



بررسی شیمی کانی و چگونگی تشکیل تورمالین در بیوتیت آمفیبولیت‌های مجموعه دگرگونی گل‌گهر سیرجان-کرمان

لیلی غفوری، سید حسام‌الدین معین‌زاده *

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

(دریافت مقاله: ۹۹/۵/۲۹، نسخه نهایی: ۹۹/۸/۱۰)

چکیده: مجموعه دگرگونی گل‌گهر در لبه جنوب‌شرقی پهنه دگرگونی سندانج- سیرجان و در شهرستان سیرجان، استان کرمان، واقع شده است. سنگ‌های تشکیل دهنده این مجموعه شامل انواع شیت‌ها، آمفیبولیت‌ها و سنگ‌های متابازیت هستند. از اجزای اصلی سنگ‌شناسی منطقه بیوتیت آمفیبولیت‌ها با مشخصه کانی‌شناسی هورنبلند، پلاژیوکلاز، بیوتیت، تورمالین، اسفن، اپیدوت، سیرسیت، کلریت، کلسیت و کانی‌های کدر هستند که در این پژوهش تشکیل تورمالین در بیوتیت آمفیبولیت‌های منطقه بررسی شده است. تجزیه کانی‌های تورمالین موجود در بیوتیت آمفیبولیت منطقه مورد بررسی به روش ریزپردازش الکترونی نشان داد که این تورمالین‌ها مقدار منیزیم بالا داشته و در گستره دراویت و گروه قلیایی قرار دارند. ارتباط مثبت میان مقادیر Mg و Fe، بالا بودن مقدار کاتیون Mg در تورمالین‌ها، ارتباط منفی میان Al و Fe/(Fe+Mg) و روند منفی Ca نسبت به Na که نشان از رخ دادن جانشینی $AlNa_{-1}Mg_{+1}$ در تورمالین‌های مورد بررسی دارد، مشخصه غیر ماگمایی و دگرگونی بودن این تورمالین‌ها هستند. تشکیل این کانی را می‌توان به حضور مقدار بالای کانی بیوتیت در سنگ مورد بررسی و سیال سرشار از بور که طی دگرگونی در سیال‌های میان روزنه‌ای انباشته شده است نسبت داد. سیال سرشار از بور با کانی بیوتیت واکنش داده و موجب بوجود آمدن تورمالین‌ها شده است.

واژه‌های کلیدی: مجموعه دگرگونی گل‌گهر؛ سندانج- سیرجان؛ تورمالین؛ بیوتیت آمفیبولیت.

مقدمه

از آنجا که کانی تورمالین در گستره دما- فشار وسیعی است، پایدار با استفاده از آن می‌توان تاریخچه سنگ را مشخص کرد [۸]. این کانی بیشتر در پگماتیت‌های گرانیتی [۹]، رسوب‌ها [۱۰]؛ رگه‌های گار کافت، برخی از گرانیت‌ها [۱۱] و سنگ‌های دگرگونی قدیمی [۴] متبلور می‌شود. تورمالین میزبان اصلی عنصر بور در سنگ‌های پوسته‌ای بوده و در سنگ‌های دگرگونی تورمالین با درجه‌های مختلف دگرگونی پایدار است [۱۰]. در سنگ‌های رسوبی و دگرگونی، فراوانی بور وابسته به واکنش‌های بین فاز سیال‌های همزیست، سیلیکات‌های ورقه‌ای (مانند بیوتیت) و تورمالین است. عنصر بور به عنوان یک عنصر متحرک طی پدیده‌های دگرگونی شناخته شده است [۱۲، ۱۳]. در چنین محیط‌هایی، بور می‌تواند از

تورمالین از جمله کانی‌های سیلیکاتی است که با طیف ترکیبی گسترده در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی مانند دگرگونی، دگرسانی و ماگمایی دیده می‌شود [۱، ۲]. ترکیب تورمالین نشان‌دهنده ترکیب سیال یا مذابی است که از آن متبلور شده است [۳-۵]. ساختار بلوری تورمالین به صورت $(X)(Y_3)(Z_6)T_6O_{18}(BO_3)V_3W$ است که جایگاه X با Na، Ca و K و جایگاه Z با Al و گاه با Fe^{+2} ، Cr ، V^{+3} ، Mg، Ti و Fe^{+3} پر می‌شود. جایگاه Y جانشینی‌های گوناگونی از کاتیون‌های یک تا چهار ظرفیتی را در بر می‌گیرد [۶]. جایگاه T بیشتر با Al، جایگاه W با O و OH و جایگاه V با O، F و H پر می‌شود [۷].

