



سنگنگاری و شیمی کانی‌ها در دایک‌های پگماتیتی - آپلیتی نواری واقع در شرق بروجرد

صدیقه سلامی^{*}، علی اصغر سپاهی‌گرو، محمد معانی‌جو

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

(دریافت مقاله: ۹۳/۱۰/۲۷، نسخه نهایی: ۹۴/۲/۲۵)

چکیده: دایک‌های پگماتیتی - آپلیتی موجود در شمال‌شرقی استان لرستان و در ۲۵ کیلومتری شرق شهرستان بروجرد، دارای سه منطقه‌ی اصلی هستند که از خارج به داخل عبارتند از منطقه‌ی گرافیکی، منطقه‌ی نواری و منطقه‌ی هسته‌ای، که به خوبی اثر پیشرفت تبلور تفریقی در پگماتیت‌ها را نشان می‌دهند. بررسی‌های ریزپردازشی انجام شده روی کانی‌های تورمالین، پلازیوکلاز و مسکوویت هر سه منطقه نیز صورت گرفت. تورمالین‌های منطقه‌ی حاشیه دارای ترکیب شورلیت تا فوئیتیت و تورمالین‌های منطقه‌ی نواری دارای ترکیب فوئیتیت هستند که هر دو در دسته‌ی تورمالین‌های ماغمایی قرار می‌گیرند. این تورمالین‌ها در نمودار FeO/FeO+MgO نسبت به MgO دارای Fe# بین ۰,۸ تا ۱ هستند، که نشان دهنده‌ی تشکیل آن‌ها در شرایط ماغمایی و عدم دخلات گرماب‌های خارجی است. ترکیب پلازیوکلازهای آنالیز شده در هر سه منطقه، غنی از آلیت است و ترکیب میانگین آن‌ها به ترتیب عبارتند از، منطقه‌ی حاشیه (Ab_{98.05})، منطقه‌ی نواری (Ab_{98.78}) و منطقه‌ی مرکزی (Ab_{98.43})، که حاکی از تفرقی بالا صورت گرفته در ماغمای خاستگاه است.

واژه‌های کلیدی: شیمی کانی‌ها؛ تفرقی ماغمایی؛ پگماتیت - آپلیت نواری؛ بروجرد.

میانی و سرانجام بلورهای بسیار درشت کوارتز و فلدسپات در بخش مرکزی هستند [۲]. آپلیت‌های لایه‌ای یکی از شکل‌های مورد توجه در پگماتیت‌ها هستند که شامل دنباله‌ای از لایه‌های تیره و روشن هستند. نوارهای روشن اغلب غنی از مسکوویت و پلازیوکلاز بوده، در حالی که نوارهای تیره غنی از تورمالین و حاوی فلدسپات پتاسیم تشکیل شده‌اند [۳]، گاهی نیز در لایه‌های تیره، گارنت به فراوانی یافت می‌شود [۴]. در بررسی‌های قبلی صورت گرفته در منطقه ۹-۵، پگماتیت‌های تورمالین دار م وجود از نظر ژئوشیمی، سنگنگاری و سال‌سنگی مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اما هدف از این پژوهش بررسی دقیق ساختار پگماتیت - آپلیت‌های نواری و شیمی کانی‌های موجود در آنهاست.

مقدمه

اگر چه پگماتیت‌ها اغلب سنگ‌های درشت بلووند، ولی گاهی در حاشیه دارای واحدهای ریزدانه‌ی آپلیتی هستند، که ممکن است این آپلیت‌ها حالت لایه‌ای یا توده‌ای داشته باشند. از حاشیه به سمت مرکز پگماتیت‌ها، نرخ هسته‌بندی، اندازه‌ی بلورهای بافت‌های موجود تغییر می‌کنند. بر اساس بررسی‌های بلورهای با مقدار کاهش دمای مagma، ناشی از میزان بخار آب موجود در مذاب وجود دارد [۱]. روند تغییرات بافتی در پگماتیت‌ها، از حاشیه به مرکز تقریباً ثابت است و به ترتیب شامل بافت‌های با هم‌رشدی گرافیکی، آپلیت‌های لایه‌ای و توده‌ای در حاشیه، سپس بلورهای درشت دانه در منطقه‌ی

*نویسنده مسئول، تلفن نمابر: ۰۸۱-۳۸۳۸۱۴۶۰، نمابر: ۹۹۹۹۹۹۹۹۹۹۹۹، پست الکترونیکی: Sedigheh.Salami91@gmail.com

مانند AX و Mincalculation نمودارهای لازم ترسیم و تفسیر شدند.

موقعیت منطقه‌ی زمین‌شناسی

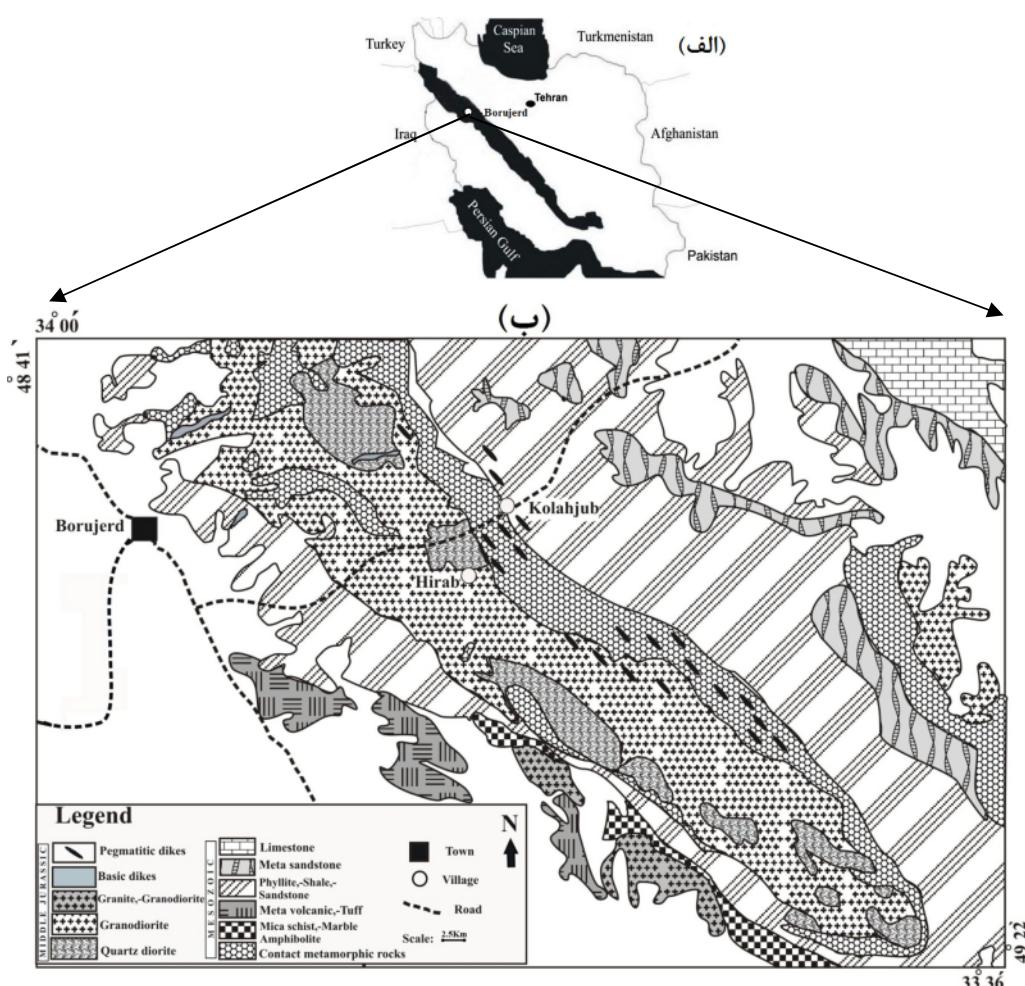
منطقه‌ی مورد بررسی در شمال شرقی استان لرستان و در ۲۵ کیلومتری شرق شهرستان بروجرد، قرار گرفته است. این منطقه در حد فاصل عرض‌های جغرافیایی $33^{\circ} 33' 55''$ و $40^{\circ} 0' 49''$ شمالي و طول‌های جغرافیایي $48^{\circ} 50' 1''$ و $50^{\circ} 49' 49''$ شرقی قرار دارد (شکل ۱). در پهنه‌بندی ساختاری ایران، شرقی قرار دارد (شکل ۱). در پهنه‌بندی ساختاری ایران، این منطقه بخشی از پهنه‌ی سنندج- سیرجان به حساب می‌آید. بیرون‌زدگی‌های پگماتیتی منطقه بیشتر به صورت دایک‌هایی با روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی هستند (شکل ۲-الف).

