



ترکیب تورمالین در پگماتیت‌های چاه رویی، جنوب غربی نهیندان

سلیمان احمدی بنکدار^{*}، علی احمدی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان

(دریافت مقاله: ۹۱/۲/۶، نسخه نهایی: ۹۱/۵/۷)

چکیده: در منطقه‌ی چاه رویی جنوب غربی نهیندان، پگماتیت‌های تورمالین داری وجود دارند که از نظر جایگیری در صحرا به دو شکل‌اند: درون توده‌ی گرانیتوئیدی چاه رویی (نوع CH) و در سنگ‌های دگرگون اطراف توده‌ی گرانیتوئیدی (نوع D). بر اساس بررسی‌های سنگنگاری و تجزیه ریز کاو الکترونی، نوع تورمالین در هر دو پگماتیت، دراویت-شورول و در گروه قلیایی که در آنها میزان آلومینیم بالاست و دارای جانشینی‌های قلیایی و پروتون زدایی‌اند. بر اساس نمودارهای عناصر نادر خاکی و عنکبوتی در تورمالین، روند هر دو نوع پگماتیت تقریباً مشابه ولی میزان عناصر متفاوتند، که علت بالا بودن میزان عناصر کم مقدار (Trace elements) در تورمالین‌های موجود در پگماتیت‌های نوع CH، قرار گرفتن در سنگ‌های گرانیتوئیدی است. بنابراین، بر اساس بررسی‌های انجام شده، به نظر می‌رسد که تورمالین در اثر فرآیندهای ماقمای گرانیتوئیدی چاه رویی در مراحل تأخیری- گرمابی با سنگ‌های دگرگون ده سلم موجود در اطراف توده‌ی گرانیتوئیدی تشکیل شده است. تغییرات دمایی در تشکیل نوع کانی‌های موجود در پگماتیت‌ها موثر و دارای اهمیت زیادی است.

واژه‌های کلیدی: پگماتیت؛ تورمالین؛ گرانیتوئید؛ عناصر کم مقدار؛ چاه رویی.

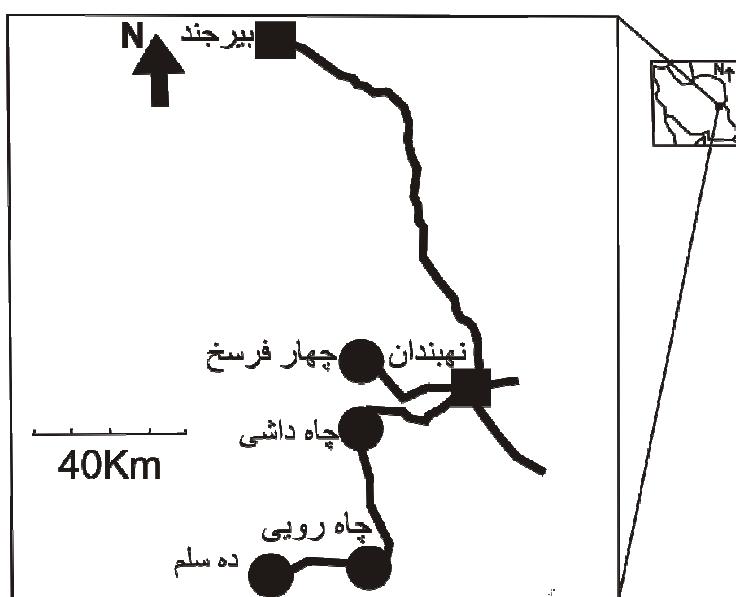
نوع دوم با علامت اختصاری (D) پیرامون توده‌ی گرانیتوئیدی و در درون سنگ‌های دگرگونی با دو کانی مشخص تورمالین و مسکویت دیده شده‌اند. گسترش پگماتیت‌های نوع دوم تا فاصله‌ی ۲-۳ کیلومتری از توده گرانیتوئیدی چاه رویی است. تورمالین در هر دو نوع پگماتیت به صورت دانه‌های منتشری و به رنگ سیاه دیده می‌شود (شکل‌های ۴، ۴ت).

بررسی‌های زیادی منجر به این حقیقت شد که تورمالین در گستره‌ی گستردگی از فشار و دما پایدار است، و در برابر هوازدگی و دگرسانی مقاوم است. همچنین تورمالین دارای ترکیبی متغیر است و قادر به تبادل اجزا و گونه‌های فرار با کانی‌ها و شاره‌های هم‌زیست در اثر تغییر شرایط خارجی، است. در نتیجه‌ی این ویژگی‌ها، تورمالین می‌تواند ماهیت شیمیایی- اش را در اثر تغییرات شرایط در طول رشد ثبت کند