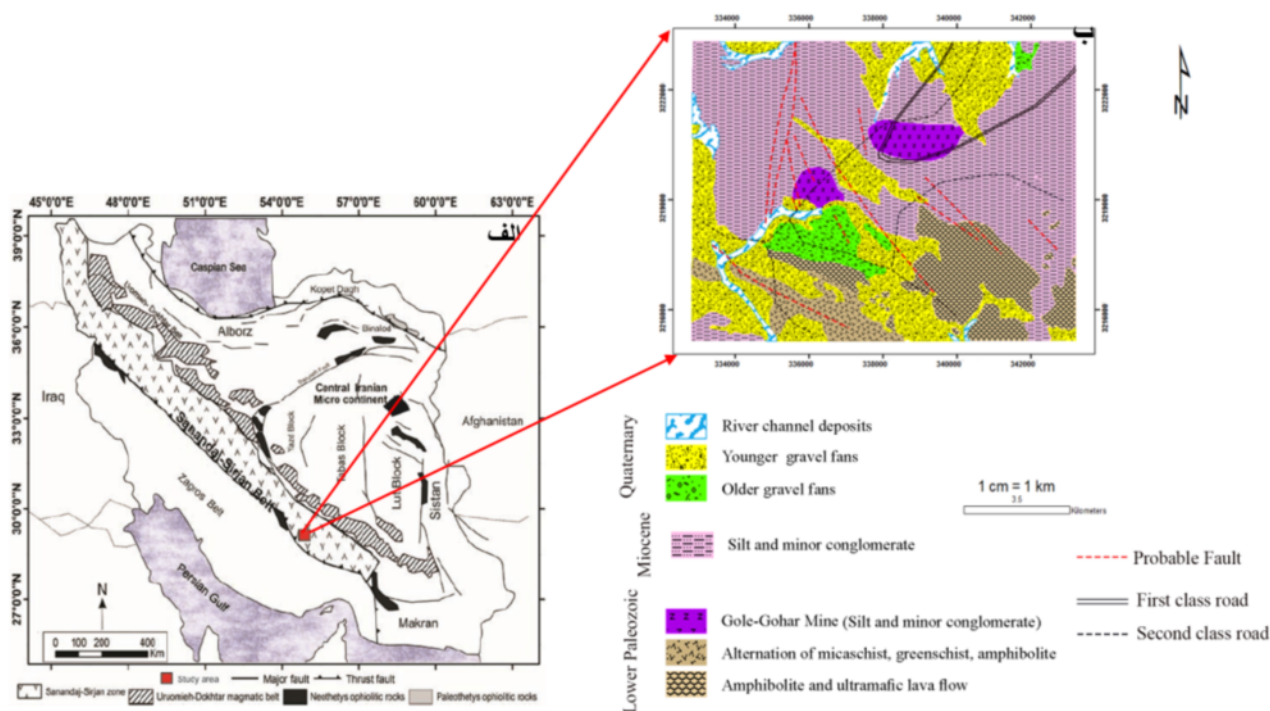
پالئوزوئیک و تریاس میانی نفوذ کرده‌اند. این مجموعه دگرگونی شامل تناوبی از گنیس، میکاشیست، آمفیبولیت، کوارتزشیست در بخش پایینی و گنیس و کوارتزشیست در بخش بالایی است. سنگ‌های کنگلومرا، آهک آبسنگی، ماسه‌سنگ آهکی، شیل و توربیدایت (سنگ‌های رسوبی مزوزوئیک) و پادگانه‌ها، مخروط-افکنه‌های قدیم و جدید (آبرفت‌های کواترنری) منطقه مورد بررسی را پوشانده‌اند [۱۴].

آمفیبولیت‌ها به صورت لایه‌های شیست‌ها و سنگ‌های متابازیت و همچنین نهشته‌های معدنی تشکیل شده و در اثر نیروهای زمین‌ساختی فعال در طول پهنه برشی در منطقه به صورت چین خورده درآمده‌اند (شکل ۲ الف). وجود گسل‌های فراوان در منطقه نشان‌دهنده پویایی منطقه و عملکرد نیروهای زمین‌ساختی در آن است. درز و گسل‌های موجود موجب تسهیل نفوذ سیال‌ها و در نتیجه به وجود آمدن دگرسانی‌هایی مانند اکسیدهای آهن (شکل ۲ ب) و رگه‌های کلریتی (شکل ۲ پ) در سنگ‌های منطقه شده است.

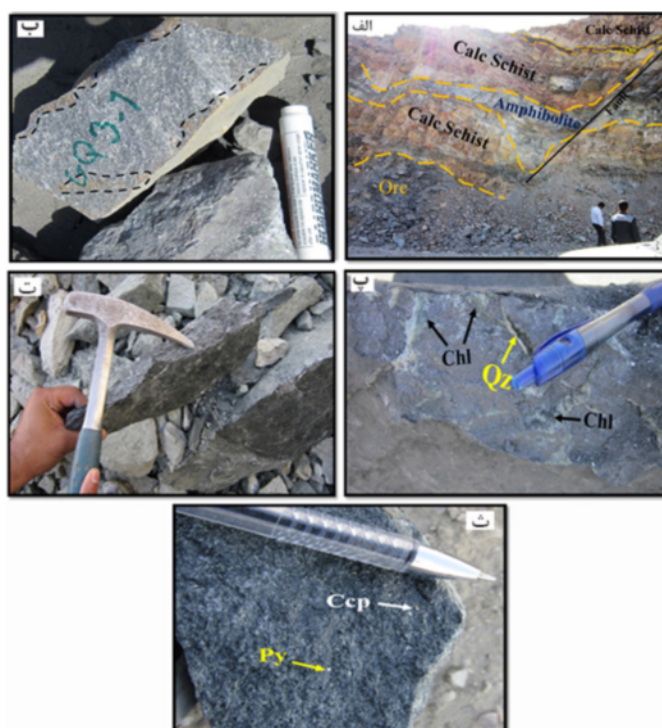
سنگ مادر خود توسط پدیده‌های آبدایی و آبدایی با افزایش درجه دگرگونی آزاد شود. از آنجا که تاکنون به چگونگی تشکیل تورمالین‌های موجود در بیوتیت آمفیبولیت‌های معدن گل‌گهر سیرجان بررسی نشده است، در این پژوهش بر پایه نتایج تجزیه‌ای ریزپردازش الکترونی، ترکیب تورمالین در سنگ‌های بیوتیت‌آمفیبولیت معدن گل‌گهر سیرجان مشخص شد و نوع و علت تشکیل این کانی در سنگ‌های مورد بررسی تعیین گردید.

زمین‌شناسی عمومی

منطقه معدنی مورد بررسی با وسعت بیش از ۱/۵ کیلومتر مربع در مجموعه گل‌گهر با مختصات جغرافیایی $55^{\circ}19'23''$ تا $55^{\circ}18'33''$ طول شرقی و $29^{\circ}05'32''$ تا $29^{\circ}05'05''$ عرض شمالی در لبه جنوب‌شرقی پهنه سندانج-سیرجان واقع است (شکل ۱). منطقه گل‌گهر و منطقه‌های پیرامون آن از سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین، پالئوزوئیک، سنگ‌های رسوبی مزوزوئیک، سنوزوئیک و آبرفت‌های کواترنر تشکیل شده است. توده‌های بازی و گرانیتی تریاس پسین در مجموعه دگرگونی



شکل ۱ الف) موقعیت منطقه مورد بررسی در نقشه زمین‌شناسی ایران ب) نقشه ساده شده زمین‌شناسی منطقه، برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ گل‌گهر، [۱۴].