روش پژوهش

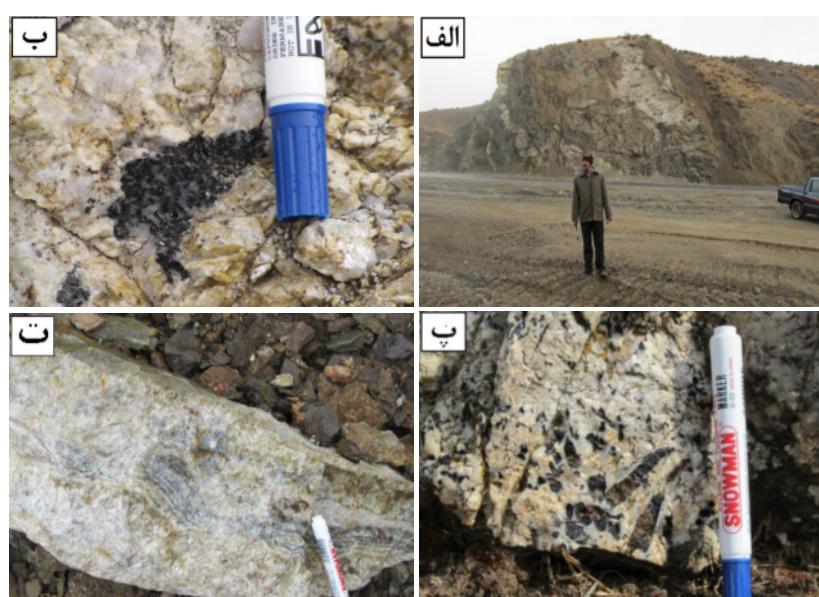
طی بررسی‌های صحرایی ۱۰۰ نمونه‌ی دستی از پگماتیت‌ها برداشت و از ۲۰ نمونه پگماتیتی مقطع نازک تهیه و بررسی شدند. به منظور بررسی شیمی کانی‌ها در منطقه‌های مختلف پگماتیت- آپلیت‌های مورد بررسی؛ آنالیز ریزپردازشی روی ۵ مقطع نازک از مناطق مختلف آن‌ها صورت گرفت که طی آن کانی‌های تورمالین (۱۱ نقطه)، موسکوویت (۱۸ نقطه) و پلازیوکلаз (۱۱ نقطه) مورد آنالیز قرار گرفتند (جدول‌های ۱-۳). این آنالیزها، از سوی شرکت فرآوری مواد معدنی کرج با آنالیز کننده‌ی نقطه‌ای مدل SX100، ساخت شرکت Cameca فرانسه؛ در شرایط ولتاژ 15 kV ، فشار 10^{-7} Torr و آمپراژ 20 nA انجام گرفت. سپس با استفاده از نرم افزارهای رایانه‌ای

جدول ۱ آنالیز ریزپردازشی تورمالین‌های موجود در نمونه پگماتیتی برداشت شده از بروجرد. H_2O به روش عنصرستنجی محاسبه شده است.

Sample	1b				2b				3D			
	1	2	۳	۴	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۴	
F	۰,۲۹	۴,۰۹	۰	۰	۰,۴۲	۰	۰	۱,۰۲	۰	۰	۰	۰,۰۴
Na ₂ O	۱,۷۱	۰,۸۱	۱,۷۵	۱,۶۴	۱,۵۱	۱,۶۸	۱,۵۴	۰	۰	۰	۰	۰
K ₂ O	۰,۰۵	۰,۰۴	۰,۰۵	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۲	۰,۰۴	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۳
MgO	۱,۰۹	۰,۸۹	۰,۷	۱,۲۶	۰,۵۵	۰,۶۲	۰,۶۷	۰,۷۵	۰,۹۳	۰,۸	۰,۸۴	۰,۸۴
CaO	۰,۱۲	۰,۱	۰,۱	۰,۱۳	۰,۰۸	۰,۱۱	۰,۱	۰,۱	۰,۰۹	۰,۱۲	۰,۰۷	۰,۰۷
MnO	۰,۲	۰,۲	۰,۲۷	۰,۲۴	۰,۲۸	۰,۲۹	۰,۳۲	۰,۲۷	۰,۳۱	۰,۲۹	۰,۲۵	۰,۲۵
FeO	۱۲,۴۷	۱۲,۷۸	۱۳,۴۹	۱۲,۹۵	۱۳,۳	۱۳,۶۶	۱۳,۵۹	۱۳,۵۱	۱۳,۶۵	۱۳,۳۵	۱۳,۸۲	۱۳,۸۲
H ₂ O ⁺	۲,۶۵	۱,۵۹	۲,۷۹	۲,۷۴	۲,۵۵	۲,۸	۳,۰۴	۲,۲۸	۲,۶۶	۲,۷۵	۲,۶۴	۲,۶۴
Al ₂ O ₃	۳۴,۵۸	۳۴,۶۱	۳۴,۴۲	۳۳,۶۳	۳۴,۰۴	۳۲,۹۴	۳۴,۰۸	۳۴,۷۲	۳۵,۷۷	۳۴,۹۳	۳۴,۵۵	۳۴,۵۵
SiO ₂	۳۵,۷	۳۵,۴	۳۵,۴۸	۳۵,۶۴	۳۵,۴۷	۳۵,۲۹	۳۵,۶۷	۳۶,۰۹	۶۶,۹۶	۳۴,۹۳	۳۵,۴۴	۳۵,۴۴
TiO ₂	۰	۰	۰	۰	۰	۰,۸۱	۰,۷۲	۰,۷۴	۰	۰	۰	۰
B ₂ O _۳	۱۰,۶۹	۱۰,۶۹	۱۰,۶۵	۱۰,۶۷	۱۰,۳۸	۱۰,۷۴	۱۰,۷۳	۱۰,۳۴	۱۰,۳۸	۱۰,۴۱	۱۰,۶۸	۱۰,۶۸
total	۹۹,۵۵	۱۰,۱۲	۹۹,۴۸	۹۸,۹۳	۹۸,۶۲	۹۹,۹۸	۱۰۰,۴۸	۹۹,۸۶	۹۸,۵۶	۹۷,۶۱	۹۸,۳۶	۹۸,۳۶
Number of cations on the basis of 31 Oxygens												
F	۰,۱۵۲	۲,۲۵۳	۰	۰	۰,۲۲۷	۰	۰	۰,۵۴۳	۰	۰	۰	۰,۰۲
Na	۰,۵۶۰	۰,۲۷۲	۰,۵۷۲	۰,۵۳۵	۰,۴۹۶	۰,۵۵۲	۰,۴۹۴	۰	۰	۰	۰	۰
K	۰,۰۱	۰,۰۰۸	۰,۰۱	۰,۰۰۶	۰,۰۰۸	۰,۰۸	۰,۰۰۴	۰,۰۰۸	۰,۰۰۴	۰,۰۰۶	۰,۰۰۶	۰,۰۰۶
Mg	۰,۲۷۵	۰,۲۳۰	۰,۱۷۳	۰,۳۱۷	۰,۱۳۴	۰,۱۵۳	۰,۱۶۱	۰,۱۸۴	۰,۲۳۵	۰,۲۰۴	۰,۲۰۵	۰,۲۰۵
Ca	۰,۰۲	۰,۰۱۰	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱۶	۰,۰۲۰	۰,۰۱	۰,۰۱
Mn	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۳۱	۰,۰۴	۰,۰۴۰	۰,۰۳	۰,۰۴۱	۰,۰۴۱	۰,۰۳	۰,۰۳
Fe	۰,۷۶۲	۱,۸۵۴	۱,۹۱	۱,۸۴۲	۱,۹۱۴	۱,۹۴	۱,۹۰۷	۱,۹۲	۱,۹۳	۱,۹۱۱	۱,۹۷	۱,۹۷
OH	۲,۹۹۴	۱,۸۴۴	۳,۱۶۷	۳,۱۱	۲,۹۲	۳,۱۷۴	۳,۴۰	۲,۵۹	۳,۰۲۴	۳,۱۵	۳,۰۰۷	۳,۰۰۷
Al	۶,۹۰۶	۷,۱۰۵	۶,۸۴۵	۶,۷۴۶	۶,۹	۶,۸۰	۶,۷۴۰	۶,۹۷	۶,۹۸۲	۷,۰۶۵	۶,۹۴۸	۶,۹۴۸
Si	۶,۰۵۱	۶,۱۷۲	۶,۰۲	۶,۰۷	۶,۱۰۶	۶,۰۱	۵,۹۸	۶,۱۵۶	۶,۱۰۱	۶,۰۰۱	۶,۰۴۵	۶,۰۴۵
Ti	۰	۰	۰	۰	۰,۱۰۲	۰,۱۰۹	۰,۰۹۲	۰	۰	۰	۰	۰
B	۳,۱۲۷	۳,۲۱۷	۳,۱۱۶	۳,۱۳	۳,۰۸۴	۳,۱۵۳	۳,۱۰۷	۳,۰۴۷	۳,۰۵۵	۳,۰۸۸	۳,۱۴۰	۳,۱۴۰



شکل ۱ (الف) موقعیت زمین‌شناسی منطقه در نوار سنندج- سیرجان و (ب) نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد بررسی، براساس نقشه‌ی ۱/۲۵۰۰۰۰ ورقه خرم آباد، سازمان زمین‌شناسی ایران [۱۰].



