر خاستگاه ماگمای مولد آن‌ها از ذوب بخشی متاپلیت‌ها دارد. وجود منطقه بندی، داشتن ترکیب شورلیت - دراویت تورمالین‌ها، انباشت گرهک‌ها در سقف توده و کاهش فراوانی آن‌ها با افزایش عمق، نسبت پایین Fe/Fe+Mg در برخی از گرهک‌ها (دراویت)، وجود هاله‌ی روشن و شکاف‌های مو مانند پیرامون گرهک‌های سرسختی از جمله شواهدی است که جدایش شاره به وجود آورنده‌ی آن‌ها به آرامی رخ داده و با شاره سنگ درونگیر (متاپلیت‌ها) واکنش داده و در یک شرایط ماگمایی - گرمایی شکل گرفته‌اند. در حالی که تورمالین‌های دهگاه با داشتن ترکیب شورلیت، سنگ میزبان با ساخت صفحه‌ای (آپلیت)، عدم منطقه بندی، نبود هاله‌ی روشن و عدم وجود شکاف‌های موماند نشان می‌دهند که شاره‌ی ماگمایی بوردار با شاره‌ی درونگیر (متاپلیت‌ها) واکنش نداده و به سرعت در دایک‌های اسیدی میزبان با شرایط کاملاً ماگمایی تزریق و منجر به تبلور گرهک‌های تورمالین شده است. بنابراین رفتار و سرعت متفاوت بور در سیستم‌های ماگمایی - گرمایی، فاکتور اصلی انباشت تورمالین و تشکیل گرهک در این دو منطقه بوده است.

واژه‌های کلیدی: سرسختی؛ دهگاه؛ گرهک تورمالین؛ شورلیت - دراویت.

مقدمه

تورمالین یک کانی آب‌دار بوروسیلیکاتی با فرمول $XY_3Z_6(T_6O_{18})(BO_3)_3$ است که در آن: $X=Ca, Na, K, [\square]$ ؛ $Y=Li, Mg, Fe^{2+}, Mn^{2+}, Al, Cr^{3+}, V^{3+}, \text{vacancy}$ ؛ $T=Si, Al, Z=Mg, Al, Fe^{3+}, V^{3+}, Cr^{3+}, Fe^{3+}, (Ti^{4+})$ ؛ $B= B, [\square \text{ vacancy}]$. این کانی در دما، فشار و محیط‌های زمین‌شناسی مختلفی به وجود می‌آید [۱-۴]. در سنگ‌های گرانیتی تورمالین معمولاً به صورت همگن متبلور می‌شود و ترکیب شورلیت و گاهی البایت دارد اما هنگامی که به شکل‌های خاص از جمله گرهکی یا کروی است، سازوکار آن ساده

نیست [۵].

برای انباشت تورمالین در سنگ‌های گرانیتوئیدی، اسامی متفاوتی با نام‌های لکه، غده، نقطه، کره، زنگوله، بسته، گرهک، لخته، ندول و غیره استفاده می‌شود [۵-۷] که در حقیقت به صورت انباشتی کروی با خاستگاه و شکل ظاهری متفاوت دیده می‌شوند و شامل یک هسته از تورمالین + کوارتز + فلدسپار با قطر یک تا ۱۰ سانتی مترند. این انباشت‌های کروی گاهی با حاشیه‌های سفید و گاهی بدون حاشیه مشاهده می‌شوند. با وجود اینکه تا کنون گرهک‌های تورمالین توسط پژوهشگران متعددی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند، ولی هنوز خاستگاه،

شناسی گرهک‌ها، سنگ‌نگاری مرکز و حاشیه گرهک و سنگ-های میزبان آن‌ها، ژئوشیمی گرانیتوئیدها و داده‌های شیمی بلور تورمالین‌های گرهکی دهگانه و سرسختی است.

زمین‌شناسی عمومی

منطقه‌ی مورد بررسی در استان‌های لرستان و مرکزی شرق و شمال شرق شهرستان بروجرд بین طول‌های جغرافیایی $48^{\circ}45'$ تا $49^{\circ}30'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی در 33° تا 34° شمالی واقع شده‌است [۱۵] (شکل ۱). این منطقه از نظر زمین‌شناسی بخشی از منطقه‌ی سنندج-سیرجان محسوب می‌شود و علی‌رغم زمین ساخت شدیدی که پیچیدگی‌هایی در زمین‌شناسی منطقه به‌وجود آورده‌است، می‌توان ردیفی از سنگ‌ها را تشخیص داد به طوری که قدیمی‌ترین سنگ‌ها در این منطقه به پالئوزوئیک وابسته است و نهشته‌های قدیمی‌تر از تریاس فوقانی وجود ندارد [۱۶].

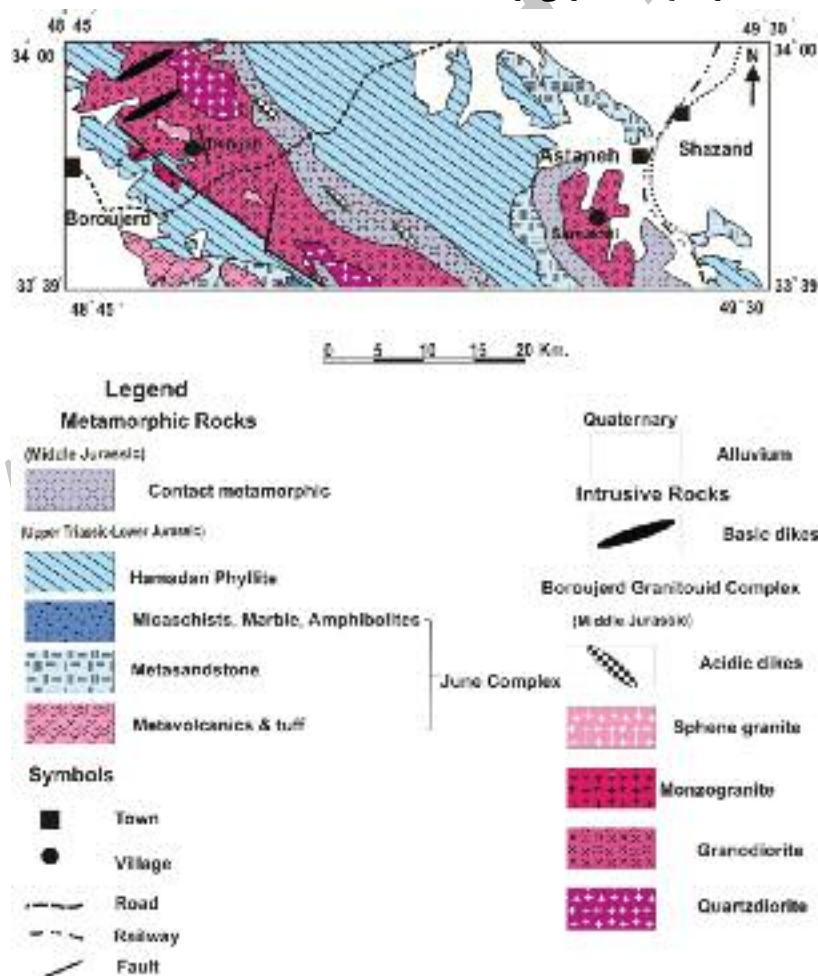
ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها به‌طور دقیق مشخص نشده است. با این حال در این مورد چهار سازوکار مطرح‌اند که عبارتند از:

۱- گرهک‌ها از جانشینی پسا ماگمایی (تأخیری) یک شارهی غنی از B مراحل انتهایی تبلور ماگما که باعث دگرسانی گرانیت‌های از پیش متبلور شده می‌شوند، به‌وجود می‌آیند. این شاره در شکستگی‌ها و شکاف‌های ریزی که در مرز بلورها وجود دارند، تزریق می‌شوند [۹،۸].