شکل ۲ الف) لایه آمفیبولیت بین لایه‌های شیست و ماده معدنی در منطقه (دید به سمت جنوب)، ب) آثار اکسید آهن در سنگ‌های آمفیبولیتی منطقه، پ) آثار دگرسانی کلریتی شده همراه با رگه کوارتزی در نمونه آمفیبولیتی، ت) نمایی از کانی‌های تیره آمفیبول و روشن پلاژیوکلاز در نمونه دستی از سنگ‌های آمفیبولیتی منطقه، ث) بلورهای پیریت (Py) و کالکوپریت (Ccp) در نمونه دستی آمفیبولیت.

سنگ‌نگاری

درصد کانی‌های فرعی و ثانویه شامل تورمالین، اسفن، اپیدوت، کلریت، سریسیت، کلسیت و کانی کدر است. تورمالین‌ها در بعضی مقاطع منطقه‌بندی نشان می‌دهند (شکل‌های ۳ ب و پ) و بیوتیت‌ها اغلب در راستای برگوارگی به کلریت تبدیل شده‌اند (شکل ۳ ت). در بعضی مقاطع، بیوتیت آمفیبولیت‌ها در اثر دگرسانی شدید به اپیدوت و کلریت دگرسان شده و اپیدوت آمفیبولیت تشکیل داده‌اند که این روابط واکنشی از شواهد دگرگونی پس‌رونده هستند.

روش پژوهش

طی پیمایش‌های صحرایی منطقه، تعداد ۵۰ نمونه از بیوتیت آمفیبولیت‌ها برای بررسی سنگ‌نگاری انتخاب شدند. تعدادی از آن‌ها برای تعیین ترکیب شیمیایی کانی‌های مورد نظر بر پایه تجزیه‌ی نقطه‌ای با ریز پردازشگر الکترونی JEOL-JX8600M با ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ کیلوولت و جریان تابشی 2×10^{-8} A به بخش علوم زمین و محیط زیست دانشگاه یاماگاتا ژاپن ارسال شدند.

بحث و بررسی

شناسایی نوع تورمالین بر پایه ترکیب شیمیایی آن
نتایج تجزیه شیمیایی بیوتیت آمفیبولیت‌های دارای تورمالین

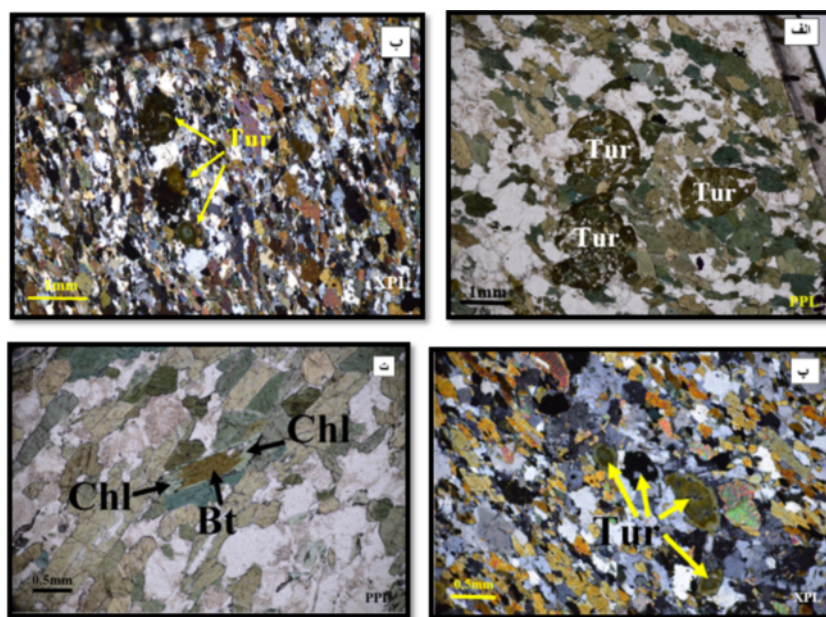
آمفیبولیت‌های منطقه در نمونه‌دستی به رنگ سبز تیره هستند که در بخش‌هایی از منطقه در اثر جدایش دگرگونی کانی‌های تیره آمفیبول و روشن پلاژیوکلاز از هم تفکیک شده‌اند و در نمونه‌دستی قابل مشاهده هستند (شکل ۲ ت). در برخی از نمونه‌های آمفیبولیتی، کانی‌های پیریت و کالکوپریت نمایان هستند (شکل ۲ ث). آمفیبولیت‌های دیده شده از نوع اورتوآمفیبولیت هستند و کانی کوارتز در آن‌ها دیده نمی‌شود یا به ندرت وجود دارد. اورتوآمفیبولیت‌های منطقه به دو دسته اورتوآمفیبولیت‌های با جهت‌یافتگی و بدون جهت‌یافتگی (توده‌ای) تقسیم می‌شوند و انواع اصلی آنها شامل آمفیبولیت، بیوتیت آمفیبولیت و اپیدوت آمفیبولیت هستند.