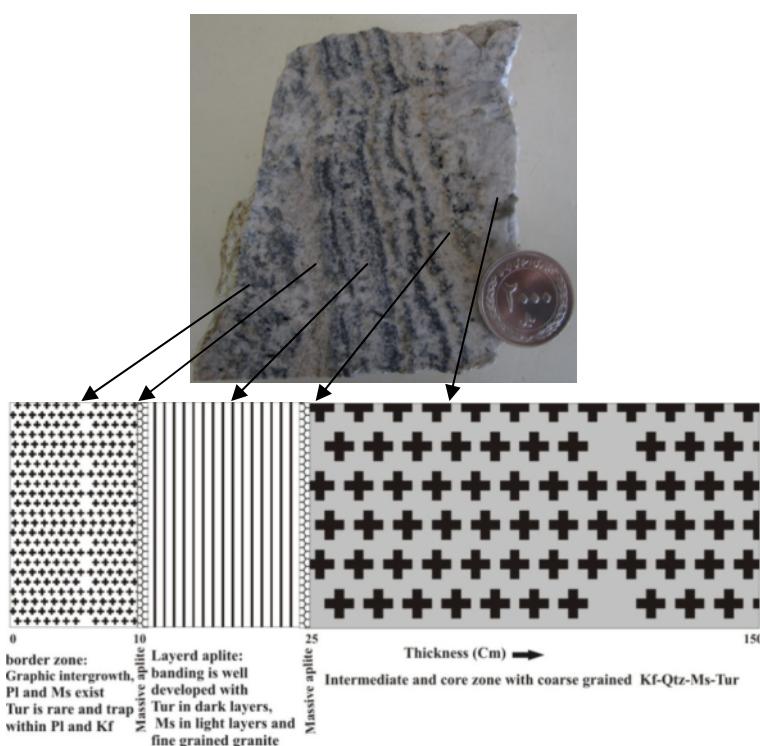
شکل ۲ (الف) دایک‌های پگماتیتی- آپلیتی منطقه با روند شمال غربی- جنوب شرقی، (ب) گرهک‌های تورمالین تشکیل شده در سطح پگماتیتها، (پ) بلورهای درشت و شکل دار تورمالین موجود در پگماتیتها، (ت) آپلیت‌های نواری در حاشیه‌ی پگماتیتها.

درشت و شکل‌دار در پگماتیت‌ها دیده می‌شود. این تورمالین‌ها به صورت تقریباً یکنواخت و فراوان در دایک‌های مورد بررسی پراکنده هستند (شکل ۲-ب). در آپلیت‌های نواری موجود در حاشیه پگماتیت‌ها نیز، تورمالین موجب شکل‌گیری بافت نواری شده است (شکل ۲-ت و ۳). از آنجا که این ساخت یکی از مباحث مورد توجه در این پژوهش است، لذا سنگنگاری دایک‌های پگماتیتی-آپلیتی موجود در منطقه از حاشیه به مرکز، به شرح زیر مورد بررسی قرار می‌گیرند:

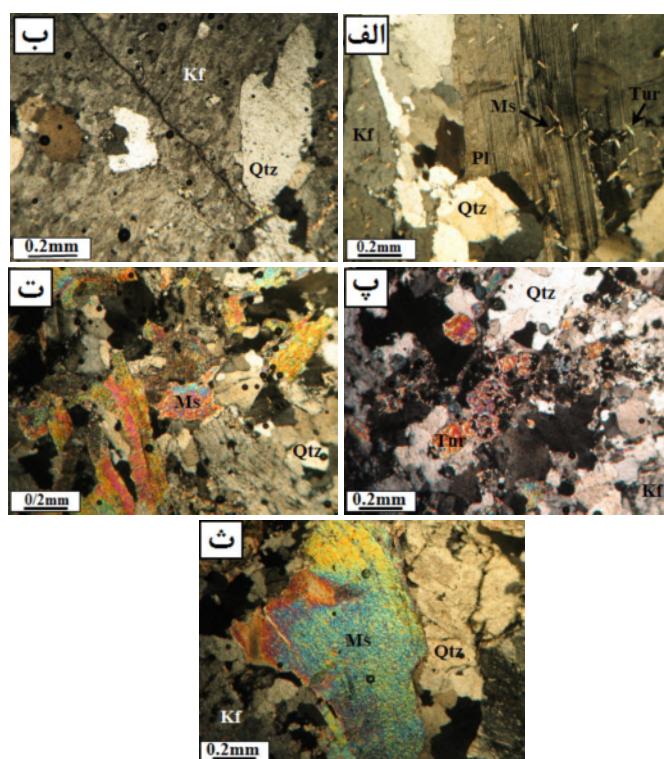
ساختار حاشیه: در این منطقه، پلازیوکلاز، پتاسیم فلدسپات‌های پرتیتی و کوارتز فراوان هستند. درون بلورهای پتاسیم فلدسپات و پلازیوکلاز اغلب ریز بلورهای کشیده مسکوویت و تورمالین یافت می‌شوند (شکل ۴-الف). هم رشدی گرافیکی هم در نمونه‌ی دستی و هم در مقطع میکروسکوپی قابل مشاهده است (شکل ۴-ب). به عقیده [۱۲]، ۱- هم رشدی نموداری، ۲- آپلیت‌های توده‌ای و ۳- آپلیت‌های نواری به سه شکل تبلور سریع از مذاب چسبنده، در حاشیه پگماتیت‌ها دیده می‌شوند که در شرایط زیر منحنی آبگونی تشکیل می‌شوند. در طول تشکیل بافت نموداری، انتشار جانبی اجزاء در طول سطح رشد به نحوی است که با پیشرفت تبلور تناوبی بین اجزاء دیده نمی‌شود و باعث افزایش پیشرونده رشد بلورهای پیوسته کوارتز و فلدسپات قلیایی به سمت داخل می‌شود [۱۳].

رخمنون‌های اصلی این دایک‌ها در مناطقی بین هیراب، قلعه ثمورخان و کله‌جوب دیده می‌شوند، سنگ‌های میزبان آن‌ها، اغلب سنگ‌های دگرگون با درجه‌ی دگرگونی کم تا متوسط (شامل فیلیت و بیشتر شیسته‌های آندالوزیت‌دار) هستند. بالاترین بخش از ردیف دگرگونی موجود در منطقه را سنگ‌های رسی دگرگون شده، موسوم به فیلیت‌های همدان تشکیل می‌دهند، که با توجه به وجود رسوب‌های آهکی دگرگون شده، با سن اوخر ژوراسیک زیرین در روی آن‌ها، سن نهشته شدن فیلیت‌ها را تریاس بالایی- ژوراسیک زیرین در نظر می‌گیرند [۱۱]. بر اساس سال‌سنگی صورت گرفته توسط [۹،۸] به روش Rb-Sr روی کانی مسکوویت و پتاسیم فلدسپات، توده‌های گرانیتی و پگماتیت‌های منطقه دارای سن کرتاسه میانی تا بالایی هستند، در حالی که سال‌سنگی انجام شده توسط [۵،۷] روی کانی زیرکن به روش U-Pb، سن توده‌های گرانیتی و پگماتیت‌های موجود را ژوراسیک میانی نشان داده است.

تصویف صحراوی و بررسی سنگ‌نگاری
پگماتیت‌های منطقه حاوی کانی‌های کوارتز، پلازیوکلاز، پتاسیم‌فلدسپات، تورمالین و مسکوویت هستند. تورمالین‌های موجود گاهی به صورت انباست در سطح دایک‌های پگماتیتی دیده می‌شوند (شکل ۲-ب)، و گاهی نیز به شکل بلورهای



شکل ۳ روند تغییرات بافتی و کانی‌شناسی در پگماتیت-آپلیت‌های نواری مورد بررسی.



شکل ۴ (الف) وجود تورمالین و مسکوویت‌های سوزنی به صورت نفوذ در پلاژیولاز و پاتاسیم فلدسپات در حاشیه‌ی پگماتیت، (ب) تشکیل بافت گرافیکی در حاشیه‌ی پگماتیت‌های مورد بررسی، (پ) تمرکز تورمالین در لایه‌های تیره‌ی موجود در آپلیت‌های نواری، (ت) تمرکز مسکوویت در لایه‌های روشن موجود در آپلیت‌های نواری، (ث) بلورهای درشت مسکوویت، کوارتز و پاتاسیم فلدسپات در منطقه هسته پگماتیت. علائم اختصاری بر اساس [۱۲].