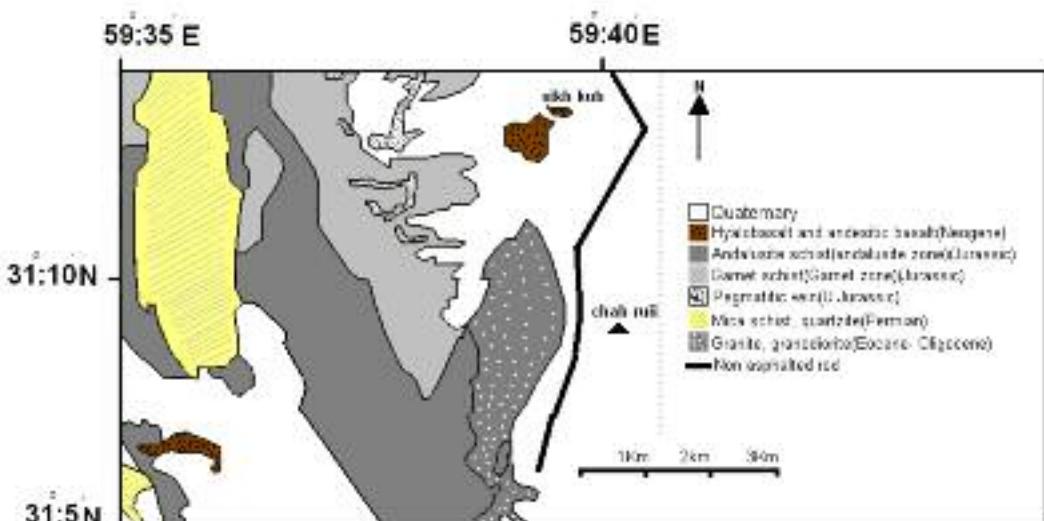
مقدمه و زمین‌شناسی

از آنجاکه پگماتیت‌ها حاوی کانی‌ها و عناصر با ارزشی هستند، بنابراین، این ماده خواهان فراوانی دارد. پگماتیت‌های چاه رویی در جنوب شرقی بلوک لوت و در حاشیه‌ی خاوری بخش میانی بلوک لوت و در مرز بلافصل زمین درز سیستان (Sistan) قرار دارند، و در فاصله‌ی ۱۰۳ کیلومتری جنوب غربی نهیندان (شکل ۱) و در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چاه داشی [۱] (شکل ۲) و تقریباً در عرض‌های جغرافیایی ۵° و ۱۰° و ۳۱° شمالی و طول‌های جغرافیایی ۳۵° و ۵۹° و ۴۰° شرقی واقع شده‌اند. در منطقه‌ی چاه داشی پگماتیت‌ها از نظر جایگیری در صحرا به دو شکل دیده شده‌اند؛ نوع اول با علامت اختصاری (CH) در درون توده‌ی گرانیتوئیدی چاه رویی با دو کانی مشخص تورمالین و بیوتیت و

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۵۹۰۶۵۳۷۴، نامبر: ۰۵۲۸۲۲۲۲۱۸۹، پست الکترونیکی: ahmadi.solomon@gmail.com



شکل ۱ نقشه‌ی راه‌های دسترسی به منطقه‌ی چاه رویی.



شکل ۲ نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی چاه رویی [۱].

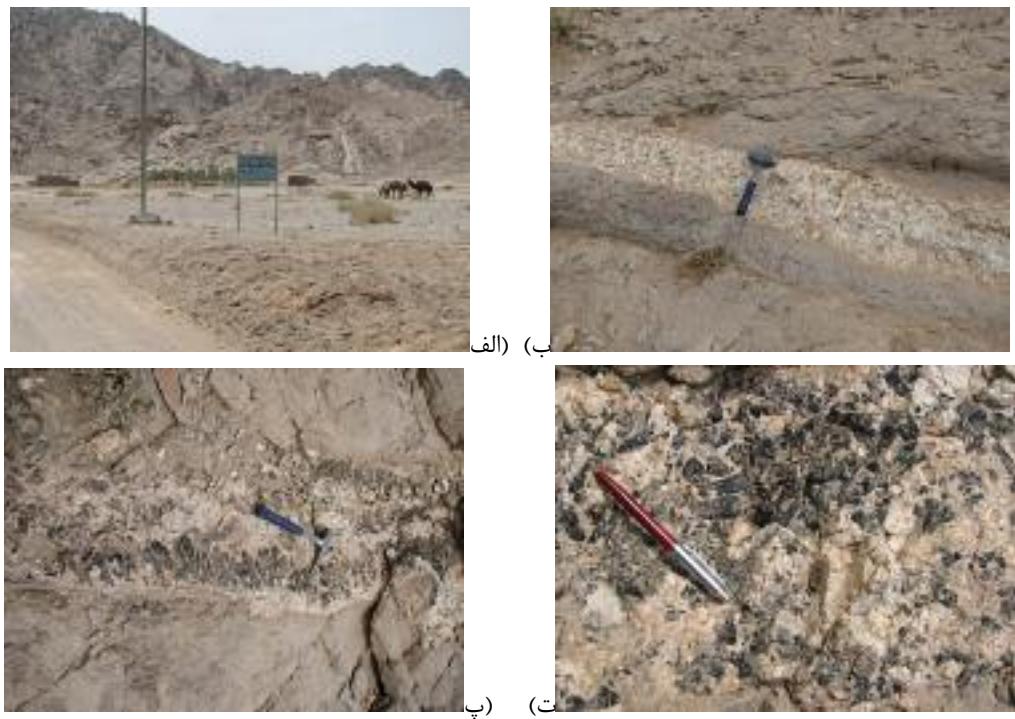
مجموعه دگرگونی ده سلم قرار دارد (شکل‌های ۲، ۳ و ۴ الف). کانی‌های این توده شامل پلاژیوکلاز، فلدوپار قلیابی، کوارتز، بیوتیت و کانی‌های فرعی آپاتیت و زیرکن است و بر اساس نقشه‌ی زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی [۱]، گرانیت-گرانودیوریت نام گذاری شده است. سنگ‌های دگرگون منطقه از گارنت شیست، آندالوزیت شیست، آمفیبولیت شیست، میکاشیست و کوارتزیت تشکیل شده‌اند، که جزء مجموعه دگرگون ده سلم و بیشتر به سن پرمین-ژوراسیک هستند [۱].

