

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. Esmaily^{1*}, H. Mohamadi¹, M. Haghazadeh²

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 tourmalines. 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



مقایسه ترکیب شیمیایی تورمالین در رگه‌های کوارتز-تورمالین قلع و تنگستن دار مناطق شاهکوه (شرق ایران) و نظام‌آباد (غرب ایران)

داریوش اسماعیلی^{۱*}، حمیده محمدی^۱، مستانه حق نظر^۲

۱- دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران

۲- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

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

چکیده: در ایران، مهمترین کانه‌زایی قلع در توده گرانیتوئیدی شاهکوه (بلوک لوت، شرق ایران) و کانه‌زایی تنگستن در منطقه نظام‌آباد (کمپلکس گرانیتوئیدی بروجرد، غرب ایران) و همراه با رگه‌های کوارتز-تورمالین صورت گرفته است. تورمالین‌های موجود در رگه‌های منطقه نظام‌آباد دارای ترکیب درآویتی بوده و با توجه به ویژگی‌هایی 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 به سمت بیرونی بردارهای تهی شدن از قلیایی و پروتون‌زدایی و ناهمخوانی بین Fe و Mg، در شرایط گرمایی تشکیل شده‌اند. فرارگیری ترکیب این تورمالین‌ها در گستره متاپلیت‌ها و متاسامیت‌ها نیز نشان می‌دهد که شاره‌سازنده آن‌ها احتمالاً متأثر از سنگ‌های تهنشستی دگرگون شده میزبان است. رگه‌های کوارتز-تورمالین شاهکوه نیز درون توده اصلی و سنگ‌های تهنشستی سازند شمشک تزریق شده‌اند. تورمالین رگه‌های رخنمون یافته در سنگ‌های تهنشستی مانند تورمالین‌های منطقه نظام‌آباد دارای ویژگی‌های تورمالین‌های گرمایی هستند. تورمالین‌های موجود در رگه‌های کوارتز-تورمالین رخنمون یافته در توده گرانیتی نیز سرشتی گرمایی دارند، ولی از آنجاکه به‌وسیله یک گرماب با خاستگاه ماگمایی به‌وجود آمده‌اند، بیشتر از نوع شورلند.

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

مقدمه

این کانی به‌دلیل ساختار منحصربه‌فرد و پیچیده 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 سری-های محلول جامد تورمالین، البایت (Elbaite) (غنی از Al + Li)، شورل (Schorl) (غنی از Fe) و دراویت (Dravite) (غنی از Mg) از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند.

تورمالین یک کانی پیچیده سیلیکاتی بُر دار با فرمول کلی (X) $Y_3 W T_6 O_{18} (BO_3)_3 (Z_6 Y_3)$ ، 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 به‌وسیله Si، گاهی همراه با مقدار Al پر 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].

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

به دلیل پایداری تورمالین در گستره گسترده‌ای از تغییرات فشار و دما و ترکیب شیمیایی متنوع آن باعث شده است تا این کانی در بررسی‌های سنگ‌شناسی و متالورژیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده، و موضوع بررسی‌های بسیاری از پژوهشگران بوده است (به عنوان مثال: [۳، ۴]). ترکیب شیمیایی متنوع و پیچیده 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 گرمایی تشکیل دهنده کانه و راهنمای خوبی برای پی‌جویی کانسارها از جمله ذخایر اقتصادی تنگستن، قلع و مولیبدن همراه با تورمالین باشد [۵].

تورمالین به عنوان یک کانی ماگمایی اولیه به صورت پراکنده و معمولاً خود شکل در گرانیت‌ها یا پگماتیت‌ها؛ یا به عنوان یک کانی پایانی در مراحل حدواسط از شرایط پایانی سالدوس (ماگمایی) تا مرحله ساب سالدوس (گرمایی)، که معمولاً روی کانی فلدسپار و یا به شکل درون شبکه‌ای با کوارتز و فلدسپار یا رگچه‌های بسیار ریز و دانه‌ای، متبلور می‌شود [۶] و [۷]. به علاوه تورمالین اغلب از گرماب‌های ساب سالدوس در گرانیت به صورت رگه، به ویژه در همبری (کنتاکت) بیرونی آن‌ها نیز تشکیل می‌شود [۷، ۸].

از آنجاکه در ایران مهمترین کانه‌زایی قلع در توده گرانیتوئیدی شاهکوه (بلوک لوت، شرق ایران) و مهمترین کانه زایی تنگستن در منطقه نظام‌آباد (کمپلکس گرانیتوئیدی بروجرد، غرب ایران) شناخته شده است و در هر دو مورد تورمالین به همراه کوارتز کانی باطله (گانگ) اصلی محسوب می‌شود، لذا بر آن شدیم تا با استفاده از نتایج آنالیزهای ریزگمانه الکترونی تورمالین به مقایسه 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 منطقه شاهکوه

باتولیت گرانیتی شاهکوه به صورت یک نوار طویل با طول در حدود ۵۰ کیلومتر و عرض ۱۲-۱۰ کیلومتر با روند شمال غرب- جنوب شرق در حاشیه شرقی بلوک لوت قرار دارد (شکل ۱). این توده گرانیتی در ۱۸۰ کیلومتری جنوب بیرجند و ۵۰ کیلومتری غرب شهرستان نهبندان با مختصات جغرافیای ۳۱°۴۷' - ۳۱°۳۰' عرض شمالی و ۵۹°۳۱' - ۵۹°۱۲' طول