های غنی از بخار تشکیل شده‌اند [۱۷،۳]. ۵- تشکیل لایه‌بندی در آپلیت‌ها در اثر جابه‌جایی سطح کوتکتیک کوارتز و قلیایی فلدسپات ناشی از تغییرات فشار بخار آب در پگماتیت‌هاست [۱۸]. ۶- گروهی دیگر علت تشکیل لایه‌بندی در آپلیت‌ها را لایه‌های مرزی انباسته شده در مذاب و در نتیجه جدایش نامتجانس اجزای بین سیال آبدار و مذاب باقی‌مانده دانسته‌اند [۱۹] و دیگری ۷- لایه‌های مرزی انباسته شده در زیر دمای معیانی را عامل اصلی تشکیل لایه‌بندی در آپلیت‌ها می‌داند [۱۳]. همچنین از نظر [۲۰]، لایه‌بندی در پگماتیت‌ها علاوه بر تغییرات کانی‌شناسی، گاهی در اثر تغییرات بافت و اندازه‌ی بلورها نیز، حاصل می‌شود. به جز از مورد اول که خاستگاه این بافت را ثانویه فرض می‌کند، موارد دیگر ممکن است کم و بیش در تشکیل این بافت موثر باشند. از آنجا که تورمالین‌های مورد بررسی هم از نظر ژئوشیمیایی و هم از نظر مدل رشد نسبت به دیواره (عمود بر دیواره) اولیه هستند، بنابراین خاستگاه دگرنهادی برای این ساختار صادق نیست. همچنین چون در طول این ساخت تغییرات کانی‌شناسی به خوبی مشهود است. بنابراین خاستگاه این ساخت را نمی‌توان

آپلیت‌های نواری: در این منطقه، تنابع لایه‌های غنی از تورمالین (شکل ۴-پ) با لایه‌های غنی از مسکوویت (شکل ۴-ت) و لایه‌های گرانیتی ریز دانه، منجر به تشکیل ساخت نواری در آپلیت‌های موجود در حاشیه‌ی پگماتیت‌ها شده است. تورمالین‌های موجود شکل‌دار و قادر منطقه‌بندی هستند که شاخص تورمالین‌های ماقمایی هستند [۱۴]. در دو سمت این آپلیت‌های نواری، لایه‌ی باریکی از آپلیت‌های توده‌ای دیده می‌شوند که اغلب قادر تورمالین هستند (شکل ۳). تشکیل آپلیت‌ها ناشی از افزایش سریع نرخ هسته‌بندی، افزایش سرعت رشد و در نتیجه ریزدانه شدن آن‌هاست [۱۱]. برای تشکیل آپلیت‌های نواری نظرهای متفاوتی وجود دارد، برخی این نظرها شامل موارد زیرند: ۱- آپلیت‌های نواری حاصل جایگزینی ساختارهای دگرنهادی در سنگ‌های قبلی است [۱۶،۱۵]. ۲- آپلیت‌ها اشکال اولیه‌ی تشکیل شده از پگماتیت‌ها هستند که در نتیجه جابه‌جایی ترکیب مذاب از نقطه‌ای با گرمایی کمینه به سمت کوتکتیک آلبیت-کوارتز تشکیل می‌شوند [۱۷]. ۳- این سنگ‌ها حاصل انجام دکانی‌ها در یک مایع چسبنده و غلیظ و تهنشست بلورها هستند [۱۴]. ۴- این سنگ‌ها از گدازه-

مسکوویت از حاشیه خارجی (نمونه‌های ۱b)، حاشیه داخلی (نمونه‌های ۲b)، منطقه نواری (نمونه‌های ۳D) و منطقه‌ی هسته (نمونه‌های ۴C) مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۵). جدول‌های ۱ تا ۳ که تفسیر این بررسی‌ها را به شرح زیر ارائه می‌دهند.

شیمی تورمالین

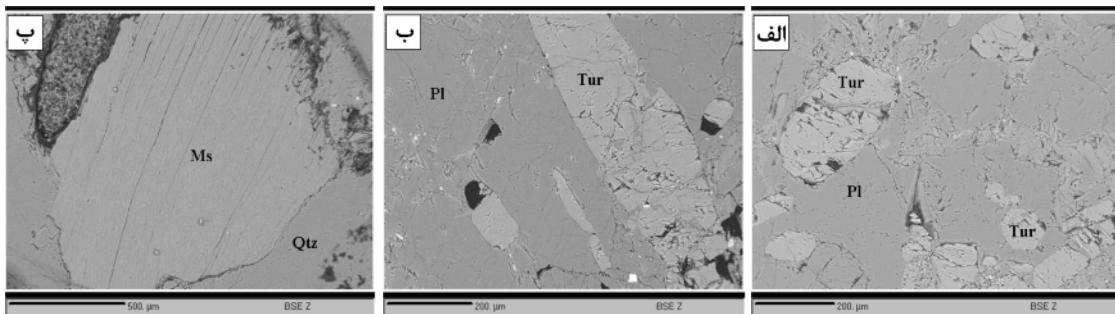
تورمالین سیلیکات حلقوی B و Al دار است که دارای ترکیب شیمیابی گسترده و متغیری است. این کانی به دلیل پایداری در گستره‌ی وسیعی از تغییرات دما-فشار و ترکیب شیمیابی متنوع، در بررسی‌های سنگ‌شناسی به عنوان یک کانی راهنمایی به کار می‌رود [۲۱]. برای تشخیص نوع تورمالین‌ها و بررسی تغییرات ترکیبی در نسبت‌های Fe, Mg, Ca, Na, K و از Mg/Mg+Fe X-vac/ X-vac+Na نسبت به استفاده شد [۲۲] (شکل ۶-الف). براساس این نمودار تورمالین‌های حاشیه بیشتر دارای ترکیب شورلیت و تورمالین‌های وابسته به منطقه‌ی نواری بیشتر مایل به ترکیب فوئیتی هستند که نشان دهنده خاستگاه ماقمایی هر دو دسته است.

تغییر اندازه‌ی بلورها دانست. بر این اساس، بهترین نظر در مورد شرایط تشکیل ساخت نواری در منطقه‌ی لایه‌های مرزی انباسته شده در مذاب و در نتیجه جدایش نامتجانس اجزای بین شاره‌ی آبدار و مذاب باقی‌مانده است، این نظر چهار نظر پیش از این را نیز در بر می‌گیرد.

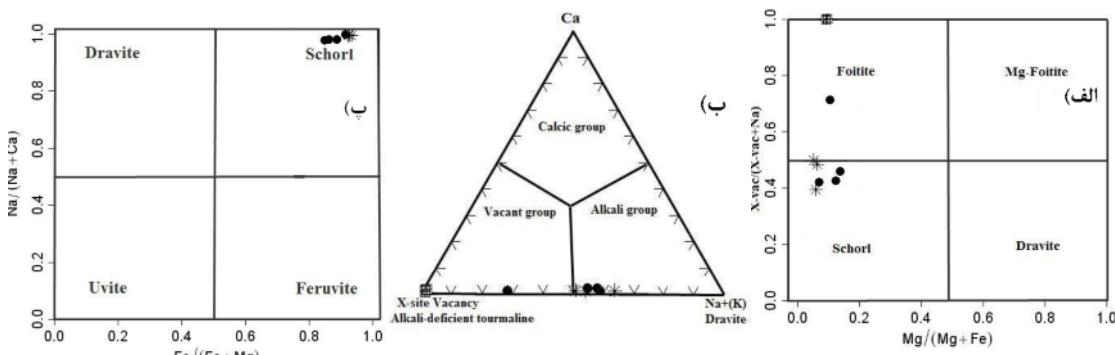
منطقه‌ی میانی و هسته: به سمت منطقه‌ی میانی و سپس هسته‌ی دایک‌های پگماتیتی مورد بررسی، به تدریج اندازه‌ی بلورها درشت‌تر شده (شکل ۴-ث) و از تمرکز پلازیوکلاز کاسته می‌شود و در عوض میزان پتاسیم فلدسپات بیشتر خواهد شد. پتاسیم فلدسپات‌های موجود در این منطقه نسبت به منطقه‌ی حاشیه‌ای، دارای مقدار ادخال کمتری هستند و نیز بلورهای فلدسپات پرتیتی در آن‌ها کمتر است. از نظر [۱۳]، تشکیل بلورهای درشت در بخش‌های داخلی پگماتیت‌ها ناشی از افزایش تمرکز مواد فرار است که ضریب انتشار Si و Al را در ماقماً افزایش می‌دهد.