۲- جدایی شارهی غنی از B آبدار غیر قابل آمیخته شدن، از شارهی گرانیتی در مرحله ماگمایی-گرمايي باعث تشکیل گرهک‌های تورمالین می‌شود [۱۰-۱۳].

۳- جانشینی شارهی غنی از B در زینولیت‌های پهنه‌ای [۷].

۴- تبلور از یک توده‌ی گرانیتی غنی از B [۱۴]. هدف از ارائه این مقاله بررسی چگونگی تشکیل و خاستگاه گرهک‌های تورمالین با استفاده از شواهد صحرایی، ریخت



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی [۱۵].

دیده می‌شوند (شکل ۲ الف و ب) و در روستای سرسختی نیز موزوگرانیت‌های تورمالین داری وجود دارند که تورمالین همراه با کوارتز به صورت گرهک روی سطح این سنگ‌ها تشکیل شده است (شکل ۲ پ و ت).

کانی‌های اصلی دایک‌های اسیدی دهگاه و موزوگرانیت‌های سرسختی عبارتند از کوارتز، پلاژیوکلاز، بیوتیت، فلدسپار پتاسیم و فازهای فرعی شامل زیرکن، آپاتیت و کانی‌های کدر. کوارتز با بافت موزوایکی با اندازه‌ی یک میلی‌متر مشاهده می‌شود. پلاژیوکلاز با اندازه‌ی مشابه با کوارتز و همراه با آن دیده شد. بیوتیت با سمت‌گیری ضعیف و گاه دگرسان شده به کلریت است. در نمونه‌ی دستی، گرهک‌های سرسختی دارای بخش مرکزی تیره و حاشیه‌ی روشن‌اند که این حاشیه روشن در واقع یک منطقه‌ی انتقالی بین موزوگرانیت‌های میزبان و هسته‌ی گرهک‌هاست. این تغییر رنگ در نتیجه تبادل‌های یونی بین مرکز و حاشیه گرهک‌های تورمالین به وجود آمده است و در نتیجه منجر به پایداری بیشتر مرکز گرهک نسبت به حاشیه‌ی آن شده است. هاله‌ی روشن گرهک‌های سرسختی فاقد کانی‌های مافیک از جمله بیوتیت است و شامل کوارتز، فلدسپار پتاسیم و مسکوویت با اشکال بافتی مشابه با موزوگرانیت‌های میزبان است با این تفاوت که اندازه آن‌ها تغییر کرده است (شکل ۲ پ و ت). از ویژگی‌های روشن گرهک‌های دهگاه که در دایک‌های اسیدی (آپلیت‌ها) مرحله پایانی تبلور ماگما تشکیل شده‌اند، تیره‌تر بودن و بدون حاشیه‌ی روشن پیرامون آن‌هاست (شکل ۲ الف و ب). از تفاوت‌های ظاهری دیگر در شکل گرهک‌های این دو منطقه وجود شکاف‌های موماند یا میارولیتی در گرهک‌های سرسختی و عدم هرگونه شکستگی در گرهک‌های دهگاه است. وجود شکاف‌های موماند در گرهک‌های منطقه سرسختی شاهد مهمی برای به دام افتادن شاره‌های غنی از B در مراحل انتهایی تبلور ماگماست.

هسته‌ی گرهک‌ها شامل تورمالین، کوارتز و فلدسپار است. در هر دو منطقه، تورمالین در گرهک‌ها سمت‌گیری خاصی ندارد. کوارتز و فلدسپار در مرکز گرهک‌های سرسختی بیشتر قابل مشاهده‌اند. تورمالین در مرکز گرهک‌های دهگاه متراکم‌تر و معمولاً بدون رده‌بندی مشخص است در حالی که

بالاترین بخش از ردیف دگرگونی را سنگ‌های پهنه‌ای دگرگون‌شده موسوم به فیلیت‌های همدان تشکیل می‌دهند که دستخوش دگرگونی دماجنشی در حد رخساره‌ی شیت‌سبز (زون کلریت) قرار گرفته‌اند و بیشتر شامل اسلیت و فیلیت می‌شوند [۱۷]. مهم‌ترین حادثه‌ی زمین‌شناسی که در این ناحیه رخ داده‌است پیدایش توده‌های گرانیتوئیدی بروجرد و آستانه در زمان ژوراسیک میانی است که درون این فیلیت‌ها نفوذ کرده‌اند و دگرگونی مجاورتی که با شیت‌های لکه‌دار شروع و به هورنفلس‌ها و میگماتیت‌ها ختم می‌شود در اثر نفوذ آن‌ها رخ داده‌اند ([۱۸، ۱۵]، شکل ۱).

روش کار

برای تعیین ترکیب، نوع و خاستگاه تورمالین‌های گرهکی در مناطق مورد بررسی، در مجموع ۱۵ نمونه از گرهک‌های تورمالین روستاهای دهگاه و سرسختی برداشت و مقطع نازک و نازک-صیقلی از آن‌ها تهیه شد.

از گرانیتوئیدهای میزبان آن‌ها که در دهگاه دایک‌های اسیدی (آپلیت‌ها) و در سرسختی موزوگرانیت‌ها هستند نیز نمونه برداری شد. گرهک‌های دهگاه و قسمتی از گرهک‌های سرسختی در اکلامای آمریکا و بخشی دیگر با استفاده از Super probe 8400 و استانداردهای مختلف در آزمایشگاه ریز پردازنده‌ی الکترونی دانشگاه Huelva اسپانیا مورد بررسی‌های نقطه‌ای قرار گرفتند. همچنین گرهک‌های تورمالین از سنگ میزبان جدا شده و از آن‌ها آنالیز شیمی عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی (REE) به روش ICP- AES و ICP- MS در آزمایشگاه ALS Chemex کانادا انجام شد.

آنالیز شیمی عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی (REE) از موزوگرانیت‌های میزبان گرهک‌های سرسختی در دانشگاه Huelva و از دایک‌های اسیدی (آپلیت‌ها) میزبان گرهک‌های دهگاه در آزمایشگاه ALS Chemex کانادا انجام شده است. آنالیزهای نقطه‌ای از تورمالین‌های گرهکی هر دو منطقه از [۲۰، ۱۹] اقتباس شدند و هدف تعیین سازوکار شکل‌گیری گرهک‌ها با استفاده از مقایسه شیمیایی سنگ میزبان و گرهک‌هاست.