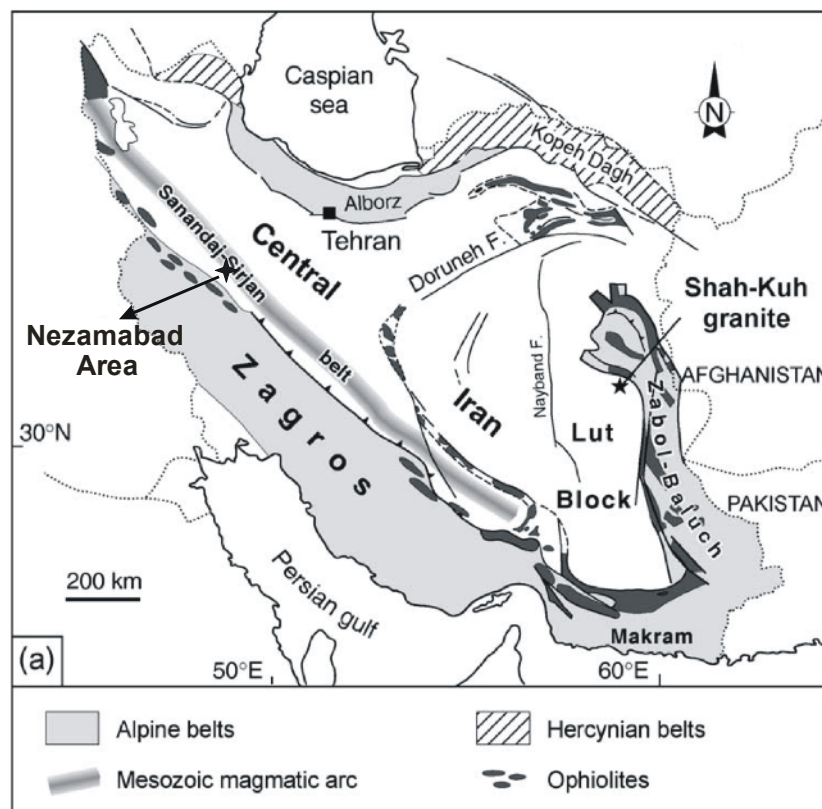
شرقی در نقشه زمین‌شناسی ۲۵۰/۱۰۰۰:۱ ده سلم و ۱۰۰/۱۰۰۰:۱ بصیران واقع شده است. باتولیت گرانیتی شاهکوه سنگ‌های پلیتی کمپلکس دگرگونی ده سلم در جنوب و تهنشست‌های ماسه‌سنگی- شیلی سازند شمشک را در شمال و شمال غرب قطع کرده و به سمت غرب با یک سطح فرسایشی در زیر کنگلومرای قاعده‌ای پیش‌رونده و در زیر آهک‌های اربیتولین‌دار کرتاسه قرار گرفته است. [۱۰] به روش 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 فروانش ورقه اقیانوسی نئوتتیس به زیر ایران مرکزی تشکیل شده است. این توده نفوذی از سه واحد اصلی گرانودیوریت و سینوگرانیت تشکیل شده است که با رشته‌ای از دایک‌های آپلیتی، داسیتی و آندزیتی با روند شمال شرق- جنوب غرب قطع شده و همه آن‌ها مورد هجوم رشته‌ای از رگه‌های کوارتز-تورمالین کانی ساز با روندی مشابه قرار گرفته‌اند. به علاوه سنگ‌های میکروگرانیتی، گرانیت‌های گرایزی، منطقه‌های دگرسانی و برشی نیز به طور پراکنده در منطقه حضور دارند (برای اطلاعات بیشتر خواننده را به [۱۰] ارجاع می‌دهیم).

مشخصات تورمالین در گرانیت‌ها و رگه‌های کوارتز- تورمالین قلع‌دار شاهکوه

به طور کلی تمرکز اصلی کانه‌زایی در شمال و شمال غرب گستره مورد بررسی درون رگه‌های کوارتز-تورمالین رخمون شده است. این رگه‌ها و رگچه‌های کوارتز- تورمالینی کم و بیش قلع دار درون گرانیت‌ها، در مرز مشترک توده گرانیتی با سنگ‌های میزبان و نیز ماسه‌سنگ‌های شیلی سازند شمشک رخمون دارند. ضخامت رگه‌های کوارتز- تورمالین از کمتر از یک متر تا بیش از ۵ متر و طول رخمون آن‌ها تا بیش از ۸۰۰ متر می‌رسد. راستای آن‌ها بیشتر شمال شرق- جنوب غرب است و دارای شیب نزدیک به قائم‌اند. 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 به شکل ریزبلور و به رنگ خاکستری تیره دیده می‌شود. این رگه‌ها غالباً به اکسیدهای آهن تیره رنگ آلوده بوده و به رنگ خاکستری تیره

به حالت شعاعی انبوه شده و یک رخساره خورشیدی را به-نمایش می‌گذارند. انواع درشت بلور تورمالین که اندازه آن به ۱ میلیمتر می‌رسد، دارای چندرنگی مشخص وارون سبز-آبی بوده و به شکل‌های مختلفی حضور دارند، به طوری که بعضی از آن‌ها به شکل رگچه‌ای و برخی دیگر با کانی‌های کدر و گاهی به-صورت دانه‌های کوارتز، هم‌رشدی نشان می‌دهند. شکستگی-های تورمالین غالباً با اکسیدهای آهن و کانی‌های کدر دیگر پر شده است. علاوه بر رگچه‌های کوارتز-تورمالین، گرانیتهای گرایزی نیز حاوی مقدار قابل توجهی تورمالین‌اند که از لحاظ میزان قلع فقیرند. در این سنگ‌ها کوارتز و فلدسپار از کانی‌های اصلی و بیوتیت، موسکویت، تورمالین، منازیت، آپاتیت، توپاز و فلئوریت از سازهای فرعی این سنگ‌ها محسوب می‌شوند. فلدسپارهای قلیایی به صورت ارتوز پرتیتی هستند و بیشتر به-وسیله کانی‌های رسی، سریسیت و موسکویت و گاهی به وسیله تورمالین جانشین شده‌اند. در این سنگ‌ها تورمالین پس از بیوتیت فراوان‌ترین کانی فرعی بوده و بیشتر روی فلدسپارها و به خرج آن‌ها تشکیل شده است.

دیده می‌شوند. رگه‌های کوارتز-تورمالین (به طور کلی) به میزان قابل توجهی سنگ‌های میزبان خود را دگرسان کرده‌اند. در بعضی از مناطق دگرسانی به حدی است که موجب فروپاشی و از بین رفتن بخش‌های گرانیتهای و در نتیجه بر جسته ماندن رگه‌ها شده است. علاوه بر کوارتز و تورمالین به عنوان کانی‌های اصلی، کانی‌های اسفن، منازیت، زیرکن، آپاتیت، روتیل، فنزیت و به ندرت کربنات‌ها نیز به طور پراکنده آن‌ها را همراهی می‌کنند. میزان فراوانی کوارتز و تورمالین از نمونه‌ای به نمونه‌ای دیگر متفاوت است. کانی‌های کاسیت، هیدرواستانیت، وارلوموفیت، پیریت، کالکوپیریت، هماتیت، گوتیت، لپیدوکروسیت، دیژنیت، کوولین و مالاکیت اجزای بخش کانه این رگه‌ها را تشکیل می‌دهند. البته همه کانی‌های بالا یکجا و همزمان در هیچیک از نمونه‌های مورد بررسی به چشم نمی‌خورد و در بررسی‌های ماکروسکوپی بلور کاسیت در هیچ کدام از نمونه‌ها مشاهده نشد. تورمالین در رگه‌ها غالباً به دو صورت ریزبلور و درشت‌بلور دیده می‌شود. انواع ریزبلور که ۷۰ درصد حجمی نمونه‌ها را به-خود اختصاص می‌دهد، با اندازه‌ای کمتر از ۰/۵ میلیمتر بیشتر