شیمی کانی‌ها

به منظور بررسی شیمی کانی‌های تشکیل دهنده‌ی پگماتیت-آپلیت‌های نواری مورد بررسی، کانی‌های تورمالین، پلازیوکلاز و

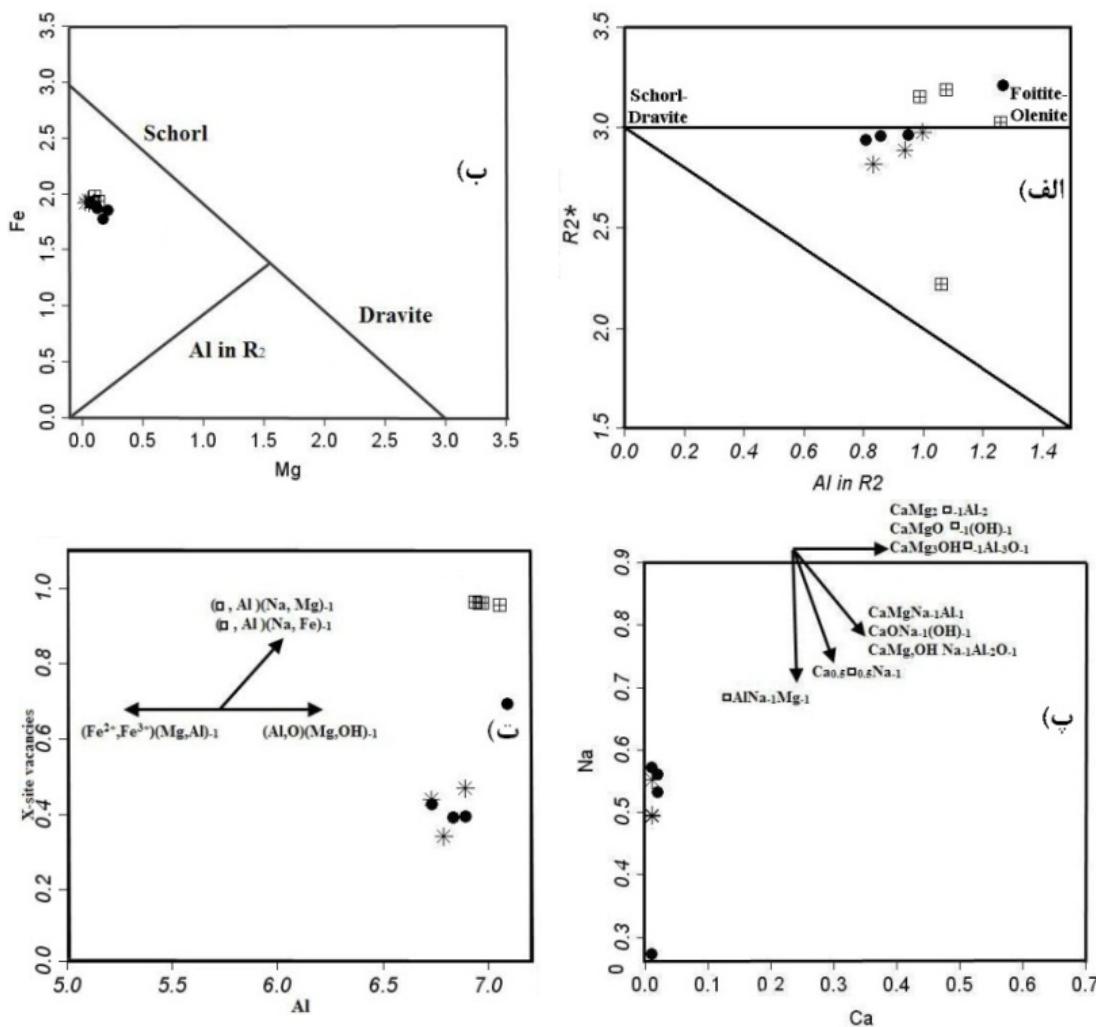


شکل ۵ تصاویر BSE از کانی‌های آنالیز شده مورد بررسی: الف و ب تورمالین‌های آنالیز شده وابسته به منطقه‌ی آپلیت‌های نواری، پ) مسکوویت‌های موجود در حاشیه‌ی پگماتیت‌ها. پ) مسکوویت‌های آنالیز شده وابسته به منطقه‌ی هسته‌ی پگماتیت‌ها. علائم اختصاری بر اساس [۱۲].



شکل ۶ موقعیت تورمالین‌های مربوط به ترکیب تورمالین‌ها، الف) نمودار (X- vac/(X- vac+Na) در برابر X- vac/(X- vac+Na) [۲۲]. ب) نمودار مثلثی Ca-(X-site vacancy)-Na+(K) [۲۳]. پ) نمودار Na/(Na+Ca) vs Fe/(Fe+Mg) نسبت به [۲۴] Fe/(Fe+Mg) نسبت به (X-site vacancy=1-(Ca+Na+K)). تورمالین‌های وابسته به حاشیه‌ی خارجی با علامت دایره توپر، حاشیه‌ی داخلی با ستاره و منطقه‌ی نواری با مربع شطرنجی نشان داده است. (میزان فضای خالی در موقعیت X).

تورمالین‌ها را رد می‌کند. در نمودار دوتایی $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})$ و $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ [۲۴]، نیز نمونه‌ها در گستره شورلیت قرار می‌گیرند (شکل ۶-پ)، که باز هم نزدیک بودن ترکیب این تورمالین‌ها را به انواع ماقمایی نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به ماقمایی بودن این تورمالین‌ها می‌توان بر خاستگاه ماقمایی بافت‌های موجود در حاشیه پگماتیت-آلپیت‌های مورد بررسی نیز تأکید کرد. برای بررسی انواع جانشینی‌های صورت گرفته در ترکیب تورمالین‌ها، از چند نمودار مختلف، استفاده می‌کنیم (شکل ۷)؛ از جمله: نمودار R2^* به مقابله Al in R2 (شکل ۷-الف)، از جمله: نمودار $\text{R2}^*=3\text{R2}=\text{Fe}$ به مقابله Mg (شکل ۷-ب)، از جمله: نمودار X-site vacancy به مقابله Al (شکل ۷-پ)، از جمله: نمودار Na به مقابله Ca (شکل ۷-ت).



شکل ۷ موقعیت تورمالین‌های مورد بررسی در نمودارهای وابسته به واکنش‌های جانشینی در ترکیب تورمالین‌ها، (الف) نمودار R2^* در مقابل Al in R2 [۲۵]، (ب) نمودار Fe به مقابله Mg [۲۵]، (پ) نمودار Na به مقابله Al_{tot} نسبت به Ca [۲۶]. (ت) نمودار X-site vacancy به مقابله Al [۲۶]. تورمالین‌های مربوط به حاشیه خارجی با علامت دایره توپر، حاشیه داخلی با ستاره و منطقه نواری با مربع شطرنجی نشان داده شده است.

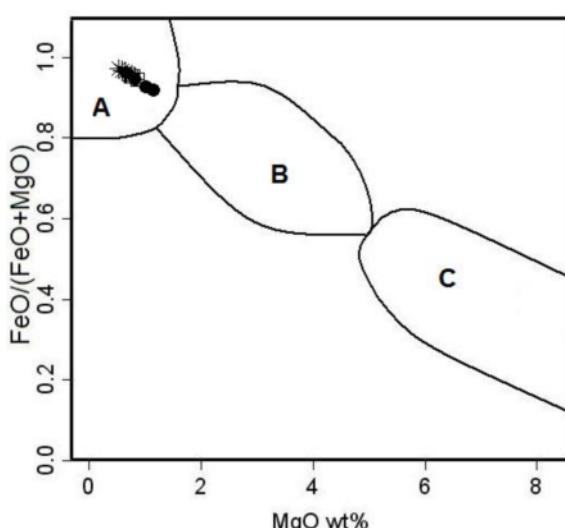
براساس مقادیر K , Ca , Na و وجود فضای خالی در موقعیت X ، تورمالین‌ها را به سه دسته تورمالین‌های کلسیک، قلیایی و انواعی که موقعیت X آنها خالی است تقسیم می‌کنند [۲۳]. بر اساس این نمودار (شکل ۶-ب)، تورمالین‌های حاشیه بیشتر در گستره‌ی قلیایی و تعدادی نیز متمایل به سمت منطقه تهی جایی که نشان دهنده‌ی بالا بودن مقدار Na و K موجود در جایگاه X ، در مقایسه با مقدار Ca در تورمالین‌های حاشیه است و تورمالین‌های مربوط به منطقه‌ی نواری دارای مقادیر X-site Ca و Na هستند، لذا در نزدیک راس X-site بسیار اندک K ، Na و Ca قرار می‌گیرند که شاخص تورمالین‌های ماقمایی است [۲۴]، این امر احتمال منشا دگرگاهداری و ثانویه بودن این

نمودار تغییرات $MgO = FeO/FeO+MgO$ (Fe#) در برابر MgO [۲۷] (شکل ۸)، تورمالین‌ها در درون و نزدیک توده‌ی گرانیتی تشکیل شده‌اند و شاره‌های خارجی در تشکیل آنها نقشی نداشته‌اند. با توجه به نمودارهای سه تایی $Al_{50} Al_{50} Mg_{50}$ و $Ca-Fe-Mg$ که سنگ خاستگاه را مشخص می‌کنند، تورمالین‌های مورد بررسی در هر دو نمودار، در گستره‌ی گرانیتوئیدهای فقیر از Li و پگماتیتها و آپلیت‌ها وابسته به آن قرار می‌گیرند (شکل ۹).

