IRANIAN SOCIETY of CRYSTALLOGRAPHY and MINERALOGY

Vol. 17, No. 3, Fall 1388/2009

IRANIAN JOURNAL of CRYSTALLOGRAPHY and MINERALOGY

Comparison of chemical composition of tourmaline in tin and tungsten-bearing quartz- tourmaline veins (Shah-kuh area, east of Iran and Nezamabad area, west of Iran)

D. Esmaeily[1*], H. Mohamadi[1], M. Haghnazar[2]

1- Faculty of Geology, College of Science, University of Tehran
2- Geological Survey of Iran

(Received: 15/9/2008, in revised form: 10/3/2009)

Abstract: In Iran, the most important tin and tungsten mineralization has occurred in Shah-Kuh granitoid pluton (Lut Block, east of Iran), and Nezamabad area (Boroujerd granitoid complex, west of Iran), respectively. Both mineralizations are mainly accompanied by existence of quartz-tourmaline veins. Nezamabad veins- type tourmalines have dravite composition and have been formed in hydrothermal condition on the basis of the following reasons: having more Mg than Fe, fine scale zoning, having low fluorine amount, low X-site vacancy, low Al amount, low Fe/(Fe+Mg) ratio, tendency away from alkali- and proton-deficient tourmaline and lack of negative correlation between Fe and Mg. Falling their composition in the metapelites and metapsammite zone reveals that the required forming fluids might be originated from host metamorphosed sedimentary rocks of the regions. Quartz-tourmaline veins from Shah- Kuh have been injected into main pluton and sedimentary rocks of Shemshak Formation. Vein- type tourmalines of the sedimentary rocks, have the same hydrothermal properties as Nezamabad tourmaines. Despite of having mostly schorl composition and originating from magmatic fluids, vein- type tourmalines of the granitic pluton represent hydrothermal nature as well.

Keywords: *Quartz-Tourmaline Vein, Nezamabad, Shah- Kuh, Hydrothermal, Mineralization.*

[*]Corresponding author, Tel.: +98 (021) 61112717, Fax: +98 (021) 66491623, E-mail: esmaili@khayam.ut.ac.ir

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-31]

مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال هفدهم، شمارهٔ ۳، پاییز ۸۸، از صفحهٔ ۳۴۳ تا ۳۵۶

انجمن بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مقایسهٔ ترکیب شیمیایی تورمالین در رگه‌های کوارتز- تورمالین قلع و تنگستن‌دار مناطق شاهکوه (شرق ایران) و نظام‌آباد (غرب ایران)

داریوش اسماعیلی[۱*]، حمیده محمدی[۱]، مستانه حق نظر[۲]

۱- دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران

۲- سازمان زمین‌شناسی واکتشافات معدنی کشور

(دریافت مقاله: ۸۷/۶/۲۵ ، نسخه نهایی: ۸۷/۱۲/۲۰)

چکیده : در ایران، مهمترین کانه‌زایی قلع در تودهٔ گرانیتوئیدی شاهکوه (بلوک لوت، شرق ایران) و کانه‌زایی تنگستن در منطقهٔ نظام‌آباد (کمپلکس گرانیتوئیدی بروجرد، غرب ایران) و همراه با رگه‌های کوارتز- تورمالین صورت گرفته است. تورمالین‌های موجود در رگه‌های منطقهٔ نظام‌آباد دارای ترکیب دراویتی بوده و با توجه به‌ویژگی‌هایی مانند بالاتر بودن مقدار Mg نسبت به Fe، منطقه‌بندی کوچک مقیاس، پایین بودن مقدار Fe/(Fe+Mg)، کاهش در موقعیت X، مقدار Al و F، تمایل به‌سمت بیرونی بردارهای تهی شدن از قلیایی و پروتون‌زدایی و ناهمخوانی بین Fe و Mg، در شرایط گرمابی تشکیل شده‌اند. قرارگیری ترکیب این تورمالین‌ها در گسترهٔ متاپلیت‌ها و متاپسامیت‌ها نیز نشان می‌دهد که شارهٔ سازندهٔ آن‌ها احتمالاً متاثر از سنگ‌های ته‌نشستی دگرگون شده میزبان است. رگه‌های کوارتز- تورمالین شاهکوه نیز درون تودهٔ اصلی و سنگ‌های ته‌نشستی سازند شمشک تزریق شده‌اند. تورمالین رگه‌های رخنمون یافته در سنگ‌های ته‌نشستی مانند تورمالین‌های منطقهٔ نظام‌آباد دارای ویژگی‌های تورمالین‌های گرمابی هستند. تورمالین‌های موجود در رگه‌های کوارتز- تورمالین رخنمون یافته در تودهٔ گرانیتی نیز سرشتی گرمابی دارند، ولی از آنجاکه به‌وسیله یک گرماب با خاستگاه ماگمایی به‌وجود آمده‌اند، بیشتر از نوع شورل‌اند.

واژه‌های کلیدی: *رگه‌های کوارتز- تورمالین، کانه‌زایی، نظام‌آباد، شاهکوه، گرمابی.*

مقدمه

تورمالین یک کانی پیچیده سیلیکاتی بُر دار با فرمول کلی $XY_3Z_6T_6O_{18}(BO_3)_3V_3W$، است. موقعیت Z با Al و گاهی با Fe^{+2} ، Fe^{3+}، Ti، Mg، Cr و V^{3+} پر می‌شود، موقعیت Y جانشینی‌های گوناگونی از کاتیون‌های یک تا چهار ظرفیتی را شامل می‌شود، موقعیت T اغلب به‌وسیلهٔ Si، گاهی همراه با مقداری Al پُر می‌شود، موقعیت X معمولاً با Na، Ca و K اشغال شده و یا خالی می‌ماند. موقعیت هیدروکسیل W، با O و OH اشغال می‌شود و موقعیت V را O، F و H پر می‌کنند[۱].

این کانی به‌دلیل ساختار منحصربه‌فرد و پیچیدهٔ خود، و با توجه به واکنش‌های جانشینی متفاوتی که در ترکیب آن صورت می‌گیرد از نظر ترکیب دارای تنوع شیمیایی بالایی است، که این تنوع ترکیب شیمیایی منجر به معرفی ۴۶ نوع تورمالین طبیعی و مصنوعی توسط [۲] شد. در این میان سه عضو انتهایی سری‌های محلول جامد تورمالین، البائیت (Elbaite) (غنی از Al + Li)، شورل (Schorl) (غنی از Fe) و دراویت (Dravite) (غنی از Mg) از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند.

*نویسنده مسئول، تلفن: ۶۱۱۱۲۷۱۷ (۰۲۱) ۹۸+، نمابر: ۶۶۴۹۱۶۲۳ (۰۲۱) ۹۸+، پست الکترونیکی: esmaili@khayam.ut.ac.ir

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-31]

به‌دلیل پایداری تورمالین در گسترهٔ گسترده‌ای از تغییرات فشار و دما و ترکیب شیمیایی متنوع آن باعث شده است تا این کانی در بررسی‌های سنگ‌شناسی و متالوژیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده، و موضوع بررسی‌های بسیاری از پژوهشگران بوده است (به‌عنوان مثال:[۳، ۴]). ترکیب شیمیایی متنوع و پیچیدهٔ تورمالین بیانگر ارتباط مشخص آن با محیطی است که از آن متبلور شده است، این ارتباط می‌تواند شاخص مناسب و قابل اعتمادی در تعیین خاستگاه و شکل‌گیری سیستم‌های گرمابی تشکیل دهندهٔ کانه و راهنمای خوبی برای پی‌جویی کانسارها از جمله ذخایر اقتصادی تنگستن، قلع و مولیبدن همراه با تورمالین باشد [۵].

تورمالین به‌عنوان یک کانی ماگمایی اولیه به‌صورت پراکنده و معمولاً خود شکل در گرانیت‌ها یا پگماتیت‌ها؛ یا به‌عنوان یک کانی پایانی در مراحل حدواسط از شرایط پایانی سالیدوس (ماگمایی) تا مرحلهٔ ساب سالیدوس (گرمابی)، که معمولاً روی کانی فلدسپار و یا به‌شکل درون شبکه‌ای با کوارتز و فلدسپار یا رگچه‌های بسیار ریز و دانه‌ای، متبلور می‌شود [۶] و [۷]. به‌علاوه تورمالین اغلب از گرماب‌های ساب سالیدوس در گرانیت به‌صورت رگه، به‌ویژه در همبری (کنتاکت) بیرونی آن‌ها نیز تشکیل می‌شود [۷، ۸].

از آنجاکه در ایران مهمترین کانه‌زایی قلع در تودهٔ گرانیتوئیدی شاهکوه (بلوک لوت، شرق ایران) و مهمترین کانه - زایی تنگستن در منطقهٔ نظام‌آباد (کمپلکس گرانیتوئیدی بروجرد، غرب ایران) شناخته شده است و در هر دو مورد تورمالین به‌همراه کوارتز کانی باطله (گانگ) اصلی محسوب می‌شود، لذا بر آن شدیم تا با استفاده از نتایج آنالیزهای ریزگمانه الکترونی تورمالین به‌مقایسهٔ ترکیب این کانی در دو منطقه یاد شده پرداخته و تفاوت‌های اصلی ترکیب تورمالین در رگه‌های حاوی قلع و تنگستن در آن مناطق را مورد بررسی قرار دهیم.

