

مقاله پژوهشی

سال بیست و نهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۰، از صفحه ۴۵۵ تا ۴۶۲

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

* لیلی غفوری، سید حسام الدین 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 سنندج-سیرجان و در شهرستان سیرجان، استان کرمان، واقع شده است. سنگ‌های تشکیل دهنده این مجموعه شامل انواع شیسته‌ها، آمفیبولیت‌ها و سنگ‌های متابازیت هستند. از اجزای اصلی سنگ‌شناسی منطقه بیوتیت آمفیبولیت‌ها با مشخصه کانی‌شناسی هورنبلند، پلاژیوکلاز، بیوتیت، تورمالین، اسفن، اپیدوت، سریسیت، 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 قلایی 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 $\text{AlNa}_1\text{Mg}_{1-x}$ در تورمالین‌های مورد بررسی دارد، مشخصه غیر ماقمایی و دگرگونی بودن این تورمالین‌ها هستند. تشکیل این کانی را می‌توان به حضور مقدار بالای کانی بیوتیت در سنگ موردن بررسی و سیال سرشار از بور که طی دگرگونی در سیال‌های میان روزنه‌ای انباسته 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، سنندج-سیرجان، تورمالین، بیوتیت آمفیبولیت.

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 ورقایی (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

مقدمه تورمالین از جمله کانی‌های سیلیکاتی است که با طیف ترکیبی گسترده در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی مانند دگرگونی، دگرسانی و ماقمایی 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 $(\text{X})(\text{Y}3)(\text{Z}6)\text{T6O18}(\text{BO}_3)\text{V}_3\text{W}$ است که جایگاه X با Al^{3+} ، Cr^{3+} ، Fe^{2+} ، Na^+ و Ca^+ و جایگاه Z با Z^{2+} ، Ti^{4+} و Mg^{2+} پر می‌شود. جایگاه Y جانشینی‌های گوناگونی از کاتیون‌های یک تا چهار ظرفیتی را در بر می‌گیرد [۶]. جایگاه T بیشتر با Al^{3+} ، جایگاه W با O^{2-} و OH^- و جایگاه V با F^- و H^+ پر می‌شود [۷].

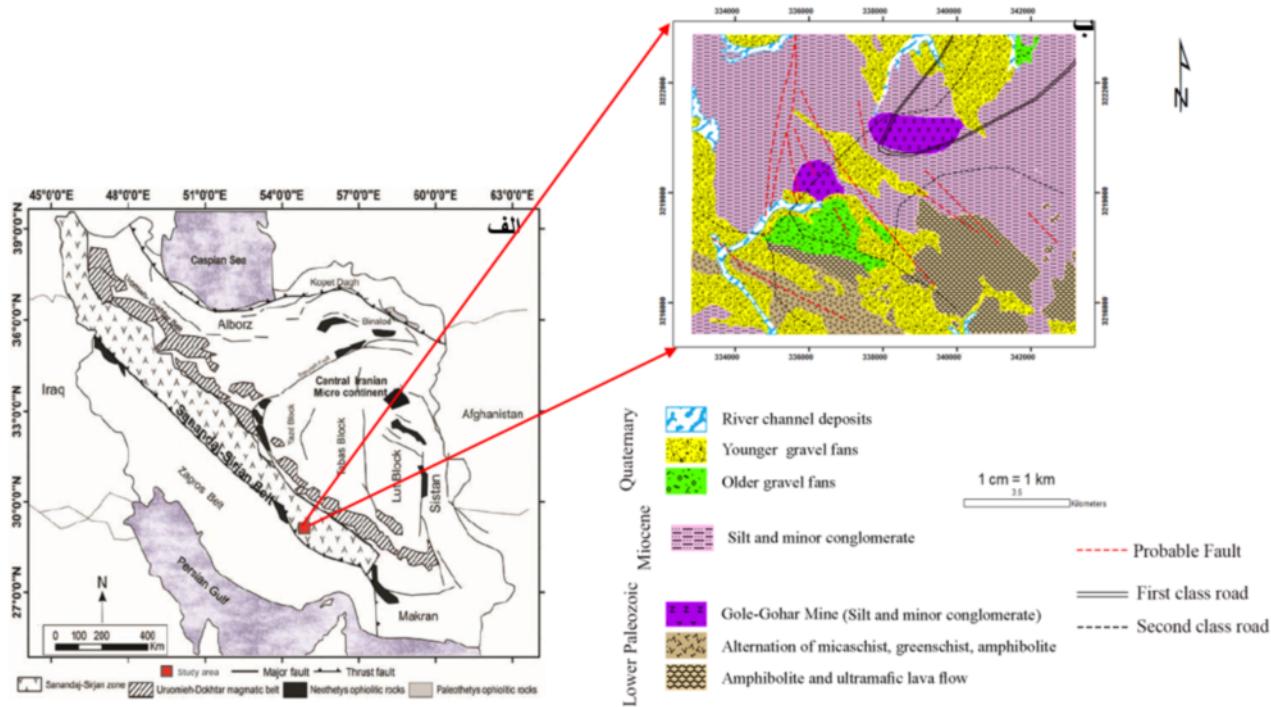
پالئوزوئیک و تریاس میانی نفوذ کرده‌اند. این مجموعه دگرگونی شامل تناوبی از گنیس، میکاشیست، آمفیبولیت، کوارتزشیست در بخش پایینی و گنیس و کوارتزشیست در بخش بالایی است. سنگ‌های کنگلومرا، آهک آبسنگی، ماسه‌سنگ آهکی، شیل و توربیدیات (سنگ‌های رسوبی مژوزوئیک) و پادگانه‌ها، مخروط-افکنهای قدیم و جدید (آبرفت‌های 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.

