



## ژئوشیمی و تعیین خاستگاه تورمالین‌های منطقه‌ی بروجرد

فرزانه میرسپهوند<sup>۱</sup>، زهرا طهماسبی\*<sup>۲</sup>، سیدوحید شاه‌رخی<sup>۱</sup>، احمداحمدی خلجی<sup>۲</sup>، محمود خلیلی<sup>۳</sup>

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم‌آباد

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان

۳- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان

(دریافت مقاله: ۸۹/۱۲/۸، نسخه نهایی: ۹۰/۴/۲۲)

**چکیده:** بررسی آنالیزهای ریزپردازشی (نقطه‌ای) از تورمالین‌های موجود در رگه‌های کوارتز - تورمالین در کوارتز دیوریت‌های نظام آباد، رگه‌های آپلیتی و پگماتیتهای تورمالین‌دار در گرانودیوریت‌های قلعه ثمورخان، گیجالی و کبوترلان، رگه‌های پگماتیتهای در شیب‌های کلهجوب و ندول‌های تورمالین در مونزوگرانیتهای آستانه و گرانودیوریت‌های دهگانه نشان می‌دهد که اکثر تورمالین‌های این منطقه از نوع شورلیت بوده و تورمالین‌های سوزنی قلعه ثمورخان و برخی از نمونه‌های گیجالی و کلهجوب از نوع فوئیتیت‌اند. خود شکلی و عدم منطقه‌بندی، بالا بودن مقدار  $Fe/Fe + Mg$ ، نقصان در جایگاه X و بالا بودن مقدار Al در اکثر تورمالین‌ها حاکی از ماگمایی بودن آنهاست، و وجود تورمالین‌ها به صورت گرهک در گرانیتهای پر آلومین دهگانه و آستانه نشانه‌ی روشنی از غنی بودن ماگمای خاستگاه آنها از B است. بنابراین تورمالین‌های مورد بررسی وابسته به محیط‌های گرانیتهای بوده و بوسیله یک گرماب با خاستگاه ماگمایی به وجود آمده‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** آستانه؛ بروجرد؛ تجزیه‌ی نقطه‌ای؛ تورمالین.

### مقدمه

تورمالین کانی رایج و فرعی انواع سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی است و به عنوان یک کانی ماگمایی اولیه در سنگ‌های گرانیتهای و پگماتیتهای متبلور می‌شود [۲،۱]. این کانی به دلیل پایداری در گستره‌ی وسیعی از تغییرات دما و فشار و ترکیب شیمیایی پیچیده و متنوع، در بررسی‌های سنگ‌شناسی از اهمیت خاصی برخوردار است [۴،۳]. پیچیدگی شیمیایی تورمالین برخلاف اغلب کانی‌ها، ناشی از جاننشینی‌های گسترده‌ای است که در این کانی وجود دارد و باعث می‌شود این کانی محیط تشکیل بسیار گسترده داشته و برای پی بردن به سنگ‌زایی و جایگاه زمین‌شناسی سنگ‌های میزبان خود مورد استفاده قرار گیرد.

بر اساس ویژگی‌های نوری مانند رنگ، چندرنگی، سختی و ترکیب شیمیایی پنج خاستگاه محتمل برای تورمالین پیشنهاد

شده‌اند [۵]: ۱- نواحی گرانیتهای ۲- نواحی پگماتیتهای ۳- نواحی پگماتیتهای تزریق شده در نواحی دگرگونی ۴- تورمالین‌های اتوژنتیک رسوبی ۵- تورمالین‌هایی از نواحی قدیمی‌تر. در اینجا با استفاده از نتایج آنالیزهای ریز گمانه‌ی الکترونی، ترکیب تورمالین را در سنگ‌های متنوع منطقه‌ی بروجرد مورد بررسی قرار داده و نوع و خاستگاه آنها در واحدهای مختلف تورمالین‌دار تعیین شده است.

### روش بررسی

برای تعیین ترکیب، نوع و خاستگاه تورمالین در واحدهای مختلف تورمالین‌دار منطقه بروجرد، در مجموع از گره‌های تورمالینی روستای دهگانه، رگه‌های تورمالین‌دار روستای گیجالی، رگه‌های آپلیتی روستای کبوترلان، پگماتیتهای روستای قلعه ثمورخان، پگماتیتهای تورمالین‌دار روستای از

شیمی تورمالین‌ها بیش از ۲۲ نقطه از واحدهای مختلف تورمالین‌دار با استفاده از دستگاه Super probe 8400 [ابرپردازنده] و استانداردهای مختلف در آزمایشگاه ریزپردازشی الکترونی در دانشگاه Huelva اسپانیا توسط مولف دوم مورد، آنالیزهای ریزپردازشی (نقطه‌ای) قرار گرفتند (جدول ۱).

کلهجوب، رگه‌های کوارتز- تورمالین روستای نظام آباد و گرهک‌های تورمالین‌دار منطقه‌ی آستانه واقع در حوالی روستای سرسختی نمونه‌برداری شده است. سپس ۳۰ مقطع نازک میکروسکوپی و ۶ مقطع نازک- صیقلی از نمونه‌های سنگی مختلف برای بررسی‌های سنگ‌نگاری تهیه شدند. برای بررسی

جدول ۱ آنالیزهای میکروپروب از تورمالین‌های موجود در سنگ‌های مختلف مورد بررسی.