موقعیت زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقهٔ شاهکوه

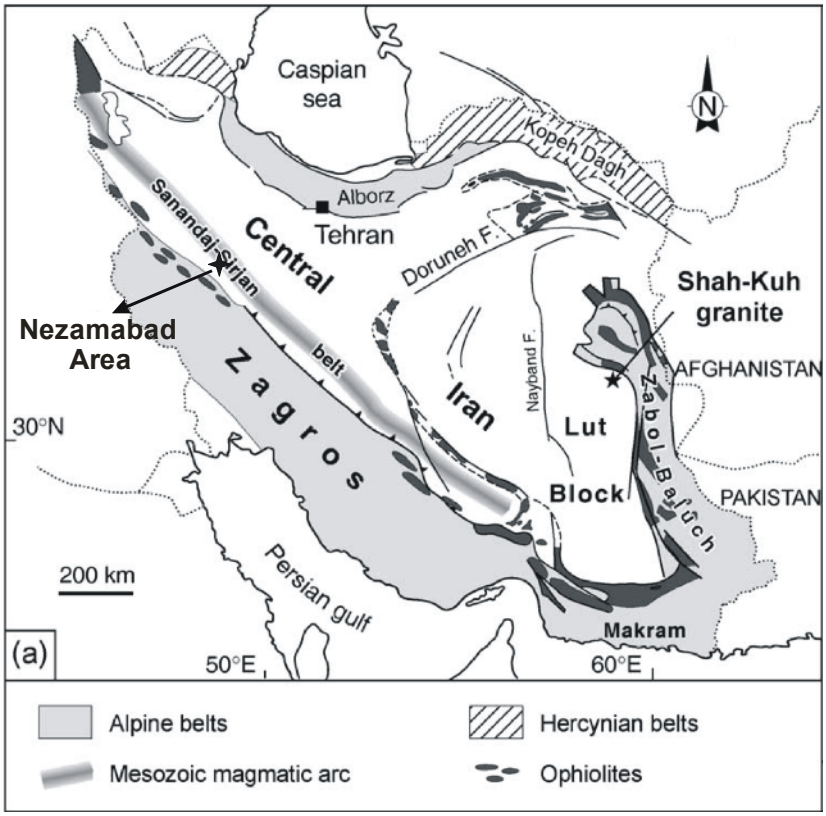
باتولیت گرانیتی شاهکوه به‌صورت یک نوار طویل با طول در حدود ۵۰ کیلومتر و عرض ۱۲-۱۰ کیلومتر با روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق در حاشیهٔ شرقی بلوک لوت قرار دارد (شکل ۱). این تودهٔ گرانیتی در ۱۸۰ کیلومتری جنوب بیرجند و ۵۰ کیلومتری غرب شهرستان نهبندان با مختصات جغرافیای ´۴۷°۳۱- ´۳۰°۳۱ عرض شمالی و´۳۱°۵۹-´۱۲°۵۹ طول شرقی در نقشهٔ زمین‌شناسی۲۵۰،۰۰۰: ۱ دهسلم و۱۰۰،۰۰۰: ۱ بصیران واقع شده است. باتولیت گرانیتی شاهکوه سنگ‌های پلیتی کمپلکس دگرگونی دهسلم در جنوب و تهنشست‌های ماسه‌سنگی- شیلی سازند شمشک را در شمال و شمال‌غرب قطع کرده و به‌سمت غرب با یک سطح فرسایشی در زیر کنگلومرای قاعده‌ای پیشرونده و در زیر آهک‌های اربیتولین‌دار کرتاسه قرار گرفته است. [۱۰] به‌روش K- Ar و Ar- Ar نشان داد که گرانیت شاهکوه با میانگین سنی ۱۶۳ میلیون سال به ژوراسیک میانی (دوگر)تعلق دارد، همچنین [۱۱] نشان دادند که این توده در یک محیط زمین ساختی قوس آتشفشانی (VAG) و در اثر فرورانش ورقهٔ اقیانوسی نئوتتیس به زیر ایران مرکزی تشکیل شده است. این تودهٔ نفوذی از سه واحد اصلی گرانودیوریت و سینوگرانیت تشکیل شده است که با رشته ای از دایک‌های آپلیتی، داسیتی و آندزیتی با روند شمال‌شرق-جنوب‌غرب قطع شده و همهٔ آن‌ها مورد هجوم رشته‌ای از رگه-های کوارتز-تورمالین کانی ساز با روندی مشابه قرارگرفته‌اند. به‌علاوه سنگ‌های میکروگرانیتی، گرانیت‌های گرایزنی، منطقه-های دگرسانی و برشی نیز به‌طور پراکنده در منطقه حضور دارند (برای اطلاعات بیشتر خواننده را به [۱۰] ارجاع می-دهیم).

مشخصات تورمالین در گرانیت‌ها و رگه‌های کوارتز- تورمالین قلع‌دار شاهکوه

به‌طور کلی تمرکز اصلی کانه‌زایی در شمال و شمال غرب گسترهٔ مورد بررسی درون رگه‌های کوارتز-تورمالین رخنمون شده است. این رگه‌ها و رگچه‌های کوارتز- تورمالینی کم و بیش قلع دار درون گرانیت‌ها، در مرز مشترک تودهٔ گرانیتی با سنگ‌های میزبان و نیز ماسه‌سنگ‌های شیلی سازند شمشک رخنمون دارند. ضخامت رگه‌های کوارتز- تورمالین از کمتر از یک متر تا بیش از ۵ متر و طول رخنمون آن‌ها تا بیش از ۸۰۰ متر می‌رسد. راستای آن‌ها بیشتر شمال‌شرق- جنوب‌غرب است و دارای شیب نزدیک به‌قائم‌اند. میزان قلع در رگه‌های کوارتز-تورمالین از حداقل ۵ در میلیون (ppm) تا حداکثر ۱۹۴۵ در میلیون متغیر است [۱۰]. کانی‌های اصلی این رگه‌ها کوارتز و تورمالین است که در برخی از نقاط کوارتز و در برخی دیگر تورمالین فراوان‌تر است. تورمالین بیشتر به‌شکل ریزبلور و به-رنگ خاکستری تیره دیده می‌شود. این رگه‌ها غالباً به اکسیدهای آهن تیره رنگ آلوده بوده و به‌رنگ خاکستری تیره

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-31]

دیده می‌شوند. رگه‌های کوارتز- تورمالین (به‌طور کلی) به‌میزان قابل توجهی سنگ‌های میزبان خود را دگرسان کرده‌اند. در بعضی از مناطق دگرسانی به‌حدی است که موجب فروپاشی و از بین رفتن بخش‌های گرانیتی و در نتیجه بر جسته ماندن رگه‌ها شده است. علاوه بر کوارتز و تورمالین به‌عنوان کانی‌های اصلی، کانی‌های اسفن، منازیت، زیرکن، آپاتیت، روتیل، فنژیت و به‌ندرت کربنات‌ها نیز به‌طور پراکنده آن‌ها را همراهی می‌کنند. میزان فراوانی کوارتز و تورمالین از نمونه‌ای به‌نمونهٔ دیگر متفاوت است. کانی‌های کاسیتریت، هیدرواستانیت، وارلوموفیت، پیریت، کالکوپیریت، هماتیت، گوتیت، لیپدوکروسیت، دیژنیت، کوولین و مالاکیت اجزای بخش کانهٔ این رگه‌ها را تشکیل می‌دهند. البته همهٔ کانی‌های بالا یکجا و همزمان در هیچیک از نمونه‌های مورد بررسی به‌چشم نمی‌خورد و در بررسی‌های ماکروسکوپی بلور کاسیتریت در هیچ کدام از نمونه‌ها مشاهده نشد. تورمالین در رگه‌ها غالباً به‌دو صورت ریزبلور و درشت‌بلور دیده می‌شود. انواع ریزبلور که ۷۰ درصد حجمی نمونه‌ها را به‌خود اختصاص می‌دهد، با اندازه‌ای کمتر از ۰/۵ میلیمتر بیشتر به‌حالت شعاعی انبوه شده و یک رخسارهٔ خورشیدی را به‌نمایش می‌گذارند. انواع درشت بلور تورمالین که اندازهٔ آن به ۱ میلیمتر می‌رسد، دارای چندرنگی مشخص وارون سبز-آبی بوده و به‌شکل‌های مختلفی حضور دارند، به‌طوری که بعضی از آن‌ها به‌شکل رگچه‌ای و برخی دیگر با کانی‌های کدر و گاهی به‌صورت دانه‌های کوارتز، همرشدی نشان می‌دهند. شکستگی‌های تورمالین غالباً با اکسیدهای آهن و کانی‌های کدر دیگر پر شده است. علاوه بر رگه‌های کوارتز-تورمالین، گرانیت‌های گرایزنی نیز حاوی مقدار قابل توجهی تورمالین‌اند که از لحاظ میزان قلع فقیرند. در این سنگ‌ها کوارتز و فلدسپار از کانی‌های اصلی و بیوتیت، موسکوویت، تورمالین، منازیت، آپاتیت، توپاز و فلوئوریت از سازاهای فرعی این سنگ‌ها محسوب می‌شوند. فلدسپارهای قلیایی به‌صورت ارتوز پرتیتی هستند و بیشتر به‌وسیلهٔ کانی‌های رسی، سریسیت و موسکوویت و گاهی به‌وسیلهٔ تورمالین جانشین شده‌اند. در این سنگ‌ها تورمالین پس از بیوتیت فراوان‌ترین کانی فرعی بوده و بیشتر روی فلدسپارها و به‌خرج آن‌ها تشکیل شده است.



شکل ۱ موقعیت مناطق مورد بررسی روی نقشهٔ زمین‌شناسی ایران از [۹].