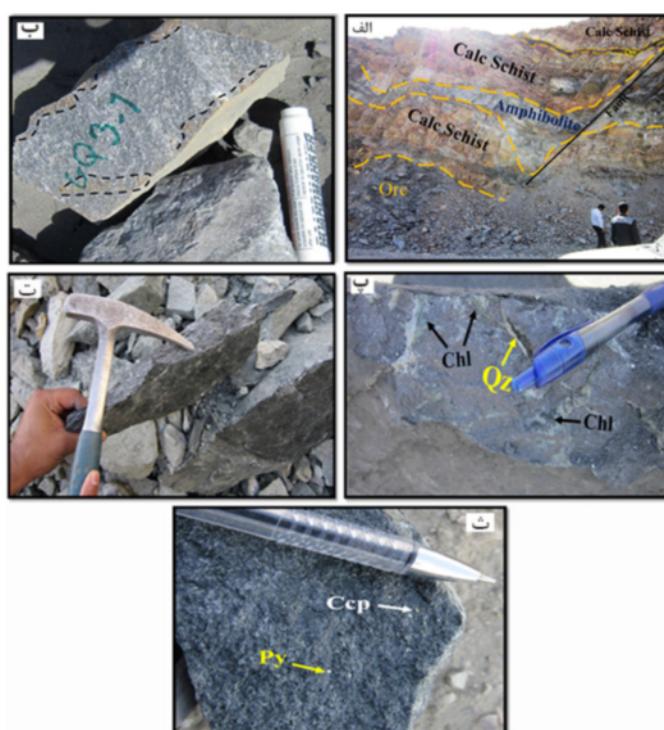
سنگ مادر خود توسط پدیده‌های آبگیری و آبزدایی با افزایش درجه دگرگونی آزاد شود. از آنجا که تاکنون به چگونگی تشکیل تورمالین‌های موجود در بیوتیت آمفیبولیت‌های معدن گل‌گهر سیرجان بررسی نشده است، در این پژوهش بر پایه نتایج تجزیه‌ای ریزپردازش الکترونی، ترکیب تورمالین در سنگ‌های بیوتیت آمفیبولیت معدن گل‌گهر 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 "۵۵°۱۹'۲۳" تا "۵۵°۱۹'۲۳" طول شرقی و "۲۹°۰۵'۳۲" تا "۲۹°۰۵'۳۲" عرض شمالی در لبه جنوب‌شرقی پهنه سندنج سیرجان واقع است (شکل ۱). منطقه گل‌گهر و منطقه‌های پیرامون آن از سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین، پالئوزوئیک، سنگ‌های رسوبی مژوزوئیک، 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 روش پلاژیوکلاز در نمونه دستی از سنگ‌های آمفیبولیتی منطقه، ث) بلورهای پیریت (Py) و کالکوپیریت (Ccp) در نمونه دستی آمفیبولیت.