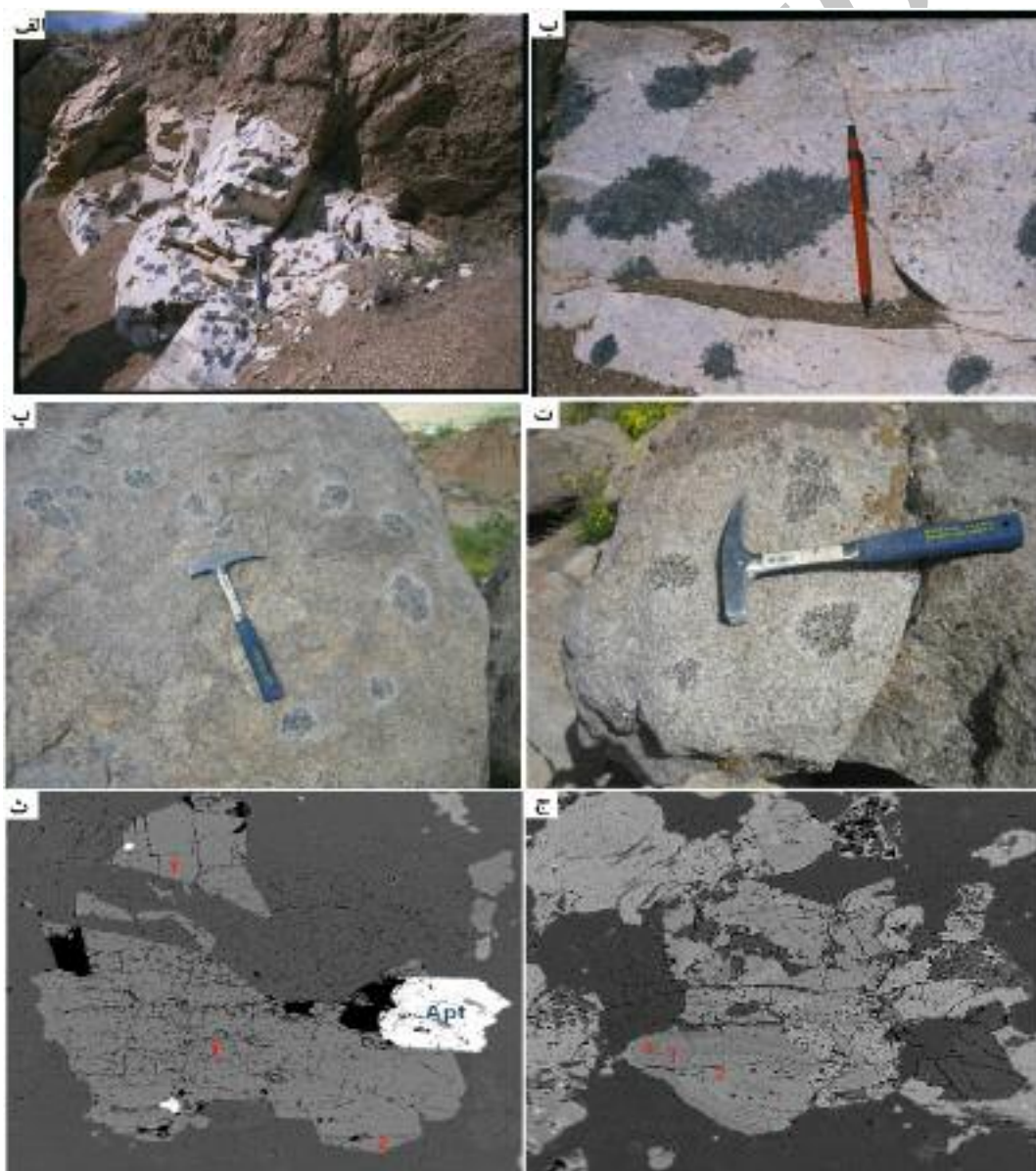
سنگ نگاری گرهک‌ها و سنگ میزبان

در حوالی روستای دهگاه رگه‌های اسیدی (آپلیت‌ها) حاوی تورمالین برونزد دارند که تورمالین به صورت لکه‌ها یا گرهک

زمین شیمی

نتایج داده‌ها (جدول ۱) نشان می‌دهد که میزان $\text{SiO}_2 = 69.2-70.1$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 16.7-18$, $\text{MgO} = 0.3-1.4$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.4-1.2$, $\text{CaO} = 2.8-3.6$, $\text{K}_2\text{O} = (2.3-3.7)$, $\text{Na}_2\text{O} = (2.8-4.2)$ است. شاخص پرآلومینه $1.21-1.31$ ، $\text{ASI} =$ (میزان پایین عناصر فرومیزین همراه با مقادیر بالای LILE (عناصر با شعاع یونی بالا) و عناصر کمیاب (199.6 - 102), Ba , Sr ($95.2-225$), Rb ($86-117.6$) در سنگ میزبان گرهک‌های سرسختی و دهگانه دیده می‌شوند.

در تورمالین‌های گرهکی سرسختی رده‌بندی روشنی در تورمالین‌ها دیده می‌شود. رده‌بندی معمولاً بیانگر تغییر ترکیب شاره در طول تبلور تورمالین است. مناطق روشن در تصاویر BSE (شکل ۲ ث و ج) مناطق با تمرکز بالاتری از آهن را نشان می‌دهند که توانسته‌اند الکترون بیشتری را خارج کنند بدین ترتیب مناطق تیره‌تر تمرکز پایین‌تری از آهن داشته و نتوانسته‌اند الکترون‌های بیشتری را منتشر کنند [۵].



شکل ۲ تصاویر صحرایی واحد های تورمالین دار. الف و ب: گرهک‌های تورمالین در دایک های اسیدی دهگانه پ و ت: گرهک‌های تورمالین در مونزوگرانیت های سرسختی ث: تصویر BSE گرهک‌های تورمالین دار دهگانه ج: تصویر BSE گرهک‌های تورمالین دار سرسختی.

جدول ۱ آنالیزهای عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی از گرهک ها و سنگ میزبان آن ها در دو منطقه دهگانه و سرسختی.

	ندول دهگانه	ندول سرسختی	موزوگرانیت سرسختی	دایک اسیدی دهگانه
SiO ₂	۷۰٫۳	۵۰٫۷	۷۰٫۱	۶۹٫۲
Al ₂ O ₃	۱۶٫۴	۲۵٫۹	۱۶٫۷	۱۸
Fe ₂ O ₃	۵٫۳	۱۰٫۷	۱٫۲	۰٫۴
CaO	۰٫۷	۰٫۲	۲٫۸	۳٫۶
MgO	۱٫۲	۱٫۷	۱٫۴	۰٫۳
Na ₂ O	۱٫۳	۱٫۶	۲٫۸	۴٫۲
K ₂ O	۰٫۹	۰٫۲	۳٫۷	۲٫۳
MnO	۰٫۰۴	۰٫۱۶	۰٫۰۶۴	۰٫۰۱
LOI	۲٫۸	۳٫۱	۱	۱٫۵
La	۲۵٫۶	۲۰٫۲	۲۳	۵۳
Ce	۶۸٫۳	۶۱٫۲	۴۶٫۶	۱۰۲
Pr	۶٫۵	۴٫۴	۵٫۵	۱۱٫۲
Nd	۲۳٫۴	۱۹٫۴	۱۹٫۴	۴۰٫۹
Sm	۶٫۱	۴٫۲	۳٫۵	۷٫۴
Eu	۰٫۲	۰٫۴	۰٫۵	۰٫۹
Gd	۵٫۵	۳٫۹	۳	۷٫۲
Tb	۱	۰٫۸	۰٫۵	۱٫۱
Dy	۴٫۹	۳٫۹	۲٫۵	۶٫۹
Ho	۰٫۹	۰٫۶	۰٫۵	۱٫۵
Er	۱٫۶	۱٫۳	۱٫۲	۴٫۸
Tm	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۷
Yb	۰٫۹	۰٫۸	۱٫۲	۴٫۵
Lu	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۷
Ba	۳۵٫۲	۵٫۴	۱۹۹٫۶	۱۰۲
Sr	۲۵٫۴	۲۱٫۲	۹۵٫۲	۲۲۵
Rb	۲۷٫۸	۱۴	۱۱۷٫۶	۸۶
Ni	۱۰	۵	۷٫۸	۸
Co	۱۰٫۲	۲٫۳	۶٫۱	۰٫۵
Cr	۱۵۰	۱۳۰	۱۴۵٫۵	۹۰٫۷
Nd	۲۳٫۴	۱٫۹	۱۹٫۴	۴۰٫۹
Ta	۱٫۴	۲٫۱	۲٫۳	۳٫۷
W	۱	۱	۹٫۱	۴٫۴
Zn	۶۴	۱۱۴	۱۹٫۷	۳۵٫۹
Zr	۴۰	۴	۷۰٫۴	۲۸۰
U	۱٫۲	۰٫۳	۲٫۴	۱
Hf	۱٫۵	۰٫۴	۲٫۳	۱٫۸
Eu/Eu*	۰٫۱	۰٫۳	۰٫۵	۰٫۴
(La/Yb)N	۱۹٫۲	۱۷٫۷	۱۳٫۵	۷٫۹
∑ REE	۱۴۵٫۲	۱۲۱٫۳	۱۰۷٫۶	۲۴۲٫۷