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-31]

موقعیت زمین‌شناسی و سنگ شناسی نظام‌آباد

منطقهٔ نظام‌آباد با مختصات جغرافیایی ´۱۷ °۴۹ طول شرقی و ´۴۰ °۳۳ عرض شمالی در نقشهٔ ۱:۱۰۰۰۰۰ شازند اراک و در ۴۶ کیلومتری جنوب‌غرب شهرستان شازند واقع شده است (شکل ۱). این منطقه که بخش کوچکی از کمپلکس گرانیتوئیدی بروجرد را تشکیل می‌دهد، از لحاظ ساختاری در بخش شمالی زون سنندج- سیرجان واقع شده است، که به اعتقاد [۱۲] تکامل زمین ساختی آن به زایش اقیانوس نئوتتیس وابسته است. کمپلکس گرانیتوئیدی بروجرد در فیلیت‌های ژوراسیک نفوذ کرده و سنگ‌های دگرگونی مجاورتی از نوع هورنفلس و شیست لکه‌دار را در پیرامون خود به‌وجود آورده است. این کمپلکس با گسترش در حدود ۱۸۰ تا ۲۰۰ کیلومتر مربع به‌صورت کشیده و با روند شمال‌غرب ـ جنوب‌شرق رخنمون دارد و از نظر سنگ‌شناسی از سه واحد اصلی کوارتزدیوریت، گرانودیوریت و مونزوگرانیت که با دایک‌های اسیدی ، بازیک و حدواسط و نیز رگه‌های کوارتز- تورمالینی متعدد قطع شده است، تشکیل شده است. به اعتقاد [۱۲] ماگمای سازندهٔ این توده از نوع I ، آهکی- قلیایی و غنی از پتاسیم، متاآلومین تا کمی پرآلومین بوده که در یک محیط زمین ساختی وابسته به‌فرورانش در زمان ژوراسیک میانی تشکیل شده است. در منطقهٔ نظام‌آباد، از میان گروه‌های سنگی یاد شده، کوارتزدیوریت و گرانودیوریت برونزد دارند که با دایک‌های پگماتیتی و آپلیتی متعدد و رگه‌های کوارتز- تورمالینی کانی ساز حاوی تنگستن به‌صورت کانهٔ شئلیت قطع شده‌اند. (برای اطلاعات بیشتر سنگ‌شناسی، خواننده را به [۱۳] ارجاع می‌دهیم).

سرشتی‌های تورمالین در رگه‌های کوارتز- تورمالین تنگستن-دار نظام‌آباد

رگه‌های کوارتز- تورمالین در حوالی روستاهای نظام‌آباد، حسن‌آباد، روشت و فیزانه در واحد کوارتزدیوریت و گاهی در واحد گرانودیوریت رخنمون دارند، ولی به‌علت فراوانی و برونزد بیشتر در ناحیهٔ نظام آباد و وجود تونل‌های فراوان‌تر در این ناحیه تحت عنوان رگه‌های کوارتزـ تورمالینی نظام‌آباد از آن‌ها نام برده می‌شود. بخش بزرگ این رگه‌ها به‌وسیلهٔ پوشش خاکی پنهان مانده و ضخامت آن‌ها متغیر و در برخی از نواحی به‌حدود ۳ متر می‌رسد. بر اساس فراوانی کوارتز و تورمالین، اکسیدهای آهن و کربنات‌های مس، رنگ رگه‌ها از روشن (سفید) به‌علت فراوانی کوارتز، تا سرخ قهوه‌ای به‌علت وجود اکسیدهای آهن، سبزـ آبی به‌دلیل حضور کربنات‌های مس به‌ویژه مالاکیت و خاکستری تیره به‌علت فراوانی تورمالین بیشتر، نسبت به کوارتز، تغییر می‌کند. فراوانی کوارتز و تورمالین از نمونه‌ای به‌نمونهٔ دیگر متفاوت است به‌طوری که برخی از نمونه‌ها بیشتر از تورمالین تشکیل شده و می‌توانند به‌عنوان تورمالینیت در نظر گرفته شوند، در برخی دیگر از نمونه‌ها، کوارتز کانی اصلی است و تورمالین به‌مقدار جزئی این کانی را همراهی می‌کند و در پایان حالت‌های حدواسط این دو نیز به‌فراوانی قابل مشاهده‌اند.

به‌طور کلی رگه‌های کوارتزـ تورمالینی منطقه از نظر اقتصادی و وجود تنگستن می‌توانند به‌دو گروه اصلی رگه‌های کوارتز- تورمالینی کانی شده حاوی شئلیت (بارور) و رگه‌های کوارتز- تورمالینی عقیم که فاقد هرگونه کانه‌سازی هستند، تقسیم شوند. تورمالین همراه با کوارتز اصلی‌ترین و مهم‌ترین کانی باطله و شئلیت، ارسنوپیریت، پیریت، پیروتیت، کالکوپیریت، اسفالریت، کوولیت، مالاکیت، آزوریت، وگوتیت، بیسموتینیت و کاسیتریت اجزای کانه این رگه‌ها را تشکیل می‌دهند. عیار تنگستن در رگه‌های کوارتز- تورمالین از حداقل ۱۰ گرم در تن تا ۴۴۰۰ گرم در تن می‌رسد. کانی تورمالین با اندازه‌های مختلف با و حداکثر طول ۱۲ تا ۱۵ میلی‌متر و قطر ۵ تا ۷ میلی‌متر دیده شد. این کانی با ساختار منطقه‌ای، با رنگ قهوه‌ای پررنگ تا کم‌رنگ در مرکز تا آبی پررنگ در حاشیه به‌خوبی قابل مشاهده است [۱۴]. به اعتقاد [۷] یکی از ویژگی‌های تورمالین‌های گرمابی، منطقه‌بندی است که به‌دلیل تغییرات مداوم شرایط تشکیل، حاصل می‌شود.

روش آنالیز و منابع داده‌ها

داده‌های ریزپردازندهٔ الکترونی مورد استفاده در این کار پژوهشی از [۱۰، ۱۴] استفاده شده است. آنالیز نمونه‌های شاهکوه در آزمایشگاه کانی‌شناسی دانشگاه پل‌ساباتیه شهر تولوز فرانسه با ریزگمانهٔ Camebox Sx50 تجزیه شده‌اند، که شامل ۲۱ نقطه از تورمالین‌های گرانیت‌های گرایزنی، رگه‌های شبه پگماتیتی، میکروگرانیت‌ها لوکوکرات و رگه‌های کوارتز- تورمالین موجود در گرانیت شاهکوه و ماسه‌سنگ‌های سازند شمشک هستند. در مورد نمونه‌های نظام‌آباد نیز تعداد ۲۹ نقطهٔ تورمالین از نمونه‌های رگه‌های کوارتز- تورمالین و سنگ میزبان کوارتزدیوریتی در آزمایشگاه کانی‌شناسی شهر پل‌ساباتیه شهر

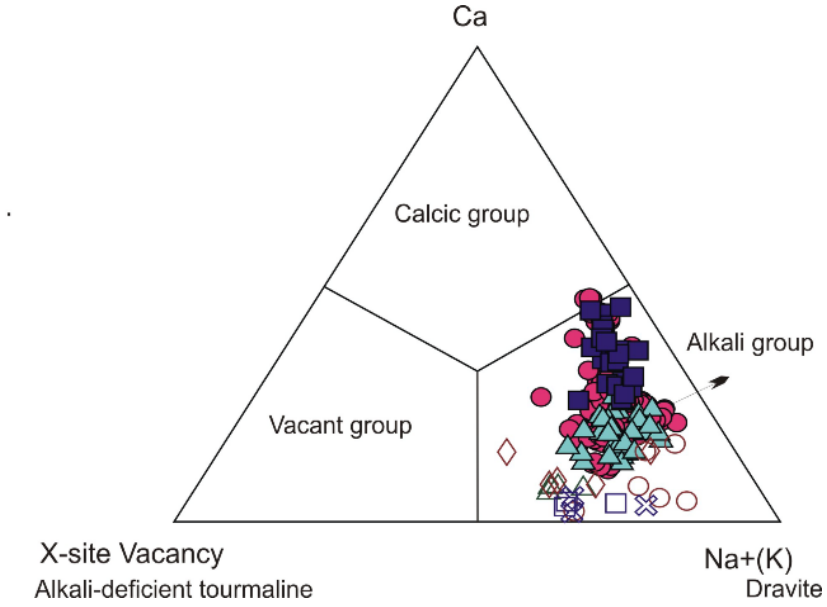
[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-31]

تولوز فرانسه به‌وسیلهٔ دستگاه ریزپردازندهٔ الکترونی Camebox Sx50 و بقیه در آزمایشگاه GFZ پوتسدام در آلمان با دستگاه Camebox Sx100 مورد آنالیز قرار گرفته‌است.