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 و پ) و بیوتویت‌ها اغلب در راستای برگوارگی به کلریت تبدیل شده‌اند (شکل ۳ ت). در بعضی مقاطع، بیوتویت آمفیبولیت‌ها در اثر دگرسانی شدید به اپیدوت و کلریت دگرسان شده و اپیدوت آمفیبولیت تشکیل داده‌اند که این روابط واکنشی از شواهد دگرگونی پسروند است.

روش پژوهش

طی پیمایش‌های صحرایی منطقه، تعداد ۵۰ نمونه از بیوتویت 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 علوم‌زمین و محیط زیست دانشگاه یاماگاتای ژاپن ارسال شدند.

بحث و بررسی

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

سنگ‌نگاری

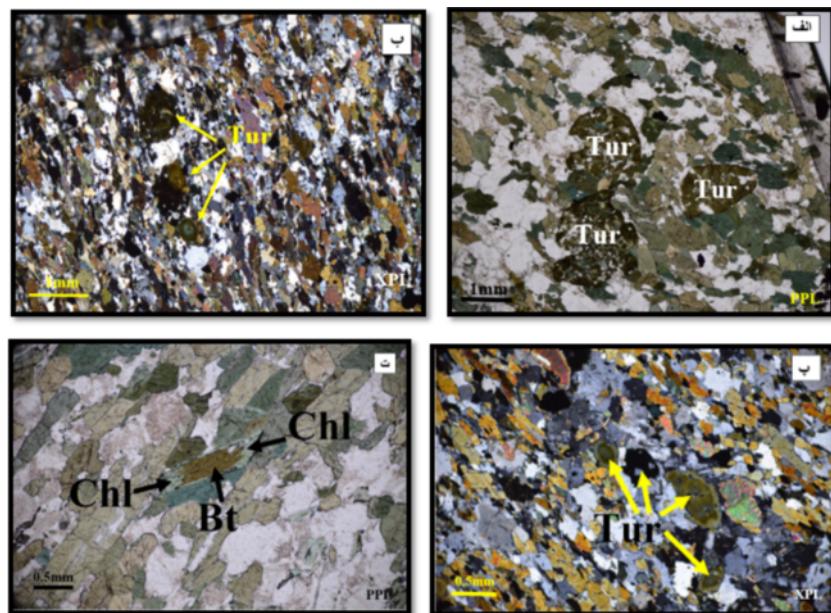
آمفیبولیت‌های منطقه در نمونه‌دستی به رنگ سبزتیره هستند که در بخش‌هایی از منطقه در اثر جدایش دگرگونی کانی‌های تیره آمفیبول و روش پلاژیوکلاز از هم تفکیک شده‌اند و در نمونه‌دستی قابل مشاهده هستند (شکل ۲ ت). در برخی از نمونه‌های آمفیبولیتی، کانی‌های پیریت و کالکوپیریت نمایان هستند (شکل ۲ ث). آمفیبولیت‌های 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 جهت‌یافته‌گی و بدون جهت‌یافته‌گی (توده‌ای) تقسیم می‌شوند و انواع اصلی آنها شامل آمفیبولیت، بیوتویت آمفیبولیت و اپیدوت آمفیبولیت هستند.

بیوتویت آمفیبولیت

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

مورد بررسی فقیر از آهن و غنی از منیزیم هستند [۱۵] که نشان دهنده غیرماگمایی بودن آنهاست [۱۶، ۱۷] مقدار $\text{Na}/\text{Na}+\text{Ca}$ در تورمالین‌های مورد بررسی $0.81-0.97$ بوده که نشان دهنده غنی بودن این تورمالین‌ها از سدیم است.