Na, Ca, K در هر دو منطقه و کاهش چشمگیر در Fe, Mg نسبت به سنگ میزبان به خوبی در شکل ۳ الف مشخص شده-

مقایسه عناصر اصلی گرهک با سنگ میزبان آن ها در شکل ۳ الف دیده می شود. بالاتر بودن مقادیر عناصر فرومیزین مانند

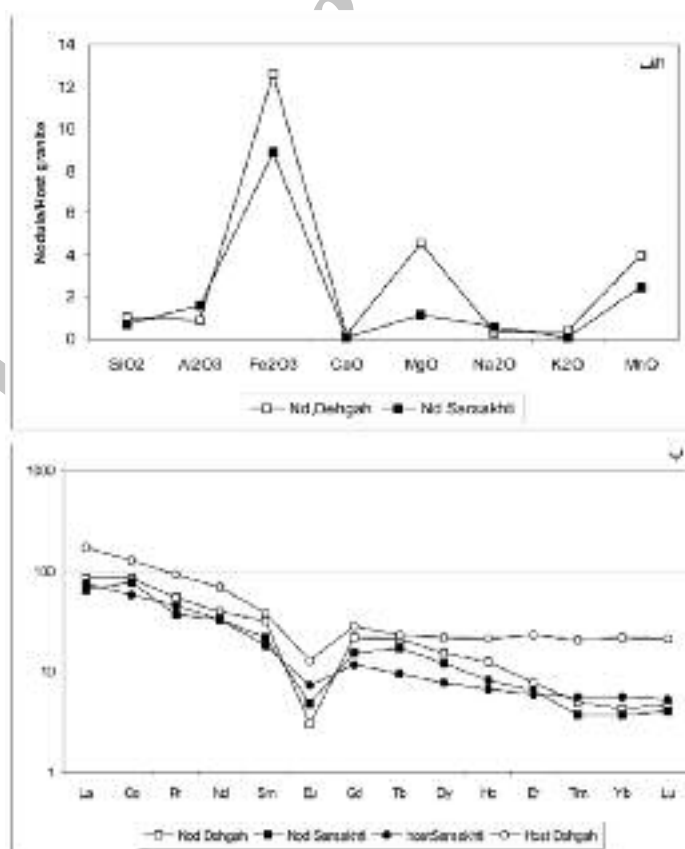
مقادیر $Rb(14-27)$ ، $Sr(21-25)$ ، $Ba(5/4-35)$ پایین در گرهک‌ها متفاوت از گرانیتوئیدهای میزبانند. بی‌هنجاری Eu شدیداً منفی و برابر است با $(Eu/Eu^*=0.1-0.3)$. بی‌هنجاری منفی چشمگیر Eu در گرهک‌های سرسختی و دهگانه (شکل ۵ب) در مقایسه با گرانیتوئیدهای میزبان به دلیل درصد کم فلدسپار قلیایی در گرهک‌ها و در نتیجه کاهش Rb, Ba, Sr در نهایت Eu خواهد بود. مقادیر پایین ΣREE در گرانیتوئیدهای میزبان نسبت به گرهک‌ها به دلیل کاهش مقادیر کانی‌های مافیک در آنهاست.

ترکیب شیمیایی گرهک‌های تورمالین مناطق سرسختی و دهگانه در [۲۰، ۱۹] آمده است. در نمودار $Fe/Fe+Mg$ نسبت به $X_{Na}/X_{Na}+X_{Ca}$ ترکیب تورمالین در هر دو منطقه‌ی مورد بررسی نشان داده شده است (شکل ۴). تورمالین‌های منطقه‌ی دهگانه با ترکیب شورلیت (شکل ۴) و گرهک‌های سرسختی دارای رده بندی مشخصی از هسته غنی از آهن با حاشیه فقیر از منیزیم بوده (شکل ۵ الف) و در منطقه‌ی دهگانه تقریباً بدون رده بندی مشخص (شکل ۵ ب) هستند.

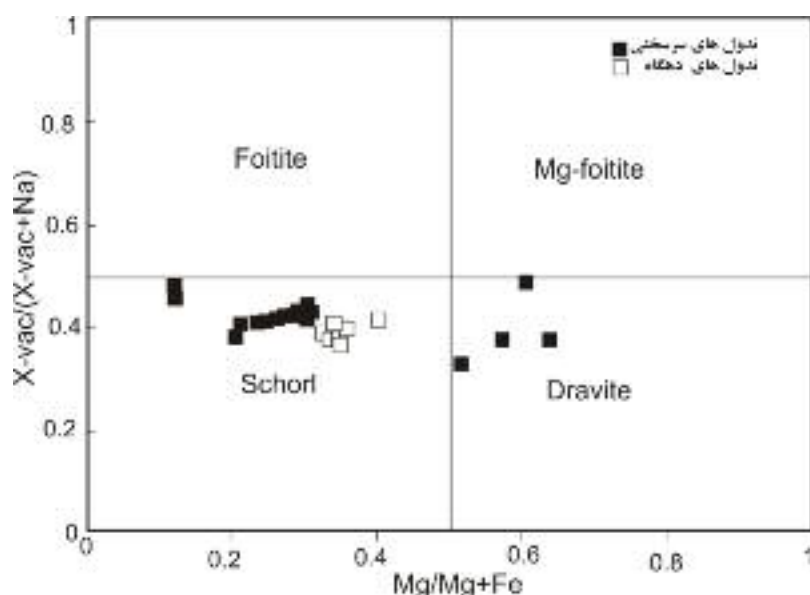
اند. بالاتر بودن عنصر K در گرهک‌های دهگانه نسبت به سنگ میزبان خود در مقایسه با گرهک‌های سرسختی نسبت به سنگ میزبان شان به دلیل نبودن حاشیه‌ی روشن در پیرامون گرهک‌های این منطقه و در نتیجه عدم تشکیل کانی فلدسپار قلیایی در حاشیه گرهک‌هاست.