محل نمونه برداری	تورمالین‌های سوزنی روستای قلعه ثمورخان				تورمالین‌های روستای گیجالی				تورمالین‌های ندولی آستانه			
SiO <sub>2</sub>	۳۶,۲۲۸	۳۶,۲۳۱	۳۶,۲۸۲	۳۶,۲۵۳	۳۶,۶۱۱	۳۵,۷۶۷	۳۶,۲۶۳	۳۵,۹۷۰	۳۵,۷۴۱	۳۵,۷۶۶	۳۶,۲۸۴	
TiO <sub>2</sub>	۰,۱۲۴	۰,۱۱۹	۰,۷۱۲	۰,۲۴۳	۰,۱۰۳	۰,۱۰	۰,۱۷	۰,۰۰۱	۰,۸۳۴	۰,۷۸۱	۰,۷۰۰	
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۴۳	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۱۱	۰,۰۰۲	۰,۰۳۴	۰,۰۰۲	۰,۰۳۴	۰,۰۰۰	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳۵,۸۳۷	۳۶,۰۷۱	۳۱,۵۸۵	۳۵,۸۸۵	۳۵,۱۵۹	۳۴,۱۷۰	۳۴,۹۸۸	۳۴,۸۶۶	۳۵,۳۷۷	۳۴,۸۶۹	۳۴,۸۵۱	
FeO*	۱۳,۱۲۹	۱۳,۱۳۶	۱۲,۷۴۹	۱۳,۰۳۶	۱۲,۹۴۶	۱۵,۵۱۳	۱۴,۱۰۲	۱۲,۷۳۸	۱۲,۸۸۷	۱۲,۱۱۰	۱۱,۰۰۱	
MnO	۰,۲۱۱	۰,۲۳۱	۰,۱۳۲	۰,۲۰۱	۰,۲۳۰	۰,۲۹۹	۰,۲۲۳	۰,۱۴۸	۰,۰۸۱	۰,۰۶۸	۰,۰۸۰	
MgO	۰,۵۹۷	۰,۵۰۱	۲,۲۳۶	۰,۵۸۷	۱,۴۷۲	۰,۱۸۱	۰,۶۷۴	۱,۴۸۲	۰,۹۹۰	۲,۰۹۸	۲,۵۰۵	
ZnO	۰,۰۹۹	۰,۰۶۵	۰,۰۳۵	۰,۰۶۷	۰,۰۳۲	۰,۰۱۳	۰,۰۲۰	۰,۰۱۶	۰,۰۷۸	۰,۰۴۳	۰,۰۰۰	
CaO	۰,۰۴۸	۰,۰۵۷	۰,۵۹۸	۰,۰۵۰	۰,۱۷۹	۰,۱۱۸	۰,۰۵۷	۰,۱۴۳	۰,۱۶۳	۰,۲۰۴	۰,۲۴۲	
Na <sub>2</sub> O	۱,۲۷۳	۱,۲۵۶	۱,۹۵۹	۱,۳۶۳	۱,۸۱۵	۱,۵۲۹	۱,۲۹۳	۱,۶۷۰	۱,۵۷۳	۱,۷۶۹	۱,۷۷۲	
K <sub>2</sub> O	۰,۰۲۸	۰,۰۱۶	۰,۰۳۷	۰,۰۳۰	۰,۰۴۴	۰,۰۴۱	۰,۰۱۷	۰,۰۳۵	۰,۰۳۰	۰,۰۳۸	۰,۰۳۱	
F	۰,۱۴۶	۰,۱۴۱	۰,۴۷۹	۰,۳۱۸	۰,۵۲۱	۰,۵۳۸	۰,۲۵۲	۰,۵۸۴	۰,۲۵۰	۰,۳۹۳	۰,۳۰۲	
Cl	۰,۰۰۰	۰,۱۱۱	۰,۰۰۷	۰,۲۱۴	۰,۲۲۴	۰,۰۱۱	۰,۰۰۲	۰,۰۰۲	۰,۳۰۹	۰,۰۱۱	۰,۰۲۱	
O=F	-۰,۰۶۱	-۰,۰۵۹	-۰,۲۰۲	-۰,۱۲۴	-۰,۲۱۹	-۰,۲۲۶	-۰,۱۰۶	-۰,۲۴۶	-۰,۱۰۵	-۰,۱۶۵	-۰,۱۲۷	
O=Cl	۰,۰۰۰	-۰,۰۲۵	-۰,۰۰۲	-۰,۰۴۸	-۰,۰۱۲	-۰,۰۰۲	۰,۰۰۰	-۰,۰۰۵	-۰,۰۷۰	-۰,۰۰۲	-۰,۰۰۵	
Total	۸۷,۶۷۰	۸۷,۸۴۹	۸۷,۶۵۱	۸۸,۱۶۵	۸۸,۴۵۳	۸۷,۹۷۰	۸۷,۸۰۲	۸۷,۴۵۹	۸۸,۱۴۱	۸۸,۰۱۴	۸۷,۶۰۷	
H <sub>2</sub> O*	۳,۴۵۲	۳,۵۸۲	۳,۴۲۴	۳,۵۴۷	۳,۵۴۷	۳,۵۴۴	۳,۴۴۷	۳,۴۵۰	۳,۵۴۰	۳,۴۵۰	۳,۶۴۰	
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	۱,۰۵۵۰	۱,۰۶۳۶	۱,۰۶۷۳	۱,۱۰۰۱	۱,۱۰۰۱	۱,۰۹۹۴	۱,۰۷۱۱	۱,۰۵۵۰	۱,۰۹۹۰	۱,۰۷۱۰	۱,۰۵۸۰	
Li <sub>2</sub> O*	۱,۲۵۰	۰,۲۹۴	۱,۰۵۵	۱,۴۵۰	۱,۴۵۰	۰,۵۸۶	۰,۲۶۷	۰,۲۵۰	۰,۵۹۰	۰,۲۷۰	۰,۰۸	
Si	۵,۹۴۹	۵,۹۴۳	۶,۰۴۸	۵,۹۶۹	۵,۹۲۳	۵,۹۹۲	۵,۹۸۹	۵,۹۷۵	۵,۸۸۸	۵,۸۷۸	۵,۹۳۹	
Ti	۰,۰۱۵	۰,۰۱۵	۰,۰۸۹	۰,۰۳۰	۰,۰۱۳	۰,۰۰۱	۰,۰۰۲	۰,۰۰۰	۰,۰۱۰۳	۰,۰۰۹۶	۰,۰۸۶	
V	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۵	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰	۰,۰۰۴	۰,۰۰۰	۰,۰۰۴	۰,۰۰۰	
Al	۶,۹۳۶	۶,۹۷۴	۶,۲۰۶	۶,۹۴۴	۶,۸۹۱	۶,۷۴۶	۶,۸۱۱	۶,۸۲۶	۶,۸۶۹	۶,۷۵۴	۶,۷۲۳	
Fe	۱,۸۰۳	۱,۸۰۲	۱,۷۷۷	۱,۷۹۰	۱,۸۰۱	۲,۱۷۳	۱,۹۴۸	۱,۷۷۰	۱,۷۷۶	۱,۶۶۴	۱,۵۰۶	
Mn	۰,۰۲۹	۰,۰۳۲	۰,۰۱۸	۰,۰۲۸	۰,۰۳۳	۰,۰۴۳	۰,۰۳۱	۰,۰۲۱	۰,۰۱۱	۰,۰۰۹	۰,۰۱۱	
Mg	۰,۱۴۶	۰,۱۲۳	۰,۸۰۴	۰,۱۴۴	۰,۳۶۵	۰,۰۴۵	۰,۱۶۶	۰,۳۶۷	۰,۲۴۳	۰,۵۴۲	۰,۶۱۱	
Zn	۰,۰۱۲	۰,۰۰۸	۰,۰۰۴	۰,۰۰۸	۰,۰۰۴	۰,۰۰۲	۰,۰۰۲	۰,۰۰۲	۰,۰۱۰	۰,۰۰۵	۰,۰۰۰	
Ca	۰,۰۰۸	۰,۰۱۰	۰,۱۰۷	۰,۰۰۹	۰,۰۳۲	۰,۰۲۱	۰,۰۱۰	۰,۰۲۵	۰,۰۲۹	۰,۰۳۶	۰,۰۴۳	
Na	۰,۴۰۵	۰,۳۹۹	۰,۶۳۳	۰,۴۳۴	۰,۵۸۵	۰,۴۹۶	۰,۴۱۴	۰,۵۳۸	۰,۵۰۲	۰,۵۶۴	۰,۵۴۶	
K	۰,۰۰۸	۰,۰۰۲	۰,۰۰۸	۰,۰۰۶	۰,۰۰۹	۰,۰۰۹	۰,۰۰۴	۰,۰۰۷	۰,۰۰۶	۰,۰۰۸	۰,۰۰۶	
F	۰,۰۷۶	۰,۰۷۳	۰,۲۵۳	۰,۱۶۵	۰,۲۷۴	۲۸۵	۰,۱۳۲	۰,۳۰۷	۰,۱۳۱	۰,۲۰۴	۰,۱۵۶	
Cl	۰,۰۰۰	۰,۰۳۱	۰,۰۰۲	۰,۰۵۹	۰,۲۰۴	۰,۰۰۳	۰,۰۰۰	۰,۰۰۶	۰,۰۸۶	۰,۰۰۳	۰,۰۰۶	
Sum	۱۵,۳۱۳	۱۵,۳۰۹	۱۵,۷۰۰	۱۵,۳۶۲	۱۵,۶۵۵	۱۵,۵۲۹	۱۵,۳۷۸	۱۵,۵۳۵	۱۵,۴۳۷	۱۵,۵۳۲	۱۵,۴۷۱	
Mg*	۰,۰۷۵	۰,۰۶۴	۰,۳۱۲	۰,۰۷۴	۰,۱۶۹	۰,۰۲۰	۰,۰۷۹	۰,۱۷۲	۰,۱۲۰	۰,۲۳۶	۰,۲۸۹	
Xsite	۰,۴۲۲	۰,۴۱۳	۰,۷۴۸	۰,۴۴۹	۰,۶۲۷	۰,۵۲۶	۰,۴۲۸	۰,۵۷۱	۰,۵۳۷	۰,۶۰۷	۰,۵۹۵	
Xvac	۰,۵۷۸	۰,۵۸۷	۰,۲۵۲	۰,۵۵۱	۰,۳۷۳	۰,۴۷۴	۰,۵۷۲	۰,۴۲۹	۰,۴۶۳	۰,۳۹۳	۰,۴۰۵	
Na+K	۰,۴۱۳	۰,۴۰۳	۰,۶۴۱	۰,۴۴۰	۰,۵۹۵	۰,۵۰۵	۰,۴۱۸	۰,۵۴۵	۰,۵۰۹	۰,۵۷۲	۰,۵۵۳	
Xvac+Na	۰,۹۸۴	۰,۹۸۷	۰,۸۸۵	۰,۹۸۵	۰,۹۵۹	۰,۹۷۰	۰,۹۸۶	۰,۹۶۷	۰,۹۶۵	۰,۹۵۶	۰,۹۵۱	
Xvac,Xvac+Na	۰,۵۸۸	۰,۵۹۵	۰,۲۸۵	۰,۵۶۰	۰,۲۹۰	۰,۴۸۸	۰,۵۸۰	۰,۴۴۴	۰,۴۷۹	۰,۴۱۱	۰,۴۲۵	
MgMg+Fe	۰,۰۷۵	۰,۰۶۴	۰,۳۱۲	۰,۰۷۴	۰,۱۶۹	۰,۰۲۰	۰,۰۷۹	۰,۱۷۲	۰,۱۲۰	۰,۲۳۶	۰,۲۸۹	
R2	۰,۹۰۵	۰,۹۳۶	۰,۳۷۳	۰,۹۵۳	۰,۸۳۱	۰,۷۴۰	۰,۸۰۳	۰,۸۰۲	۰,۸۹۴	۰,۷۶۰	۰,۷۷۶	
R2*	۲,۸۸۴	۲,۸۹۳	۲,۹۷۳	۲,۹۱۵	۳,۰۲۹	۳,۰۰۱	۲,۹۴۸	۲,۹۵۹	۲,۹۲۴	۲,۹۴۸	۲,۹۰۴	