بیوتیت آمفیبولیت

این سنگ‌ها نسبت به سایر آمفیبولیت‌ها بیشترین برونزد را در منطقه دارند. آن‌ها مانند سایر آمفیبولیت‌ها به دو صورت توده‌ای و با جهت‌یافتگی، سیاه رنگ و محکم هستند که بافت دانه شکفتی و نخ شکفتی در آن‌ها دیده می‌شود. بیوتیت آمفیبولیت دارای ۴۵-۵۰ درصد هورنبلند با اندازه ۰/۱ تا بیش از ۲ میلی‌متر، ۳۵-۳۰ درصد پلاژیوکلاز در اندازه ۰/۲ تا ۲ میلی‌متر، ۱۰ درصد بیوتیت با اندازه ۰/۰۵ تا ۲ میلی‌متر و ۵

مورد بررسی فقیر از آهن و غنی از منیزیم هستند [۱۵] که نشان دهنده غیرماگمایی بودن آنهاست [۱۶، ۱۷] مقدار $Na/Na+Ca$ در تورمالین‌های مورد بررسی ۰/۸۱-۰/۹۷ بوده که نشان‌دهنده غنی بودن این تورمالین‌ها از سدیم است.

مورد بررسی به ازای ۲۴/۵ اتم اکسیژن در جدول ۱ ارائه شده است. مجموع اکسیدهای این کانی ۸۶/۵۹-۹۵/۷ است که پایین بودن آن به علت وجود سیال‌های فرار مانند OH، B و F در شبکه کانی تورمالین است. با توجه به مقدار Al موجود در این کانی (۴/۱۳-۵/۸۶ درصد) مشخص می‌شود که تورمالین‌های



شکل ۳ الف) حضور کانی تورمالین در بیوتیت آمفیبولیت‌ها، نور قطبیده صفحه‌ای، (PPL)، ب) تورمالین‌های دارای منطقه‌بندی در بیوتیت آمفیبولیت‌ها، نور قطبیده متقاطع، (XPL)، پ) تورمالین‌های دارای منطقه بندی در بیوتیت آمفیبولیت‌ها، نور XPL. ت) بیوتیت کلریتی شده در بیوتیت آمفیبولیت‌ها، نور PPL. Tur: تورمالین، Bt: بیوتیت و Chl: کلریت.

جدول ۱ داده‌های تجزیه شیمیایی تورمالین‌های بیوتیت آمفیبولیت مجموعه دگرگونی گل‌گهر با ریزکاو الکترونی (بر حسب درصد وزنی). فرمول ساختاری تورمالین‌ها بر اساس ۲۴/۵ اتم اکسیژن محاسبه شده است.

نمونه	GQ7-4-3-2	GQ7-4-3-3	GQ7-4-3-4	GQ7-5-2-46	GQ7-5-2-47	GQ7-5-2-48	GQ7-5-2-49	GQ7-5-2-50	GQ7-5-2-51	GQ7-5-2-52	GQ7-5-2-53	GQ7-5-2-54	GQ7-5-3-62	GQ7-5-3-63	GQ7-5-3-65
SiO ₂	۳۷,۸۴	۳۷,۶۶	۳۸,۰۴	۳۸,۳۷	۳۸,۳۱	۳۸,۳۰	۳۹,۱۱	۳۹,۱۴	۳۹,۵۵	۳۸,۸۵	۳۸,۵۶	۳۹,۰۴	۵۰,۸۴	۵۰,۳۲	۳۷,۵۸
TiO ₂	۰,۷۹	۰,۷۶	۰,۹۶	۰,۸۸	۰,۴۸	۰,۸۲	۰,۷۹	۰,۸۳	۰,۸۲	۰,۸۴	۰,۸۲	۰,۷۷	۰,۴۴	۰,۵۵	۰,۷۰
Al ₂ O ₃	۲۹,۱۰	۲۹,۸۳	۲۹,۲۸	۳۰,۳۱	۳۱,۳۶	۲۹,۶۰	۳۰,۸۲	۳۰,۴۸	۳۰,۱۴	۳۰,۴۸	۳۰,۴۷	۳۰,۱۴	۲۵,۲۱	۲۷,۰۰	۲۹,۵۹
FeO	۸,۸۶	۷,۳۳	۸,۱۲	۷,۶۹	۷,۱۶	۸,۲۴	۷,۲۴	۶,۵۶	۶,۱۲	۶,۷۱	۶,۶۵	۶,۱۸	۴,۶۳	۵,۶۲	۷,۹۷
MnO	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۸	۰,۰۴	۰,۰۷	۰,۰۱	۰,۰۴	۰,۰۵	۰,۰۲	۰,۰۴	۰,۰۱	۰,۰۹	۰,۰۰	۰,۰۳
MgO	۷,۴۵	۷,۸۲	۸,۰۶	۷,۸۸	۷,۸۶	۷,۹۸	۸,۲۲	۸,۰۴	۸,۰۴	۷,۷۳	۷,۹۶	۷,۷۸	۴,۳۷	۵,۳۶	۷,۴۷
CaO	۰,۵۷	۰,۶۵	۰,۷۹	۰,۷۹	۰,۴۸	۰,۸۷	۰,۸۱	۰,۷۱	۰,۷۵	۰,۶۵	۰,۷۷	۰,۷۱	۰,۴۸	۰,۸۵	۰,۷۶
Na ₂ O	۲,۷۰	۲,۴۴	۲,۴۵	۲,۴۸	۲,۵۱	۲,۱۶	۲,۷۵	۲,۵۰	۲,۴۲	۲,۵۵	۲,۵۱	۲,۴۰	۱,۴۱	۵,۷۶	۲,۳۷
K ₂ O	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۰۶	۰,۰۴	۰,۰۵	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۶	۰,۰۶	۰,۰۳	۷,۳۴	۰,۰۷	۰,۳۳
V ₂ O ₃	۰,۱۳	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۴	۰,۰۹	۰,۰۸	۰,۰۲	۰,۱۶	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۷	۰,۰۸	۰,۱۶	۰,۰۹
Cr ₂ O ₃	۰,۰۲	۰,۰۴	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۳	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
مجموع	۸۷,۳۴	۸۶,۵۴	۸۷,۷۷	۸۸,۵۱	۸۸,۲۶	۸۸,۰۸	۸۹,۷۹	۸۸,۳۱	۸۷,۹۱	۸۷,۸۸	۸۷,۸۳	۸۷,۰۴	۹۴,۸۰	۹۵,۵۳	۸۶,۸۰
Si	۱,۲۶	۱,۲۵	۱,۲۷	۱,۲۸	۱,۲۸	۱,۲۷	۱,۳۰	۱,۳۰	۱,۳۲	۱,۲۹	۱,۲۸	۱,۳۰	۱,۶۹	۱,۶۷	۱,۲۵
Ti	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۲
Cr	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
V	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Al	۰,۸۶	۰,۸۸	۰,۸۶	۰,۸۹	۰,۹۲	۰,۸۷	۰,۹۱	۰,۹۰	۰,۸۹	۰,۹۰	۰,۹۰	۰,۸۹	۰,۷۴	۰,۷۹	۰,۸۷
Fe ²⁺	۰,۱۲	۰,۱۰	۰,۱۱	۰,۱۱	۰,۱۰	۰,۱۱	۰,۱۰	۰,۰۹	۰,۰۹	۰,۰۹	۰,۰۹	۰,۰۹	۰,۰۶	۰,۰۸	۰,۱۱
Mn	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Mg	۰,۱۸	۰,۱۹	۰,۲۰	۰,۲۰	۰,۲۰	۰,۲۰	۰,۲۰	۰,۲۰	۰,۲۰	۰,۱۹	۰,۲۰	۰,۱۹	۰,۱۱	۰,۱۳	۰,۱۹
Ca	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱
Na	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۲	۰,۰۹	۰,۰۴