گرانیتوئیدهای میزبان گرهک‌ها الگوی جدا شده‌ای از عناصر REE نشان می‌دهند (شکل ۳ ب). غنی شدگی در LREE، بی‌هنجاری منفی از Eu، $\Sigma REE=(1.076-2.427)$ ، $(La/Yb)_N=(7.9-13.5)$ و $Eu/Eu^*=(0.4-0.5)$ الگوی مسطح HREE همگی دلالت بر ذوب سنگ‌های پهنه‌ای دارند [۲۱].

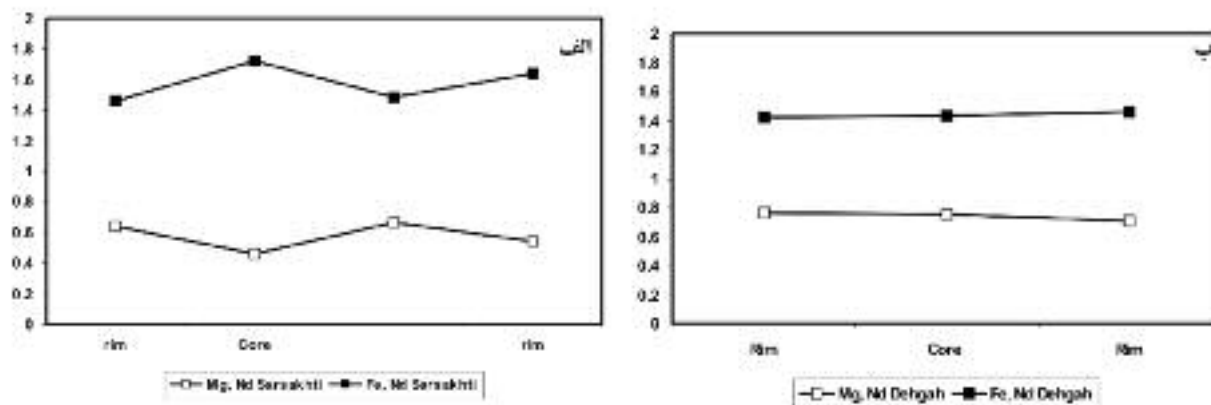
هسته گرهک تورمالین دارای مقادیر بالایی از $(5.3-10.7)$ $MgO = (1.2-1.7)$ ، $Fe_2O_3 = (0.2-0.9)$ ، $CaO = (1.3-1.6)$ ، $Na_2O = (0.2-0.7)$ ، $K_2O = (2.8-3)$ و LOI آن بالاست (شکل ۳ الف). مقادیر بالای LOI با فرآیند دگرسانی مجموعه‌ی کانی‌ها و یافاز شاره‌ی بدام افتاده برای تشکیل تورمالین قابل توجیه است.



شکل ۳ الف- ترکیب شیمیایی عناصر اصلی گرهک‌های تورمالین عادی شده به سنگ میزبان آنها ب- نمودار عناصر نادر خاکی که نسبت به کاندیت [۲۱] نرمال شده اند.



شکل ۴ ترکیب تورمالین های مورد بررسی: تورمالین های دهگانه در گستره ی شورلیت و تورمالین های سرسختی در گستره ی شورلیت - دراویت قرار می گیرند (داده ها از [۲۰، ۱۹] اقتباس شده است).



شکل ۵ الف- نمایش الگوی منطقه بندی عناصر Fe, Mg از حاشیه به حاشیه در تک بلور تورمالین در گرهک های تورمالین سرسختی. ب- نبود رده بندی در گرهک های تورمالین دهگانه. (داده ها از [۱۹] اقتباس شده است).

آهن در شاره پایین می آید و منجر به کاهش آن در حاشیه ی تورمالین خواهد شد (شکل ۲ ث و ج) [۲۵].
 بالاتر بودن MgO و Fe_2O_3 در هسته گرهک های دهگانه نسبت به گرهک های سرسختی دلیل تیره تر بودن آنهاست و با توجه به نبودن کانی های مافیک مانند بیوتیت در دایک های اسیدی میزبان، گرهک توانسته مقادیری از عناصر فرومنیزین را در خود جای دهد (اشکال ۲ الف و ب و ۳ الف).
 به عقیده ی [۲۶]، هاله ی روشن پیرامون گرهک به عنوان یک مرز انتشار عناصر بین مرکز گرهک و گرانیته میزبان آن محسوب می شود. کاهش چشمگیر Ca ، K ، Na و افزایش Fe در Mg گرهک ها مبین حضور این مرز انتشار است.

به عقیده ی [۲۳، ۲۲] تورمالین های گرمایی با رده بندی مشخص، جانشینی های گسترده و Mg بالا در حاشیه و Fe بالا در مرکز را نشان می دهند. در منطقه ی سرسختی (شکل ۲ ج) وجود رده بندی هسته ی غنی از آهن و حاشیه ی منیزیم بالا حاکی از تغییر ترکیب شاره ها در طول تبلور تورمالین است در حالی که تورمالین های ماگمایی با $Fe/Fe+Mg$ بالا شرایط فیزیکوشیمیایی یکسانی را در طول تبلور نشان می دهند [۲۴].
 در مراحل اولیه ی تبلور تورمالین از یک محلول ماگمایی، احتمالاً آهن در ترکیب کانی های مگنتیت و بیوتیت شرکت نخواهد کرد بنابراین باعث بالا رفتن آهن در مرکز بلور تورمالین می شود. همچنین در مراحل انتهایی تبلور تورمالین، غلظت

بحث

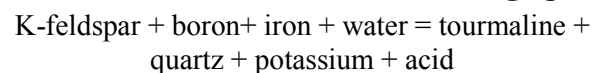
گرهک‌های تورمالین شامل انباشت تورمالین با شکل تقریباً کروی در سنگ‌های گرانیتی تفریق‌یافته هستند. این انباشت گرمایی‌ها، از مرحله‌ی انتهایی تبلور ماگمای گرانیتی [۲۷] و یا بخارهای ماگمایی ریشه گرفته است که اجازه فرار از سیستم را داشته‌اند [۵، ۱۰، ۱۲-۱۴].

به‌طور کلی دو نظریه درباره‌ی سازوکار شکل‌گیری گرهک‌های تورمالین وجود دارند. ۱- تئوری جاننشینی پسا ماگمایی یا پس از تبلور [۲۸، ۹، ۸] ۲- تئوری ماگمایی- گرمایی [۱۰].

سازوکار اول با جاننشینی دگرنهادی شاره‌های غنی از بور مراحل انتهایی ماگما در ارتباط است که به صورت پگماتیت و یا آپلیت ظاهر می‌شود در این روش بایستی بافت‌های حاصل از دگرسانی یا جاننشینی در سنگ دیده شود [۸].

[۹] بافت گرهک‌های گرانیت را به شبه ریخت‌های گرانیت میزبان نسبت می‌دهند. مثلاً گرانیت‌های درشت دانه میزبان باعث تشکیل گرهک‌های بزرگ‌تر می‌شوند. شکاف‌های موازی در مرز دانه‌ها باعث مهاجرت و انتشار شاره‌های غنی از بور و در نهایت دگرسانی گرمایی گرانیت‌های میزبان می‌شود. سازوکار شکل کروی گرهک‌ها به‌وسیله آن‌ها کاملاً مشخص نیست ولی به هسته‌زایی مرکزی در انتهای شکاف‌ها تأکید کرده‌اند [۹].