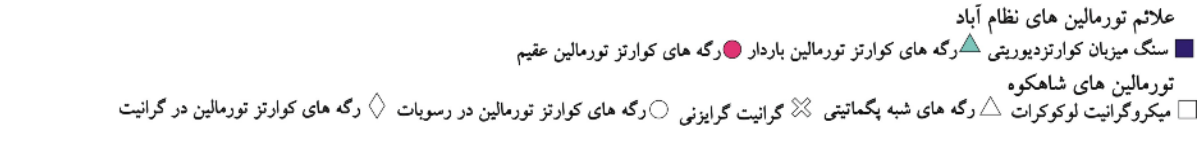
شناسایی نوع تورمالین بر اساس ترکیب شیمیایی آن

[۲] تورمالین‌ها را بر اساس مقادیر Ca، Na+(K) و نقصان یا تهیجای موقعیت X (X-site vacancy)[1]، به سه گروه تورمالین‌های کلسیک، قلیایی و انواعی که موقعیت X آن‌ها خالی است، تقسیم‌بندی کرده‌اند (شکل ۲). براساس این رده بندی تورمالین‌های هر دو منطقهٔ نظام‌آباد و شاهکوه به‌انواع قلیایی تعلق دارند، که این مسئله نشانگر بالا بودن مقدار Na و K موجود در جایگاه X، در مقایسه با مقدار Ca و مقدار کمبود جایگاه یادشده است. نکتهٔ مهم در مورد این نمودار عدم وجود تفاوت چشمگیر در مقدار کمبود در موقعیت X در نمونه‌های نظام‌آباد است، به‌طوریکه بیشتر آن‌ها دارای مقداری کمبود در جایگاه X در حدود ۲۵ درصدند ولی همین نمونه‌ها دارای تفاوت چشمگیری از ۲۰ تا ۵۵ درصد در مقدار کلسیم هستند، که این گستردگی در مقدار کلسیم را می‌توان با جانشینی‌هایی با مشارکت Ca تفسیر کرد. ولی در مورد نمونه‌های شاهکوه وضعیتی برعکس دیده می‌شود به‌طوری که این نمونه‌ها دارای مقدار کلسیم کمتر (در حدود ۱۵ درصد) با گستردگی خیلی کمتر و دارای مقدار کمبود در موقعیت X بالاتر و با طیف گسترده‌تری از ۱۰ تا ۴۵ درصدند.

برای بررسی تغییرات ترکیبی در نسبت‌های Fe، Mg، Na و Ca و تشخیص نوع تورمالین‌ها از نمودارهای دوتایی Na/(Na+Ca) و Fe/(Fe+Mg) [۱۵] استفاده شده‌است. در نمودار مورد بررسی (شکل ۳) نمونه‌های مورد بررسی نظام‌آباد در گسترهٔ بین شورل و دراویت با تمرکز بیشتر در نیمهٔ وابسته به دراویت قرار گرفته‌اند. در این نمودار، تورمالین‌های سنگ میزبان کوارتزدیوریتی در مقایسه با نمونه‌های دیگر دارای غنی‌شدگی نسبی از عناصر Ca و Mg هستند. ولی بیشتر نمونه‌های منطقهٔ شاهکوه بر خلاف نظام‌آباد، در گسترهٔ شورل قرار می‌گیرند و در مقایسه با تورمالین‌های نظام‌آباد دارای عدد Fe بالاترند، در این میان نیز تورمالین‌های گرانیت گرایزنی و رگه‌های کوارتز- تورمالین با میزبانی گرانیت با عدد Fe بالاتری دیده شده‌اند.

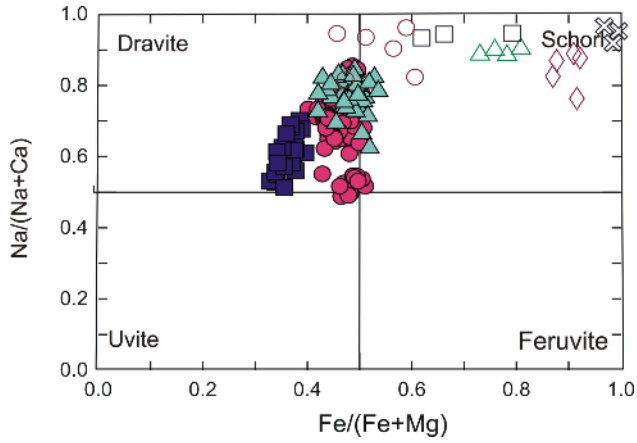


شکل۲ نمودار مثلثی Ca-X-sitevacancy-Na+(K) و موقعیت نمونه‌های شاهکوه و نظام‌آباد روی آن [۲].



1 - X-site vacancy = 1- (Ca + Na + K)

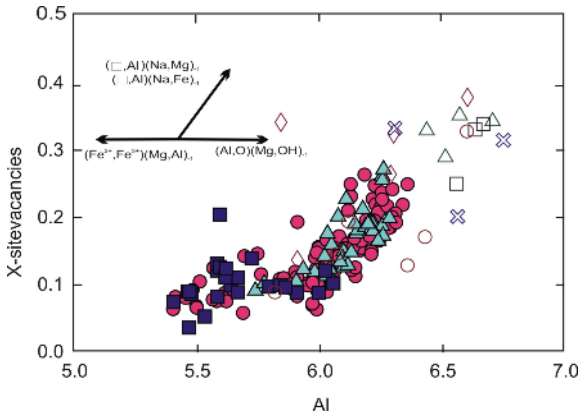
[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-31]



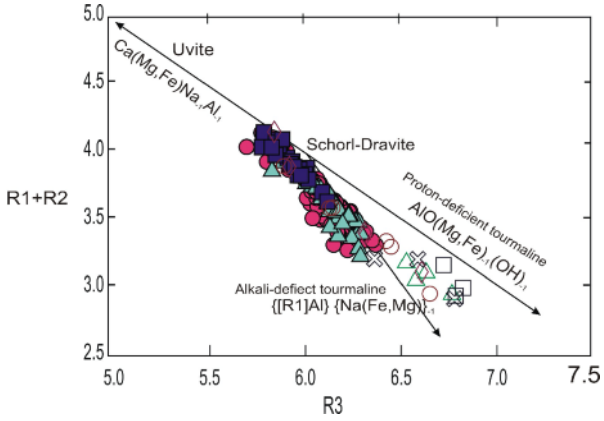
شکل ۳ نمودار Fe/ (Fe+Mg) نسبت به Na/(Na+Ca)، از [۱۵] و موقعیت نمونه‌های مورد بررسی روی آن (علائم مانند شکل ۲).

واکنش‌های جانشینی در ترکیب تورمالین

واکنش‌های جانشینی در ترکیب تورمالین می‌تواند به‌صورت تبادل هم ظرفیتی در یک موقعیت خاص (مانند جانشینی Mg به‌جای Fe^{2+} در موقعیت Y) و یا به‌صورت تبادل چند ظرفیتی در چندین موقعیت (مانند جانشینی زوجی اوویت (Uvite) (Ca-Mg به‌جای Na-Al)، که دو موقعیت X و Z را درگیر می‌کند)، انجام شود. به‌منظور بررسی واکنش‌های جانشینی ترکیب تورمالین‌ها از نمودارهای مختلف (شکل ۴ تا ۸) استفاده کرده‌ایم.

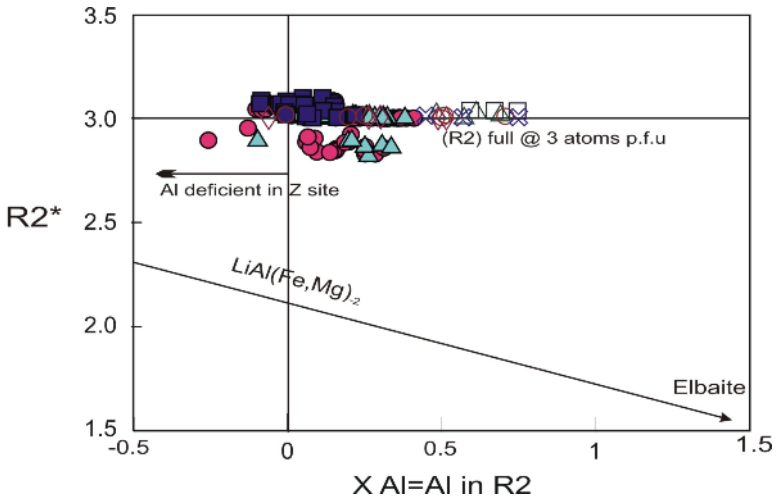


شکل ۴ موقعیت تورمالین‌های مورد بررسی روی نمودار Al_{tot} نسبت به X-site vacancy، [۱۶]. (علائم مانند شکل ۲).

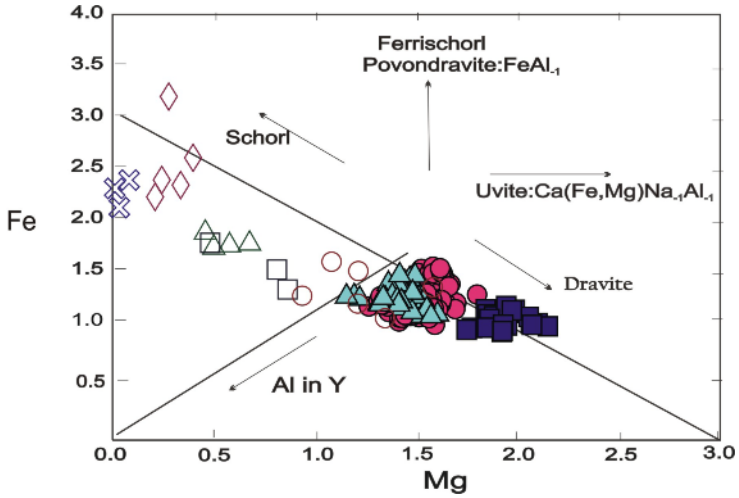


شکل ۵ نمونه‌های مورد بررسی روی نمودارR1+R2 نسبت به R3، [۱۷]. (علائم مانند شکل ۲).