ادامه جدول ۱

محل نمونه برداری	تورمالین‌های ندولی روستای دهگانه				تورمالین‌های روستای کلهجوب			تورمالین‌های روستای کبوترلان			
	۳۶,۵۷۷	۳۶,۱۸۸	۳۶,۰۲۲	۳۵,۹۵۷	۳۴,۵۶۲	۳۴,۹۷۷	۳۶,۰۰۱	۳۶,۱۰۱	۳۶,۳۸۳	۳۶,۳۸۳	۳۶,۲۶۶
SiO2	۱,۰۶۷	۰,۹۰۵	۰,۸۴۸	۱,۰۴۳	۰,۸۳۷	۰,۷۳۵	۰,۸۵۳	۰,۲۸۶	۰,۱۴۳	۰,۱۸۲	۰,۲۱۴
TiO2	۰,۰۳۴	۰,۰۰۰	۰,۰۳۲	۰,۰۳۶	۰,۰۳۸	۰,۰۰۰	۰,۰۱۵	۰,۰۵۸	۰,۰۱۱	۰,۰۱۵	۰,۰۰۰
V2O3	۳۴,۷۲۴	۳۴,۸۷۹	۳۴,۹۸۰	۳۳,۳۴۴	۳۵,۹۰۷	۳۵,۷۲۳	۳۵,۷۹۴	۳۵,۳۴۷	۳۵,۴۹۶	۳۵,۵۵۰	۳۵,۶۹۹
Al2O3	۱,۰۵۰۹	۱,۰۵۴۷	۱,۰۷۰۴	۱,۰۹۷۴	۱۲,۵۹۶	۱۲,۷۲۲	۱۰,۵۸۲	۱۱,۶۸۹	۱۲,۰۷۴	۱۲,۰۴۳	۱۱,۵۵۵
FeO*	۰,۰۷۷	۰,۰۵۲	۰,۰۷۳	۰,۰۷۹	۰,۱۱۹	۰,۱۳۲	۰,۰۶۳	۰,۰۸۶	۰,۱۱۹	۰,۱۰۶	۰,۰۷۰۴
MnO	۳,۱۸۶	۳,۱۰۵	۲,۹۱۹	۳,۱۶۴	۱,۳۷۸	۱,۳۰۸	۲,۵۸۲	۲,۱۶۰	۱,۸۶۳	۱,۹۱۷	۲,۱۵۱
MgO	۰,۰۳۱	۰,۰۱۹	۰,۰۴۶	۰,۰۰۰	۰,۰۸۵	۰,۰۴۳	۰,۰۹۱	۰,۰۸۲	۰,۰۷۱	۰,۰۸۷	۰,۰۷۹
ZnO	۰,۳۸۹	۰,۳۷۸	۰,۳۷۶	۰,۳۹۸	۰,۳۶۲	۰,۳۲۴	۰,۴۲۳	۰,۱۹۸	۰,۱۵۵	۰,۱۶۰	۰,۱۶۶
CaO	۱,۸۷۰	۱,۷۷۵	۱,۷۹۰	۱,۷۹۹	۱,۶۷۱	۱,۶۹۷	۱,۵۸۵	۱,۶۱۶	۱,۶۳۸	۱,۶۵۷	۱,۶۶۳
Na2O	۰,۰۳۱	۰,۰۳۵	۰,۰۳۷	۰,۰۵۱	۰,۰۳۹	۰,۰۴۲	۰,۰۳۴	۰,۰۳۶	۰,۰۳۵	۰,۰۳۴	۰,۰۴۴
K2O	۰,۱۹۲	۰,۲۰۲	۰,۲۷۶	۰,۱۷۰	۰,۰۴۷	۰,۰۸۴	۰,۱۵۵	۰,۳۳۵	۰,۳۰۷	۰,۳۹۲	۰,۳۳۶
F	۰,۰۱۲	۰,۰۰۰	۰,۰۰۶	۰,۱۶۵	۰,۵۱۷	۰,۵۵۳	۰,۰۴۷	۰,۳۱۳	۰,۷۴۹	۰,۰۰۸	۰,۰۱۵
Cl	-۰,۰۸۱	-۰,۰۸۵	-۰,۱۱۶	-۰,۰۷۲	-۰,۰۲۰	-۰,۰۳۵	-۰,۰۶۵	-۰,۱۴۱	-۰,۱۲۹	-۰,۱۶۵	-۰,۱۴۱
O=F	-۰,۰۰۳	۰,۰۰۰	-۰,۰۰۱	-۰,۰۳۷	-۰,۱۱۷	-۰,۱۲۵	-۰,۰۱۱	-۰,۰۷۱	-۰,۱۶۹	-۰,۰۰۲	-۰,۰۰۳
O=Cl	۸۸,۶۱۶	۸۸,۰۰۰	۸۷,۹۹۱	۸۷,۰۷۱	۸۸,۰۲۲	۸۸,۱۸۹	۸۸,۱۴۸	۸۸,۰۹۳	۸۸,۲۲۳	۸۸,۳۶۶	۸۸,۰۸۷
Total	۳,۵۴۷	۳,۵۴۴	۳,۴۴۷	۳,۶۴۱	۳,۴۳۰	۳,۵۵۰	۳,۵۴۰	۳,۵۴۰	۳,۴۵۰	۳,۶۴۰	۳,۴۴۴
H2O*	۱۱,۰۰۱	۱۰,۹۹۴	۱۰,۷۱۱	۱۰,۵۸۲	۱۰,۶۷۰	۱۱,۰۰۰	۱۰,۹۹۰	۱۰,۹۹۰	۱۰,۷۱۰	۱۰,۵۸۰	۱۰,۶۷۳
B2O3*	۱,۴۵۰	۰,۵۸۶	۰,۲۶۷	۰,۰۸۲	۱,۰۰۶	۱,۴۵۰	۰,۵۹	۰,۵۹	۰,۲۷	۰,۰۰۸	۱,۰۵۵
Li2O*	۵,۹۰۵	۵,۸۸۲	۵,۸۷۱	۵,۹۴۳	۵,۷۱۴	۵,۷۷۶	۵,۸۳۶	۵,۹۲۲	۵,۹۲۱	۵,۹۳۶	۵,۹۱۵
Si	۰,۱۲۹	۰,۱۱۱	۰,۱۰۴	۰,۱۳۰	۰,۱۰۴	۰,۰۹۱	۰,۱۰۴	۰,۰۳۵	۰,۰۱۸	۰,۰۲۲	۰,۰۲۶
Ti	۰,۰۰۴	۰,۰۰۰	۰,۰۰۴	۰,۰۰۴	۰,۰۰۴	۰,۰۰۰	۰,۰۰۲	۰,۰۰۶	۰,۰۰۱	۰,۰۰۲	۰,۰۰۰
V	۶,۶۰۷	۶,۶۸۷	۶,۷۱۹	۶,۴۹۵	۶,۹۹۶	۶,۹۵۲	۶,۸۳۹	۶,۸۳۴	۶,۹۰۷	۶,۸۳۶	۶,۸۶۳
Al	۱,۴۱۹	۱,۴۳۶	۱,۴۵۹	۱,۵۱۷	۱,۷۴۲	۱,۷۵۸	۱,۴۳۵	۱,۶۰۴	۱,۶۶۷	۱,۶۴۳	۱,۵۷۶
Fe	۰,۰۱۰	۰,۰۰۷	۰,۰۱۰	۰,۰۱۱	۰,۰۱۷	۰,۰۱۸	۰,۰۰۹	۰,۰۱۲	۰,۰۱۶	۰,۰۱۵	۰,۰۱۰
Mn	۰,۷۶۶	۰,۷۵۲	۰,۷۰۹	۰,۷۷۹	۰,۳۳۹	۰,۳۲۲	۰,۶۲۴	۰,۵۲۸	۰,۴۵۸	۰,۴۶۶	۰,۵۲۳
Mg	۰,۰۰۴	۰,۰۰۲	۰,۰۰۶	۰,۰۰۰	۰,۰۱۰	۰,۰۰۵	۰,۰۱۱	۰,۰۱۰	۰,۰۰۹	۰,۰۱۰	۰,۰۱۰
Zn	۰,۰۶۷	۰,۰۶۶	۰,۰۶۶	۰,۰۷۰	۰,۰۶۴	۰,۰۵۷	۰,۰۷۴	۰,۰۳۵	۰,۰۲۷	۰,۰۲۸	۰,۰۲۹
Ca	۰,۵۸۶	۰,۵۵۹	۰,۵۶۶	۰,۵۷۶	۰,۵۳۶	۰,۵۴۳	۰,۴۹۸	۰,۵۱۴	۰,۵۲۴	۰,۵۲۴	۰,۵۱۷
Na	۰,۰۰۶	۰,۰۰۷	۰,۰۰۸	۰,۰۱۱	۰,۰۰۸	۰,۰۰۹	۰,۰۰۷	۰,۰۰۷	۰,۰۰۷	۰,۰۰۷	۰,۰۰۹
K	۰,۰۹۸	۰,۱۰۴	۰,۱۴۲	۰,۰۸۹	۰,۰۲۵	۰,۰۴۴	۰,۰۷۹	۰,۱۷۴	۰,۱۶۰	۰,۲۰۲	۰,۱۷۳
F	۰,۰۰۳	۰,۰۰۰	۰,۰۰۲	۰,۰۴۶	۰,۱۴۵	۰,۱۵۵	۰,۰۱۳	۰,۰۸۷	۰,۲۱۰	۰,۰۰۲	۰,۰۰۴
Cl	۱۵,۵۰۳	۱۵,۵۰۲	۱۵,۵۱۹	۱۵,۵۳۶	۱۵,۵۳۴	۱۵,۵۲۲	۱۵,۴۳۷	۱۵,۵۰۷	۱۵,۵۵۷	۱۵,۴۸۹	۱۵,۴۷۸
Sum	۰,۳۵۱	۰,۳۴۴	۰,۳۲۷	۰,۳۳۹	۰,۱۶۳	۰,۱۵۵	۰,۳۰۳	۰,۲۴۸	۰,۲۱۶	۰,۲۲۱	۰,۲۴۹
Mg*	۰,۶۵۹	۰,۶۳۲	۰,۶۳۹	۰,۶۵۷	۰,۶۰۸	۰,۶۰۹	۰,۵۷۹	۰,۵۵۶	۰,۵۵۹	۰,۵۵۹	۰,۵۵۵
Xsite	۰,۳۴۱	۰,۳۶۸	۰,۳۶۱	۰,۳۴۳	۰,۳۹۲	۰,۳۹۱	۰,۴۲۱	۰,۴۴۱	۰,۴۴۱	۰,۴۴۱	۰,۴۴۵
Xvac	۰,۵۹۲	۰,۵۶۶	۰,۵۷۳	۰,۵۸۷	۰,۵۴۴	۰,۵۵۲	۰,۵۰۵	۰,۵۲۱	۰,۵۳۲	۰,۵۳۱	۰,۵۲۶
Na+K	۰,۹۲۷	۰,۹۲۷	۰,۹۲۷	۰,۹۱۹	۰,۹۲۸	۰,۹۳۴	۰,۹۱۹	۰,۹۵۸	۰,۹۶۵	۰,۹۶۵	۰,۹۶۲
Xvac+Na	۰,۳۶۸	۰,۳۹۷	۰,۳۹۰	۰,۳۷۳	۰,۴۲۳	۰,۴۱۸	۰,۴۵۸	۰,۴۶۳	۰,۴۵۷	۰,۴۵۷	۰,۴۶۳
Mg,Mg+Fe	۰,۳۵۱	۰,۳۴۴	۰,۳۲۷	۰,۳۳۹	۰,۱۶۳	۰,۱۵۵	۰,۳۰۳	۰,۲۴۸	۰,۲۱۶	۰,۲۲۱	۰,۲۴۹
R2	۰,۶۸۶	۰,۷۱۱	۰,۷۲۸	۰,۶۱۰	۰,۸۴۸	۰,۸۴۹	۰,۸۱۳	۰,۸۰۳	۰,۸۵۲	۰,۸۰۱	۰,۸۱۳
R2*	۲,۸۷۹	۲,۹۰۴	۲,۹۰۶	۲,۹۱۷	۲,۹۴۶	۲,۹۴۸	۲,۸۸۰	۲,۹۴۷	۲,۹۹۴	۲,۹۲۵	۲,۹۲۳