[۸] تشکیل هسته‌ی غنی از تورمالین را بر اساس واکنش زیر توضیح می‌دهد:



تشکیل گرهک تورمالین بر اساس واکنش بالا نیاز به وارد شدن مقادیری از B, Al, Fe و خروج سیلیس دارد.

به عقیده‌ی [۸] خاستگاه بور از شاره‌های مراحل انتهایی تبلور ماگماست، و پتاسیم و اسید واقع در واکنش بالا باعث شستشوی آهن از بیوتیت‌های سنگ میزبان می‌شود و در نهایت تشکیل هاله‌ی روشن را با خروج عناصر فرومنیزین در اطراف گرهک امکان‌پذیر می‌سازد. بنابراین روش بالا نیز بر جاننشینی دگرنهادی یا تورمالینیزاسیون گرانیت میزبان تأکید دارد.

روش دوم یعنی فرضیه‌ی ماگمایی- گرمایی با جدایش و بدام افتادن شاره‌های غنی از بور غیر قابل ترکیب با ماگمای گرانیتی وابسته است [۷، ۱۰].

[۷] در بررسی گرهک‌های تورمالین در لوکوگرانیت‌های میوسن هیمالیا نشان داد که این گرهک‌ها بر اثر دگرنهادی حاصل از چرخش و جدایش شاره‌های غنی از بور به وجود می‌-

آیند. همچنین به عقیده آن‌ها این شاره‌ها خاستگاه تأخیری ندارند بلکه از آغاز با ماگمای میزبان ریشه گرفته‌اند و یا به عبارت بهتر ماگمایی‌اند و شواهد آن را حضور بلورهای شکل‌دار تورمالین در گرانیت‌های میزبان می‌دانند.

[۱۰] شواهدی مانند تمرکز گرهک‌ها در سقف بالایی و یا در حاشیه‌ی توده، کاهش فراوانی آن‌ها با افزایش عمق، شکل کروی آن‌ها و فقدان اشکال ساختاری وابسته با شکل یا پراکنندگی گرهک را برای اثبات فرضیه خود می‌آورند. آن‌ها عقیده دارند که اشکال بافتی درون گرهک‌ها احتمالاً به دلیل واکنش‌گذاری حاوی بلور و شاره‌ی آبدار غنی از F, B, Fe در ماگمای در حال انجماد به دام افتاده‌اند، تشکیل می‌شوند. به‌طوری که در آغاز گدازه و شاره‌ی آبدار ممکن است در تعادل با هم باشند اما هنگامی که سرد شدن ادامه می‌یابد، عدم تعادل رخ می‌دهد. این عدم تعادل باعث واکنش‌هایی از تبادل عناصر در حاشیه گرهک بین فلدسپار و تورمالین می‌شود. بور اضافی به مرکز گرهک می‌رود و باعث تشکیل تورمالین شده و آهن از گرانیت میزبان شسته می‌شود. در پایان در گرهک‌هایی که جاننشینی گسترده و به آرامی صورت گیرد هاله‌ی روشن در پیرامون گرهک ایجاد می‌شود. همچنین آن‌ها عقیده دارند گرهک‌ها از یک شاره‌ی غنی از بور غیر قابل ترکیب با ماگمای گرانیتی در حال تبلور به وجود می‌آیند که حاوی لخته‌ها یا گرهک‌هایی از تورمالین است و در ضمن حرکت قارچی به دلیل چگالی کمتر نسبت به ماگمای اطراف به سمت بالا حرکت می‌کند.

[۲۹] نشان داد که انباشت بور در شاره‌ی انتهایی ماگما باعث بالا رفتن قابلیت حلالیت آب در همان شاره خواهد شد. جدایش آب از این شاره همزمان با جدایی بور، شرایط مطلوبی را برای تشکیل لخته‌ها یا انباشت‌های تورمالین در شکاف‌های موماند فراهم خواهد کرد.

در مورد شکل کروی گرهک‌ها، به عقیده‌ی [۱۴] در طول رشد بلور مقدار انرژی سطحی تمایل به کمینه شدن دارد. زیرا بر اساس قانون گیبس انرژی آزاد سیستم در کمترین میزان خود باقی خواهد ماند به‌همین دلیل برای تعادل ترمودینامیکی، سطوح با انرژی سطحی بالا نسبت به سطوح با انرژی سطحی پایین کمتر رشد می‌کنند. بنابراین در طول فرآیند انجماد، کسش سطحی یک فاکتور محدود کننده‌ی رشد محسوب می‌-

ممکن است این شاره‌ها با آب موجود در شبه پهنه‌های سقف توده واکنش دهد و منجر به تشکیل تورمالین‌هایی با هر دو خاستگاه ماگمایی و آب‌های اطراف شود [۳۷،۳۶]. بر عقیده‌ی [۳۹،۳۸] B میل زیادی به فازهای آبدار دارد و نمی‌تواند وارد ساختار کانی‌های معمول سنگ‌های گرانیتی (کوارتز، فلدسپار و میکا) شود بنابراین، این عنصر خوشه‌های بوراتی آبداری در گدازه‌های مراحل انتهایی تشکیل می‌دهد.

به عقیده‌ی [۴۰-۴۲] اگر جدایی حباب‌ها با کاهش فشار، ضمن حرکت رو به بالای شاره با سرعت انجام شود، حباب‌ها قادر به واکنش با شاره‌های شبه پهنه‌ای دیواره، ایجاد هاله‌ی روشن پیرامون گرهک‌ها و رده‌بندی مشخص در تورمالین نخواهد شد و به دلیل بالا بودن نسبت Fe/Fe+Mg ترکیب تورمالین‌ها معمولاً شورلیت خواهد بود. در حالی که اگر جدایش حباب‌ها به آرامی صورت گیرد ضمن حرکت شاره به سمت بالا با شاره‌های شبه پهنه‌ای واکنش داده و شرایط تبلور یک شرایط نیمه جامد و یا نزدیک به جامد خواهد شد. با این تغییر در سیستم تبلور، رده‌بندی در بلور تورمالین به وجود می‌آید و واکنش با سنگ‌های اطراف منجر به بالا رفتن نسبت Mg/Mg+Fe شده و در نهایت تورمالین تبلور یافته ترکیب درایت خواهد داشت.

شکل کروی گرهک‌های تورمالین، جدایی فیزیکی آن‌ها از زمینه، عدم رده بندی مشخص و شورلیت بودن تورمالین‌های دهگانه، عدم وجود هرگونه شکاف‌های موماند از شواهد ماگمایی بودن گرهک‌های دهگانه‌اند. در حالی که وجود شکاف‌های ریز، هاله‌ی روشن در اطراف گرهک سرسختی، رده‌بندی با Mg بالا در حاشیه و Fe بالا در مرکز و داشتن ترکیب درایت از جمله شواهد تغییر در ترکیب تورمالین ضمن تبلور و یا شرایط رشد زیر خط انجماد تبلور تورمالین است.

برداشت

بر اساس مشاهدات زمین‌شناسی، بافتی و کانی‌شناسی در دو منطقه‌ی دهگانه و سرسختی، انباشت تورمالین به صورت گرهک حاصل یک فاز شاری غنی از بور مراحل انتهایی تبلور ماگما بوده که از ماگمای در حال تبلور جدا شده است. هنگامی که ماگمای گرانیتی تحت اشباع از فازهای بخار بر اساس چگالی کمتر نسبت به فازهای متبلور شده به سطح بالاتر و کم عمق‌تر انتقال می‌یابد باعث جدایی فازها یا حباب‌های بخاردار حاوی بور شده و در نهایت گرهک‌های تورمالین تشکیل شده است.