[۵-۲]. بنابراین کانی مهم برای دنبال کردن گسترش ترکیبی سنگ‌های آذرین و دگرگون است و می‌تواند در بسیاری از نمونه‌ها، به عنوان نمایشگر نشت شاره به کار رود [۵]. تورمالین ممکن است یا به عنوان یک کانی اولیه ماقمایی متبلور شود، و یا به عنوان یک کانی در شرایط انتقال از مرحله‌ی مرز انجاماد تا خیری (ماقمایی) تا نیمه جامد آغازی (گرمابی) تشکیل شود [۲].

توده‌ی گرانیتوئیدی چاه رویی با روندی تقریباً شمالی-جنوبی و بیضوی شکل به سن اوشن-الیگوسن، در حاشیه‌ی



شکل ۳ عکس ماهواره‌ای از منطقه چاه رویی.



شکل ۴ عکس‌هایی از منطقه‌ی مورد بررسی. (الف) نمایی از گراییتوئید چاه رویی ب) نمایی از پگماتیت‌هایی که در درون توده‌ی گرانیتوئیدی چاه رویی‌اند و دارای بیوتیت‌اند و از فراوانی کم تورمالین برخوردارند پ) نمایی از پگماتیت‌های نوع CH که حاوی تورمالین و فاقد بیوتیت ت) نمایی از تورمالین در صحراء که فاقد بیوتیت است.

نتایج به دست آمده از مشاهدات صحرایی و میکروسکوپی و آنالیزهای ریزپردازشی الکترونی و ICP، ترکیب و خاستگاه تورمالین در پگماتیت‌های چاه رویی تعیین شود.

از آنجاکه تورمالین کانی مهم برای دنبال کردن گسترش ترکیبی سنگ‌های آذرین و دگرگونی است و می‌تواند در بسیاری از نمونه‌ها، به عنوان یک نمایشگر نشت شاره به کار رود [۵] در نتیجه در این پژوهش سعی شده تا با استفاده از

ریزپردازش الکترونی تورمالین در جدول ۱ آورده شده‌اند. همچنین برای بررسی بیشتر کانی‌ها علاوه بر بررسی‌های مقاطع نازک، تصاویری نیز با میکروسکوپ الکترونی تهیه شدند. برای این که خاستگاه این دو نوع پگماتیت را مشخص کنیم، دوازده نمونه تورمالین (چهار نمونه از پگماتیت‌های درون توده‌ی گرانیتوئیدی [نوع CH₃]^{*}، چهار نمونه از پگماتیت‌های درون سنگ‌های دگرگون [نوع D₁]) و چهار نمونه از توده‌ی گرانیتوئیدی چاه رویی برای آنالیز با ICP انتخاب و به آزمایشگاه ALS Chemex در کانادا فرستاده شدند، و نتایج آن در جدول ۲ آورده شده‌اند.

روش بررسی

از آنجاکه ترکیب سنگ‌شناسی پگماتیت‌ها تقریباً یکسان است، در نتیجه بین نمونه‌های زیادی که جمع آوری شدند، چهارده نمونه از هر دو نوع پگماتیت، مقاطع نازک تهیه شدند تا به منظور بررسی ترکیب شیمیایی و تعیین فرمول ساختاری نیوبرانزویک با ولتاژ شتاب دهنده‌ی ۱۰ کیلو ولت، زمان شمارش ۲۰ ثانیه بر عنصر و با شعاع باریکه‌ی الکترونی ۱ آنگستروم به روش آنالیز نقطه‌ای تحلیل شوند. به این ترتیب تمام کانی‌ها با گمانه‌زنی به روش WDS آنالیز شدند، و نتایج

جدول ۱ نتایج آنالیز ریزپردازشی الکترونی در نمونه‌های تورمالین در منطقه‌ی چاه رویی (جنوب غربی نهبندان). عناصری که با (*) مشخص شده‌اند، به روش عنصرسنجی محاسبه شدند.