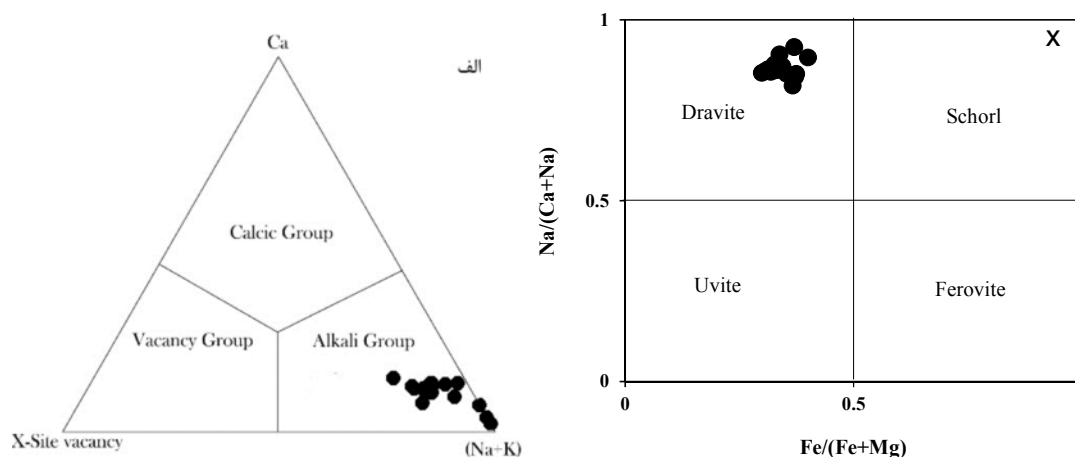
بررسی سازوکار جانشینی در ترکیب تورمالین‌ها

در ترکیب تورمالین‌ها، جانشینی عنصری به صورت تبادل عنصرهایی با ظرفیت یکسان در یک جایگاه ویژه (مانند جانشینی Mg^{2+} به جای Fe^{2+} در جایگاه Y) و یا به صورت تبادل عنصرهایی با ظرفیت‌های متفاوت در چند جایگاه (برای مثال، جانشینی زوجی اوویت Ca و Mg به جای Na و Al دو جایگاه X و Z را اشغال می‌کنند) روی می‌دهد [۱۹]. تورمالین‌های مورد نظر در نزدیکی ترکیب شول- دراویت جای دارند. ترکیب شول- دراویت نزدیک مرکز نمودار با مقدار $R_1R_2=4$ و $R_3=6$ است که همه بردارها با مولفه جانشینی شول دراویت آغاز می‌شوند. این وضعیت اجازه بررسی تبادل اوویت با فرمول $\{Na, Al\}_1 \{Ca(Fe, Mg)\}_1$ ، تبادل پروتون-زدایی با فرمول آلنیت

$\{Fe^{3+}O\} \{Fe^{2+}OH\}$ و تهی‌شدگی از قلیایی‌ها با فرمول $\{Na(Fe, Mg)\}_1 \{[R_1]Al\}$ را می‌دهد. در واقع جانشینی عناصر در ساختار تورمالین به صورت جانشینی کاتیون‌هایی با بار یونی مشابه در یک تک‌جایگاه بلورشناسی و نیز جانشینی کاتیون‌هایی با بارهای یونی متفاوت در چند جایگاه رخ می‌دهد در تورمالین‌های شول و دراویت، جانشینی ناقص قلیایی $(R^{3+} + R^{2+} \longleftrightarrow R^{3+})$ و جانشینی نوع هیدروکسیل زدایی $(R^{3+} + O^{2-} \longleftrightarrow (OH)^- + R^{2+})$ انجام می‌شود که عامل کنترل روند تورمالین هستند؛ تورمالین‌های مورد بررسی در نزدیکی مرکز و در راستای تهی‌شدگی از قلیایی‌ها جای دارند و وجود مقادیر ناچیز اوویت در ساختار این کانی‌ها نمایان است [۲۰].

بر اساس کاتیون عناصر K، Na و Ca و مقادیر X، کانی تورمالین را به سه گروه قلیایی، کلسیمی و با تهی‌جای X تقسیم کرده‌اند [۶]. با توجه به نمودار مرجع [۱۰]، نمونه‌های مورد بررسی در گستره تورمالین‌های قلیایی جای دارند (شکل ۴ الف). تورمالین‌های قلیایی در حضور سیال‌های اسیدی و در دمای کم پدید می‌آیند [۱۸]. سیال‌های اسیدی باعث انتشار کاتیونی سریع‌تر و آزاد شدن آهن و منیزیم از ساختار بلورهایی مانند بیوتیت شده و شرایط برای پیدایش تورمالین و آزاد شدن سیلیسیم و پیدایش کوارتز به صورت ریزدانه درون بلورهای تورمالین و نیز پیرامون آنها و در زمینه سنگ فراهم می‌شود [۱۸].