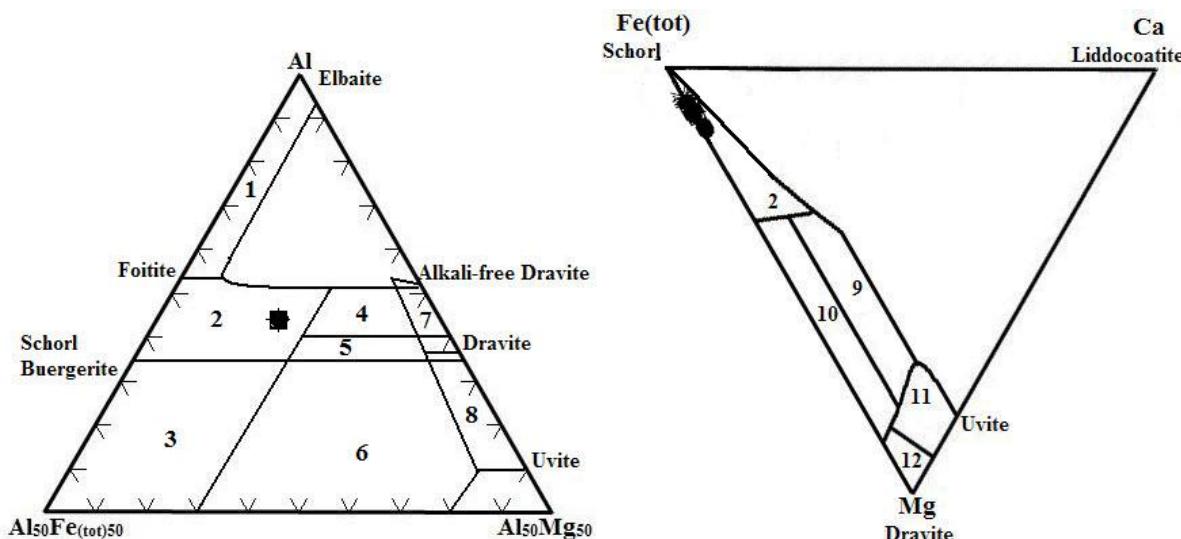
شیمی پلازیوکلاز

نمونه‌های پلازیوکلاز از هر سه منطقه (حاشیه، نواری و مرکزی) پگماتیت-آپلیت مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آنالیز این کانی در جدول ۲ آورده شده‌اند و محاسبه‌ی فرمول ساختاری آن بر اساس ۸ اتم اکسیژن و با استفاده از روش [۲۸] انجام شد که بر این اساس پلازیوکلازهای هر سه منطقه دارای ترکیب آلبیتی غالباً هستند به طوری که ترکیب میانگین آلبیت منطقه‌ی حاشیه ($Ab_{98.05}$), منطقه‌ی نواری ($Ab_{98.78}$) و منطقه‌ی مرکزی ($Ab_{98.44}$), است (شکل ۱۰). بالا بودن آلبیت در ترکیب این پلازیوکلازها نشان دهنده‌ی پیشرفت تبلور جدایشی و کم شدن پلازیوکلاز کلسیک در ماقماً باقی‌مانده است.

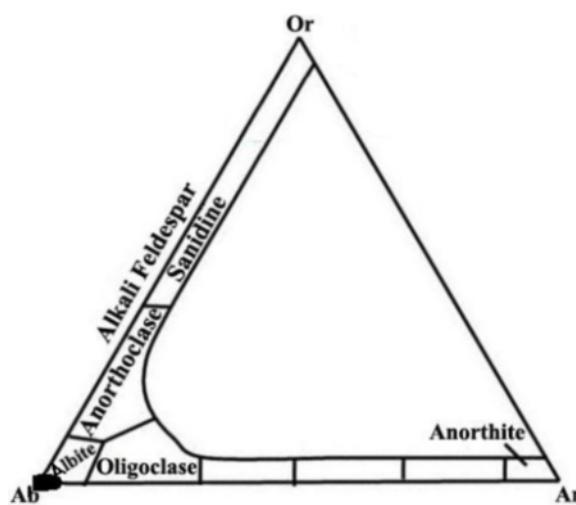
برخی نمونه‌ها نیز در پایین این خط قرار می‌گیرند که نشان دهنده‌ی نقصان در جایگاه Y است. نقصان در این نمونه‌ها را می‌توان تا حدودی با فعالیت مولفه‌ی جانشینی الائیت Li^{+2} $Al(Fe, Mg)$ توجیه کرد. یعنی عملکرد این جانشینی باعث می‌شود که Li و Al جایگزین مقداری از Fe و Mg در موقعیت Y شود. در نمودار Fe نسبت به Mg [۲۵] نیز ترکیب $\Sigma(Fe + Mg) = 3$ قرار می‌گیرند شورل-دراویت روی خط (۷-ب) و همه‌ی نمونه‌هایی که زیر این خط قرار می‌گیرند دارای $\Sigma(Fe + Mg) < 3$ هستند که بیانگر جانشینی Al در موقعیت Y است. بر اساس این نمودار، تورمالین‌های مورد بررسی دارای جانشینی Al در موقعیت Y هستند. بر اساس نمودار Ca نسبت به Na [۲۶]، تورمالین‌های آنالیز شده دارای $Ca < 1$ هستند (۷-پ) که نشانه‌ی مقادیر ناچیز امواج در ساختار این کانی است. همچنین پراکندگی داده‌های تورمالین در این نمودار نشان می‌دهد که جانشینی‌هایی مانند $AlNa_1Mg_1$ موثر است که حاکی از تشکیل فضاهای خالی در موقعیت X است [۲۶] با توجه به روند مشاهده شده در شکل ۷ در تورمالین‌های مورد بررسی بیشتر واکنش کمبودهای قلیایی با فرمول $\{(Mg, Fe)Na\}_{1-x}Al_x$ دیده می‌شود. مقدار کاستی در موقعیت X در تورمالین‌های گرمایی کمتر است و در تورمالین‌های ماقماً بیشتر است [۲۶]. بر اساس



شکل ۸ نمودار $FeO/FeO+MgO$ در مقابل MgO [۲۷]. محدوده‌ی A: شاخص تورمالین‌های درون و نزدیک توده‌ی گرانیتی و نشانگر بسته بودن سیستم ماقماً و عدم دخالت شاره‌های خارجی در تشکیل تورمالین‌هایست، گستره‌ی B: شاخص تورمالین‌هایی است که در فاصله‌ی نزدیک تا حد واسط توده‌ی گرانیتی قرار گرفته‌اند، هم شاره‌های ماقماً و هم شاره‌های گرمایی در تشکیل این تورمالین‌ها نقش داشته‌اند، گستره‌ی C: نشان دهنده‌ی تورمالین‌های با فاصله‌ی دور از توده گرانیتی است و دلیل بر خاستگاه خارجی بور وجود یک سیستم گرمایی دارد. تورمالین‌های وابسته به حاشیه خارجی با علامت دایره توپر، حاشیه‌ی داخلی با ستاره و منطقه نواری با مربع شطرنجی نشان داده شده است.



شکل ۹ موقعیت تورمالین‌های مورد بررسی روی نمودارهای سه تابی [۲۵]. ۱- گرانیتوئیدهای غنی از لیتیم، پگماتیتها و آپلیت‌های وابسته به آن‌ها، ۲- گرانیتوئیدهای فقیر از لیتیم، پگماتیتها و آپلیت‌های وابسته به آن‌ها، ۳- سنگ‌های کوارتز- تورمالین سرشار از Fe^{+3} ، ۴- متاپلیت‌ها و متاپسامیت‌های همزیست با یک فاز اشباع از آلومنیوم، ۵- متاپلیت‌ها و متاپسامیت‌های ناهزمیست با یک فاز اشباع از آلومنیوم، ۶- سنگ‌های کالکسیلیکاته، متاپلیت‌ها و سنگ‌های کوارتز- تورمالین سرشار از Fe^{+3} ، ۷- فرامافیک‌های دگرگون شده با کلسیم پایین و ته نشسته‌های دگرگون شده غنی از وانادیم و کروم- ۸- متاکربنات‌ها و متاپیروکسنیت‌ها- ۹- سنگ‌های کالک- سیلیکاته، متاپسامیت‌ها و متاپلیت‌های غنی از Ca- ۱۰- سنگ‌های کوارتز- تورمالین، متاپسامیت‌ها و متاپلیت‌های فقیر از Ca، ۱۱- متاکربنات‌ها- ۱۲- اولترامافیک‌های دگرگون شده. تورمالین‌های مربوط به حاشیه خارجی با علامت دایره توپر، حاشیه داخلی با ستاره و منطقه نواری با مریع شطرنجی نشان داده شده است.



شکل ۱۰ رده بندی پلاژیوکلازها از ۳ منطقه پگماتیت- آپلیت مورد بررسی برگرفته از [۲۸]. پلاژیوکلازهای وابسته به حاشیه‌ی خارجی با علامت دایره توپر، منطقه‌ی نواری با مریع شطرنجی و منطقه‌ی هسته با مریع توپر نشان داده شده است.