شود. وجود گرهک‌های تورمالین نشان می‌دهد که شکل کروی کمترین مقدار انرژی آزاد گیبس و انرژی سطحی را دارد.

شواهد زمین‌شناسی و ژئوشیمی مانند وجود زینولیت‌های پلیتی، حضور آندالوزیت در هر دو منطقه‌ی مورد بررسی، وجود میگماتیت‌ها در اطراف بروجرد [۱۵] و وجود کوندوم در زینولیت‌های آستانه [۳۰] تشکیل گدازه‌ی اولیه به وسیله ذوب پوسته در یک محیط برخوردی را تأیید می‌کنند [۳۲،۳۱].

ذوب بخشی شبه متاپلیت در aH_2O پایین، سازوکار احتمالی تشکیل گرانیتوئیدهای میزبان گرهک‌های تورمالین سرسختی و دهگانه است. این گرانیتوئیدها در یک محیط پلوتونیک کم عمق تشکیل می‌شوند به طوری که گرهک‌های تورمالین دهگانه در درون دایک‌های اسیدی (آپلیت‌ها) قرار دارند که در مراحل پایانی تبلور ماگما تزریق شده‌اند و گرهک‌های با حاشیه روشن منطقه سرسختی در موزوگرانیت‌ها تشکیل شده‌اند که وجود شکاف‌های موماند یا میارولیتی حاکی از کم عمق بودن میزبان این گرهک‌ها بوده‌اند.

به عقیده‌ی [۲، ۱۲، ۲۹، ۳۳] در طول ذوب شبه پهنه‌ها با خروج مقدار کمی از گدازه، مقدار B و آب در ماگمای باقیمانده حاصل از ذوب بالا می‌رود که اگر این غنی شدگی از B و آب ادامه یابد جدایش و شاره‌ی غنی از بور ادامه می‌یابد و تبلور تورمالین رخ می‌دهد.

جدایش ماگمایی باعث تشکیل یک مایع [آبگون] غیر قابل ترکیب از سیلیس و گدازه‌ی آبدار در سقف توده و یک شاره‌ی غنی از B, Na, Fe می‌شود و در نتیجه سازوکاری برای جدایش حباب‌های غنی از عناصر فوق و تشکیل گرهک‌های تورمالین خواهد شد [۱۳]. آلومینیم مورد نیاز برای تشکیل تورمالین از دگرسانی فلدسپارها و انتقال آن در مرز هاله‌ی روشن به مرکز تیره گرهک تأمین می‌شود.

بر اساس نظریه [۳۵،۳۴] ذوب شبه پهنه‌ها در شرایط فشار پایین منجر به جدایش یا آزاد سازی فاز بخار غنی از B, Na, Fe در مرز یا پیشانی تبلور می‌شود. هنگامی که حجم بلورها در گدازه افزایش می‌یابد گرانیوی شاره‌ی باقیمانده افزایش می‌یابد که منجر به جدایش و تبلور گرهک‌های تورمالین و حرکت آن‌ها در شکاف‌های موزوگرانیت‌ها (منطقه سرسختی) می‌شود.

با حرکت رو به بالای شاره‌های غنی از بور و کاهش فشار در سطوح کم عمق، آزاد سازی و جدایش ادامه می‌یابد و در نهایت

- [7] Le Fort P., "Enclaves of the Miocene Himalayan leucogranites", In: Enclaves and granite petrology. Didier and Barbain (eds.), (1991) 35-47.
- [8] Nemeč D., "Genesis of tourmaline spots in leucocratic granites", Neues Jahrbuch Mineralogic Monatshefte 7 (1975) 308-317.
- [9] Rozendaal A., Bruwer L., "Tourmaline nodules indicator of hydrothermal alteration and Sn-Zn-(W) mineralization in the Cape Granite Suite, South Africa", Journal of African Earth Sciences 21 (1995) 141-155.
- [10] Sinclair D.W., Richardson J.M., "Quartz-tourmaline orbicules in the Seagull Batholith, Yukon Territory", Canadian Mineralogist 30 (1992) 923-935.
- [11] Samson I.M., Sinclair W. D., "Magmatic hydrothermal fluids and the origin of quartz-tourmaline orbicules in the Seagull Batholith, Yukon Territory", Canadian Mineralogist 30 (1992) 937-954.
- [12] Dini A., Corretti A., Innocenti F., Rocchi S., Westerman D. S., "Sooty sweat stains or tourmaline spots? The Argonauts at Elba Island (Tuscany) and the spread of Greek trading in the Mediterranean Sea", In Piccardi, L., Masse, W. B. (eds) Myth and Geology. Geological Society, London, Special Publications 273 (2007) 227-243.
- [13] Trumbull R. B., Krienitz M.S., Gottesmann B., Wiedenbeck M., "Chemical and boron-isotope variations in tourmalines from S-type granite and its source rocks: the Erongo granite and tourmalinites in the Damara Belt, Namibia", Contributions to Mineralogy and Petrology 155 (2008) 1-18.
- [14] Perugini D., Poli G., "Tourmaline nodules from Capo Bianco aplite (Elba Island, Italy): an example of diffusion limited aggregation growth in a magmatic system", Contributions to Mineralogy and Petrology 153 (2007) 493-508.

- [۱۵] احمدی خلجی ا.، "پترولوژی توده‌ی گرانیتوئیدی بروجرد". پایان‌نامه دکتري، دانشکده علوم، دانشگاه تهران (۱۳۸۵).
- [۱۶] رادفر ج.، "بررسی‌های زمین‌شناسی و پترولوژی سنگ‌های گرانیتوئیدی ناحیه آستانه-گوشه". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه تهران (۱۳۶۶).
- [۱۷] احمدی خلجی ا.، "بررسی پترولوژی و پتروفابریک توده‌های نفوذی و دگرگونی مجاورتی منطقه بروجرد". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه تهران (۱۳۷۸).

شکل کروی تورمالین به دلیل پاسخ به حداقل نکه داشتن انرژی آزاد گیبس است. بنابر این کاهش فشار، سرعت سرد شدن و در نهایت رفتار بور در سیستم‌های گرانیتی از جمله فاکتورهای اصلی تعیین کننده‌ی شکل گرهکی تورمالین و سازوکار شکل‌گیری کروی آن است [۴۱-۴۳]. گرهک‌های تورمالین منطقه دهگانه با داشتن ترکیب شورلیت، بدون رده بندی (با تغییر ناچیز) و بدون حاشیه روشن نشان می‌دهند که تورمالین‌ها در یک محیط کاملاً ماگمایی و در شرایطی با سرعت بالا (جدایی حباب‌ها از ماگمای اولیه به سرعت صورت گرفته است) و بدون واکنش با شاره‌های حاصل از سنگ میزبان به وجود آمده‌اند. این در حالی است که وجود هاله‌ی روشن، رده بندی مشخص، ترکیب شورلیت تا دراویت گرهک‌های تورمالین منطقه‌ی سرسختی دلالت بر جدایی آرام حباب‌ها از ماگمای میزبان و واکنش با شاره‌های سنگ میزبان دارد.