موردن بررسی به ازای ۲۴/۵ اتم اکسیژن در جدول ۱ ارائه شده است. مجموع اکسیدهای این کانی $86/59-95/7$ 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 ($4/13-5/86$ درصد) مشخص می‌شود که تورمالین‌های

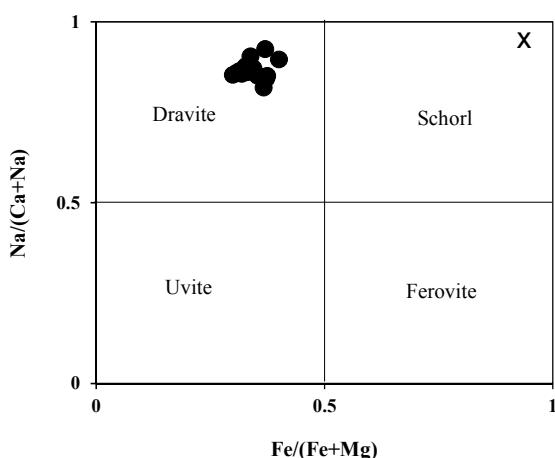
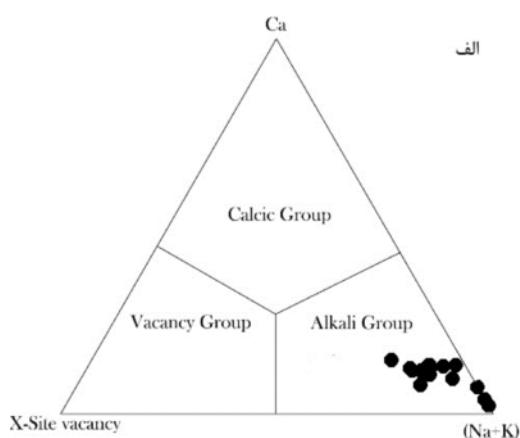


شکل ۳ الف) حضور کانی تورمالین در بیوتیت آمفیبولیت‌ها، نور قطبیده صفحه‌ای، (PPL)، ب) تورمالین‌های دارای منطقه‌بندی در بیوتیت آمفیبولیت‌ها، نور قطبیده متقاطع، (XPL)، پ) تورمالین‌های دارای منطقه‌بندی در بیوتیت آمفیبولیت‌ها، نور XPL . ت) بیوتیت کلریتی شده در بیوتیت آمفیبولیت‌ها، نور PPL. Tur: تورمالین، Bt: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

جدول ۱ داده‌های تجزیه شیمیایی تورمالین‌های بیوتیت آمفیبولیت مجموعه دگرگونی گل‌گهر با ریزکاو الکترونی (بر جسب 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_2O_3	۲۹/۱۰	۲۹/۸۳	۲۹/۲۸	۳۰/۳۱	۳۱/۳۶	۲۹/۶۰	۳۰/۱۲	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	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۳	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_2O	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_2O	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_2O_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_2O_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	۰/۰۲	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	۰/۱۶	۰/۸۸	۰/۸۶	۰/۸۹	۰/۹۲	۰/۸۷	۰/۹۱	۰/۹۰	۰/۹۱	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۸۹	۰/۷۶	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	۰/۲۰	۰/۱۹	۰/۲۰	۰/۱۹	۰/۱۱	۰/۱۳
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	۰/۰۴	۰/۰۳	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 زوچی اowoیت 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 شورل-draویت جای دارند. ترکیب شورل-draویت نزدیک مرکز **نمودار** با مقدار $R_1R_2=4$ و $R_3=6$ است که همه بردارها با مولفه جانشینی شورل draویت آغاز می‌شوند. این وضعیت اجازه بررسی تبادل اowoیت با فرمول $\{Ca(Fe,Mg)\} \{Na,Al\}_{-1}$ ، تبادل پروتون-زادی با فرمول آلتیت $\{Fe^{3+}O\} \{Fe^{2+}OH\}$ و تهی‌شدگی از قلیایی‌ها با فرمول $\{R_1[Al]\} \{Na(Fe,Mg)\}_{-1}$ 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 شورل و draویت، جانشینی ناقص قلیایی ($R^+ + R^{2+} \leftrightarrow R^{3+}$) و جانشینی نوع هیدروکسیل زدایی ($(OH)^- + R^{2+} \leftrightarrow R^{3+} + O^{2-}$) 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 اowoیت در ساختار این کانی‌ها نمایان است [۲۰].