سوزنی درون فلدسپات پتاسیم، پلاژیوکلاز و کوارتز دیده می- شود. حضور مسکوویت در کوارتز خاستگاه اولیه این بلورها را مشخص می‌کند. ۲- در منطقه‌ی نواری به صورت ریز بلور در

شیمی موسکوویت
مسکوویت در هر سه منطقه پگماتیت- آپلیت مورد بررسی یافت می‌شود: ۱- در منطقه‌ی حاشیه بیشتر به صورت بلورهای

$$X, Y = 0.046\text{Fe} + 0.025\text{Mg} + 0.0001\text{Mn} + 0\text{Ti} + 0.001\text{Ca} + 2.032[\text{Al}]^6 = 2.1$$

$$Z = 0.898[\text{Al}]^4 + 3.102\text{Si} = 4(\text{K}, \text{Na})_{1.036}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Ti}, \text{Ca}, [\text{Al}]^6)_{2.1}([\text{Al}]^4, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$$

که نشان دهنده تغییرات جزئی کاتیون‌ها در منطقه‌های مختلف‌اند.

بحث و بررسی

پگماتیت‌های گرانیتی بیشتر دارای دو گستره‌ی بافتی هستند: ۱- بافت‌های ناهمسانگرد در منطقه‌های خارجی که شامل واحدهای دانه‌ریز، بافت گرافیکی، بافت نواری و بافت‌های حاصل از رشد یک‌طرفه که تحت تاثیر شرایط زیر منحنی لیکوئیدوس تشکیل می‌شوند. ۲- بافت‌های درشت بلور و توده‌ای در منطقه‌های داخلی که ناشی از تمرکز مواد فرار و در نتیجه افزایش انتشار عناصر Al و Si هستند [۱۳]. با توجه به شیمی کانی‌ها می‌توان خاستگاه تشکیل برخی کانی‌ها را حدس زد؛ برای مثال به عقیده [۲۲] تورمالین‌های ماقمایی اصولاً دارای ترکیب شورلیت تا دراویت هستند و بر اساس نظر [۲۴]، تورمالین‌های ماقمایی در مقایسه با تورمالین‌های گرمایی دارای مقادیر Al بالاتر و کاستی بیشتر در موقعیت X قرار دارند. همچنین بالا بودن نسبت Fe به Mg در تورمالین نشانه تشکیل آن در شرایط ماقمایی است [۲۹]. تورمالین‌های حاشیه و تورمالین‌های وابسته به منطقه‌ی نواری به ترتیب دارای ترکیب شورلیت- فوئیتیت و فوئیتیت هستند که نشان دهنده خاستگاه ماقمایی هر دو دسته است (شکل ۶-الف). تورمالین‌های منطقه حاشیه در محدوده قلیایی تا منطقه X تهی‌ها و تورمالین‌های مربوط به منطقه‌ی نواری نزدیک راس تهی جا X قرار می‌گیرند که شاخص تورمالین‌های ماقمایی است (شکل ۶-ب). بنابراین با توجه به این نتایج بافت نواری موجود در حاشیه‌ی پگماتیت‌ها دارای خاستگاه ماقمایی است. بر اساس نمودار تغییرات $\text{Fe} \# = \text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ در برابر MgO [شکل ۸]، در تورمالین‌ها مقدار $\text{Fe} \#$ با فاصله گرفتن از توده‌ی گرانیتی کوچک‌تر می‌شود. چنانچه نسبت $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ در تورمالین‌ها در گستره‌ی ۰.۸ تا ۰.۸ باشد، نشانگر بسته بودن سیستم ماقمایی، قرار گرفتن تورمالین‌ها در درون و نزدیکی توده‌ی گرانیتی و عدم دخالت

کنار پلاژیوکلاز و کوارتز، نوارهای روشن را تشکیل می‌دهد. چنانکه در قسمت آپلیت‌های نواری گفته شد، خاستگاه تشکیل این بافت و کانی‌های تشکیل دهنده‌ی آن، ماقمایی هستند. ۳- در منطقه‌ی میانی نیز به صورت بلورهای مسکوویت بصورت اشکال پر دیده می‌شوند که از حاشیه به منطقه‌ی میانی رشد کرده‌اند که شاخص رشد بلورهای مسکوویت در جهت محور a و نشان دهنده رشد در شرایط ابر اشباع و انتشار کم اجزاء است [۲]. بنابراین مسکوویت‌های موجود در این دایک‌های آپلیتی- پگماتیتی اولیه هستند. از نظر [۲] حضور مسکوویت‌های اولیه در پگماتیت‌ها معمولاً نشان دهنده پرآلومین بودن ماقمای خاستگاه است که این موضوع با حضور گرانیت‌های نوع S و پرآلومین در منطقه‌ی بروجرد همخوانی دارد [۷]. نتایج آنالیز این کانی در جدول ۳ آورده شده‌اند و محاسبه‌ی فرمول ساختاری آن بر اساس ۲۴ اتم اکسیژن و با استفاده از روش W(X,Y)₂ [۲۸] انجام شد. با توجه به فرمول عمومی میکاها Z₄O₁₀(OH,F)₂ (این فرمول بر اساس ۱۲ اتم اکسیژن است) فرمول میانگین مسکوویت‌های موجود در منطقه‌های مختلف بصورت زیر است:

۱- مسکوویت‌های موجود در حاشیه‌ی خارجی (1b)

$$W = 0.846K + 0.0685Na = 0.9145$$

$$X, Y = 0.036\text{Fe} + 0.16\text{Mg} + 0\text{Mn} + 0.005\text{Ti} + 0.0005\text{Ca} + 2.097[\text{Al}]^6 = 2.29$$

$$Z = 0.997[\text{Al}]^4 + 3.003\text{Si} = 4(\text{K}, \text{Na})_{0.9145}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Ti}, \text{Ca}, [\text{Al}]^6)_{2.29}([\text{Al}]^4, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$$

۲- مسکوویت‌های موجود در حاشیه‌ی داخلی (2b)

$$W = 0.877K + 0.101Na = 0.978$$

$$X, Y = 0.039\text{Fe} + 0.006\text{Mg} + 0.0005\text{Mn} + 0.007\text{Ti} + 0.001\text{Ca} + 1.973[\text{Al}]^6 = 2.29$$

$$Z = 0.946[\text{Al}]^4 + 3.054\text{Si} = 4(\text{K}, \text{Na})_{0.978}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Ti}, \text{Ca}, [\text{Al}]^6)_{2.026}([\text{Al}]^4, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$$

۳- مسکوویت‌های موجود در منطقه‌ی نواری (3D)

$$W = 0.885K + 0.043Na = 0.928$$

$$X, Y = 0.042\text{Fe} + 0.009\text{Mg} + 0.0016\text{Mn} + 0\text{Ti} + 0.00005\text{Ca} + 1.978[\text{Al}]^6 = 2.03$$

$$Z = 0.963[\text{Al}]^4 + 3.037\text{Si} = 4(\text{K}, \text{Na})_{0.928}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Ti}, \text{Ca}, [\text{Al}]^6)_{2.03}([\text{Al}]^4, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$$

۴- مسکوویت‌های موجود در منطقه‌ی هسته (4C)

$$W = 0.864K + 0.172Na = 1.036$$

شده (تورمالین‌ها)، این بافت اولیه است و مستقیماً از ماگما حاصل شده است و علت تشکیل این بافت لایه‌های مرزی انباسته شده در شرایط زیر منحنی آبگونی است. بلورهای پگماتیتی نیز در اثر تمرکز مواد فرار و در نتیجه افزایش ضربه انتشار Si و Al در ماگما تشکیل شده‌اند. دنباله‌ی بافت‌های موجود به خوبی نشان دهنده پیشرفت تبلور جدایشی ماگما در شرایط پگماتیتی است. تورمالین‌های آنالیز شده از منطقه‌های مختلف پگماتیت-آپلیت‌های مورد بررسی دارای ویژگی‌های تورمالین‌های ماگمایی هستند؛ از جمله این ویژگی‌ها دارا بودن X-site ترکیب شورلیت (Fe/Fe+Mg بالا) تا فوئیت (vacancy بالا) و دارا بودن Al بالاست. همچنین همه‌ی تورمالین‌های آنالیز شده در نمودار # Fe/MgO در برابر O_{tot}-Al_{tot} نمودارهای ارائه شده در شکل ۹ نزدیک است (شکل ۹). نمودارهای ارائه شده در شکل ۹ نشان دهنده تغییرات Fe و Mg در مقادیر نسبتی ثابت Al و Ca-Fe-Mg-Al₅₀ Fe_{(tot)50}-Al- Al₅₀ Mg₅₀ است. قرارگیری نمونه‌ها در بالای خط شورل-دواویت Ca-Na³⁺ در این نمونه‌هاست [۳۰]. بر اساس این نمودارها که سنگ منبع تورمالین را مشخص می‌کنند؛ نمونه‌های مورد بررسی در هر دو نمودار، در محدوده‌ی گرانیت‌ویدهای فقیر از Li و پگماتیت‌های آپلیت‌های وابسته به آن قرار می‌گیرند. با توجه به آن که گرانیت‌های بروجرد از نظر شیمیایی پرآلومین هستند [۷] لذا Al برای تشکیل تورمالین‌ها در درون توده و پگماتیت‌ها و آپلیت‌های وابسته به آن از خود توده تامین می‌شود، با توجه به ماگمایی بودن این تورمالین‌ها، ماگمای مادر غنی از B بوده است. از آنجا که پگماتیت‌ها و آپلیت‌ها اصولاً در مراحل پایانی تبلور ماگما تشکیل می‌شوند ترکیب پلازیوکلازهای آنالیز شده بسیار غنی از آلیت است.