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

موقعیت زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی نظام آباد

منطقه نظام آباد با مختصات جغرافیایی $۴۹^{\circ}۱۷'$ طول شرقی و $۳۳^{\circ}۴۰'$ عرض شمالی در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ شازند اراک و در ۴۶ کیلومتری جنوب غرب 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 سندانج-سیرجان واقع شده است، که به اعتقاد [۱۲] تکامل زمین‌ساختی آن به زایش اقیانوس نئوتتیس وابسته است. کمپلکس گرانیتوئیدی بروجرد در فلیت‌های ژوراسیک نفوذ کرده و سنگ‌های دگرگونی مجاورتی از نوع هورنفلس و شیست لکه‌دار را در پیرامون خود به وجود آورده است. این کمپلکس با گسترش در حدود ۱۸۰ تا ۲۰۰ کیلومتر مربع به صورت کشیده و با روند شمال غرب - جنوب شرق رخنمون دارد و از نظر سنگ‌شناسی از سه واحد اصلی کوارتز دیوریت، گرانودیوریت و مونزوگرنایت که با دایک‌های اسیدی، بازیک و حواسط و نیز رگه‌های کوارتز-تورمالینی متعدد قطع شده است، تشکیل شده است. به اعتقاد [۱۲] ماگمای سازنده این توده از نوع I، آهکی-قلیایی و غنی از پتاسیم، متآلومین تا کمی پراآلومین بوده که در یک محیط زمین‌ساختی وابسته به فروورانش در زمان ژوراسیک میانی تشکیل شده است. در منطقه نظام آباد، از میان گروه‌های سنگی یاد شده، کوارتز دیوریت و گرانودیوریت برونزد دارند که با دایک‌های پگماتیتی و آپلیتی متعدد و رگه‌های کوارتز-تورمالینی کانی ساز حاوی تنگستن به صورت کانه شلیت قطع شده‌اند. (برای اطلاعات بیشتر سنگ‌شناسی، خواننده را به [۱۳] ارجاع می‌دهیم).

سرشتی‌های تورمالین در رگه‌های کوارتز-تورمالین تنگستن-**دار نظام آباد**

رگه‌های کوارتز-تورمالین در حوالی روستاهای نظام آباد، حسن آباد، روست و فیزانه در واحد کوارتز دیوریت و گاهی در واحد گرانودیوریت رخنمون دارند، ولی به علت فراوانی و برونزد بیشتر در ناحیه نظام آباد و وجود تونل‌های فراوان تر در این ناحیه تحت عنوان رگه‌های کوارتز-تورمالینی نظام آباد از آن‌ها نام برده می‌شود. بخش بزرگ این رگه‌ها به وسیله پوشش خاکی پنهان مانده و ضخامت آن‌ها متغیر و در برخی از نواحی به حدود ۳ متر می‌رسد. بر اساس فراوانی کوارتز و تورمالین، اکسیدهای آهن و کربنات‌های مس، رنگ رگه‌ها از روشن

(سفید) به علت فراوانی کوارتز، تا سرخ قهوه‌ای به علت وجود اکسیدهای آهن، سبز-آبی به دلیل حضور کربنات‌های مس به-ویژه ملاکیت و خاکستری تیره به علت فراوانی تورمالین بیشتر، نسبت به کوارتز، تغییر می‌کند. فراوانی کوارتز و تورمالین از نمونه‌ای به نمونه دیگر متفاوت است به طوری که برخی از نمونه‌ها بیشتر از تورمالین تشکیل شده و می‌توانند به عنوان تورمالینیت در نظر گرفته شوند، در برخی دیگر از نمونه‌ها، کوارتز کانی اصلی است و تورمالین به مقدار جزئی این کانی را همراهی می‌کند و در پایان حالت‌های حواسط این دو نیز به-فراوانی قابل مشاهده‌اند.

به طور کلی رگه‌های کوارتز-تورمالینی منطقه از نظر اقتصادی و وجود تنگستن می‌توانند به دو گروه اصلی رگه‌های کوارتز-تورمالینی کانی شده حاوی شلیت (بارور) و رگه‌های کوارتز-تورمالینی عقیم که فاقد هرگونه کانه‌سازی هستند، تقسیم شوند. تورمالین همراه با کوارتز اصلی‌ترین و مهم‌ترین کانی باطله و شلیت، ارسنوپیریت، پیریت، پیروتیت، کالکوپیریت، اسفالریت، کولیت، ملاکیت، آزوریت، وگوتیت، بیسموتینیت و کاسیتريت 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 به-خوبی قابل مشاهده است [۱۴]. به اعتقاد [۷] یکی از ویژگی‌های تورمالین‌های گرمابی، منطقه‌بندی است که به دلیل تغییرات مداوم شرایط تشکیل، حاصل می‌شود.

روش آنالیز و منابع داده‌ها

داده‌های ریزپردازنده الکترونی مورد استفاده در این کار پژوهشی از [۱۰، ۱۴] استفاده شده است. آنالیز نمونه‌های شاهکوه در آزمایشگاه کانی‌شناسی دانشگاه پل‌سباتیه شهر تولوز فرانسه با ریزگمانه 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 نظام آباد نیز تعداد ۲۹ نقطه تورمالین از نمونه‌های رگه‌های کوارتز-تورمالین و سنگ میزبان کوارتز دیوریتی در آزمایشگاه کانی‌شناسی شهر پل‌سباتیه شهر

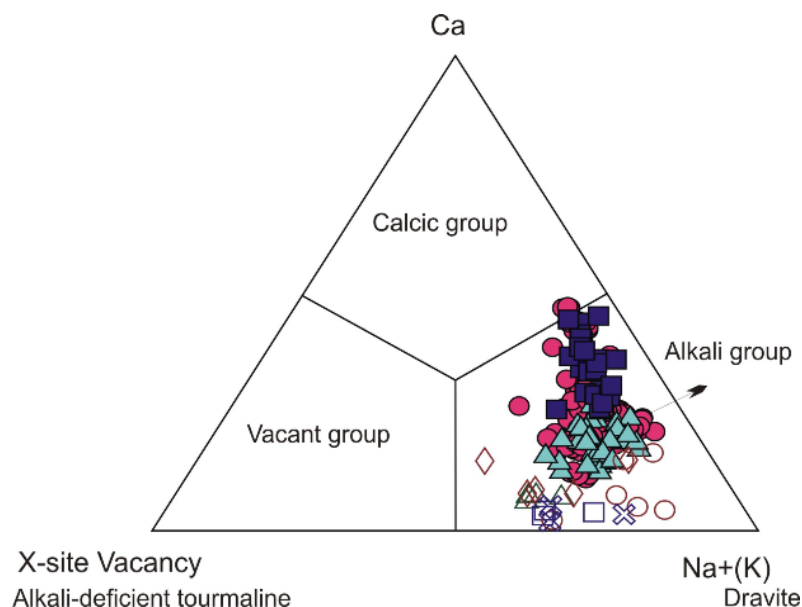
تولوز فرانسه به وسیله دستگاه ریزپردازنده الکترونی Camebox Sx50 و بقیه در آزمایشگاه GFZ پوتسدام در آلمان با دستگاه Camebox Sx100 مورد آنالیز قرار گرفته است.

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)^۱، 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 منطقه 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. نکته 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 درصد 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 به‌طوری‌که 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.