تورمالین‌های موجود در پگماتیت‌های توده گرانیتوئیدی				تورمالین‌های موجود در پگماتیت‌های دگرگونی			
	CH3	CH2	CH1	D11	D12	D13	D14
SiO ₂	۳۵۳۱	۳۵۲۱	۳۵۴۴	۳۵۰۳	۳۵۱۶	۳۴۷۳	۳۴۶۵
Al ₂ O ₃	۳۳۷۱	۳۵۰۳	۳۴۰۷	۳۴۹۳	۳۴۳۰	۳۴۵۵	۳۴۲۷
MgO	۵۲۱	۲۸۲	۵۳۵	۴,۲۶	۳۸۹	۴۳۶	۴,۴۵
FeO	۷,۷۵	۱۰,۵۵	۷,۴۲	۸,۴۱	۸,۶۱	۶,۸۲	۷,۰۲
Cr ₂ O ₃	۰,۰۶	۰,۱۴	۰	۰,۱۲	۰,۰۸	۰	۰
TiO ₂	۰,۷۳	۰,۳۲	۰,۶۹	۰,۹۲	۱,۰۲	۰,۲۳	۰,۶۳
MnO	۰	۰,۱۵	۰,۲۲	۰,۰۵	۰,۱۴	۰	۰
Na ₂ O	۱,۹۷	۱,۸۹	۲,۱۰	۲,۰۹	۲,۱۰	۱,۶۴	۱,۸۲
CaO	۰,۴۸	۰,۲۰	۰,۵۵	۰,۲۶	۰,۱۷	۰,۱۴	۰,۱۷
K ₂ O	۰,۱۲	۰,۱۱	۰,۱۲	۰,۱۵	۰,۰۶	۰,۱۰	۰,۰۶
Total	۸۵,۳۹	۸۶,۴۶	۸۵,۸۶	۸۶,۳۹	۸۵,۴۵	۸۲,۵۷	۸۳,۰۷
B ₂ O ₃ *	۱۰,۵۴	۱۰,۵۵	۱۰,۵۶	۱۰,۴۹	۱۰,۴۹	۱۰,۴۴	۱۰,۴۷
Li ₂ O*	۰,۲۴	۰,۲۴	۰,۲۲	۰,۰۵	۰,۳	۰,۶۲	۰,۶۳
۳۱(OH,O)				فرمول			
Si	۵,۸۳	۵,۷۹	۵,۸۳	۵,۸۰	۵,۸۲	۵,۷۷	۵,۷۴
B*	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
Al	۶,۵۶	۶,۸۵	۶,۶۰	۶,۸۲	۶,۶۹	۶,۷۷	۶,۷۰
Mg	۱,۲۸	۰,۶۹	۱,۳۱	۱,۰۵	۰,۹۶	۱,۰۸	۱,۱
Fe(tot)	۱,۰۷	۱,۴۵	۱,۰۲	۱,۱۶	۱,۱۹	۰,۹۴	۰,۹۷
Cr	۱,۰۱	۰,۰۱	۰	۰,۰۲	۰,۰۱	۰	۰
Ti	۰,۰۹	۰,۰۳	۰,۰۶	۰,۱۱	۰,۱۲	۰,۰۲	۰,۰۷
Mn	۰	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۰۶	۰,۰۱	۰	۰
Y total	۲,۸۴	۲,۸۴	۲,۸۵	۲,۹۶۶	۲,۸	۲,۵۸	۲,۵۸
Li*	۰,۱۶	۰,۱۶	۰,۱۵	۰,۰۳۴	۰,۲	۰,۴۲	۰,۴۲
Na	۰,۶۳	۰,۶۰	۰,۶۶	۰,۶۷	۰,۶۷	۰,۵۳	۰,۵۸
Ca	۰,۰۸	۰,۰۳	۰,۰۹	۰,۱۴	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۳
K	۰,۰۵	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱
X total	۰,۷۶	۰,۶۵	۰,۷۷	۰,۷۴	۰,۷۱	۰,۵۷	۰,۶۲
X vac	۰,۲۴	۰,۳۵	۰,۲۳	۰,۲۶	۰,۲۹	۰,۴۳	۰,۳۸
Fe/(Fe+Mg)	۰,۴۵	۰,۶۷	۰,۴۳	۰,۵۲	۰,۵۵	۰,۴۶	۰,۴۶
Na/(Na+Ca)	۰,۸۸	۰,۹۵	۰,۸۸	۰,۹۴	۰,۹۵	۰,۹۶	۰,۹۵

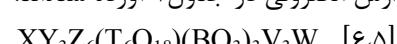
جدول ۲ نتایج آنالیز ICP در نمونه‌های تورمالینی و نمونه‌های توده‌ی گرانیت‌وئیدی چاه رویی. عناصری که با (*) مشخص شده‌اند، بر اساس درصد اکسید و بقیه عناصر بر اساس ppm محاسبه شدند.