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

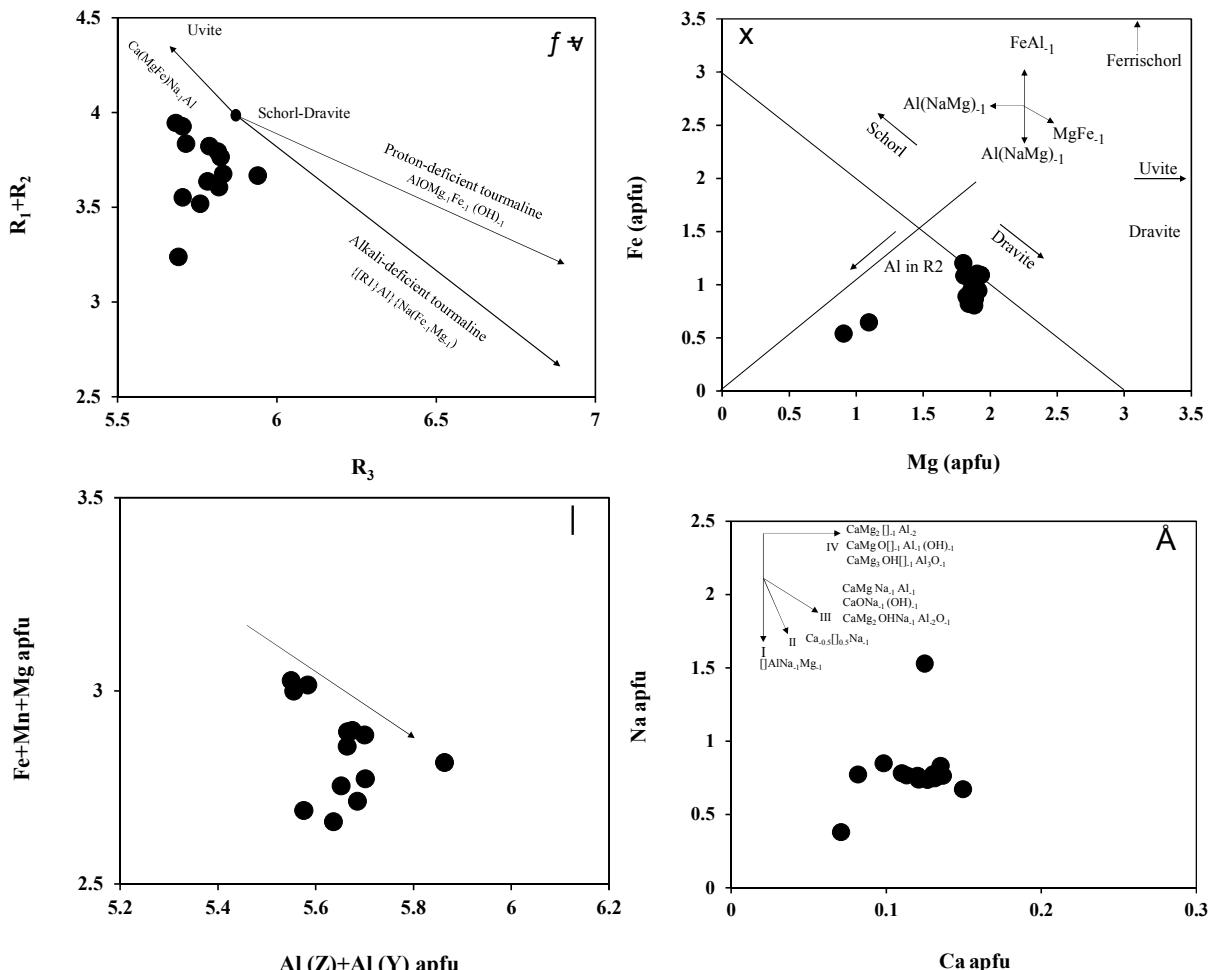
بر اساس کاتیون عناصر K، Na و Ca و مقادیر X، کانی تورمالین را به سه گروه قلیایی، کلسیمی و با تهیجای X تقسیم کرده‌اند [۶]. با توجه به نمودار مرجع [۱۰]، نمونه‌های مورد بررسی در گستره تورمالین‌های قلیایی جای دارند (شکل ۴ الف). تورمالین‌های قلیایی در حضور سیال‌های اسیدی و در دمای کم پدید می‌آیند [۱۸]. سیال‌های 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 draویت 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 $0.4 / ۰.۹$ درصد) و تورمالین‌های دگرگونی مجاورتی دارای مقادیر کلسیم بالاتر ($0.۴ / ۰.۹$ درصد وزنی) هستند. همچنین مقادیر MnO ، Cr_2O_3 ، K_2O 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 صحرابی منطقه نیز همخوانی دارد.