با توجه به نمودار مرجع [۱۰]، تورمالین‌های مورد بررسی در گستره دراویت قرار دارند (شکل ۴ ب). تورمالین‌های دگرگونی ناحیه‌ای و مجاورتی را می‌توان بر اساس مقادیر کلسیم آن‌ها از هم تشخیص داد. تورمالین‌های دگرگونی دارای مقادیر کلسیم پایین (کمتر از ۰/۴ درصد) و تورمالین‌های دگرگونی مجاورتی دارای مقادیر کلسیم بالاتر (۱/۹-۰/۴ درصد وزنی) هستند. همچنین مقادیر K_2O ، Cr_2O_3 و MnO در تورمالین‌های دگرگونی ناحیه‌ای کمتر از ۰/۵ درصد وزنی و مقدار TiO_2 نیز کمتر از ۱/۷ درصد وزنی است. با توجه به این مقادیر در نمونه‌های تجزیه شده (جدول ۱)، تورمالین‌های موجود در بیوتیت آمفیبولیت‌های مورد بررسی طی دگرگونی ناحیه‌ای تشکیل شده‌اند که با شواهد صحرایی منطقه نیز همخوانی دارد.

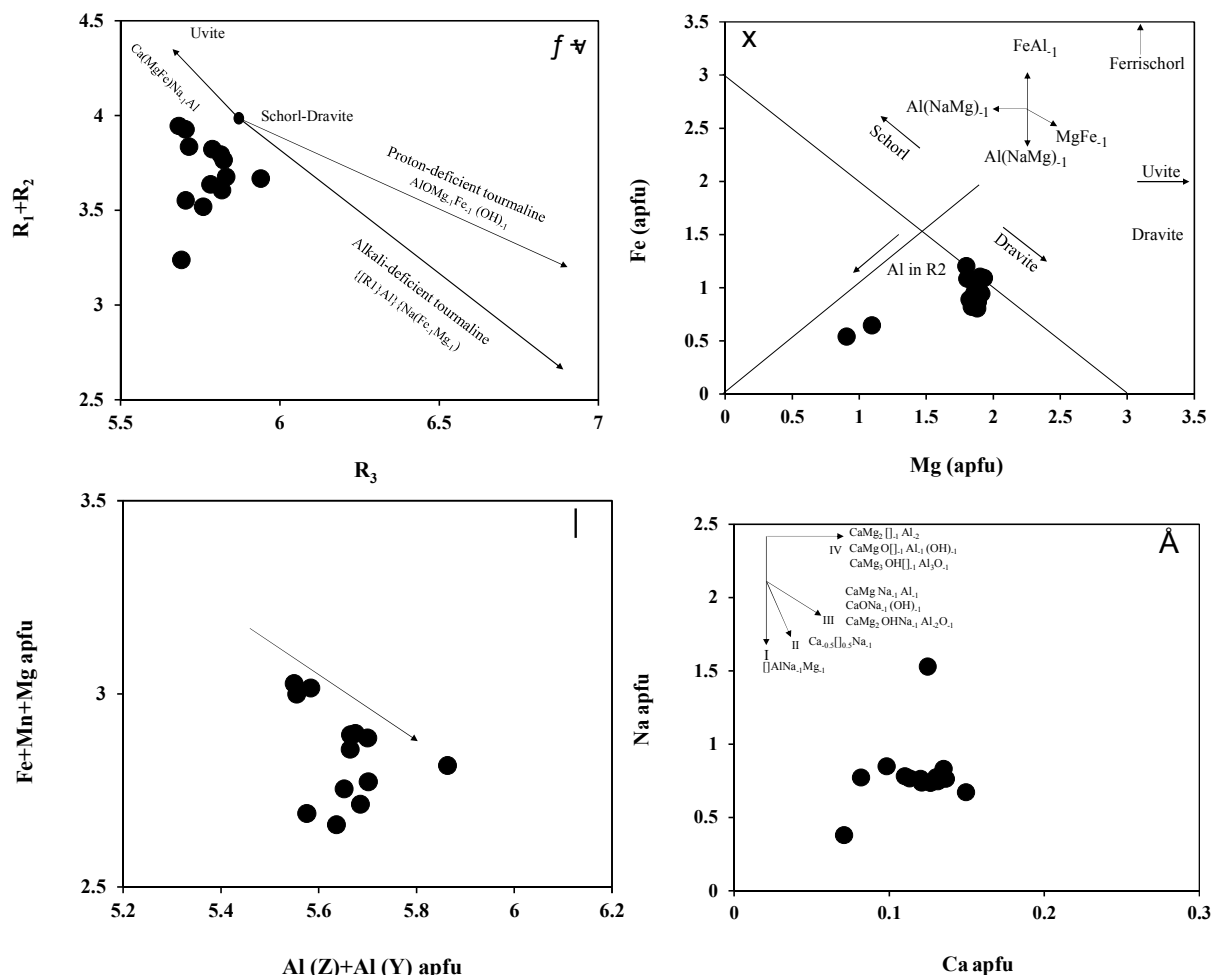


شکل ۴ الف) نمودار رده‌بندی تورمالین‌ها [۱۰] و ب) نمودار $Fe/(Fe+Mg)$ نسبت به $Na/(Na+Mg)$ [۱۰].