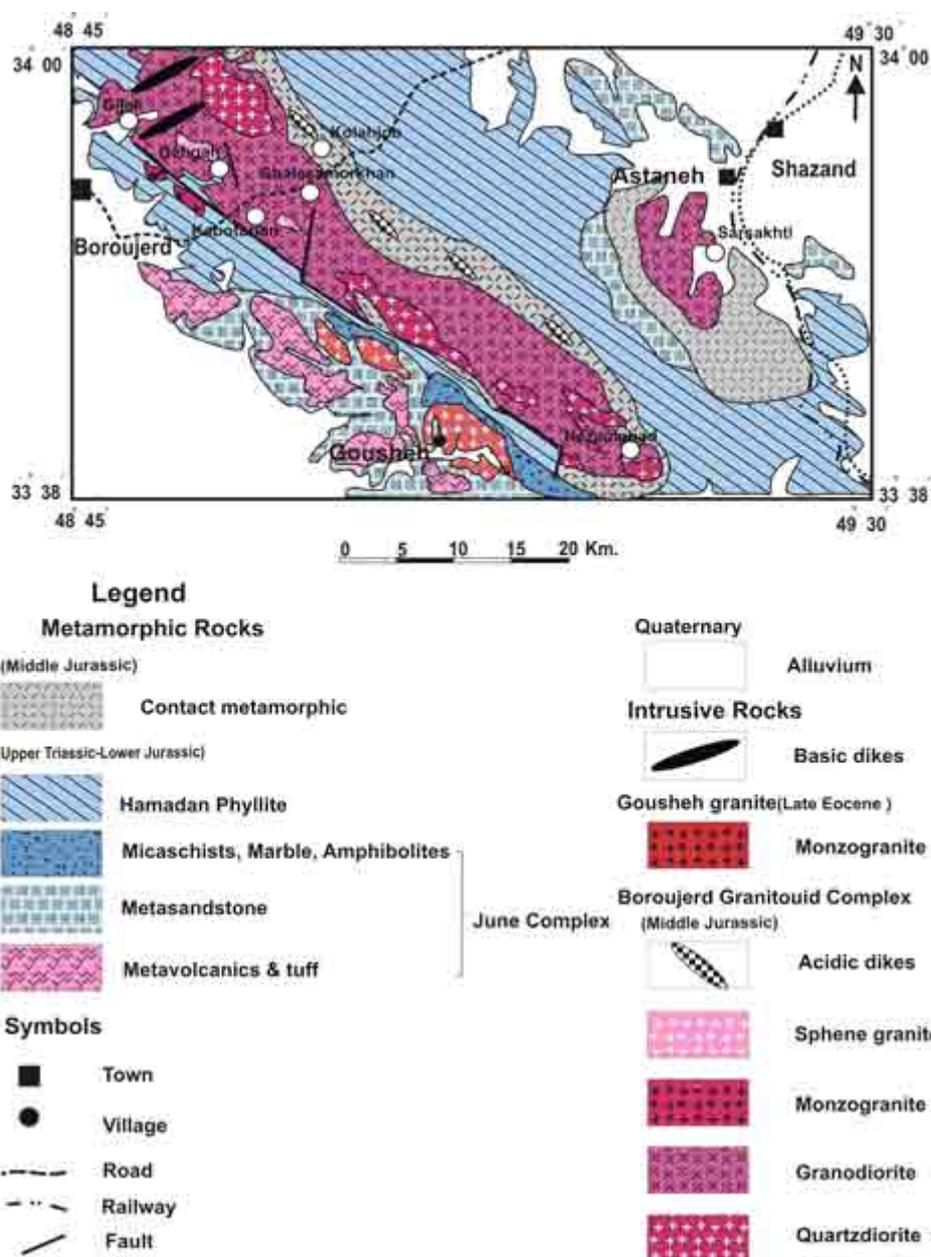
زمین‌شناسی عمومی

منطقه‌ی مورد بررسی در استان‌های لرستان و مرکزی، در شرق و جنوب شرقی شهرستان بروجرد و جنوب غربی شهرستان اراک بین طول‌های جغرافیایی ۴۵°۴۸' تا ۳۰°۴۹' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۸°۳۳' تا ۳۴° شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این منطقه از نظر زمین‌شناسی بخشی از زون سندج-

سیرجان محسوب می‌شود و علی‌رغم زمین‌ساختی شدیدی که پیچیدگی‌هایی در زمین‌شناسی منطقه به وجود آورده‌است، می‌توان ردیفی از سنگ‌ها را تشخیص داد به طوری که قدیمی‌ترین نهشته‌های موجود در این منطقه به تریاس وابسته بوده که شامل متاولکانیک‌ها با درون لایه‌هایی از مرم‌های نازک تا ضخیم‌اند و جدیدترین نهشته‌های آن‌ها، آبرفت‌های

مجاورتی (با شیست‌های لکه‌دار شروع، و به هورنفلس‌ها و میگماتیت‌ها ختم می‌شود) (۹،۸). شکل ۱). همچنین [۱۱،۱۰] معتقدند که اولین فعالیت نفوذی پس از دگرگونی ناحیه‌ای و طی حرکت‌های زمین‌ساختی اولیه آلپ در زمان کرتاسه زیرین (حدود ۱۲۰ Ma) رخ داده‌است که به واحدهای گرانودیوریتی (گرانیت‌های قدیمی [۱۱،۱۰]) و پگماتیت‌های موجود در هاله دگرگونی (پگماتیت‌های قدیمی [۱۱،۱۰]) وابسته‌اند.

عهد حاضر است [۶]. بالاترین بخش از ردیف دگرگونی را سنگ‌های پلیتی دگرگون‌شده موسوم به فیلیت‌های همدان تشکیل می‌دهند که به‌صورت دگرگونی ناحیه‌ای در حد رخساره شیست‌سبز (زون کلریت) درآمده و بیشتر شامل اسلیت و فیلیت می‌شوند [۷]. بر اساس تعیین سن به روش U-Pb روی زیرکن واحدهای مختلف گرانیتوئیدی، مهمترین رویداد زمین‌شناسی که در این ناحیه رخ داده‌است پیدایش توده‌های گرانیتوئیدی بروجرد و آستانه در زمان ژوراسیک میانی است که درون این فیلیت‌ها نفوذ کرده‌اند و دگرگونی



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد بررسی [۸].

**ویژگی‌های صحرایی و پتروگرافی واحدهای تورمالین‌دار**

روابط صحرایی بین مجموعه‌های سنگ‌شناسی موجود در منطقه (مجموعه‌های گرانیتی و دگرگونه‌ها)، ارتباط رگه‌های آپلیتی و پگماتیتی با این مجموعه‌ها و نیز ارتباط رگه‌های کوارتز-تورمالینی با سنگ میزبان کوارتزدیوریتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بررسی‌های صحرایی انجام گرفته بیانگر این است که در بخش‌های مختلف منطقه، کوارتزدیوریت‌ها، گرانودیوریت‌ها، مونزوگرانیت‌ها و شیست‌ها، میزبان واحدهای تورمالین‌دار هستند. واحدهای تورمالین‌دار موجود در منطقه مورد بررسی عبارتند از:

در جنوب شرقی بروجرد در حوالی روستای دهگاه، رگه‌های آپلیتی - پگماتیتی تورمالین‌دار در سنگ‌های گرانودیوریتی برونزد دارند که تورمالین در آن‌ها به صورت لکه‌ها یا گرهک‌ها دیده می‌شود (شکل ۲ الف). به عقیده‌ی [۱۲] این گرهک‌ها غالباً به وسیله‌ی رگچه‌های نازک تغذیه می‌شوند و حاصل آن یک فاز غنی از بر (B) در فازهای پایانی است. در این سنگ‌ها، تورمالین به صورت لکه‌های قهوه‌ای و آبی با پلی کروئیسیم معکوس دیده می‌شود (در بخش میانی آبی و در حاشیه قهوه‌ای) و بخش اعظم سنگ کوارتز است. پلاژیوکلاز با لکه‌های چند ترکیبی، میکروکلین و پرتیت‌های بسیار درشت دیده می‌شود.