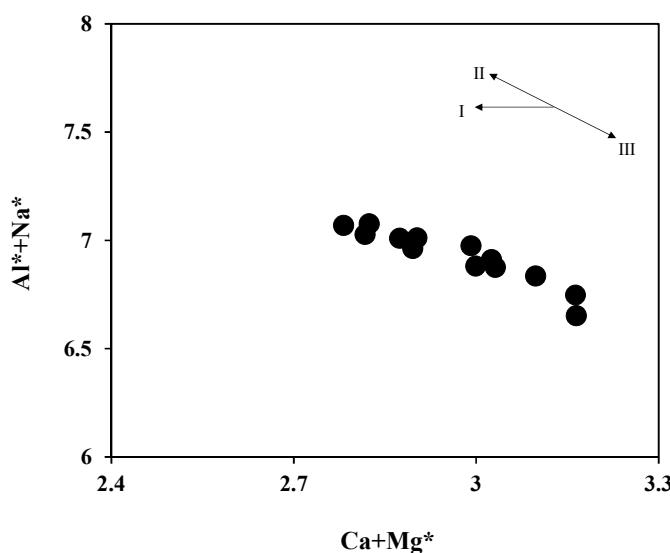
های مورد بررسی جانشینی‌های $(MgFe)-1$ نقش مهمی در ترکیب تورمالین‌ها نداشتند و آنها خاستگاه ماقمایی ندارند.^[۲۱]

براساس شکل ۵ ت، وجود مقدار Ca کمتر از $0.2apfu$ 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 $AlNa_1Mg_{-1}(OH)_{-1}$ و $AlOMg_{-1}Mg_{-1}$ است. پراکندگی داده‌ها نیز در این نمودار به علت جانشینی $AlNa_1Mg_{-1}$ و تشکیل $AlNa^*+Al^*$ (شکل ۶) نشان دهنده تطابق خطی معکوس و درجه کم جانشینی اوویت است.

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



شکل ۵ (الف) نمودار R_1+R_2 نسبت به R_3 ؛ (ب) نمودار Fe نسبت به Mg ؛ (ج) نمودار $Fe+Mn+Mg$ نسبت به $Al(Z)+Al(Y)$ ؛ (د) نمودار Na نسبت به Ca . در آن نمودار Ca نسبت به $Al^t+Fe+Mg+Mn$ و جایگاه نمونه‌ها.



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

گل‌گهر از نوع دراویت است که در گروه قلیایی‌ها قرار دارند. تورمالین‌های مورد بررسی غیر ماقمایی 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 بیوتیت‌آمفیبولیت‌ها و مرز تعادلی بین آن‌ها می‌تواند نشان‌دهنده تمامی عنصر مورد نیاز ساختار تورمالین از بیوتیت باشد.

قدرتانی

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 tourmalinates 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

ماگمایی یا غیرماگمایی 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 [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 $FeO/(FeO+MgO)=0.48$ ($FeO^{\#}$) در نمونه‌های مورد بررسی نیز غیرماگمایی بودن آن‌ها را مشخص می‌کند. به عقیده پیراجنو و اسمیتیز [۲۵] نسبت بالای $FeO^{\#}$ (بیش از ۰.۸) نشان دهنده خاستگاه ماگمایی و نبود سیال و آلایش آن‌ها با رسوب‌های سرشار از Al است. در بیوتیت‌آمفیبولیت‌های مورد بررسی که در بردارنده، کانی بیوتیت فراوانی هستند، Fe و Mg 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, K و Na مورد نیاز تورمالین را از کانی بیوتیت تامین می‌کنند [۲۶، ۴] که در این صورت تورمالین به وجود آمده با بیوتیت‌ها در تعادل بافتی است [۲۷].

برداشت

تورمالین‌های موجود در بیوتیت‌آمفیبولیت‌های منطقه معدنی

- 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-supergroup 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 (schorlomite) 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