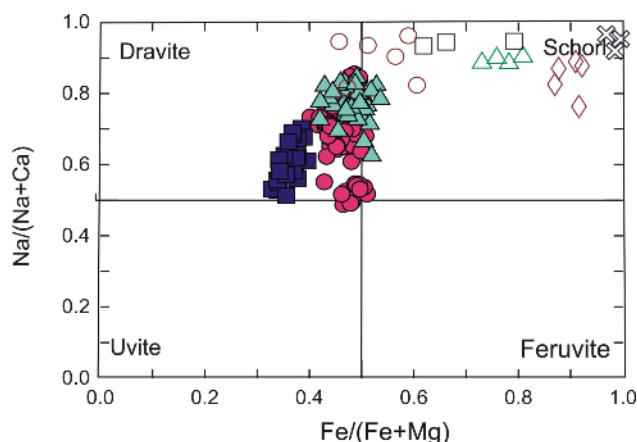
برای بررسی تغییرات ترکیبی در نسبت‌های Na ، Mg ، Fe و Ca و تشخیص نوع تورمالین‌ها از نمودارهای دوتایی $Na/(Na+Ca)$ و $Fe/(Fe+Mg)$ [۱۵] استفاده شده است. در نمودار مورد بررسی (شکل ۳) نمونه‌های مورد بررسی نظام‌آباد در گستره بین شورل و دراویت با تمرکز بیشتر در نیمه وابسته به دراویت قرار گرفته‌اند. در این نمودار،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



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

علامت تورمالین‌های نظام‌آباد
 سنگ میزبان کوارتز دیوریتی ▲ رگه‌های کوارتز تورمالین باردار ● رگه‌های کوارتز تورمالین عقیم
 تورمالین‌های شاهکوه
 میکروگرانیته لوکوکرات △ رگه‌های شبه پگماتیته ✕ گرانیته گرایزی ○ رگه‌های کوارتز تورمالین در رسوبات ◇ رگه‌های کوارتز تورمالین در گرانیته

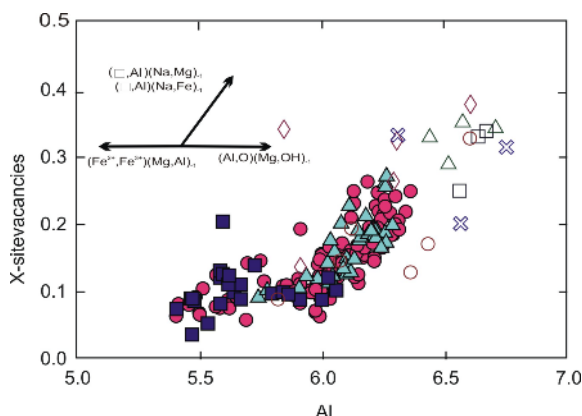
1 - X-site vacancy = 1 - (Ca + Na + K)



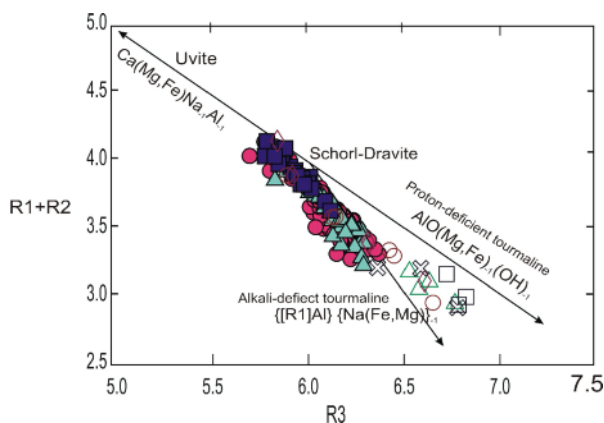
شکل ۳ نمودار $Fe/(Fe+Mg)$ نسبت به $Na/(Na+Ca)$ ، از [۱۵] و موقعیت نمونه‌های مورد بررسی روی آن (علائم مانند شکل ۲).

واکنش‌های جانشینی در ترکیب تورمالین
می‌کند)، انجام شود. به‌منظور بررسی واکنش‌های جانشینی
ترکیب تورمالین‌ها از نمودارهای مختلف (شکل ۴ تا ۸) استفاده
کرده‌ایم.

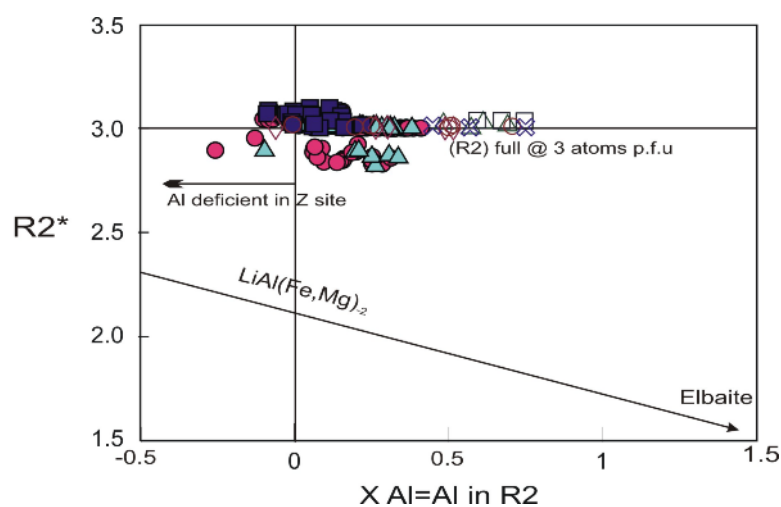
واکنش‌های جانشینی در ترکیب تورمالین
تبادل هم ظرفیتی در یک موقعیت خاص (مانند جانشینی Mg
به جای Fe^{2+} در موقعیت Y) و یا به‌صورت تبادل چند ظرفیتی
در چندین موقعیت (مانند جانشینی زوجی اوویت (Uvite)



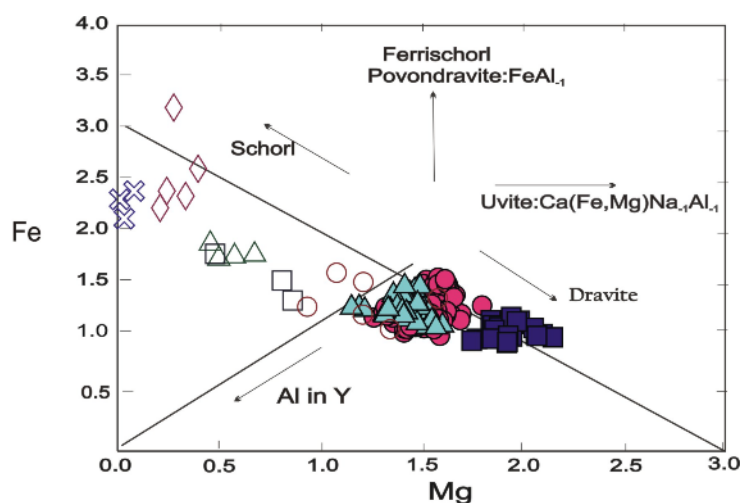
شکل ۴ موقعیت تورمالین‌های مورد بررسی روی نمودار Al_{tot} نسبت به X-site vacancy، [۱۶]. (علائم مانند شکل ۲).