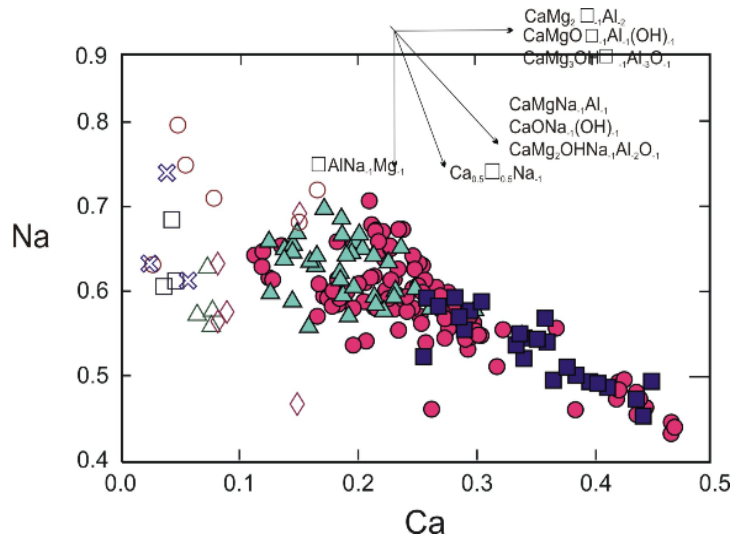
[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-31]



شکل۶ موقعیت تورمالین‌های مورد بررسی روی نمودار *R2 نسبت به X Al، [۷]. (علائم مانند شکل ۲)



شکل ۷ موقعیت تورمالین‌های مورد بررسی روی نمودار Fe نسبت به Mg ، ترکیبات شورل- دراویت روی خط ∑(Fe+Mg) = 3 قرار می‌گیرند [۷]. (علائم مانند شکل ۲).



شکل ۸ موقعیت تورمالین‌های مورد بررسی روی نمودار Ca نسبت به Na، [۱۸] (علائم مانند شکل ۲).

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-31]

تغییرات تهیجاهای X نسبت به Al_{tot} از [۱۶]، در نمونه-های مورد بررسی در شکل ۴ تصویر شده است. بر اساس این نمودار، در نمونه‌های وابسته به‌رگه‌های کوارتز- تورمالین باردار و بیشتر تورمالین رگه‌های عقیم نظام‌آباد، واکنش تهیجاهای قلیایی‌ها با فرمول $^{-1}\{(Mg,Fe)Na\}\{Al,[\ ]\}$، دیده می‌شود، ولی در بقیهٔ نمونه‌ها که به‌سمت Al و کاهش در جایگاهِ X کمتر تمایل دارند، به‌دلیل وجود Fe^{3+}، واکنش جانشینی $^{-1}\{Mg,Al\}\{Fe^{2+},Fe^{3+}\}$ مؤثر است (منظور از [ ]، تهیجاهای قلیایی‌هاست).

از میان نمونه‌های شاهکوه، نیز تورمالین‌های گرانیت گرایزنی، رگه‌های شبه پگماتیتی، میکروگرانیت‌های لوکوکرات و تا حدودی رگه‌های کوارتز- تورمالین موجود در گرانیت، تحت تأثیر هر دو واکنش جانشینی خالی شدن از قلیایی‌ها و پروتون زدایی یا تهی شدن از پروتون، (تبادل O-OH) با فرمول $^{-1}\{(Mg,Fe)OH\}\{AlO\}$، قرار گرفته‌اند، ولی تورمالین رگه-های کوارتز- تورمالین رخنمون یافته در سنگ‌های ته‌نشستی، متأثر از واکنش جانشینی تهی‌شدن از قلیایی‌ها بوده و بیشترین تأثیر را از این واکنش دارند.

[۱۷] به‌منظور بررسی واکنش‌های جانشینی ترکیب‌های تورمالین‌ها از نمودار $^{۳}R1+^{2}R2$ نسبت به $^{4}R3$ استفاده کرده است (شکل ۵). روی این نمودار ترکیب شورل- دراویت نزدیک به‌مرکز نمودار با مقدار $R1 + R2 = 4$ و $R3 = 6$ قرار می‌گیرد و همهٔ بردارها با مولفهٔ افزایشی شورل- دراویت آغاز می‌شوند. این وضعیت اجازه می‌دهد که تبادل اوویت با فرمول $^{-1}\{Ca(Fe,Mg)\}\{NaAl\}$، تبادل پروتون‌زدایی یا ترکیب اُلنیت، $^{-1}\{Fe^{3+}O\}\{Fe^{2+}OH\}$ و تبادل تهی شدن از قلیایی را بررسی کنیم. چنانکه مشاهده می‌شود، در نمونه‌های وابسته به-منطقهٔ نظام‌آباد بیشتر تورمالین‌های سنگ میزبان کوارتز دیوریتی و تعدادی از تورمالین‌های رگه‌ها، پیش از نقطهٔ شورل- دراویت قرار می‌گیرند، که نشان می‌دهد واکنش مؤثرتر بر این تورمالین‌ها، اوویت است، ولی بیشتر نمونه‌های رگه‌ها و تعدادی از سنگ میزبان پس از نقطهٔ شورل- دراویت و در راستای بردار تهی شدن از قلیایی‌ها قرار گرفته‌اند. در مورد نمونه‌های شاهکوه بیشتر نمونه‌ها جز تعداد کمی از رگه‌های کوارتز-تورمالین پس از نقطهٔ شورل- دراویت قرار گرفته‌اند و نمونه‌های رگه‌های شبه پگماتیتی و میکروگرانیت‌ها به‌خوبی بین دو بردار تهیجاها و پروتون‌زدایی قرار گرفته‌اند که نشان دهندهٔ تأثیر انبوهی این دو بردار است، ولی نمونه‌های رگه‌های کوارتز- تورمالین و گرانیت گرایزنی در راستای بردار پروتون-زدایی قرار گرفته‌اند که نشان دهنده تأثیر بیشتر این بردار نسبت به‌بردار تهیجای از قلیایی‌هاست.

در نمودار ^{-5}XAl-*R2 از [۷]، کلیهٔ نمونه‌ها جز تعدادی از نمونه‌های وابسته به‌رگه‌های نظام آباد، روی خط $^{6}R2^* = 3apfu^{7}$ قرار گرفته (شکل ۶) و نشان می‌دهند که جایگاه Y آن‌ها به‌طور کامل پر است، زیرا اگر نمونه‌ای دارای مقدار *R2 کمتر از (apfu) ۳ باشد، در جایگاه Y دارای نقصان است. نقصان دراین نمونه‌ها را تا حدودی می‌توان با فعالیت مولفهٔ جانشینی البائیت، $^{2+}_{-2}LiAl(Fe,Mg)$، توجیه کرد، یعنی عملکرد این جانشینی باعث می‌شود که Li و Al، جایگزین مقداری از Fe و Mg موجود در موقعیت Y شود، ولی چون Li در آنالیزهای ریزگمانه اندازه‌گیری نشده است، به‌نظر می‌رسد که در موقعیت Y دارای کم و کاستی دیده می‌شود.

تغییرات Fe نسبت به Mg از [۷] در شکل ۷ مورد بررسی قرار گرفته است. در این نمودار ترکیب شورل- دراویت روی خط $\sum(Fe + Mg) = 3$ قرار می‌گیرد و همهٔ نمونه‌هایی که زیر این خط قرار دارند دارای $\sum(Fe + Mg)<3$ بوده و به‌صورت جانشینی Al در موقعیت Y در می‌آیند، چنانکه از نمودار پیداست هرچه مقدار $\sum(Fe + Mg)$ کمتر باشد، میزان جانشینی Al در موقعیت Y بیشتر می‌شود. در بالای خط شورل- دراویت نیز مولفهٔ تبادلی پوندراویت یا فریشورل با فرمول $^{-1}FeAl$ و اوویت وجود دارند. بر اساس این نمودار تعدادی از نمونه‌های سنگ میزبان و رگه‌های باردار نظام‌آباد و تعدادی از نمونه‌های رگه‌های شاهکوه دارای کاهش Al در

2 - R2 = Fe + Mg + Mn
3 - R1 = Ca + Na
4 - R3 = Al + 1.33Ti

5 - X Al = Al in Y = atoms Al p.f.u + 1.33 atoms Ti p.f.u + atoms Si p.f.u
6 - R2* = Fetotal apfu + Mg apfu+ Mn apfu+ Al in Yapfu
7 - Apfu = Atoms Per Formula Unites

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-31]

موقعیت Z و عدم حضور Al در موقعیت Y هستند. در واقع کاستی در Z با جانشینی‌های یوویت و فریشورل یعنی جانشینی Fe^{3+} به‌جای Al به‌وجود می‌آید.

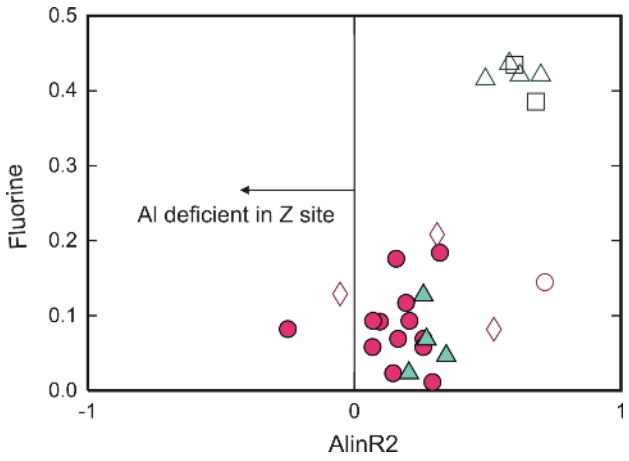
به‌منظور بررسی غنی شدگی نسبی برخی از نمونه‌ها از Ca و تعیین واکنش‌های جانشینی مؤثر، از نمودار Na نسبت به Ca [۱۸] استفاده می‌کنیم (شکل ۸). بر اساس این نمودار مقدار Ca پایین (در بیشتر آن‌ها کمتر از 0.1 apfu) و گستردگی بیشتر Na نمونه‌های شاهکوه نشان دهندهٔ فعالیت یک واکنش جانشینی با حضور Ca نبوده است، بلکه مولفهٔ جانشینی خالی شدن از قلیایی‌ها واکنش اصلی است. در نمونه‌های نظام‌آباد چنانکه در شکل ۲ نیز دیده می‌شود، نمونه‌های سنگ میزبان کوارتزدیوریتی و تعداد زیادی از نمونه‌های رگه‌های باردار، دارای Ca بالاتر و Na پایین‌تری بوده و بر اساس شکل ۹، برای تشکیل چنین تورمالین‌هایی، مولفهٔ $\{CaMg\}\{NaAl\}_{-1}$ و $\{CaO\}\{NaOH\}_{-1}$ و $\{CaMg_2OH\}\{Na_{-1}Al_{-2}O_{-}$ مؤثرند. ولی در مورد نمونه‌های رگه‌های عقیم و تعدادی از رگه‌های باردار که روند متفاوتی به‌نمایش می‌گذارند، مولفهٔ مسؤل، تغییرات $\{CaMg_2\}\{\ \}_{-1}Al_{-2}\}$، است.