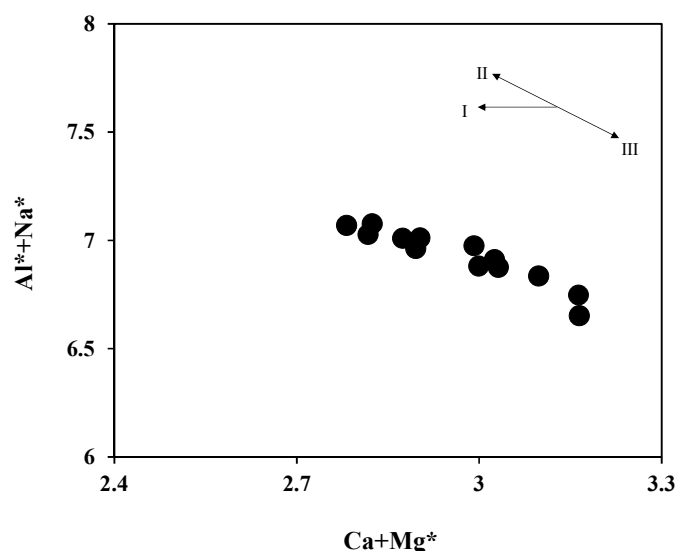
های مورد بررسی جانشینی‌های 1-(MgFe) نقش مهمی در ترکیب تورمالین‌ها نداشته‌اند و آنها خاستگاه ماگمایی ندارند [۲۱].

براساس شکل ۵ ت، وجود مقدار Ca کمتر از ۰/۲apfu در نمونه‌های مورد نظر نشان‌دهنده مقدار ناچیز اوویت در ساختار تورمالین است. در واقع به عقیده برخی پژوهشگران [۲۲]، مقادیر بالای Al در جایگاه Y به دلیل جانشینی‌های $\text{Al}(\text{Na} \cdot 1\text{Mg})_1$ و $\text{Al}(\text{OMg} \cdot 1(\text{OH}))_1$ است. پراکندگی داده‌ها نیز در این نمودار به علت جانشینی $\text{AlNa} \cdot 1\text{Mg}_1$ و تشکیل تهیجای X رخ می‌دهد. نمودار $\text{Ca} + \text{Mg}^*$ نسبت به $\text{Na}^* + \text{Al}^*$ (شکل ۶) نشان دهنده تطابق خطی معکوس و درجه کم جانشینی اوویت است.

در نمودار مرجع [۱۵]، ترکیب شورلیت- دراویت روی خط $\Sigma(\text{Fe} + \text{Mg}) = 3$ قرار می‌گیرد. همه نمونه‌های زیر این خط دارای $\Sigma(\text{Fe} + \text{Mg})$ کمتر از ۳ هستند و به‌صورت جانشینی Al در جایگاه Y در می‌آیند و هر چه $\Sigma(\text{Fe} + \text{Mg})$ کمتر باشد، میزان جانشینی Al در جایگاه Y بیشتر می‌شود. براساس این نمودار، بیشتر نمونه‌های مورد بررسی دارای $\Sigma(\text{Fe} + \text{Mg})$ کمتر از ۳ هستند و با توجه به کمتر بودن Fe نسبت به Mg، نمونه‌ها در گستره دراویت قرار دارند. ارتباط مثبت میان Mg و Fe در تورمالین‌ها (شکل ۵ب) و ارتباط منفی میان Al در جایگاه Y و $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ (شکل ۵ پ و جدول ۱) نشان از جانشینی Al در جایگاه Y و جانشینی $\text{Al}(\text{Na} \cdot \text{Mg})$ در تورمالین‌ها دارد. از این رو، مشخص می‌شود که در تورمالین-



شکل ۵ الف) نمودار $R_1 + R_2$ نسبت به R_3 [۲۰]؛ ب) نمودار Fe نسبت به Mg [۱۵]؛ ج) نمودار $R_1 + R_2$ نسبت به R_3 [۲۳]؛ د) نمودار $\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Mn}$ نسبت به Na و جایگاه نمونه‌ها.



شکل ۶ همبستگی معکوس $Ca+Mg^*$ نسبت به Al^*+Na^* . ($Al^*=Al+Fe^{3+}+2Ti-Li$, $Na^*=Na+K$, $Mg^*=Mg+Fe+Mn$)

ماگمایی یا غیر ماگمایی بودن تورمالین‌ها

تورمالین‌ها با خاستگاه ماگمایی دارای نسبت Fe/Mg بالا، تهیجای X فراوان و Al در جایگاه Y هستند و منطقه‌بندی رنگی ندارند. این در حالی است که تورمالین‌های گرمایی منطقه‌بندی رنگی و گرایش به ترکیب‌های سرشار از Mg دارند [۱۷، ۲۳، ۲۴]. در تورمالین‌های تشکیل شده بر اثر فرایندهای دگرگونی، مقدار جایگزینی Al در جایگاه Y و مقدار کاتیون Mg بالاست و مقادیر Ca نسبت به Na روند کاهشی از خود نشان می‌دهند. این امر ناشی از جانشینی $AlNa-1Mg-1$ در تورمالین‌ها و نشان دهنده فضای تهیجای X است [۱۰]. مقادیر Fe^{II} ($FeO/(FeO+MgO)=0.48$) در نمونه‌های مورد بررسی نیز غیرماگمایی بودن آن‌ها را مشخص می‌کند. به عقیده پیراجنو و اسمیتز [۲۵] نسبت بالای Fe^{II} (بیش از ۰/۸) نشان دهنده خاستگاه ماگمایی و نبود سیال و آرایش آن‌ها با رسوب‌های سرشار از Al است. در بیوتیت‌آمفیبولیت‌های مورد بررسی که در بردارنده، کانی بیوتیت فراوانی هستند، Mg و Fe مورد نیاز برای تشکیل تورمالین‌ها در دسترس است [۲۶]. در این کار، سیال‌های اسیدی و پدیده انتشار کاتیونی نقش مهمی دارند و یون‌های Mg، Fe، Ti و K مورد نیاز تورمالین را از کانی بیوتیت تامین می‌کنند [۴، ۲۶] که در این صورت تورمالین به‌وجود آمده با بیوتیت‌ها در تعادل بافتی است [۲۷].