در جنوب شرقی روستای گیجالی پایین، رگه‌های پگماتیتی در درون گرانودیوریت‌ها برونزد دارند که حاوی تورمالین‌اند (شکل ۲ ب). در این رگه‌ها، تورمالین با رنگ سبز - آبی با پلی کروئیسیم مشخص آبی همراه پلاژیوکلاز، مسکوویت و کوارتز دیده می‌شوند.

در جنوب غربی روستای کبوترلان در کنار جاده‌ی بروجرد - اراک رگه‌های آپلیتی - پگماتیتی تورمالین‌دار در سنگ‌های گرانودیوریتی برونزد دارند که حاوی تورمالین‌های بسیار ریزند. این رگه‌ها حاوی تورمالین (به صورت آبی و قهوه‌ای که تورمالین آبی در وسط و قهوه‌ای در حاشیه‌ها) قرار دارند، اسفن، کلریت و پلاژیوکلاز با بافت آپلیتی هستند.

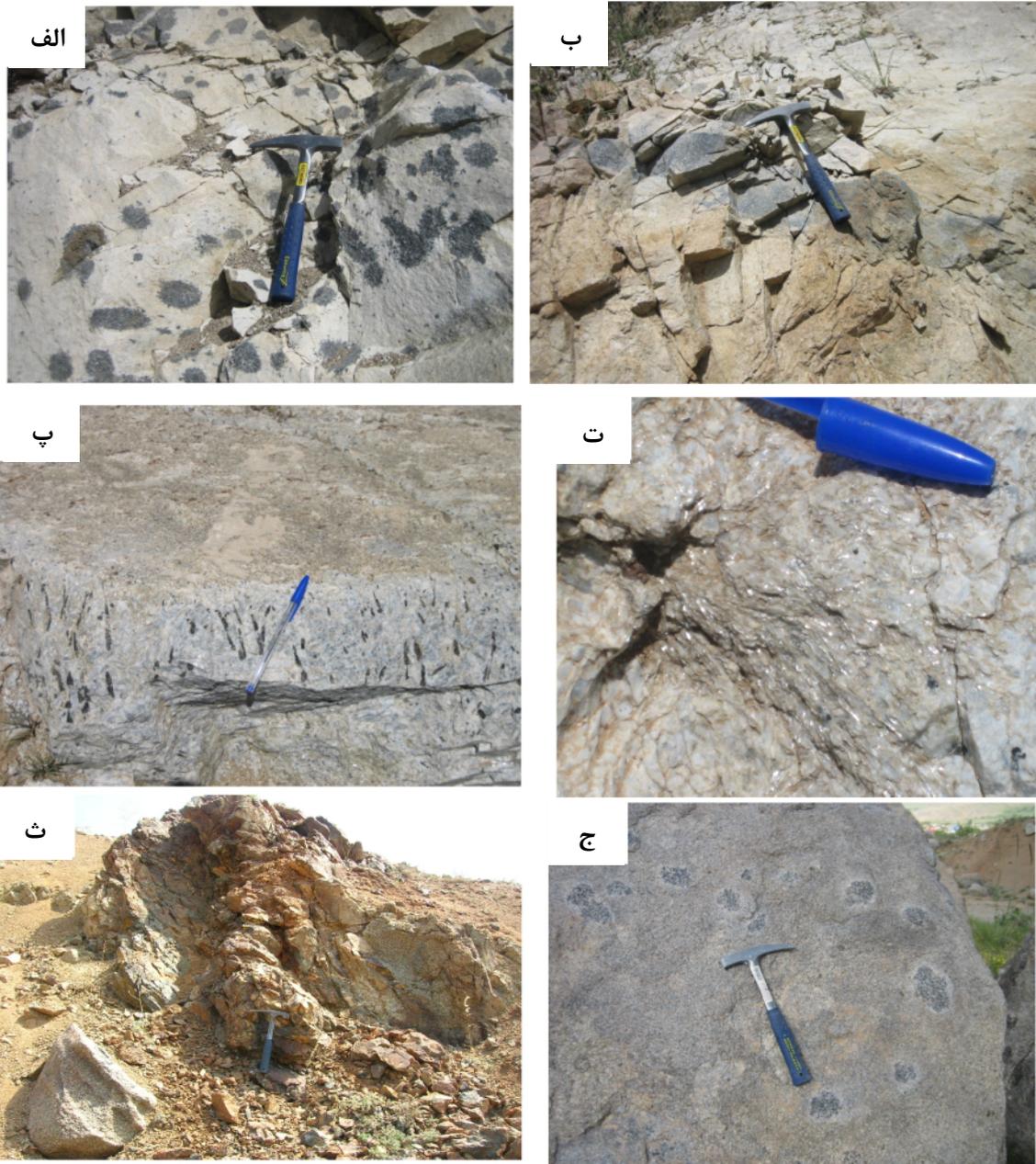
در غرب روستای قلعه ثمورخان در مسیر جاده‌ی بروجرد - اراک، رگه‌های پگماتیتی تورمالین‌دار در درون گرانودیوریت‌ها دیده می‌شوند (شکل ۲ پ). کانی‌های این سنگ‌ها شامل

کوارتز، پلاژیوکلاز با ماکل تکراری، میکروکلین با ماکل مشبک، تورمالین (به حالت هم‌رشدی با کوارتز)، ارتوزهای پرتیتی، مسکوویت و گارنت با بافت دیده می‌شوند.

در شرق روستای کله‌جوب، پگماتیتهایی در درون شیست‌ها برونزد دارند که حاوی انواع تورمالین و مسکوویت‌های دانه‌های بسیار درشت هستند (شکل ۲ ت). در این منطقه اندازه‌ی تورمالین‌ها به ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر می‌رسد. این سنگ‌ها دارای روند شمال غربی - جنوب شرقی بوده و در حوالی روستاهای کهریز و کله‌جوب به خوبی دیده می‌شوند (شکل ۲ ت). در نمونه دستی، مسکوویت‌های درشت، تورمالین و کوارتز قابل تشخیص‌اند. این سنگ‌ها دارای تورمالین‌های سوزنی و بیشتر به رنگ آبی هستند. این تورمالین‌ها خود شکل و به صورت تیغه‌های منفرد کرده و رشد افشانه‌ای دارند.

در جنوب شرقی روستای نظام آباد، رگه‌های کوارتز - تورمالین در درون کوارتزدیوریت‌ها مشاهده می‌شوند که گاه حاوی ۱۰۰ درصد تورمالین‌اند (شکل ۲ ث). این سنگ‌ها حاوی کانی‌های تورمالین (با چند رنگی آبی کمرنگ و ساخت منطقه‌ای)، کوارتز، مسکوویت، پلاژیوکلاز با ماکل تکراری، پرتیت و اپیدوت با بافت پگماتیتی است.

در جنوب شهر آستانه، مونزوگرانیت‌های تورمالین داری وجود دارند که تورمالین در این گرانیت‌ها همراه با کوارتز به صورت گرهک دیده می‌شود (شکل ۲ ج). این گرهک‌ها در نمونه‌ی دستی دارای دو ترکیب مرکزی تیره و حاشیه‌ی روشن‌اند [۱۳]. این تغییر رنگ در نتیجه‌ی تبادل‌های یونی بین مرکز و حاشیه گرهک‌های تورمالین به وجود آمده است، و در نتیجه منجر به پایداری بیشتر مرکز گرهک نسبت به حاشیه آن می‌شود. در مقاطع نازک، هسته‌ی این تورمالین با رنگ قهوه‌ای مایل به سبز با حاشیه آبی دیده می‌شود. در بخش روشن، یا بیوتیت وجود ندارد یا اندک است. فلدسپات پتاسیم و پلاژیوکلاز سریسیتی شده از کانی‌های غالب این حاشیه است. شکل گرهک‌ها متفاوت است ولی متداول‌ترین آنها کروی یا بیضی‌وار است. یکی از اشکال ظاهری گرهک‌ها قرارگیری آنها در یک مسیر مستقیم و شبیه دانه‌های تسبیح است (شکل ۲ ج). قطر گرهک‌ها از ۲۰ میلی‌متر در هسته‌ی تیره تا حدود ۴۰ میلی‌متر در بخش روشن تغییر می‌کند (شکل ۲ ج).