بحث و بررسی

به‌اعتقاد [۷] تورمالین‌های ماگمایی اصولاً خود شکل‌اند و وجود این تورمالین‌ها در گرانیت نشانهٔ روشنی است از غنی بودن ماگمای خاستگاه آن گرانیت از B. به‌اعتقاد این پژوهشگران در صورتی که همهٔ شرایط لازم برای تشکیل تورمالین در گرانیت مانند پرآلومین بودن (A/CNK > 1)، حضور Fe-Mg < 2 %wt و شرایط اسیدی (PH <6.5) فراهم باشد، اگر مذاب مورد نظر غنی از B باشد ($B_2O_3 \approx 2$ wt%)، تورمالین‌های ماگمایی خود شکل بدون منطقه‌بندی شکل می‌گیرند.

تورمالین‌های گرمابی در مقایسه با تورمالین‌های ماگمایی دارای مقدار Al پایین‌تر [۱۵] و کاستی کمتر در موقعیت X [۷] هستند، با توجه به‌شکل ۴، همهٔ تورمالین‌های منطقهٔ نظام‌آباد و تورمالین‌های رگه‌های کوارتز- تورمالین و یکی از نمونه‌های گرانیت گرایزنی شاهکوه که به‌سمت Al و کاهش در جایگاه X کمتر گرایش دارند، از گرماب‌ها به‌وجود آمده‌اند و شرایط تشکیل بقیهٔ نمونه‌ها به‌شرایط ماگمایی نزدیک می‌شود. همچنین به‌اعتقاد [۷] ترکیب تورمالین‌های ماگمایی در طول و بین بردارهای تهی شده از قلیایی‌ها و پروتون‌زدایی، مشتق شده از مولفهٔ افزایشی شورل- دراویت، قرار می‌گیرند، در حالیکه ترکیب تورمالین‌های گرمابی به‌سمت خارجی این بردارها تمایل دارند. بنابراین و با توجه به‌شکل ۵ کلیهٔ نمونه‌های نظام‌آباد به‌علاوهٔ نمونه‌های رگه‌های کوارتز- تورمالین و گرانیت گرایزنی که به‌سمت خارجی این دو بردار و ترکیب شورل- دراویت تمایل دارند، در شرایط گرمابی به‌وجود آمده‌اند و بقیهٔ نمونه‌ها به‌طریق ماگمایی تشکیل شده‌اند. همچنین تورمالین‌های ماگمایی در مقایسه با تورمالین‌های گرمابی عدد آهن (Fe/(Fe+Mg))، بالاتری دارند، بنابراین با توجه به‌شکل ۳، کلیه تورمالین‌های نظام‌آباد و تورمالین‌های رگه‌های کوارتز- تورمالین رخنمون یافته در سنگ‌های ته نشستی شاهکوه که دارای عدد آهن پایین‌تری هستند در شرایط گرمابی و بقیهٔ نمونه‌های شاهکوه در شرایط ماگمایی تشکیل شده‌اند. از طرف دیگر به‌اعتقاد [۱۹] ناهمخوانی شدید بین Fe^{2+} و Mg و بالا بودن مقدار Fe^{2+} نسبت به Mg در تورمالین از نشانه‌های تشکیل آن به‌وسیلهٔ شارهٔ ماگمایی است. با توجه به‌شکل ۷ در نمونه‌های نظام‌آباد ناهمخوانی چشمگیر بین Fe و Mg دیده نمی‌شود و با یک مقدار Fe تقریباً ثابت، مقدار Mg در تمام نمونه‌ها بالاست. در مورد نمونه‌های شاهکوه در همهٔ نمونه‌ها جز رگه‌های کوارتز- تورمالین موجود در ته نشست‌ها، مقدار Fe نمونه‌ها نسبت به‌مقدار Mg آن‌ها بالاتر است، ولی بین این نمونه‌ها فقط در نمونه‌های رگه‌های شبه پگماتیتی و میکروگرانیت‌های لوکوکرات ناهمخوانی مشخص بین Fe و Mg دیده می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کلیهٔ تورمالین‌های نظام‌آباد و تورمالین‌های رگه‌های رخنمون یافته در سنگ‌های ته نشستی شاهکوه احتمالاً در شرایط گرمابی به‌وجود آمده‌اند. از دیگر دلایل ماگمایی بودن تورمالین‌ها مقدار F بالاتر (بیشتر از ۰/۵ درصد) در مقایسه با تورمالین‌های گرمابی (۰/۲ تا ۰/۵ درصد) است [۷]. با توجه به‌شکل ۹، کلیهٔ تورمالین‌های نظام‌آباد و تورمالین‌های رگه‌های کوارتز- تورمالین شاهکوه با مقدار F، کمتر از ۰/۳ درصد، به‌طریق گرمابی به‌وجود آمده‌اند و بقیهٔ نمونه‌ها با دارا بودن F بیشتر از ۰/۳ در شرایط ماگمایی تشکیل شده‌اند.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-31]



شکل۹ موقعیت تورمالین‌های مورد بررسی روی نمودار فلورین نسبت به‌میزان Al در موقعیت Y [۷] (علائم مانند شکل ۲)؛ Al in R2 = Al + 1.33Ti + Si - 12.

بنابراین در شاهکوه، تورمالین‌های رگه‌های کوارتز-تورمالین رخنمون یافته در سنگ‌های ته‌نشستی، به‌دلیل پایین بودن مقدار F، Al، نسبت Fe/(Fe + Mg)، کاستی در مکان X و قرارگیری بین بردارهای تهیجای قلیایی‌ها و پروتون‌زدایی در شرایط گرمابی به‌وجود آمده‌اند. تورمالین رگه‌های شبه پگماتیتی به‌دلیل بالا بودن مقدار F، Al، و Fe/(Fe + Mg)، قرار گرفتن بین بردارهای تهیجاهای قلیایی و پروتون‌زدایی به‌طریق ماگمایی به‌وجود آمده‌اند. تورمالین‌های گرانیت‌های گرایزنی به‌دلیل بالا بودن مقدار Fe/(Fe + Mg)، کاستی در جایگاه X و بالا بودن مقدار Al دارای ویژگی‌های تورمالین‌های ماگمایی بوده، و به‌دلیل قرار نگرفتن همهٔ نمونه‌های بین دو بردار تهیجای از قلیایی و پروتون‌زدایی و ناهمخوانی Fe و Mg دارای ویژگی‌های تورمالین‌های گرمابی هستند، بنابراین ویژگی‌های دوگانه دارند. تورمالین‌های رگه‌های کوارتز-تورمالین موجود در گرانیت به‌دلیل قرار گیری در بخش بیرونی بردارها، ناهمخوانی Fe و Mg، پایین بودن مقدار F و Al، دارای سرشتی‌های گرمابی، و به‌دلیل بالا بودن مقدار Fe نسبت به Mg و ترکیب شورلی دارای ویژگی‌های تورمالین‌های ماگمایی نیز هستند. تورمالین‌های موجود در میکروگرانیت‌های لوکوکرات با مقدار بالای F و Al ، ناهمخوانی بین Fe و Mg و قرار گیری بین بردارهای تهیجاهای قلیایی‌ها و پروتون‌زدایی، دارای ویژگی‌های تورمالین‌های ماگمایی و از طرفی به‌دلیل مقدار بالای Mg نسبت به‌نمونه‌های دیگر و تشکیل تورمالین‌ها به‌صورت بین شبکه‌ای و بر روی فلدسپارها دارای ویژگی‌های تورمالین‌های گرمابی است. در مقطع نازک، کانی تورمالین روی فلدسپارها و یا به‌صورت بین شبکه‌ای، و یا به‌صورت رگچه‌های بسیار ظریفی با این کانی دیده می‌شوند که در طول آن‌ها تورمالین‌های بسیار ریز متبلور شده‌اند، که به‌اعتقاد [۱۵] نشان دهندهٔ جدایش تأخیری یک شارهٔ غنی از B از گرانیت بوده و نشان دهندهٔ تشکیل در یک سیستم بسته با شرایط ماگمایی-گرمابی است [۲۰].