مراجع

- [1] Maning D. A. C. "Chemical and morphological variation in tourmalines from the Hub Kapong batholith of peninsular Tailand", Mineralogical Magazine 45 (1982) 139-147.
- [2] London D., "Stability of tourmaline in peraluminous granite systems: the boron cycle from anatexis to hydrothermal aureoles", European Journal of Mineralogy 11(1999) 253-262.
- [3] Taylor R.P., Ikingura J.R., Fallick A.E., Huang Yiming, Watkinson D.H., "Stable isotope compositions of tourmalines from granites and related hydrothermal rocks of the Karagwe-Ankolean belt, northern Tanzania", Chemical Geology (Isotope Geoscience Section) 94 (1992) 215-227.
- [4] 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.
- [5] Shewfelt D., Ansdell K., Sheppard S., "The origin of tourmaline nodules in granites; preliminary findings from the Paleoproterozoic Scrubber Granite", Geological Survey of Western Australia Annual Review (2005) 59-63.
- [6] Didier J., "Mineral nodules", In: Didier, J. (ed.) Granites and Their Enclaves. The Bearing of Enclaves on the Origin of Granites. Elsevier, Amsterdam, Developments in Petrology 3 (1973) 357-368.

- [28] Rozendaal A., Bruwer L., Scheepers R., "Tourmaline nodules as indicators of Sn-Zn-(W) mineralization in the Cape Granite Suite, South Africa", Mineral Deposits, Pasava, Kribek & Zak (eds.), (1995) 511-513.
- [29] London D., Morgan G. B., VI. Wolf M. B., "Boron in granitic rocks and their contact aureoles", In Grew, E.S., Anovitz, L. (eds) Boron: Mineralogy, Petrology and Geochemistry in the Earth's Crust, Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy 33 (1996) 299-330.
- [۳۰] طهماسبی ز، خلیلی م، احمدی خلجی ا، مکی زاده م.ع، "مقایسه انواع آمفیبول و ژئوتروموبارومتري توده نفوذی آستانه (زون سنندج سیرجان)". مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۲ (۱۳۸۸)، ص ۲۷۹-۲۹۰.
- [۳۱] طهماسبی ز، خلیلی م، احمدی خلجی ا، مکی زاده م.ع، "پتروژنز توده‌ی گرانیتوئیدی جنوب شازند (جنوب غرب اراک)"، پترولوژی، شماره ۱ (۱۳۸۹)، ص ۸۷-۱۰۲.
- [۳۲] احمدی خلجی ا، ولی زاده م.و، اسماعیلی د، "پترولوژی و ژئوشیمی توده‌ی گرانیتوئیدی بروجرد (غرب ایران)". مجله دانشکده علوم، دانشگاه تهران، شماره ۱۰ (۱۳۸۶)، ص ۱۴-۱.
- [33] Wilke M., Nabelek P.I., Glascock M. D., "B and Li in Proterozoic metapelites from the Black Hills, U.S.A.: Implications for the origin of leuco-granitic magmas", American Mineralogist 87 (2002) 491-500.
- [34] Veksler I.V., "Liquid immiscibility and its role at the magmatic hydrothermal transition: a summary of experimental studies", Chemical Geology 210 (2004) 7-31.
- [35] Veksler I.V., Thomas R., "An experimental study of B-, P- and Frich synthetic granite pegmatite at 0.1 and 0.2 GPa", Contributions to Mineralogy and Petrology 143 (2002) 673-683.
- [36] Candela P. A., "Physics of aqueous phase evolution in plutonic environments", American Mineralogist 76 (1991) 1081-1091.
- [37] Candela P. A., "Combined chemical and physical model for plutonic devolatilization: A non-Rayleigh fractionation algorithm", Geochimica et Cosmochimica Acta 58 (1994) 2157-2167.
- [38] Dingwell D. B., Pichavant M., Holtz F., "Experimental studies of boron in granitic melts", In Grew, E.S., Anovitz, L. (eds) Boron: Mineralogy, Petrology, and Geochemistry in the
- [18] Ahmadi-Khalaji A., Esmaily D., Valizadeh, M.V., Rahimpour-Bonab H., "Petrology and Geochemistry of the Granitoid Complex of Boroujerd, Sanandaj-Sirjan Zone, Western Iran", Journal of Asian earth Sciences 29 (2007) 859-877.
- [۱۹] میرسپهوند ف، طهماسبی ز، شاهرخی س، احمدی خلجی ا، خلیلی م، "ژئوشیمی و تعیین خاستگاه تورمالین های منطقه بروجرد". مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۲ (۱۳۹۱)، ص ۲۸۱-۲۹۲.
- [۲۰] طهماسبی ز، احمدی خلجی ا، رجاییه م، "تورمالین زائی در توده گرانیتوئیدی آستانه (جنوب غرب اراک)". مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۳ (۱۳۸۸)، ص ۳۶۹-۳۸۰.
- [21] Boynton W.V., "Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies", In: Henderson, P. (ed) Rare Earth Element Geochemistry, Elsevier, Amsterdam (1984) 63-114.
- [22] Pivec E., Stempork M., Novak M., Lang J.K., "Tourmaline as a late-magmatic or post-magmatic mineral in granites of the Czech part of the Krusne Hory-Erzgebirge batholith and its contact zone". Journal of the Czech Geological Society 43 (1998) 17-23.
- [23] Gaweda A., Pieczka A., Kraczka J., "Tourmalines from the western Tatra Mountains (W-Carpathians, S-Poland): Their characteristics and petrogenetic importance", European Journal of Mineralogy 14 (2002) 943-955.
- [24] 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.
- [25] Yavuz F., Fuchs Y., Karakaya N., Karakaya M.C., "Chemical composition of tourmaline from the Asarcik Pb-Zn-Cu±U deposit, Sebinkarahisar, Turkey", Mineralogy and petrology, 94 (2008) 195-208.
- [26] Barbey P., "Diffusion-controlled biotite breakdown reaction textures at the solid/liquid transition in the continental crust", Contribution to Mineralogy and Petrology 154 (2007) 707-716
- [27] Thomas R., Forster H.J., Heinrich W., "The behavior of boron in a peraluminous granite-pegmatite system and associated hydrothermal solutions: a melt and fluid inclusion study", Contributions to Mineralogy and Petrology 144 (2003) 457-472.

examples from the Bohemian Massif, Czech Republic", *Lithos* 95 (2007) 148-164.

[42] Kubis M., Broska I., "*The role of boron and fluorine in evolved granitic rock systems (on the example of the Hnilec area, Western Carpathians)*", *Geologica Carpathica* 56 (2005) 193-204.

[43] Balen D., Broska I., "*Tourmaline nodules: products of devolatilization within, the final evolutionary stage of granitic melt?*", Geological Society, London, Special Publications 350 (2011) 53-68.

Earth's Crust Mineralogical Society of America, *Reviews in Mineralogy* 33 (1996) 331-385.

[39] Dingwell D. B., "*Granitic Melt Viscosities*", Geological Society, London, Special Publications 168 (1999) 27-38.

[40] Burianek D., Novak M., "*Morphological and compositional evolution of tourmaline from nodular granite at Lavický near Velké Meziříčí, Moldanubi cum, Czech Republic*", *Journal of the Czech Geological Society* 49 (2004.) 81-90.

[41] Burianek D., Novak M., "*Compositional evolution and substitutions in disseminated and nodular tourmaline from leucocratic granites:*

Archive of SID