شکل ۲ تصاویر صحرایی واحدهای تورمالین دار، الف: گرهک‌های تورمالین در رگه‌های آپلیتی-پگماتیتی موجود در گرانودیوریت‌های دهگاه، ب: رگه‌های آپلیتی-پگماتیتی تورمالین دار در گرانودیوریت‌های روستای گیجالی، پ: تورمالین‌های سوزنی در رگه‌های پگماتیتی موجود در گرانودیوریت‌های روستای قلعه ثمورخان، ت: پگماتیتهای تورمالین دار در شیست‌های روستای کلهجوب، ث: رگه‌های کوارتز-تورمالین در کوارتزدیوریت‌های منطقه‌ی نظام آباد، ج: گرهک‌های تورمالین دار در مونزوگرنیت‌های منطقه‌ی آستانه.

#### شیمی کانی تورمالین در منطقه‌ی مورد بررسی

برای بررسی تغییرات ترکیبی در نسبت‌های Ca, Na, Mg, Fe و تشخیص نوع تورمالین‌ها از نمودارهای دوتایی  $X - vac / X - vac + Na$  نسبت به  $Mg/Mg + Fe$  استفاده شد (شکل ۳ الف). بر اساس این نمودارها، کلیه تورمالین‌ها در گستره‌ی بین شورل-فونیتیت با تمرکز بیشتر در منطقه‌ی

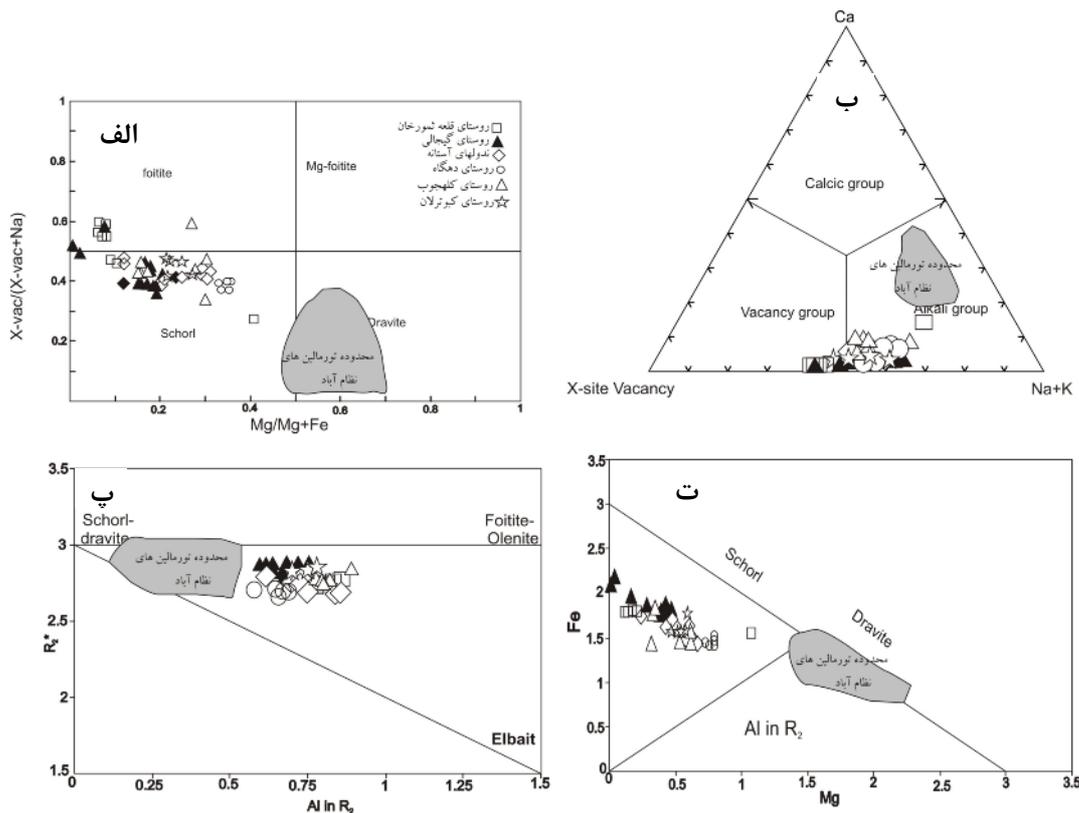
شورلیت قرار گرفته‌اند. همچنین بنابراین نمودار، گرهک‌های تورمالین دار دهگاه و به میزان کمتری گرهک‌های آستانه دارای میزان بیشتری از  $Mg/Mg + Fe$  هستند و نمونه‌های قلعه‌ی ثمورخان و تعدادی از نمونه‌های روستای گیجالی معمولاً دارای میزان کمتری از نسبت فوق بوده و به قطب فونیتیت وابسته‌اند. در حالی که نمونه‌های نظام آباد در گستره‌ی شورلیت -

در نمودار  $R_2^*$  نسبت به  $Al$  in  $R_2$  (شکل ۳ پ)، کلیه نمونه‌های آنالیز شده نشان می‌دهند که جایگاه  $Y$  آنها به طور کامل پر نشده است. کمبود در این جایگاه را تا حدودی می‌توان با جانشینی البائیت (جانشینی لیتیم) توجیه کرد یعنی عملکرد این جانشینی باعث می‌شود که  $Al$ ,  $Li$  جایگزین مقداری از  $Mg$ ,  $Fe$  موجود در موقعیت  $Y$  شود [۱۵].

در نمودار  $Fe$  نسبت به  $Mg$  [۱۵] ترکیب شورلیت-دراویت روی خط  $\sum(Fe + Mg) = 3$  قرار می‌گیرد (شکل ۳ ت) و همه‌ی نمونه‌هایی که زیر این خط قرار دارند به صورت جانشینی  $Al$  در موقعیت  $Y$  در می‌آیند. چنان‌که از نمودار پیداست هرچه  $\sum(Fe + Mg)$  کمتر باشد، میزان جانشینی  $Al$  در موقعیت  $Y$  بیشتر می‌شود. آنچه از این نمودار بر می‌آید این است که تمامی نمونه‌ها (بجز نمونه‌های نظام آباد) در گستره‌ی  $Mg$  کمتر از میزان  $Fe$ ، یعنی شورلیت است.

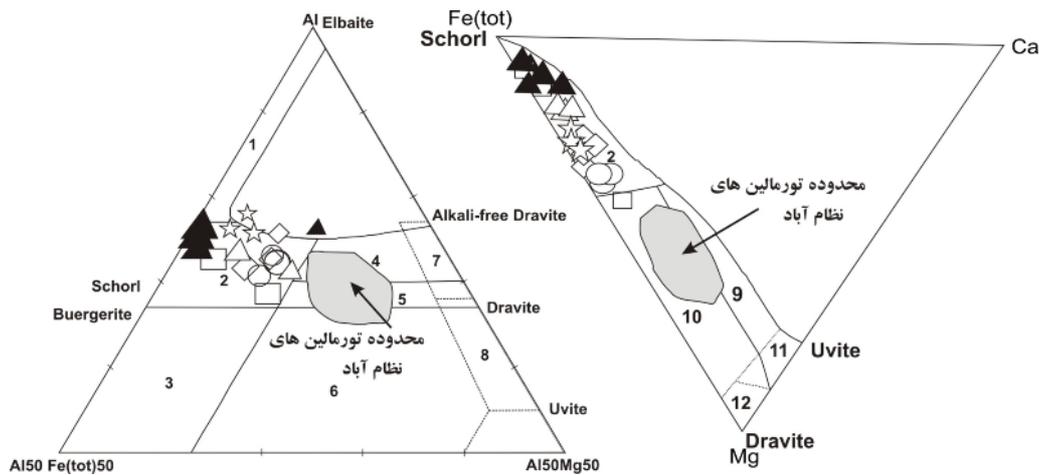
دراویت با تمایل بیشتر به سمت دراویت قرار می‌گیرند، و با توجه به تمایل نمونه‌ها به سمت قطب دراویت در مقایسه با شورلیت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که میزان  $Mg$  آنها از  $Fe$  بیشتر است.

بر اساس مقادیر  $(Ca, Na, K)$  تورمالین‌ها و وجود یا عدم وجود فضائی خالی در موقعیت  $X$ ، تورمالین‌ها را به سه دسته تورمالین‌های کلسیک، قلیائی و انواعی که موقعیت  $X$  آنها خالی است تقسیم می‌کنند [۱۴]، (شکل ۳ ب). بر اساس این رده‌بندی، بیشتر تورمالین‌های آنالیز شده به انواع قلیائی وابسته‌اند و فقط تعدادی از نمونه‌های روستای گیجالی و روستای قلعه‌ی ثمورخان به موقعیت  $X$  خالی تعلق دارند که این مسئله پایین بودن مقادیر  $Na$ ,  $K$  موجود در جایگاه  $X$  در مقایسه با مقدار  $Ca$  است.



شکل ۳ در نمودار الف) ترکیب تورمالین‌های مورد بررسی در گستره‌ی شورلیت - فوئیتیت قرار می‌گیرند، در نمودار ب) بیشتر تورمالین‌های منطقه‌ی مورد بررسی به انواع قلیائی تعلق دارند و فقط تعدادی از نمونه‌های روستای گیجالی و روستای قلعه‌ی ثمورخان در منطقه به موقعیت  $X$  خالی تعلق دارند. پ) در نمودار  $R_2^*$  نسبت به  $Al$  in  $R_2$  ( $R_2^* = Fe + Mg + Mn + Al$ ,  $R_2 = Al + 1.33Ti + Si - 12$ ) کلیه‌ی نمونه‌های آنالیز شده نشان می‌دهند که جایگاه  $Y$  آنها به طور کامل پر نشده است. ت) در نمودار  $Fe$  نسبت به  $Mg$  نمونه‌ها در زیر خط  $\sum(Fe + Mg) = 3$  و در گستره‌ی  $Mg$  کمتر از میزان  $Fe$ ، یعنی شورلیت قرار می‌گیرند. برای مقایسه، از داده‌های تورمالین‌های نظام آباد [۲۲] استفاده شد.