مراجع

- [1] Fenn P.M., "The nucleation and growth of alkali feldspars from hydrous melts", Canadian Mineralogist 15 (1977) 135-161.
- [2] London D., "Pegmatites", Canadian Mineralogist Special Publication 10 (2008) 368.
- [3] Rockhold J.R., Nabelek P.I., Glascock M.D., "Origin of rhythmic layering in the Calamity Peak satellite pluton of the Harney Peak Granite, South Dakota: the role of boron", Geochimica et Cosmochimica Acta 51 (1987) 487-496.
- [4] Kleck W.D., Foord E.E., "The chemistry, mineralogy, and petrology of the George Ashley Block pegmatite body", American Mineralogist 84 (1999) 695-707.
- [۵] احمدی خلجمی ا.، "پترولوژی توده گرانیت‌ویدی بروجرد"، رساله دکتری، دانشکده علوم، دانشگاه تهران (۱۳۸۵).

شاره‌های خارجی در تشکیل تورمالین‌هاست. قرار گرفتن این مقدار در گستره‌ی بین ۰/۸ تا ۰/۶ شاخص تورمالین‌هایی است که در فاصله‌ی نزدیک تا حد واسط نسبت به توده‌ی گرانیتی قرار گرفته‌اند و نشان‌دهنده‌ی آن است که هم شاره‌های ماگمایی و هم گرمابها در تشکیل تورمالین‌ها نقش داشته‌اند و در صورتی که مقدار $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ کمتر از ۰/۶ باشد، نشان دهنده‌ی تورمالین‌های با فاصله‌ی دور از توده‌ی گرانیتی است و دلیل بر خاستگاه خارجی بور و وجود یک سیستم گرمابی دارد. بر این اساس و با توجه به قرار گرفتن همه‌ی تورمالین‌های آنالیز شده در قلمرو A این تورمالین‌ها خاستگاه ماگمایی دارند. ترکیب تورمالین‌ها روی نمودارهای سه تایی نزدیک است (شکل ۹) [۲۵]. نمودارهای ارائه شده در شکل ۹ نشان دهنده تغییرات Fe و Mg در مقادیر نسبتی ثابت Al و Ca است. قرارگیری نمونه‌ها در بالای خط شورل-دواویت Ca-Na³⁺ در این نمونه‌هاست [۳۰]. بر اساس این نمودارها که سنگ منبع تورمالین را مشخص می‌کنند؛ نمونه‌های مورد بررسی در هر دو نمودار، در محدوده‌ی گرانیت‌ویدهای فقیر از Li و پگماتیت‌های آپلیت‌های وابسته به آن قرار می‌گیرند. با توجه به آن که گرانیت‌های بروجرد از نظر شیمیایی پرآلومین هستند [۷] لذا Al برای تشکیل تورمالین‌ها در درون توده و پگماتیت‌ها و آپلیت‌های وابسته به آن از خود توده تامین می‌شود، با توجه به ماگمایی بودن این تورمالین‌ها، ماگمای مادر غنی از B بوده است. از آنجا که پگماتیت‌ها و آپلیت‌ها اصولاً در مراحل پایانی تبلور ماگما تشکیل می‌شوند ترکیب پلازیوکلازهای آنالیز شده بسیار غنی از آلیت است.

برداشت

در پگماتیت-آپلیت‌های شرق بروجرد، در حاشیه، بافت گرافیکی و نواری و در هسته بلورهای پگماتیتی، از حاشیه به مرکز این دایک‌ها تنوع بافتی و کانی‌شناسی، دیده می‌شوند. آپلیت‌های نواری به صورت تناوب لایه‌های غنی از تورمالین با لایه‌های غنی از مسکوویت دیده نیز می‌شود، در مورد چگونگی تشکیل آپلیت‌های نواری، با توجه به شیمی کانی‌های آنالیز

- [18] Jahns R.H., "Internal evolution of pegmatite bodies", Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook, vol. 8 (1982) 293-327.
- [19] Webber K.L., Falster A.U., Simmons W.B., Foord E.E., "The role of diffusion controlled oscillatory nucleation in the formation of line rock in pegmatite-aplite dikes", Journal of Petrology 38 (1997) 1777-1791.
- [20] London D., "A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites", Lithos 184-187 (2014) 74-104.
- [21] Van hinsberg V.J., Henry D.J., Marschall H.R., "Tourmaline an ideal indicator of its host environment", The Canadian mineralogist, 49 (2011) 1-16.
- [22] Slack J.F., Palmer M.R., Stevens B.P.J., Barnes R.G., "Origin significance of tourmaline-rich rocks in the Broken Hill district, Australia", Economic Geology 88 (1993) 505-541.
- [23] Hawthorne F.C., Henry D.J., "Classification of the minerals of the tourmaline group", European Journal of Mineralogy 11 (1999) 201-215.
- [24] Trumbull R.B., Chaussidon M., "Chemical and boron isotopic composition of megmatic and hydrothermal tourmalines from the Sinceni granite-pegmaite system in Swaziland", Chemical Geology 153 (1999) 125-137.
- [25] London D., Manning D.A.C., "Chemical Variation and Significance of tourmaline from southwest England", Economic Geology 90 (1995) 495-519.
- [26] Pesquera A., Velasco F., "Mineralogy, geochemistry and geological significance of tourmaline-rich rocks from the Paleozoic Cinco Villas massif (western Pyrenees, Spain)", Contributions to Mineralogy and Petrology 129 (1997) 53-74.
- [27] 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.
- [28] Deer W.A., Howie A., Zussman J., "An introduction to the rock-forming minerals", Long man, London (1991) 528p.
- [۶] میرسپهوند ف., طهماسبی ز., شاهرخی س., احمدی خلجی ا., خلیلی م., "رزوشیمی و تعیین خاستگاه تورمالین‌های منطقه‌ی بروجرد", مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران, شماره ۲۰ (۱۳۹۱) ص ۲۸۱-۲۹۲
- [7] Ahmadi Khalaji A., Esmaeily 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.
- [8] Masoudi F., "Contact metamorphism and pegmatite development in the region S.W of Arak-Iran", Thesis, University of Leeds. England. (1997) 321p.
- [9] Masoudi F., Yardley B.W.D., Cliff R.A., "Rb-Sr geochronology of pegmatites, plutonic rocks and a hornfels in the south-west of Arak, Iran", Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran 13(3) (2002) 249-254.
- [10] Afsharianzadeh A.M., Sahbaei M., "1/250000 map of Khorramabad, Geological Survey of Iran (in Persian)", (1992).
- [۱۱] واعظی‌بور م.ج., اقلیمی ب., "یافته‌های نوین در نهشته-های ژوراسیک تا حمیمه لکان (چهار گوش گلپایگان)", گزارش داخلی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۶۳).
- [12] Kertz R., "Symbol for rock-forming minerals", American Mineralogist 68(1983)277-9.
- [13] London D., "The origin of primary textures in granitic pegmatites", Canadian Mineralogist 47 (2009) 697-724.
- [14] Pesquera A., Torres-Ruiz J., Gil-Grespo 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.
- [15] Cameron E.N., Jahns R.H., McNair A.H., Page L.R., "Internal structure of granitic pegmatites", Economic Geology Monograph 2 (1949) 115.
- [16] Jahns R.H., "The study of pegmatites", Economic Geology, 50th Anniversary (1955) 1025-1130.
- [17] Jahns R.H., Tuttle O.F., "Layered pegmatite-aplite intrusive", Mineralogical Society of America Special Paper 1 (1963) 78-92.

- [30] Henry D.J., Guidotti Ch.V., “*Tourmaline as petrogenetic indicator mineral: an example from staurolite-grade metapelites of NW Mains*”, American Mineralogist 70 (1985) 1-15.
- [29] Cavarretta G., Puxeddu M., “*Schorl-Dravite-Ferridravite Tourmalines Deposited by Hydrothermal Magmatic Fluids during Early Evolution of the Larderico Geothermal Field*”, Italy. Economic Geology 85 (1990) 1236-1251.