نمونه های توده گرانیت‌وئیدی چاه رویی					تورمالین های موجود در پگماتیت های دیگرگونی				تورمالین های موجود در پگماتیت های توده گرانیت‌وئیدی			
	G1	G2	G3	G4	D10	D11	D14	D16	CH12	CH13	CH15	CH17
La	۶۴,۴	۳۷,۳	۴۱	۵۹,۹	۲,۳	۱,۷	۲,۲	۳,۱	۱۳,۵	۲۴,۳	۴,۵	۱۷,۲
Ce	۱۳۰,۵	۷۲,۴	۸۰,۵	۱۲۰	۴,۵	۲,۴	۳,۴	۵,۴	۲۵,۱	۴۲,۴	۷,۸	۳۴,۹
Pr	۱۵,۵	۸,۶	۹,۳۴	۱۳,۸۵	۰,۴۸	۰,۴	۰,۳۱	۰,۶۴	۳,۱۴	۵,۱۳	۰,۸۳	۴,۰۳
Nd	۵۳,۹	۳۱,۵	۳۲,۸	۴۹	۱,۸	۱,۵	۰,۹	۲,۲	۱۰,۹	۱۸	۲,۶	۱۵,۱
Sm	۷,۹۸	۵,۵۱	۵,۷۷	۷,۶۸	۰,۲۶	۰,۲۶	۰,۱۴	۰,۴۸	۲,۲۸	۳,۹۵	۰,۵۳	۳,۰۴
Eu	۰,۸۶	۰,۹۵	۰,۹	۰,۸۶	۰,۰۸	۰,۱۳	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۱	۰,۱۴	۰,۰۶	۰,۴۱
Gd	۶,۲۴	۴,۶۴	۴,۷۷	۵,۵۵	۰,۳۱	۰,۲۷	۰,۱۶	۰,۳۹	۲,۱۴	۳,۷۱	۰,۶۳	۲,۶۵
Tb	۰,۷۲	۰,۵۹	۰,۶	۰,۶۲	۰,۰۴	۰,۰۵	۰,۰۳	۰,۰۷	۰,۴۱	۰,۶۸	۰,۱۵	۰,۴۲
Dy	۳,۰۹	۲,۹۷	۲,۹۸	۲,۷۱	۰,۲۶	۰,۳۲	۰,۲	۰,۴۸	۲,۵۶	۴,۲۲	۱,۱۳	۲,۴۷
Ho	۰,۵۸	۰,۵۸	۰,۵۷	۰,۴۹	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۰۴	۰,۱	۰,۵۱	۰,۹۲	۰,۳۳	۰,۴۶
Er	۱,۸۶	۱,۸۲	۱,۶۸	۱,۵۷	۰,۱۶	۰,۲۲	۰,۱۸	۰,۳۸	۱,۷۵	۳,۳۳	۱,۴۳	۱,۲۹
Tm	۰,۲۱	۰,۲۵	۰,۲۱	۰,۱۷	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۴	۰,۲۶	۰,۵۳	۰,۳	۰,۱۵
Yb	۱,۵۲	۱,۸۵	۱,۵۷	۱,۳۷	۰,۲۲	۰,۳۸	۰,۲۵	۰,۴۸	۲,۰۶	۴,۴۱	۲,۸۱	۱,۱۸
Lu	۰,۲۲	۰,۲۶	۰,۲۲	۰,۱۹	۰,۰۳	۰,۰۶	۰,۰۴	۰,۰۸	۰,۳۲	۰,۶۵	۰,۴۵	۰,۱۸
Ba	۶۷۴	۷۲۱	۶۶۶	۶۸۴	۱۲,۴	۶,۹	۳,۳	۱۶,۶	۱۸,۲	۳۳,۵	۱۵,۱	۷۳
Rb	۲۱۰	۱۵۰	۱۴۹	۲۰۴	۸,۸	۳	۲,۵	۲,۹	۵,۳	۱۰	۱۸,۱	۴۸,۸
Th	۵۱,۴	۲۵,۹	۲۷,۸	۴۵,۳	۰,۷	۰,۵۷	۰,۷۱	۱,۳۴	۱۲,۵۵	۱۰,۸	۳,۷۷	۶,۸۲
K*	۳,۸۵	۳,۷۴	۳,۵۷	۳,۸۲	۰,۲۲	۰,۱	۰,۰۹	۰,۰۸	۰,۱۳	۰,۲۲	۰,۳۲	۱,۳۶
Nb	۷,۷	۷,۵	۸	۷,۳	۱,۵	۰,۷	۰,۵	۰,۵	۰,۷	۰,۸	۱	۷,۱
Ta	۰,۶	۰,۸	۰,۷	۰,۵	۰,۳	۰,۱	۰,۱	۰,۱	۰,۱	۰,۱	۰,۳	۱,۲
Sr	۲۸۷	۲۷۰	۳۴۴	۲۹۵	۱۰,۵	۲۵,۹	۱۳,۹	۱۰,۲	۳۸,۱	۱۸,۴	۱۳,۹	۳۱,۵
P*	۰,۱	۰,۰۷	۰,۰۸	۰,۱	۰,۰۸	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۸۰	۰,۰۶	۰,۰۶	۰,۱۳
Zr	۲۲۸	۱۵۴	۱۶۷	۲۱۲	۸	۳۶	۳	۱۰	۵۶	۳۷	۷	۸۹
Hf	۶,۷	۴,۷	۵	۶,۴	۰,۳	۱,۶	۰,۲	۰,۴	۲	۱,۴	۰,۴	۲,۹
Ti*	۰,۰۴۱	۰,۳۳	۰,۴	۰,۴	۰,۵۷	۰,۶۱	۰,۶۲	۰,۵۴	۰,۵۱	۰,۵۱	۰,۵۷	۰,۶
Y	۱۵,۸	۱۶,۱	۱۴,۶	۱۳,۶	۱,۳	۱,۹	۱,۲	۳	۱۵,۳	۲۸,۶	۱۰,۲	۱۱,۷
ΣREE	۲۸۷,۵۸	۱۷۰,۲۲	۱۸۳,۹۱	۲۶۳,۹۶	۱۰,۵	۸,۷۷	۷,۸۹	۱۳,۸۸	۶۵,۰۳	۱۱۲,۳۷	۲۳,۵۵	۸۳,۴۸
(La/Yb)N	۲۸,۳۳	۱۳,۴۸	۱۷,۴۶	۲۹,۲۳	۶,۹۹	۲,۹۹	۵,۸۸	۴,۳۱	۴,۳۸	۳,۶۸	۱,۰۷	۹,۷۴
(La/Sm)N	۴,۹۷	۴,۱۷	۴,۳۸	۴,۸۱	۵,۴۵	۴,۵۳	۹,۶۹	۳,۹۸	۲,۶۵	۳,۷۹	۵,۲۳	۳,۴۹