شکل ۵ نمایش تورمالین‌های منطقه‌ی مورد بررسی روی نمودارهای سه تایی Al-Fe-Mg و Ca-Fe-Mg. ۱: گرانیتوئیدهای غنی از لیتیم، پگماتیت‌ها و آپلیت‌های وابسته به آنها ۲: گرانیتوئیدهای فقیر از لیتیم، پگماتیت‌ها و آپلیت‌های وابسته به آنها ۳: سنگ‌های کوارتز-تورمالین سرشار از  $Fe^{3+}$  ۴: متاپلیت‌ها و متاپسامیت‌های همزیست با یک فاز اشباع از آلومینیم ۵: متاپلیت‌ها و متاپسامیت‌های ناهمزیست با یک فاز اشباع از آلومینیم ۶: سنگ‌های سیلیکات آهکی، متاپلیت‌ها و سنگ‌های کوارتز-تورمالین سرشار از  $Fe^{3+}$  ۷: اولترامافیک‌های دگرگون شده با کلسیم پایین و شبه سدیم‌های غنی از وانادیم و کروم ۸: شبه کربنات‌ها و شبه پیروکسنیت‌ها ۹: سنگ‌های سیلیکاتی آهکی، متاپسامیت‌ها و متاپلیت‌های غنی از Ca ۱۰: سنگ‌های کوارتز-تورمالین، متاپسامیت‌ها و متاپلیت‌های فقیر از Ca ۱۱: متاکربنات‌ها ۱۲: اولترامافیک‌های دگرگون شده. علائم مشابه شکل ۳ هستند.

شده‌اند. احتمالاً این رگه‌ها پس از نفوذ توده‌ی اصلی گرانیتی در اثر نفوذ دوباره‌ی ماگما و تزریق آن در توده‌ی اصلی به وجود آمده‌اند. گرهک‌های تورمالین در میکروگرانیت‌های لوکوکرات، با اینکه از جمله تورمالین‌های درون گرانیتی به حساب می‌آیند و باید در ناحیه‌ی گرانیتوئیدها قرار گیرند، به دلیل تشکیل در یک شرایط حد واسط، مقدار Mg آنها بیشتر از مقداری است که برای تورمالین‌های ماگمایی انتظار می‌رود، و برخی از آنها مانند نمونه‌های نظام آباد در ناحیه‌ی متاپلیت‌ها قرار می‌گیرند. تورمالین‌های رگه‌ای به دلیل منطقه‌بندی در مقیاس کوچک، پائین بودن  $Fe/Fe + Mg$  و کاستی کمتر در جایگاه X در شرایط گرمایی (ماگمایی تاخیری) به وجود آمده‌اند.

به اعتقاد [۹] همبافت گرانیتوئیدی بروجرد (به جزء واحد کوارتزادیوریت آن) از لحاظ شیمیایی پرآلمین است، لذا می‌تواند مقدار Al لازم برای تشکیل تورمالین در درون خود توده و رگه‌های آپلیتی-پگماتیتی را برآورده سازد. همچنین با توجه به وجود تورمالین‌های اولیه به این نتیجه می‌رسیم که این توده‌ی گرانیتوئیدی مقدار B لازم برای تشکیل تورمالین در درون توده و در رگه‌ها را نیز داراست و با توجه به مقدار  $Fe + Mg > 10$  در این توده، می‌توان گفت که مقدار کافی

آهن  $Fe/Fe + Mg$  بالاتری دارند. بنابراین تورمالین‌های نظام آباد، گرهکی روستای دهگاه و آستانه که عدد آهن پائین‌تر و Mg بالاتر دارند، تورمالین‌های گرمایی هستند درحالی که تورمالین‌های پگماتیتی-آپلیتی و تورمالین‌های درون گرانودیوریت‌های دیگر ماگمایی هستند. از طرف دیگر بالا بودن نسبت  $Fe^{2+}$  به Mg در تورمالین از نشانه‌های تشکیل آن به وسیله گدازه‌های ماگمایی است [۱۹]. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که کلیه تورمالین‌های گرانودیوریت‌ها و نمونه‌های پگماتیتی-آپلیتی به جز تورمالین‌های نظام آباد و گرهکی روستای دهگاه و منطقه آستانه، ماگمایی هستند.

بر اساس نمودار Ca-Fe(tot)-Mg نیز ترکیب تورمالین‌های منطقه به ترکیب شورلیت نزدیک‌تر بوده و غنی از آهن‌اند (شکل ۵). به علاوه ترکیب این تورمالین‌ها در هر دو مثلث در ناحیه‌ی گرانیتوئیدهای فقیر از Li و پگماتیت‌های وابسته به آن قرار می‌گیرند.

به اعتقاد [۲۰] هرچه از شرایط ماگمایی به شرایط گرمایی نزدیک‌تر می‌شویم تورمالین در مقدار خیلی پائین‌تر B و طیف گسترده‌تری از ترکیب‌ها نسبت به شرایط ماگمایی به وجود می‌آید. تورمالین‌های رگه‌های پگماتیتی به دلیل قرارگیری در ناحیه‌ی گرانیتوئیدها، احتمالاً به طریق ماگمایی تشکیل

فاصله‌ی رگه‌های تورمالین‌دار در منطقه‌ی مورد بررسی از توده-ی گرانیتهی بروجرد کمتر از ۱ کیلومتر بوده است. بنابراین تاثیر واحدهای دگرگونی در تشکیل تورمالین‌های منطقه با توجه به مقدار  $Fe^{\#}$  آنها و نیز قرار گرفتن آنها در گستره‌ی ترکیبی گرانیتهای فقیر از لیتیم، پگماتیت‌ها و آپلیت‌های وابسته به آن (شکل ۶) بی‌تاثیر است. قرار گیری کلیه نمونه‌های آنالیز شده اعم از رگه‌های تورمالین‌دار گیجالی، گرگه‌های آستانه و دهگانه و روستای قلعه ثمورخان در منطقه‌ی A شکل ۶ حاکی از بالا بودن مقدار  $Fe^{\#}$  در این مناطق، نزدیک بودن با خاستگاه تغذیه کننده‌ی شاره و فاصله‌ی کمتر از ۱ کیلومتر با توده نفوذی را نشان می‌دهد.

#### برداشت

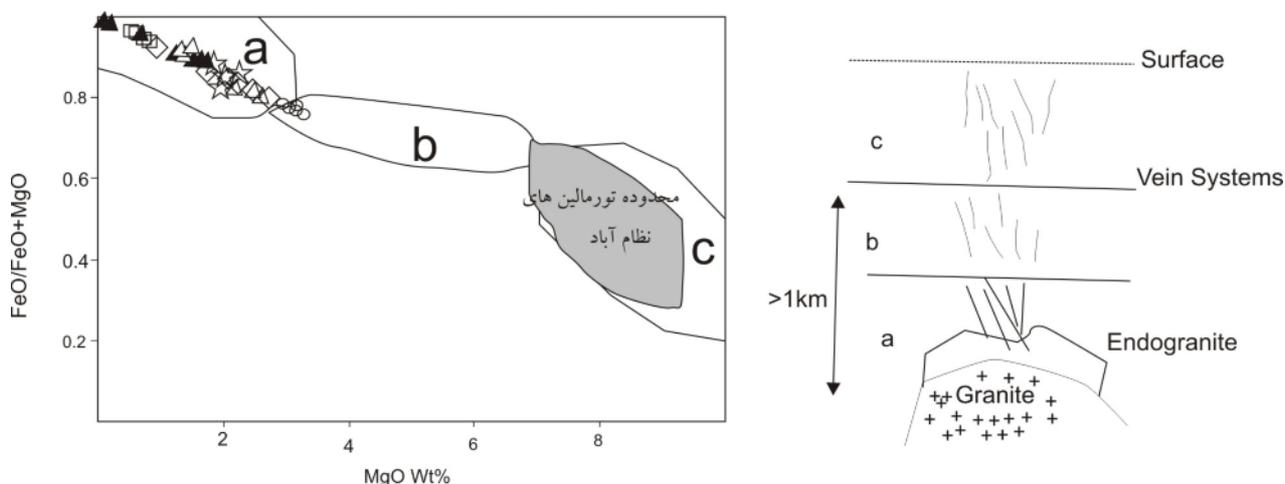
از بررسی واحدهای مختلف تورمالین‌دار مناطق بروجرد و آستانه نتایج زیر حاصل شده‌اند:

- بر اساس نمودارهای مختلف، نوع تورمالین در تورمالین‌های سوزنی قلعه ثمورخان و برخی از نمونه‌های گیجالی و کله‌جوب از نوع فوئیتیت و در رخنمون‌های دیگر منطقه از نوع شورلیت است و تورمالین‌های منطقه‌ی نظام آباد محلول جامدی از شورلیت و دراویت با تمایل بیشتر به سمت دراویت هستند که پدیده‌ی منطقه‌بندی بسیار روشن و چشمگیر در تورمالین‌های این منطقه، آنرا تایید می‌کند.