در تودهٔ گرانیتوئیدی شاهکوه همهٔ واحدهای اصلی جز برونبوم‌های ریزدانه از لحاظ شیمیایی دارای $Al_2O_3/(Na_2O + CaO + K_2O)>1$ و $Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)>1$ (ترکیب پرآلومین ضعیف)، به‌جز گرانیت‌های گرایزنی همهٔ واحدهای این توده دارای Fe+Mg>2 %wt و حداکثر مقدار B2O3، ۰٫۰۶ wt% است [۱۰]. بنابراین به‌اعتقاد [۷] تودهٔ گرانیتوئیدی شاهکوه از نظر مقدار Al و اجزای فرومنیزین شرایط لازم برای تشکیل تورمالین را داراست، ولی هیچکدام از واحدهای سنگی مقدار B لازم برای تشکیل تورمالین را نداشته‌اند و حتی در برخی از نمونه‌ها مقدار B آن‌ها به‌حدی پایین بود که دستگاه قادر به‌اندازه‌گیری آن نبوده است [۱۰]. نتیجهٔ این کمبود یا نبود بُر در ماگمای سازنده، عدم وجود تورمالین ماگمایی خودشکل در واحدهای سنگی منطقه (جز در رگه‌های شبه‌پگماتیتی) است. بنابراین می‌توان گفت که مقدار بُر ماگمای سازندهٔ این باتولیت خیلی جزئی بوده است و بُر لازم برای تشکیل تورمالین‌ها از یک خاستگاه خارجی تأمین شده است. به‌اعتقاد [۲۱] تورمالین‌های وابسته به‌محیط‌های گرانیتی تمایل به‌سمت عضو انتهائی شورل داشته و نسبت‌های Na/(Na + Ca) و Fe/(Fe + Mg) بالایی دارند،

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-31]

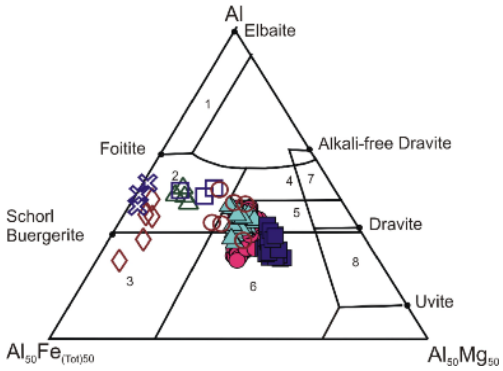
ولی تورمالین‌های وابسته به‌محیط‌های دگرگونی و ته‌نشستی دارای ترکیب حد واسطی بین دو عضو انتهائی دراویت و شورل هستند. بنابراین با توجه به‌نمودار شکل ۳ شاید بتوان گفت که همهٔ تورمالین‌های شاهکوه به‌محیط‌های گرانیتی وابسته‌اند، به‌جز نمونه‌های رگه‌های کوارتز- تورمالین رخنمون یافته در سنگ‌های ته‌نشستی سازند شمشک که با محیط‌های ته‌نشستی در ارتباط دارند.

بر اساس نمودار مثلثی $Al_{50}Fe\text{-}Al\text{-}Al_{50}Mg$ (شکل ۱۰)، و Ca-Fe(tot)-Mg (شکل ۱۱)، از [۲۱]، ترکیب تورمالین‌های شاهکوه به‌نوع شورل نزدیک‌تر بوده و غنی از آهن‌اند. به‌علاوه ترکیب این تورمالین‌ها در هر دو مثلث، در ناحیهٔ گرانیتوئیدهای فقیر از Li و پگماتیت‌ها و آپلیت‌های وابسته به آن قرار می‌گیرند. به‌اعتقاد [۲۲] هر چه از سمت شرایط ماگمایی به‌سمت شرایط گرمابی نزدیکتر می‌شویم، تورمالین در مقدار خیلی پایین‌تر B و طیف گسترده‌تری از ترکیب‌ها نسبت به‌شرایط ماگمایی به‌وجود می‌آید. به‌عنوان مثال در آزمایش‌های شبه جامدی مقدار بخار آبی بُر که برای اشباع مجموعهٔ AFM پرآلومین از تورمالین لازم است، از حدود ۲٫۲% B_2O_3 در ۷۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد به ۰٫۲ % در ۵۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. با توجه به این نمودار دلیل ویژگی‌های دوگانهٔ تورمالین‌های گرانیت گرایزنی و رگه‌های رخنمون یافته در گرانیت‌ها، خاستگاه شارهٔ مسؤل گرایزنی شدن و تورمالین‌زایی از ماگمای اصلی سازندهٔ توده گرانیتوئیدی و بدون دخالت یک خاستگاه خارجی مانند سنگ‌های ته نشستی بوده و به‌همین دلیل بر خلاف تورمالین‌های گرمابی دارای Fe بالایی هستند. در مورد رگه‌های رخنمون یافته در سنگ‌های ته‌نشستی مجاور توده که بیشتر در ناحیهٔ متاپلیت‌ها و متاپسامیت‌های همراه با یک فاز اشباع از Al و متاپلیت‌ها و متاپسامیت‌های بدون فاز غنی از Al، قرار گرفته‌اند و نسبت به‌بقیهٔ نمونه‌ها از قطب شورل دورترند، شرایط تشکیل آن‌ها با نظریهٔ [۷]، همخوانی دارد. به‌اعتقاد این پژوهشگران، رگه‌های گرمابی از جدایش در سیستم‌های بسته و یا تغییرات فازی دیگر به‌وجود نیامده‌اند، بلکه در اثر اختلاط دو شاره یا دو خاستگاه که یکی باعث تأمین B و دیگری باعث تأمین عناصر Fe و Mg مورد نیاز تورمالین شده تشکیل شده‌اند. بنابراین احتمالاً این رگه‌ها در اثر اختلاط دو شارهٔ ماگمایی و شارهٔ ریشه گرفته از ته نشست‌های سازند شمشک به‌وجود آمده‌اند. تورمالین‌های رگه‌های شبه پگماتیتی، نیز بنا بر نظر [۱۹]، به‌دلیل قرارگیری در ناحیهٔ گرانیتوئیدها، احتمالاً به‌طریق ماگمایی تشکیل شده‌اند، احتمالاً این رگه‌ها پس از نفوذ تودهٔ اصلی گرانیتی در اثر نفوذ دوبارهٔ ماگما و تزریق آن در تودهٔ اصلی به‌وجود آمده‌اند. تورمالین‌های میکروگرانیت‌های لوکوکرات با اینکه از جمله تورمالین‌های درون گرانیتی به‌حساب می‌آیند و باید در ناحیه گرانیتوئیدها قرار گیرند، ولی به‌دلیل تشکیل در یک شرایط حدواسط، مقدار Mg آن‌ها بیشتر از مقداری است که برای تورمالین‌های ماگمایی انتظار می‌رود، و برخی از آن‌ها در ناحیهٔ متاپلیت‌ها قرار می‌گیرند.

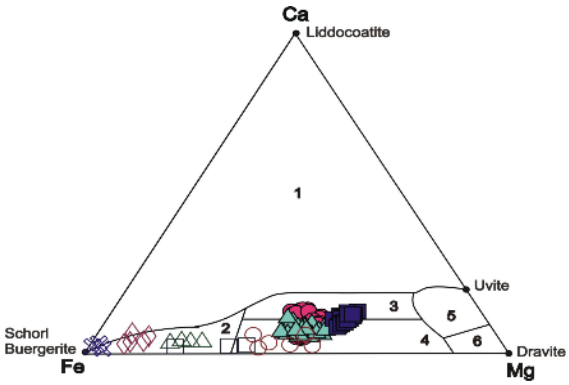
تورمالین‌های نظام‌آباد به‌دلیل منطقه‌بندی کوچک مقیاس، پایین بودن مقدار F، Fe/(Fe + mg)/Al کاستی کمتر در جایگاه X، تمایل به‌سمت بیرونی بردارهای تهیجاهای از قلیایی‌ها و پروتون‌زدایی، و ناهمخوانی بین Fe و Mg در شرایط گرمابی به‌وجود آمده‌اند.

به‌اعتقاد [۱۳]، کمپلکس گرانیتوئیدی بروجرد از لحاظ شیمیایی شبه آلومین (واحد کوارتزدیوریت) تا حدودی پرآلومین (گرانودیوریت و مونزوگزانیت) با مقادیر(ASI = 1/1 -1) است، که بنابر نظر [۷]، واحد کوارتزدیوریتی نظام‌آباد مقدار Al لازم برای تشکیل تورمالین در درون خود توده و در رگه‌های کوارتز-تورمالین ندارد. همچنین با وجود مقدار B_2O_3 سنگ کل واحد کوارتزدیوریت (۰.۰۰۲۷ تا ۰٫۰۰۳ درصد وزنی)، و عدم وجود تورمالین‌های اولیه، به این نتیجه می‌رسیم که این واحد مقدار B لازم برای تشکیل تورمالین در درون توده و در رگه‌ها را نیز دارا نیست [۱۷] و با توجه به‌مقدار FeO+MgO>10 % در این واحد می‌توان گفت که، مقدار کافی Fe و Mg برای تشکیل تورمالین وجود دارد و در نتیجه باید خاستگاه B و Al مورد نیاز برای تشکیل تورمالین را یک خاستگاه خارجی در نظر بگیریم. ترکیب تورمالین‌های نظام‌آباد روی خط دراویت- شورل با تمایل به‌سمت قطب دراویت، و در نواحی متاپلیت‌ها و متاپسامیت‌های بدون فاز غنی از Al؛ سنگ‌های کوارتز-تورمالینی غنی از Fe^{3+}، سنگ‌های آهکی سیلیکاتی و متاپلیت‌ها قرار می‌گیرد (گسترهٔ ۵ و ۶ شکل ۱۰ و گسترهٔ ۳ و ۴ شکل ۱۱)، که مؤید ارتباط این نمونه‌ها با چنین محیط‌ها است. به این دلیل که تورمالین‌های وابسته به‌محیط‌های دگرگونی و ته‌نشستی دارای ترکیب حدواسطی بین دو عضو انتهائی دراویت و شورل هستند [۱۹]، بنابراین تورمالین‌های منطقهٔ نظام‌آباد به‌محیط‌های ته‌نشستی و دگرگونی وابسته‌اند. به‌اعتقاد [۲۳]، غنی بودن تورمالین‌ها از Mg (دراویت) معمولاً به‌ریشه گرفتن شاره‌های سازندهٔ آن‌ها از سنگ‌های ته نشستی و دگرگونی و ورود Mg از آن‌ها به‌درون تورمالین نسبت داده می‌شود.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-31]