رنگ گاهی آبی، و نیز چند رنگی از قهوه‌ای کم رنگ تا قهوه‌ای پررنگ دیده می‌شد (شکل‌های ۵ الف، ۵ ت، ۵ ج).

تحلیل ریزپردازش الکترونی

فرمول عمومی استفاده شده برای تورمالین به صورت زیر است و نتایج تجزیه‌ی ریزپردازش الکترونی در جدول ۱ آورده شده‌اند.



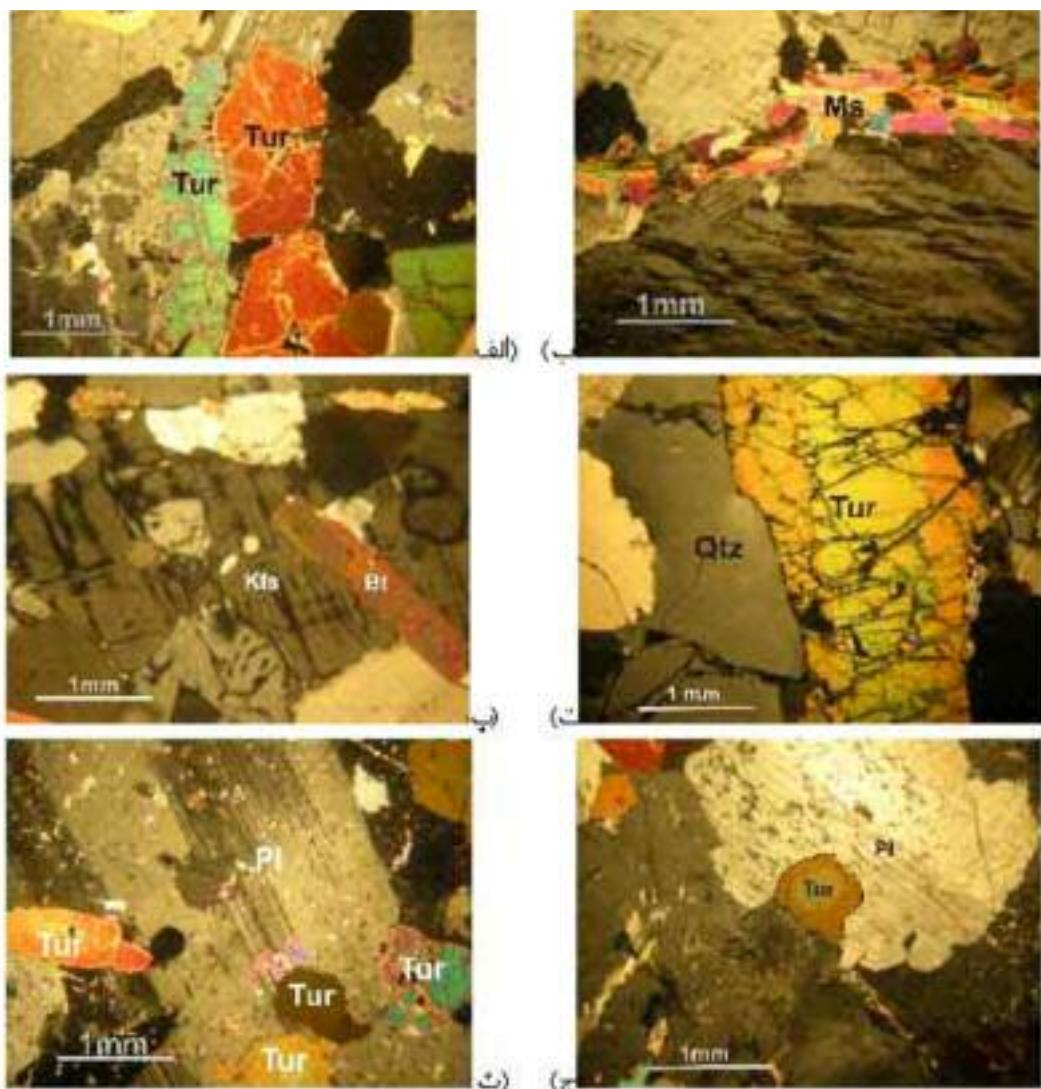
X = Ca, Na, K, [vacant]