Mg, Fe برای تشکیل تورمالین نیز وجود دارند، در نتیجه باید خاستگاه Mg, Fe, Al, B مورد نیاز برای تشکیل تورمالین را یک خاستگاه درون توده در نظر بگیریم.

چنانچه نسبت  $FeO^* = FeO/FeO + MgO$  در تورمالین بیشتر از ۰/۸ باشد نشانگر بسته بودن سیستم ماگمایی، عدم دخالت شاره‌ها و آرایش آنها با رسوب‌های غنی از Al است اما اگر این نسبت کمتر از ۰/۶ باشد دلالت بر دگرنهادی بور با رسوب‌های غنی از Al، و بور از یک خاستگاه خارجی است [۲۱]. در صورتی که این نسبت در تورمالین‌های واحدهای مختلف (گیجالی، دهگانه، قلعه ثمورخان، کبوترلان، نظام آباد و گرگه‌های آستانه) بیش از ۰/۸ است که دلالت بر ریشه گرفتن بور از شاره‌های ماگمایی مراحل تأخیری دارد، که در تورمالین-های نظام آباد خاستگاه گرمایی و در مناطق دیگر از نوع ماگمایی است.

به اعتقاد [۲۱] مقدار  $Fe^{\#} = FeO^*/(FeO^* + MgO)$  تورمالین با فاصله گرفتن از گرماب توده‌ی گرانیتهی کوچکتر می‌شود به طوری که این نسبت برای ذخایر درون گرانیتهی که چسبیده به توده‌ی گرانیتهی هستند بین ۰/۸ تا ۱ و برای سیستم‌های رگه‌ای که در فاصله‌ی مساوی یا بیشتر از ۱ کیلومتر، کمتر از ۰/۶ است. با توجه به مقدار  $Fe^{\#}$  نمونه‌های مختلف بروجرد که کمتر از ۰/۸ تا ۰/۵ تغییر می‌کند و قرار گرفتن آنها در گستره‌ی A (شکل ۶) می‌توان نتیجه گرفت که



شکل ۶ نمودار  $Fe^{\#}$  نسبت به MgO که میدان تورمالین‌های درون گرانیتهی تا نزدیک به توده‌ی گرانیتهی (a)، نزدیک به توده‌ی گرانیتهی تا حدواسط (b) و تورمالین‌های دور از توده‌ی گرانیتهی (c) در آن مشخص شده است [۲۱]. در این نمودار نمونه‌های گرگه‌ی روستای دهگانه، آستانه و مناطق دیگر آنالیز شده در گستره‌ی a قرار گرفته‌اند در حالی که تمامی نمونه‌های منطقه‌ی نظام آباد تقریباً در بخش c قرار می‌گیرند. علائم مشابه شکل ۳ هستند.

[3] Maning D. A. C., "Chemical and morphological variation in tourmalines from the Hub Kapong batholith of peninsular Tailand" و Mineralogical Magazine 45 (1982) 139-147.

[4] London D., Maning D. A. C., "Chemical variation and significance of tourmaline from SW England", Economic Geology 90 (1995) 495-519.

[5] Krynine P.D., "The tourmaline group in sediments", Journal of Geology 54 (1946) 65-87.

[۶] رادفر ج.، "بررسی‌های زمین‌شناسی و پترولوژی سنگ‌های گرانیتوئیدی ناحیه آستانه-گوشه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه تهران (۱۳۶۶).

[۷] احمدی خلجی ا.، "بررسی پترولوژی و پتروفابریک توده‌های نفوذی و دگرگونی مجاورتی منطقه بروجرد"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه تهران (۱۳۷۸).

[۸] احمدی خلجی ا.، "پترولوژی توده‌ی گرانیتوئیدی بروجرد"، رساله دکتری، دانشکده علوم، دانشگاه تهران (۱۳۸۵).

[9] Ahmadi-Khalaji A., Esmaily 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.

[10] Masoudi F., "Contact metamorphism and pegmatite development in the region SW of Arak, Iran", PhD Thesis, Leeds University, UK, (1997).

[11] Masoudi F., Yardley B.W.D., Cliff R.A., "Rb-Sr geochronology of pegmatites, plutonic rocks and a hornfels in the region southwest of Arak, Iran", Islamic Republic of Iran Journal of Sciences 13 (3) (2002) 249-254.

[12] Didier J., Barbarin B., "Enclaves and granite petrology", Elsevier (1991), 601 p.

[۱۳] طهماسبی ز.، احمدی خلجی ا.، رجاییه م.، "تورمالین زائی در توده گرانیتوئیدی آستانه (جنوب غرب اراک)"، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۳ (۱۳۸۸)، ص ۳۶۹-۳۸۰.

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

[15] London D., Maning D. A. C., "Chemical variation and significance of tourmaline from SW England", Economic Geology 90 (1995) 495-519.

[16] Harraz H. Z., El-Sharkaway M. F., "Origin of tourmaline in the metamorphosed Sikait pelitic belt, south eastern desert, Egypt", Journal of African Earth Science 33 (2001) 391-416.

- بر اساس جانشینی‌های کاتیونی، تورمالین‌های منطقه‌ی نظام آباد در گستره‌ی قلیایی آلکالی و نزدیک به قطب کلسیک قرار می‌گیرند در حالی که بیشتر تورمالین‌های مورد بررسی از نوع قلیایی نزدیک به قطب Vacancy group قرار می‌گیرند و تورمالین‌های سوزنی قلعه‌ی ثمورخان و برخی از نمونه‌های گیجالی و کلهجوب به دلیل آنکه از نوع فوئیتیت هستند در منطقه Vacancy group قرار می‌گیرند.

- در نمودار Mg نسبت به Fe/Fe + Mg، تورمالین‌های روستای دهگاه که به صورت گرھکی هستند، و بالاترین مقدار منیزیم و تورمالین‌های قلعه ثمورخان و روستای کبوترلان بالاترین مقدار Fe/Fe + Mg و کمترین میزان Mg دارند و قرار گیری همه‌ی نمونه‌ها زیر  $\Sigma(\text{Fe} + \text{Mg}) < 3$  نشان دهنده‌ی جانشینی Al در موقعیت Y است.

- تورمالین‌های ماگمایی خود شکل و بدون منطقه‌بندی هستند و وجود این تورمالین‌ها به صورت گرھک در گرانیت‌های دهگاه و آستانه نشانه‌ی روشنی است از غنی بودن ماگمای خاستگاه این گرانیت‌ها از B است.

- تورمالین‌های گرمابی در سنگ‌های میزبان گرانیتی شبه آلومین (کوارتز دیوریت‌ها) وجود دارند. بنابراین نمونه‌های تورمالین‌دار نظام‌آباد از نوع گرمابی (ماگمایی تاخیری) با میزبان کوارتز دیوریتی هستند و ترکیب شورلیت-دراویت دارند. در حالی که تورمالین‌های مناطق دیگر که به صورت رگه‌های آپلیتی و پگماتیتی هستند، خاستگاه ماگمایی دارند. بدین ترتیب به نظر می‌رسد خاستگاه بور در واحدهای مختلف خاستگاه ماگمایی یا گرمابی دارند.

- نسبت  $\text{FeO}^* = \text{FeO}/\text{FeO} + \text{MgO}$  در مناطق تورمالین‌دار بیش از ۰/۸ است که دلالت بر ریشه گرفتن بور از شاره‌های ماگمایی مراحل تاخیری دارد. این شاره‌های بوردار در تورمالین‌های نظام آباد از نوع گرمابی و در مناطق دیگر از نوع ماگمایی هستند.

#### مراجع

[1] Slack J. F., Herriman N., Barnes R. G., Plimer I. R., "Stratiform tourmalinites in metamorphic terrenes and their geologic significance", Geology 12 (1984) 713-716.

[2] Henry D. J., Guidotti C. V., "Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite grade metapelites of NW-Marine", American Mineralogist 70 (1985) 1-15.

*boron content of natural hydrothermal fluids and tourmalinization process"*, Volume of Abstracts, International Symposium Experimental Mineralogy and Geochemistry, Nancy (1986) 140-141.

[21] 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.

[۲۲] اسماعیلی د.، محمدی ح.، حق نظر م.، "مقایسه ترکیب شیمیایی تورمالین در رگه های کوارتز- تورمالین قلع و تنگستن دار مناطق شاهکوه (شرق ایران) و نظام آباد (غرب ایران)"، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۳ (۱۳۸۸)، ص ۳۴۳-۳۵۶.

[17] Pesquera A., Torres-Ruiz J., Gil-Grespo P. P., Velilla N., "Chemistry and genetic implications of tourmaline and Li-F-Cs micas from the Valdeflores area (Caceres, Spain)", American Mineralogist 84 (1999) 55-69.

[18] Trumbull R.B., Chaussidon M., "Chemical and boron isotopic composition of magmatic and hydrothermal tourmalines from the Sinceni granite-pegmatite system in Swaziland", Chemical Geology 153 (1999) 125-137.

[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] Weisbrod A., Polak C., Roy D., "Experimental study of tourmaline solubility in the system Na-Mg-Al-Si-B-O-H. Applications to the