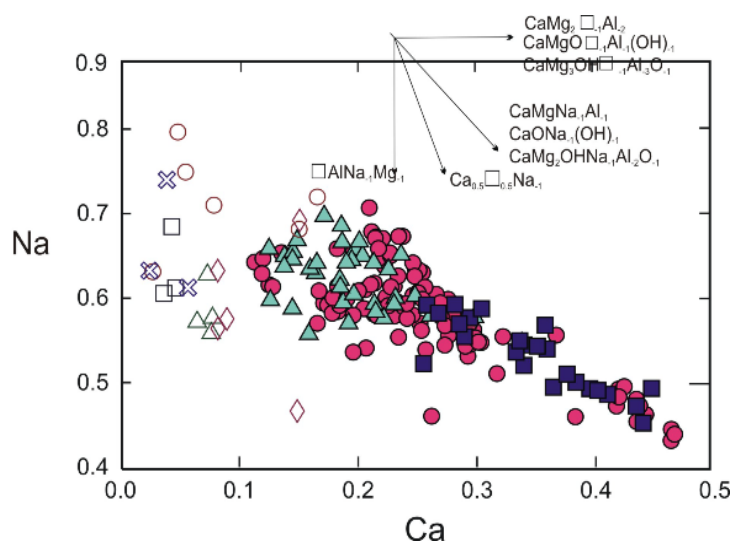
شکل ۵ نمونه‌های مورد بررسی روی نمودار $R1+R2$ نسبت به $R3$ ، [۱۷]. (علائم مانند شکل ۲).



شکل ۶ موقعیت تورمالین‌های مورد بررسی روی نمودار $R2^*$ نسبت به $X \text{ Al} = \text{Al}$ در [۷]. (علائم مانند شکل ۲)



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



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

راستای بردار تهی شدن از قلیایی‌ها قرار گرفته‌اند. در مورد نمونه‌های شاهکوه بیشتر نمونه‌ها جز تعداد کمی از رگه‌های کوارتز-تورمالین پس از نقطه شورل- دراویت قرار گرفته‌اند و نمونه‌های رگه‌های شیه پگماتیستی و میکروگرانیت‌ها به‌خوبی بین دو بردار تهیج‌ها و پروتون‌زدایی قرار گرفته‌اند که نشان دهنده تأثیر انبوهی این دو بردار است، ولی نمونه‌های رگه‌های کوارتز- تورمالین و گرانیت گرایزی در راستای بردار پروتون-زدایی قرار گرفته‌اند که نشان دهنده تأثیر بیشتر این بردار نسبت به بردار تهیج‌ای از قلیایی‌هاست.

در نمودار $R2^* - XAl$ از [۷]، کلیه نمونه‌ها جز تعدادی از نمونه‌های وابسته به رگه‌های نظام آباد، روی خط $R2^* = 3apfu$ قرار گرفته (شکل ۶) و نشان می‌دهند که جایگاه Y آن‌ها به‌طور کامل پر است، زیرا اگر نمونه‌ای دارای مقدار $R2^*$ کمتر از ۳ (apfu) باشد، در جایگاه Y دارای نقصان است. نقصان در این نمونه‌ها را تا حدودی می‌توان با فعالیت مولفه جانشینی البائیت، $LiAl(Fe,Mg)^{2+}$ ، 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 همه 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 مولفه تبادلی پوندراویت یا فریشورل با فرمول $FeAl_1$ و اوویت وجود دارند. بر اساس این نمودار تعدادی از نمونه‌های سنگ میزبان و رگه‌های بردار نظام‌آباد و تعدادی از نمونه‌های رگه‌های شاهکوه دارای کاهش Al در

تغییرات تهیج‌های X نسبت به Al_{tot} از [۱۶]، در نمونه‌های مورد بررسی در شکل ۴ تصویر شده است. بر اساس این نمودار، در نمونه‌های وابسته به رگه‌های کوارتز- تورمالین بردار و بیشتر تورمالین رگه‌های عقیم نظام‌آباد، واکنش تهیج‌های قلیایی‌ها با فرمول $\{Mg,Fe\}Na_1\{Al\}$ ، دیده می‌شود، ولی در بقیه نمونه‌ها که به سمت Al و کاهش در جایگاه X کمتر تمایل دارند، به‌دلیل وجود Fe^{3+} ، واکنش جانشینی $\{Mg,Al\}\{Fe^{2+},Fe^{3+}\}$ مؤثر است (منظور از []، تهیج‌های قلیایی‌هاست).

از میان نمونه‌های شاهکوه، نیز تورمالین‌های گرانیت گرایزی، رگه‌های شیه پگماتیستی، میکروگرانیت‌های لوکوکرات و تا حدودی رگه‌های کوارتز- تورمالین موجود در گرانیت، تحت تأثیر هر دو واکنش جانشینی خالی شدن از قلیایی‌ها و پروتون‌زدایی یا تهی شدن از پروتون، (تبادل O-OH) با فرمول $\{Mg,Fe\}OH_1\{AlO\}$ ، قرار گرفته‌اند، ولی تورمالین رگه‌های کوارتز- تورمالین رخنمون یافته در سنگ‌های تهنشستی، متأثر از واکنش جانشینی تهی شدن از قلیایی‌ها بوده و بیشترین تأثیر را از این واکنش دارند.

[۱۷] به‌منظور بررسی واکنش‌های جانشینی ترکیب‌های تورمالین‌ها از نمودار $R1 + 2R2$ نسبت به $R3$ استفاده کرده است (شکل ۵). روی این نمودار ترکیب شورل- دراویت نزدیک به مرکز نمودار با مقدار $R1 + R2 = 4$ و $R3 = 6$ قرار می‌گیرد و همه بردارها با مولفه افزایشی شورل- دراویت آغاز می‌شوند. این وضعیت اجازه می‌دهد که تبادل اوویت با فرمول $\{Ca(Fe,Mg)\}\{NaAl\}_1$ ، تبادل پروتون‌زدایی یا ترکیب آلنیت، $\{Fe^{3+}O\}\{Fe^{2+}OH\}_1$ و تبادل تهی شدن از قلیایی را بررسی کنیم. چنانکه مشاهده می‌شود، در نمونه‌های وابسته به- منطقه نظام‌آباد بیشتر تورمالین‌های سنگ میزبان کوارتز دیوریتی و تعدادی از تورمالین‌های رگه‌ها، پیش از نقطه 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 نقطه شورل- دراویت و در

5 - $X Al = Al$ in $Y = \text{atoms Al p.f.u} + 1.33 \text{ atoms Ti p.f.u} + \text{atoms Si p.f.u}$

6 - $R2^* = Fe_{total} \text{ apfu} + Mg \text{ apfu} + Mn \text{ apfu} + Al$ in $Y \text{ apfu}$