سنگنگاری

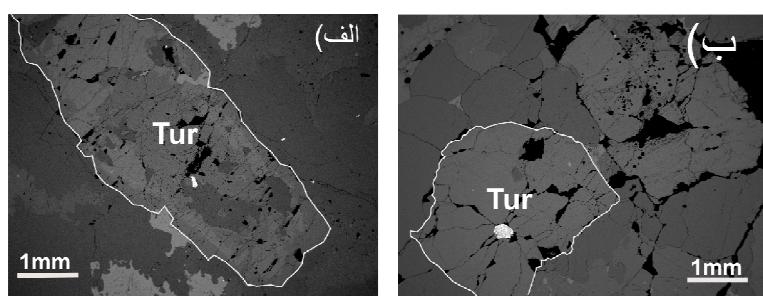
در بررسی مقاطع نازک، کانی‌های تورمالین، بیوتیت، پلازیوکلاز، ارتوکلاز، کوارتز در پگماتیت نوع CH و کانی‌های تورمالین، مسکویت، پلازیوکلاز، ارتوکلاز و کوارتز در پگماتیت نوع D مشاهده شدند (شکل‌های ۵ و ۶). بافت‌های غالب در هر دو نوع پگماتیت، میرمکیت، پرتیت، آنتی پرتیت و غربالی بودند. در زیر میکروسکوپ، تورمالین به رنگ سبز تیره تا قهوه‌ای کم

B = B, Vacant
V = OH, O, (F)
W = OH, F, O

Y = Li, Mg, Fe²⁺, Mn²⁺, Al, Cr³⁺, V³⁺, Fe³⁺, (Ti⁴⁺)
Z = Mg, Al, Fe³⁺, V³⁺, Cr³⁺
T = Si, Al, B



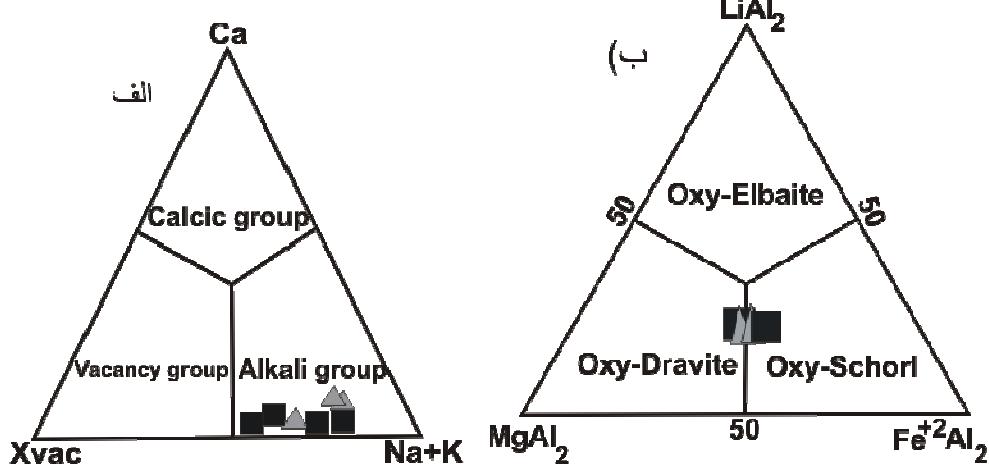
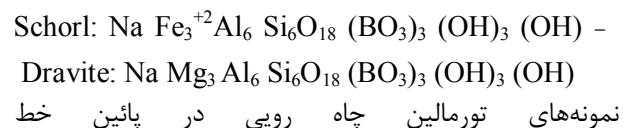
شکل ۵ عکس‌هایی از کانی‌ها در مقطع میکروسکوپی. (الف) نمایی از مقطع میکروسکوپی تورمالین ب) نمایی از مقطع میکروسکوپی مسکویت پ) نمایی از بیوتیت در کنار فلدسپار پتاسیم ت) نمایی از تورمالین که بهوسیله‌ی کوارتز احاطه شده است ث) نمایی از تورمالین در کنار پلاژیوکلاز ج) نمایی از تورمالین و بافت غربالی در پلاژیوکلاز (تمامی عکس‌ها در حالت XPL گرفته شده‌اند).