شکل۱۰ نمودار مثلثی $Al_{50}Fe$-Al-$Al_{50}Mg$ ،[۲۱] و موقعیت نمونه‌های مورد بررسی روی آن. اعداد در نمودار: ۱- گرانیتوئیدهای غنی از Li و پگماتیت و آپلیت‌های وابسته به آن ۲- گرانیتوئیدهای فقیر از Li و پگماتیت و آپلیت‌های وابسته به آن ۳-سنگ‌های کوارتز-تورمالینی غنی از Fe^{3+} و گرانیت‌های گرمابی دگرسان ۴- متاپلیت‌ها و متاپسامیت‌های همراه با یک فاز اشباع از Al ۵-متاپلیت‌ها و متاپسامیت‌های بدون فاز غنی از Al ۶-سنگ‌های کوارتز-تورمالینی غنی از Fe^{3+} ،سنگ‌های کالک سیلیکاته و متاپلیت‌ها ۷-الترامافیک‌های دگرگون شده با میزان Ca کم و متاسدیمنت‌های غنی از Cr و V ۸-کربنات‌ها و پیروکسینیت‌های دگرگون شده. (علائم مانند شکل ۲).



شکل ۱۱ نمودار مثلثی Ca-Fe(tot)-Mg از [۲۱]. اعداد در نمودار: ۱- گرانیتوئیدهای غنی از Li و پگماتیت و آپلیت‌های وابسته به آن ۲- گرانیتوئیدهای فقیر از Li و پگماتیت و آپلیت‌های وابسته به آن۳-متاپلیت‌های غنی از Ca، متاپسامیت‌ها و سنگ‌های آهکی سیلیکاتی ۴-متاپلیت-های فقیر از Ca، متاپسامیت‌ها و سنگ‌های کوارتز-تورمالینی ۵- کربنات‌های دگرگون‌شده ۶-الترامافیک‌های دگرگون‌شده. (علائم همانند شکل ۲).

برداشت

ترکیب کلیهٔ تورمالین‌های منطقهٔ نظام‌آباد بین دو عضو انتهائی شورل و دراویت، با تمایل به‌سمت قطب دراویت قرار می‌گیرند و بیشتر از نوع قلیایی هستند. قرارگیری این تورمالین‌ها در گسترهٔ متاپلیت‌ها نشان می‌دهد که سنگ‌های تهنشستی دگرگون شدهٔ منطقه نیز احتمالا در خاستگاه شاره‌های تشکیل دهندهٔ آن‌ها موثر بوده‌اند. همچنین ترکیب کلیهٔ تورمالین‌های شاهکوه نیز بین دو عضو انتهائی شورل و دراویت، ولی با تمایل زیاد به‌قطب شورل و در رده تورمالین‌های قلیایی قرار می‌گیرند. از این میان تورمالین‌های موجود در رگه‌های شبه پگماتیتی به-طریق ماگمایی تشکیل شده‌اند. تورمالین‌های گرانیت‌های گرایزنی و رگه‌های کوارتز- تورمالین رخنمون یافته در تودهٔ گرانیتی دارای خصوصیات تورمالین‌های گرمابی و ماگمایی بوده و با شارهٔ گرمابی ریشه گرفته از ماگمای اصلی توده، و تورمالین‌های میکروگرانیت‌های لوکوکرات نیز در یک شرایط حدواسط گرمابی- ماگمایی به‌وجود آمده‌اند.

تورمالین‌های رگه‌های کوارتز- تورمالین رخنمون یافته در سنگ‌های تهنشستی نیز به‌تورمالین‌های نظام‌آباد شباهت دارند و در شرایط گرمابی به‌وجود آمده‌اند.

مراجع

[1] Foit F.F.Jr., Rosenberg P.E., "*Coupled substitutions in the tourmaline group*":Contr. Mineralogy Petrology, 62 (1977) 109-127.

[2] Hawthorne F.C., Henry D.J., "*Classification of the minerals of the tourmaline group*". European Journal of Mineralogy 11 (2) (1999) 201-215.

[3] Slack J.F., "*Tourmaline associations with hydrothermal ore-deposits*". In: Grew, E.S.,

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-31]

Anovitz, L.M. Eds., Boron: mineralogy, petrology and geochemistry. Rev. Mineral., 33, Mineral. Soc. Amer. (1996) 559–643.

[4] Henry D.J., Dutrow B.L., "*Metamorphic tourmaline and its petrologic applications"*. In: Grew, E.S., Anovitz, L.M. Eds., Boron: mineralogy, petrology and geochemistry. Rev. Mineral., 33, Mineral. Soc. Amer., (1996), 503–557.

[5] Jiang S.Y., Palmer M.R., Li Y.H., Xue C.-J., "*Chemical compositions of tourmaline in the Yindongzi-Tongmugou Pb-Zn deposits, Qinling,China"*: hnplieations for hydrothermal ore-forming processes: MineraliumDeposita, 30 (1995) 225-234.

[6] Sinclair W.D., Richardson J.M., "*Quartz-tourmaline orbicules in the seagull batholith, Yukon Territory"*. Can. Minera. 30, (1992), 923-935.

[7] London D., Manning D.A.C., "*Chemical Variation and Significance of tourmaline from southwest England"*. Economic Geology 90, (1995), 495-519.

[8] Williamson B.J., Spratt J., Adams J.T., Tindle A.G., Stanley C.J, "*Geochemical constraints from tourmaline hydrothermal overgrowths on the evolution of mineralising fluids in southwestEngland"*. J. Petrol. 41 (2000) 1439–1453.

[9] Berberian m., King G.C.P., "*Towards a palegeography and tectonic evolution of Iran"*. Canadian Journal of Earth Sciences 18 (1981) 210-265.

[۱۰] اسماعیلی د.، *"پترولوژی و ژئوکرونولوژی توده گرانیتی شاهکوه (جنوب بیرجند) با نگرش ویژه به کانه‌زایی قلع"*، رساله دوره دکتری، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۸۰).

[11] Esmaeily D., Bellon H., Valizadeh M.V., "*Isotopic chronology and trace elements eochemistry of the Shah-Kuh granite, Eastern Iran"*. The International Earth Sciences colloquium on the Aegeean region (IESCA). Abstract book, OCTOBER 4-7, Izmir, Turkey, (2005).

[12] 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.

[۱۳] احمدی خلجی ا. *"پترولوژی تودهٔ گرانیتوئیدی بروجرد*، رسالهٔ دکتری، دانشکدهٔ زمین‌شناسی"، پردیس علوم، دانشگاه تهران، (۱۳۸۵)، ۱۹۰ صفحه.

[۱۴] حق نظر م.، *"پتروژنز وکانه زایی تنگستن در بخش جنوب شرقی کمپلکس گرانیتی بروجرد"*، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه تهران (۱۳۸۶).

[15] 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.

[16] Torres-Ruiz J., Pesquera A., Gil-Crespo P.P., Vellila N., "*Origin and petrogenetic implications of tourmaline-rich rocks in the Sierra Nevada (Betic Cordillera, southeastern Spain)"*. Cemical Geology 197 (2003) 55-86.

[17] Manning D.A.C., "*Chemical and morphological variation in tourmalines from the Hub Kapong batholith of Peninsular Thailand"*. Mineralogical Magazine 45 (1982) 139-147.

[18] Pesquera A., Velasco F., "*Mineralogy, geochemistry and geological significance of tourmaline-rich rocks from the Paleozoic Cinco Villas massif (western Pyrenees, Spain)". Contrib. Mineral.* Petrol. 129 (1997) 53– 74.

[19] Cavarretta G., Puxeddu M., *"Schorl-Dravite-Ferridravite Tourmalines Deposited by Hydrothermal Magmatic Fluids during Early Evolution of the Larderclio Geothermal Field, Italy"*. Economic Geology 85 (1990) 1236-1251.

[20] Sinclair W.D., Richardson J.M., "*Quartz-tourmaline orbicules in the seagull batholith, Yukon Territory"*. Can. Minera. 30 (1992) 923-935.

[21] Henry D.J., Guidotti Ch.V., "*Tourmaline as petrogenetic indicator mineral: an example from staurolite-grade metapelites of NW Mains"*. Am. Mineral. 70 (1985) 1-15.

[22] Weisbrod A., Polak C., Roy D., "*Experimental study of tourmaline solubility in the system Na–Mg–Al–Si–B–O÷H. Applications to the boron content of natural hydrothermal fluids and the tourmalinization process"*. Volume of Abstracts, International Symposium Experimental Mineralogy and Geochemistry, Nancy, (1986) 140–141.

[23] 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 Explorations 42 (1992) 371-381.

[24] Jiang Sh. Y., Palmer M.R., Yeats Ch.J., "*Chemical and boron isotopic composition of tourmaline from the Archean Big Bell and Mount Gibson gold deposite, Murchison Provinece, Yilgarn Craton, Western Australia"*. Chemical Geology 188 (2002) 229-247.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-31]