7 - $Apfu = \text{Atoms Per Formula Unites}$

2 - $R2 = Fe + Mg + Mn$

3 - $R1 = Ca + Na$

4 - $R3 = Al + 1.33Ti$

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

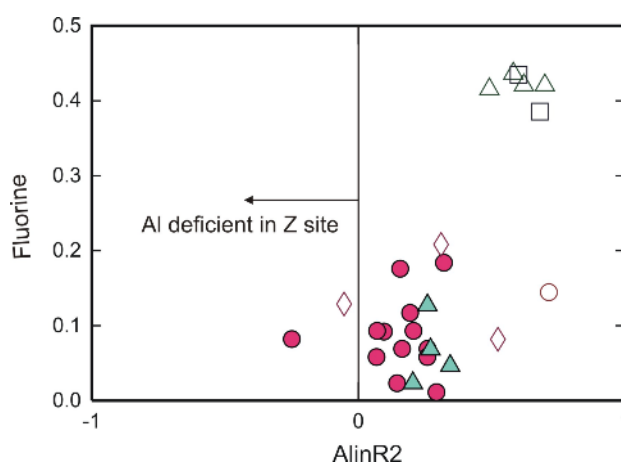
به منظور بررسی غنی شدگی نسبی برخی از نمونه‌ها از Ca و تعیین واکنش‌های جانشینی مؤثر، از نمودار Na نسبت به Ca [۱۸] استفاده می‌کنیم (شکل ۸). بر اساس این نمودار مقدار Ca پایین (در بیشتر آن‌ها کمتر از 0.1 apfu) و گستردگی بیشتر Na نمونه‌های شاهکوه نشان دهنده فعالیت یک واکنش جانشینی با حضور Ca نبوده است، بلکه مولفه جانشینی خالی شدن از قلیایی‌ها واکنش اصلی است. در نمونه‌های نظام‌آباد چنانکه در شکل ۲ نیز دیده می‌شود، نمونه‌های سنگ میزبان کوارتز دیوریتی و تعداد زیادی از نمونه‌های رگه‌های باردار، دارای Ca بالاتر و Na پایین‌تری بوده و بر اساس شکل ۹، برای تشکیل چنین تورمالین‌هایی، مولفه $\{NaAl\}\{CaMg\}_1$ و $\{CaO\}\{NaOH\}_1$ و $\{CaMg_2OH\}\{Na_{-1}Al_2O\}$ و مؤثرند. ولی در مورد نمونه‌های رگه‌های عقیم و تعدادی از رگه‌های باردار که روند متفاوتی به نمایش می‌گذارند، مولفه مسؤل، تغییرات $\{Al_{-1}\}\{CaMg_2\}$ است.

بحث و بررسی

به اعتقاد [۷] تورمالین‌های ماگمایی اصولاً خود شکل‌اند و وجود این تورمالین‌ها در گرانیته نشانه روشنی است از غنی بودن ماگمای خاستگاه آن گرانیته از B. به اعتقاد این پژوهشگران در صورتی که همه شرایط لازم برای تشکیل تورمالین در گرانیته مانند پراآلومین 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 ($B_2O_3 \approx 2 \text{ wt\%}$)، 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 به شکل ۴، همه تورمالین‌های منطقه نظام‌آباد و تورمالین‌های رگه‌های کوارتز-تورمالین و یکی از نمونه‌های گرانیته گرایزنی شاهکوه که به سمت Al و کاهش در جایگاه X کمتر گرایش دارند، از گرماب‌ها به وجود آمده‌اند و شرایط تشکیل بقیه نمونه‌ها به شرایط ماگمایی نزدیک می‌شود. همچنین به اعتقاد [۷] ترکیب تورمالین‌های ماگمایی در طول و بین بردارهای تهی شده از قلیایی‌ها و پروتون‌زدایی، مشتق شده

از مولفه افزایشی شورل- دراویت، قرار می‌گیرند، در حالیکه ترکیب تورمالین‌های گرمابی به سمت خارجی این بردارها تمایل دارند. بنابراین و با توجه به شکل ۵ کلیه نمونه‌های نظام‌آباد به علاوه نمونه‌های رگه‌های کوارتز-تورمالین و گرانیته گرایزنی که به سمت خارجی این دو بردار و ترکیب شورل- دراویت تمایل دارند، در شرایط گرمابی به وجود آمده‌اند و بقیه نمونه‌ها به طریق ماگمایی تشکیل شده‌اند. همچنین تورمالین‌های ماگمایی در مقایسه با تورمالین‌های گرمابی عدد آهن $(Fe/(Fe+Mg))$ ، بالاتری دارند، بنابراین با توجه به شکل ۳، کلیه تورمالین‌های نظام‌آباد و تورمالین‌های رگه‌های کوارتز-تورمالین رخنمون یافته در سنگ‌های ته نشست شاهکوه که دارای عدد آهن پایین‌تری هستند در شرایط گرمابی و بقیه نمونه‌های شاهکوه در شرایط ماگمایی تشکیل شده‌اند. از طرف دیگر به اعتقاد [۱۹] ناهمخوانی شدید بین Fe^{2+} و Mg و بالا بودن مقدار Fe^{2+} نسبت به Mg در تورمالین از نشانه‌های تشکیل آن به وسیله شاره ماگمایی است. با توجه به شکل 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 همه نمونه‌ها جز رگه‌های کوارتز-تورمالین موجود در ته نشست‌ها، مقدار Fe نمونه‌ها نسبت به مقدار Mg آن‌ها بالاتر است، ولی بین این نمونه‌ها فقط در نمونه‌های رگه‌های شبه پگماتیته و میکروگرانیته‌های لوکوکرات ناهمخوانی مشخص بین Fe و Mg دیده می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کلیه تورمالین‌های نظام‌آباد و تورمالین‌های رگه‌های رخنمون یافته در سنگ‌های ته نشست شاهکوه احتمالاً در شرایط گرمابی به وجود 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 به شکل ۹، کلیه تورمالین‌های نظام‌آباد و تورمالین‌های رگه‌های کوارتز-تورمالین شاهکوه با مقدار F، کمتر از ۰/۳ درصد، به طریق گرمابی به وجود آمده‌اند و بقیه نمونه‌ها با دارا بودن F بیشتر از ۰/۳ درصد در شرایط ماگمایی تشکیل شده‌اند.



شکل ۹ موقعیت تورمالین‌های مورد بررسی روی نمودار فلورین نسبت به میزان Al در موقعیت Y [۷] (علائم مانند شکل ۲)؛
 $Al \text{ in } R2 = Al + 1.33Ti + Si - 12$

بسیار ظریفی با این کانی دیده می‌شوند که در طول آن‌ها تورمالین‌های بسیار ریز متبلور شده‌اند، که به اعتقاد [۱۵] نشان دهنده جدایش تأخیری یک شارء غنی از B از گرانیت بوده و نشان دهنده تشکیل در یک سیستم بسته با شرایط ماگمایی-گرماپی است [۲۰].