برداشت

تورمالین‌های موجود در بیوتیت‌آمفیبولیت‌های منطقه معدنی

گل‌گهر از نوع دراویت است که در گروه قلیایی‌ها قرار دارند. تورمالین‌های مورد بررسی غیر ماگمایی هستند که منطقه‌بندی ضعیف موجود در تورمالین‌ها، نبود دگرسانی در کانی‌های سازنده بیوتیت‌آمفیبولیت‌های و جایگیری تورمالین‌ها در تماس تعادلی با کانی‌های دیگر موجود در سنگ نشان‌دهنده این امر است. وابستگی تورمالین‌ها با بیوتیت‌های موجود در بیوتیت-آمفیبولیت‌ها و مرز تعادلی بین آن‌ها می‌تواند نشان‌دهنده تامین عناصر مورد نیاز ساختار تورمالین از بیوتیت باشد.

قدردانی

از مسئولین پژوهشکده سنگ آهن و فولاد گل‌گهر که نهایت همکاری در ارتباط با حضور در منطقه و نمونه‌برداری را با در این پژوهش داشتند صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

- [1] Grew E.S. and Anovitz, L.M. *Boron: mineralogy, petrology, and geochemistry* (1996).
- [2] Slack J.F., et al., "Stratiform tourmalinites in metamorphic terranes and their geologic significance.", *Geology* 12 (1984) 713-716.
- [3] Yavuz F., et al., "Trace-element, rare-earth element and boron isotopic compositions of tourmaline from a vein-type Pb-Zn-Cu±U deposit, NE Turkey.", *International Geology Review* 53 (2011) 1-24.
- [4] Marks M.A., et al., "Trace element systematics of tourmaline in pegmatitic and hydrothermal systems from the Variscan Schwarzwald (Germany): the importance of major element composition, sector zoning, and fluid or

- Sinceni granite-pegmatite system in Swaziland.*", Chemical geology 153 (1999) 125-137.
- [17] Jiang S.-Y., et al., "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.
- [18] Collins A.C., "Mineralogy and geochemistry of tourmaline in contrasting hydrothermal systems: Copiapó area, Northern Chile.", (2010).
- [19] Henry D.J., et al., "Nomenclature of the tourmaline-super group minerals.", American Mineralogist 96 (2011) 895-913.
- [20] Manning D., "Chemical and morphological variation in tourmalines from the Hub Kapong batholith of peninsular Thailand.", Mineralogical Magazine 45 (1982) 139-147.
- [21] Henry D.J. and Dutrow B.L., "Ca substitution in Li-poor aluminous tourmaline.", The Canadian Mineralogist 28 (1990) 111-124.
- [22] Harraz H. and El-Sharkawy M.F., "Origin of tourmaline in the metamorphosed Sikait pelitic belt, south Eastern Desert, Egypt.", Journal of African Earth Sciences 33 (2001) 391-416.
- [23] Buriánek D. and Novák M., "Compositional evolution and substitutions in disseminated and nodular tourmaline from leucocratic granites: examples from the Bohemian Massif, Czech Republic.", Lithos 95 (2007) 148-164.
- [24] Wolf M.B. and London D., "Boron in granitic magmas: stability of tourmaline in equilibrium with biotite and cordierite.", Contributions to Mineralogy and Petrology 130 (1997) 12-30.
- [25] Pirajno F. and Smithies R., "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.
- [26] Deer W.A., Howie R.A., and Zussman J., "An introduction to the rock-forming minerals.", Vol. 2. (1992): Longman Scientific & Technical Hong Kong.
- [27] El-Enen M.A. and Okrusch M., "The texture and composition of tourmaline in metasediments of the Sinai, Egypt: Implications for the tectono-metamorphic evolution of the Pan-African basement.", Mineralogical Magazine 71 (2007) 17-40.
- melt composition.", Chemical Geology 344 (2013) 73-90.
- [5] Yang S.-Y., et al., "Tourmaline as a recorder of magmatic-hydrothermal evolution: an in situ major and trace element analysis of tourmaline from the Qitianling batholith, South China.", Contributions to Mineralogy and Petrology 170 (2015) 42.
- [6] Hawthorne F.C. and Henry D.J., "Classification of the minerals of the tourmaline group.", EUROPEAN JOURNAL OF MINERALOGY-STUTTGART- 11 (1999) 201-216.
- [7] Foit F.F. and Rosenberg P.E., "Coupled substitutions in the tourmaline group.", Contributions to Mineralogy and Petrology 62 (1977) 109-127.
- [8] Slack J.F., "Tourmaline associations with hydrothermal ore deposits. Boron: Mineralogy, Petrology and Geochemistry.", Rev. Mineral. 33 (1996) 559-643.
- [9] Nemec D., "GENESIS OF TOURMALINE SPOTS IN LEUCORRATIC GRANITES." (1975).
- [10] Henry D.J. and 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.
- [11] Neiva A.M., "Geochemistry of tourmaline (schorlite) from granites, aplites and pegmatites from northern Portugal.", Geochimica et Cosmochimica Acta 38 (1974) 1307-1317.
- [12] Leeman W., "Geochemistry of boron and its implications for crustal and mantle processes. Boron: mineralogy, petrology and geochemistry.", Rev. Mineral 33 (1996) 645-708.
- [13] Sperlich R., Giere R., and Frey M., "Evolution of compositional polarity and zoning in tourmaline during prograde metamorphism of sedimentary rocks in the Swiss Central Alps.", American Mineralogist 81 (1996) 1222-1236.
- [14] Sabzehei M. and Watters M., "Preliminary report on the geology and petrography of the metamorphic and igneous rocks of central part of Neiriz.", Geological Survey of Iran (1970).
- [15] London D. and Manning D.A., "Chemical variation and significance of tourmaline from southwest England." Economic geology 90 (1995) 495-519.
- [16] Trumbull R.B. and Chaussidon M., "Chemical and boron isotopic composition of magmatic and hydrothermal tourmalines from the