در توده گرانیتوئیدی شاهکوه همه واحدهای اصلی جز برونوم‌های ریزدانه از لحاظ شیمیایی دارای $Al_2O_3/(Na_2O + CaO + K_2O) > 1$ و $K_2O > 1$ (ترکیب پرآلومین ضعیف)، به جز گرانیتهای گرایزنی همه واحدهای این توده دارای $Fe+Mg > 2\%$ و حداکثر مقدار B_2O_3 ۰/۰۶ wt% است [۱۰]. بنابراین به اعتقاد [۷] توده 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 به حدی پایین بود که دستگاه قادر به اندازه‌گیری آن نبوده است [۱۰]. نتیجه این کمبود یا نبود بُر در ماگمای سازنده، عدم وجود تورمالین ماگمایی خودشکل در واحدهای سنگی منطقه (جز در رگه‌های شبه‌پگماتیستی) است. بنابراین می‌توان گفت که مقدار بُر ماگمای سازنده این باتولیت خیلی جزئی بوده است و بُر لازم برای تشکیل تورمالین‌ها از یک خاستگاه خارجی تأمین شده - است. به اعتقاد [۲۱] تورمالین‌های وابسته به محیط‌های گرانیتی تمایل به سمت عضو انتهای شورل داشته و نسبت‌های $Na/(Na + Ca)$ و $Fe/(Fe + Mg)$ بالایی دارند،

بنابراین در شاهکوه، تورمالین‌های رگه‌های کوارتز-تورمالین رخنمون یافته در سنگ‌های ته‌نشستی، به دلیل پایین بودن مقدار F، Al، نسبت $Fe/(Fe + Mg)$ ، کاستی در مکان X و قرارگیری بین بردارهای تهیجای قلیایی‌ها و پروتون‌زدایی در شرایط گرمایی به وجود آمده‌اند. تورمالین رگه‌های شبه پگماتیستی به دلیل بالا بودن مقدار F، Al، و $Fe/(Fe + Mg)$ قرار گرفتن بین بردارهای تهیجای قلیایی و پروتون‌زدایی به-طریق ماگمایی به وجود آمده‌اند. تورمالین‌های گرانیتهای گرایزنی به دلیل بالا بودن مقدار $Fe/(Fe + Mg)$ ، کاستی در جایگاه X و بالا بودن مقدار Al دارای ویژگی‌های تورمالین‌های ماگمایی بوده، و به دلیل قرار نگرفتن همه نمونه‌های بین دو بردار تهیجای از قلیایی و پروتون‌زدایی و ناهمخوانی Fe و Mg دارای ویژگی‌های تورمالین‌های گرمایی هستند، بنابراین ویژگی‌های دوگانه دارند. تورمالین‌های رگه‌های کوارتز-تورمالین موجود در گرانیتهای قلیایی قرارگیری در بخش بیرونی بردارها، ناهمخوانی Fe و Mg، پایین بودن مقدار F و Al، دارای سرشتهای گرمایی، و به دلیل 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 قرارگیری بین بردارهای تهیجای قلیایی‌ها و پروتون‌زدایی، دارای ویژگی‌های تورمالین‌های ماگمایی و از طرفی به دلیل مقدار بالای Mg نسبت به نمونه‌های دیگر و تشکیل تورمالین‌ها به صورت بین شبکه‌ای و بر روی فلدسپارها دارای ویژگی‌های تورمالین‌های گرمایی است. در مقطع نازک، کانی تورمالین روی فلدسپارها و یا به صورت بین شبکه‌ای، و یا به صورت رگچه‌های

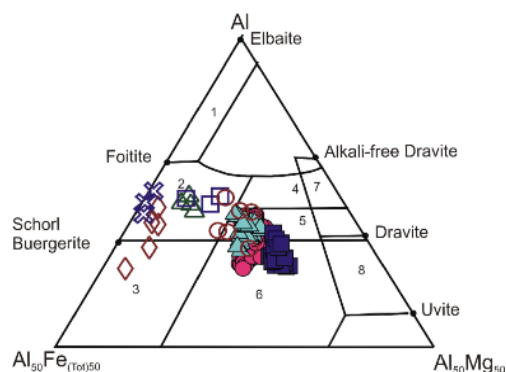
ولی تورمالین‌های وابسته به محیط‌های دگرگونی و تهنشستی دارای ترکیب حد واسطی بین دو عضو انتهائی دراویت و شورل هستند. بنابراین با توجه به نمودار شکل ۳ شاید بتوان گفت که همهٔ تورمالین‌های شاهکوه به محیط‌های گرانیتی وابسته‌اند، به-جز نمونه‌های رگه‌های کوارتز-تورمالین رخنمون یافته در سنگ‌های تهنشستی سازند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

بر اساس نمودار مثلثی $Al_{50}Fe-Al-Al_{50}Mg$ (شکل ۱۰)، و $Ca-Fe(tot)-Mg$ (شکل ۱۱)، از [۲۱]، ترکیب تورمالین‌های شاهکوه به نوع شورل نزدیک‌تر بوده و غنی از آهن‌اند. به علاوه ترکیب این تورمالین‌ها در هر دو مثلث، در ناحیهٔ گرانیتوئیدهای فقیر از Li و پگماتیت‌ها و آپلیت‌های وابسته به آن قرار می‌گیرند. به اعتقاد [۲۲] هر چه از سمت شرایط ماگمایی به سمت شرایط گرمایی نزدیک‌تر می‌شویم، تورمالین در مقدار خیلی پایین‌تر B و طیف گسترده‌تری از ترکیب‌ها نسبت به شرایط ماگمایی به وجود می‌آید. به عنوان 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 گرایزی و رگه‌های رخنمون یافته در گرانیت‌ها، خاستگاه شارهٔ مسؤل گرایزی شدن و تورمالین‌زایی از ماگمای اصلی سازندهٔ توده گرانیتوئیدی و بدون دخالت یک خاستگاه خارجی مانند سنگ‌های تهنشستی بوده و به همین دلیل بر خلاف تورمالین‌های گرمایی 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 به بقیهٔ نمونه‌ها از قطب شورل دورترند، شرایط تشکیل آن‌ها با نظریهٔ [۷]، همخوانی دارد. به اعتقاد این پژوهشگران، رگه‌های گرمایی از جدایش در سیستم‌های بسته و یا تغییرات فازی دیگر به وجود 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 تهنشست‌های سازند شمشک به وجود آمده‌اند. تورمالین‌های رگه‌های شبه پگماتی، نیز بنا بر نظر [۱۹]، به دلیل قرارگیری در ناحیهٔ گرانیتوئیدها، احتمالاً به طریق ماگمایی تشکیل شده‌اند، احتمالاً این رگه‌ها

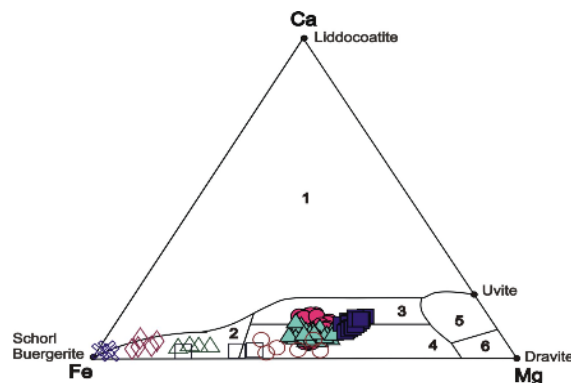
پس از نفوذ تودهٔ اصلی گرانیتی در اثر نفوذ دوبارهٔ ماگما و تزریق آن در تودهٔ اصلی به وجود آمده‌اند. تورمالین‌های میکروگرانیت‌های لوکوکرات با اینکه از جمله تورمالین‌های درون گرانیتی به حساب می‌آیند و باید در ناحیه گرانیتوئیدها قرار گیرند، ولی به دلیل تشکیل در یک شرایط حدواسط، مقدار Mg آن‌ها بیشتر از مقداری است که برای تورمالین‌های ماگمایی انتظار می‌رود، و برخی از آن‌ها در ناحیهٔ متاپلیت‌ها قرار می‌گیرند.

تورمالین‌های نظام‌آباد به دلیل منطقه‌بندی کوچک مقیاس، پایین بودن مقدار $F, Fe/(Fe + mg)/Al$ ، کاستی کمتر در جایگاه X، تمایل به سمت بیرونی بردارهای تهیج‌های از قلیایی‌ها و پروتون‌زدایی، و ناهمخوانی بین Fe و Mg در شرایط گرمایی به وجود آمده‌اند.

به اعتقاد [۱۳]، کمپلکس گرانیتوئیدی بروجرد از لحاظ شیمیایی شبه آلومین (واحد کوارتز دیوریت) تا حدودی پرآلومین (گرانودیوریت و مونزوگزانیت) با مقادیر $ASI = 1/1$ (1- است، که بنابر نظر [۷]، واحد کوارتز دیوریتی نظام‌آباد مقدار Al لازم برای تشکیل تورمالین در درون خود توده و در رگه-های کوارتز-تورمالین ندارد. همچنین با وجود مقدار B_2O_3 سنگ کل واحد کوارتز دیوریت (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 به مقدار $FeO+MgO > 10\%$ 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 به سمت 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 به محیط-های دگرگونی و تهنشستی دارای ترکیب حدواسطی بین دو عضو انتهائی دراویت و شورل هستند [۱۹]، بنابراین تورمالین-های منطقهٔ نظام‌آباد به محیط‌های تهنشستی و دگرگونی وابسته‌اند. به اعتقاد [۲۳]، غنی بودن تورمالین‌ها از Mg (دراویت) معمولاً به ریشه گرفتن شاره‌های سازندهٔ آن‌ها از سنگ‌های تهنشستی و دگرگونی و ورود Mg از آن‌ها به درون تورمالین نسبت داده می‌شود.



شکل ۱۰ نمودار مثلثی $Al_{50}Fe-Al-Al_{50}Mg$ ، [۲۱] و موقعیت نمونه‌های مورد بررسی روی آن. اعداد در نمودار: ۱- گرانیوئیدهای غنی از Li و پگماتیت و آپلیت‌های وابسته به آن ۲- گرانیوئیدهای فقیر از Li و پگماتیت و آپلیت‌های وابسته به آن ۳- سنگ‌های کوارتز-تورمالینی غنی از Fe^{3+} و گرانیوئیدهای 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- گرانیوئیدهای غنی از Li و پگماتیت و آپلیت‌های وابسته به آن ۲- گرانیوئیدهای فقیر از Li و پگماتیت و آپلیت‌های وابسته به آن ۳- متاپلیت‌های غنی از Ca، متاپسامیت‌ها و سنگ‌های آهکی سیلیکاتی ۴- متاپلیت‌های فقیر از Ca، متاپسامیت‌ها و سنگ‌های کوارتز-تورمالینی ۵- کربنات‌های دگرگون شده ۶- الترامافیک‌های دگرگون شده. (علائم همانند شکل ۲).

برداشت

ترکیب کلیه تورمالین‌های منطقه نظام‌آباد بین دو عضو انتهایی شورل و دراویت، با تمایل به سمت قطب دراویت قرار می‌گیرند و بیشتر از نوع قلیایی هستند. قرارگیری این تورمالین‌ها در گستره متاپلیت‌ها نشان می‌دهد که سنگ‌های تهنشستی دگرگون شده منطقه نیز احتمالاً در خاستگاه شاره‌های تشکیل دهنده آن‌ها موثر بوده‌اند. همچنین ترکیب کلیه تورمالین‌های شاهکوه نیز بین دو عضو انتهایی شورل و دراویت، ولی با تمایل زیاد به قطب شورل و در رده تورمالین‌های قلیایی قرار می‌گیرند. از این میان تورمالین‌های موجود در رگه‌های شبه پگماتیته به طریق ماگمایی تشکیل شده‌اند. تورمالین‌های گرانیوئیدهای گرایزنی و رگه‌های کوارتز-تورمالین رخمون یافته در توده گرانیته دارای خصوصیات تورمالین‌های گرمابی و ماگمایی بوده

و با شاره گرمابی ریشه گرفته از ماگمای اصلی توده، و تورمالین‌های میکروگرانیته‌های لوکوکرات نیز در یک شرایط حدواسط گرمابی-ماگمایی به وجود آمده‌اند. تورمالین‌های رگه‌های کوارتز-تورمالین رخمون یافته در سنگ‌های تهنشستی نیز به تورمالین‌های نظام‌آباد شباهت دارند و در شرایط گرمابی به وجود 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.,

[۱۴] حق نظر م.، "پتروژنر و کانه زایی تنگستن در بخش جنوب شرقی کمپلکس گرانیتی بروجرد"، پایان نامه 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)". Chemical 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 Larderello 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. Mineral. 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 deposits, Murchison Province, Yilgarn Craton, Western Australia". Chemical Geology 188 (2002) 229-247.

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": implications for hydrothermal ore-forming processes: Mineralium Deposita, 30 (1995) 225-234.

[6] Sinclair W.D., Richardson J.M., "Quartz-tourmaline orbicules in the seagull batholith, Yukon Territory". Can. Mineral. 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 southwest England". J. Petrol. 41 (2000) 1439-1453.

[9] Berberian m., King G.C.P., "Towards a paleogeography 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 تگرش ویژه به کانه زایی قلع"، رساله دوره دکتری، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۸۰).

[11] Esmaeily D., Bellon H., Valizadeh M.V., "Isotopic chronology and trace elements geochemistry of the Shah-Kuh granite, Eastern Iran". The International Earth Sciences colloquium on the Aegean 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 توده گرانیتیویدی بروجرد، رساله دکتری، دانشکده زمین شناسی"، پردیس علوم، دانشگاه تهران، (۱۳۸۵)، ۱۹۰ صفحه.