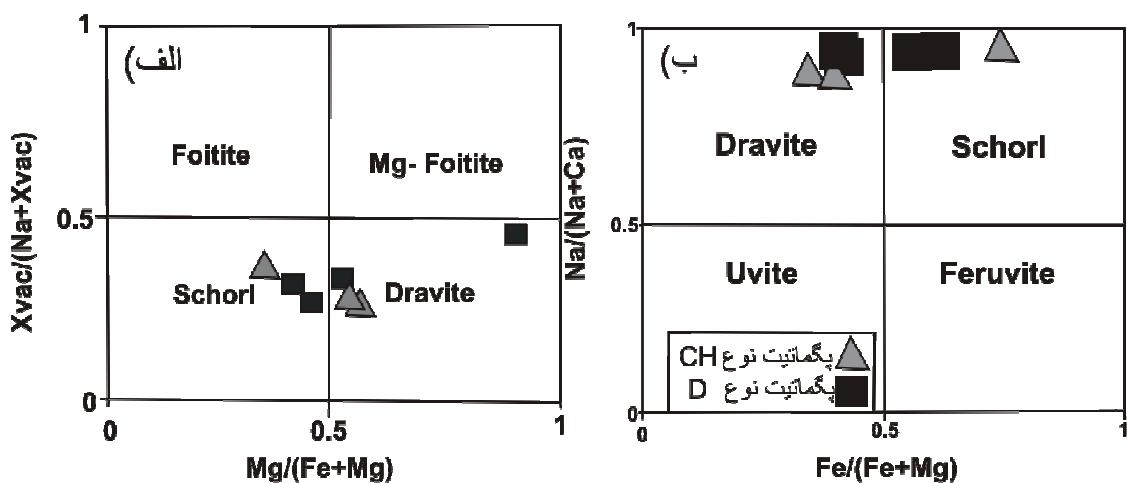
شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی. (الف) تصویری از مقطع طولی از تورمالین ب) تصویری از مقطع عرضی از تورمالین.

شدن Al در جایگاه Y است. نمونه‌های تورمالین چاه رویی از نظر آلومینیم غنی‌اند (شکل ۱) و از آنجاکه میزان آلومینیم در تورمالین‌های منطقه‌ی مورد بررسی بالاست در نتیجه جانشینی‌های تورمالین‌های ناقص یعنی جانشینی از نظر قلیابی (۱) و از نظر پروتون زدایی (۲) در آنها صورت می‌گیرد ولی جانشینی اوویت (Ca(Fe,Mg)AlNa) در آنها صورت نگرفت (شکل ۱).

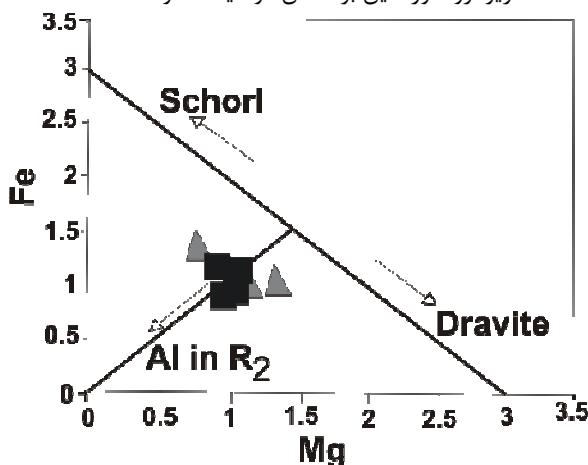
میزان لیتیم در تورمالین با استفاده از رابطه‌ی $(\text{Li} = 3 - \sum \text{Y})$ برآورد شد [۷]. تورمالین‌های منطقه‌ی چاهرویی در گستره‌ی تورمالین‌های قلیایی قرار می‌گیرند (شکل ۷ الف)، که نشان دهنده‌ی میزان پائین فضای خالی و کلسیم در جایگاه X دارد، و نمونه‌های تورمالین منطقه‌ی چاه رویی از نوع شورل-دراویتاند (شکل‌های ۷ ب و ۸). فرمول عمومی برای شورل-دراویت به صورت زیر است:



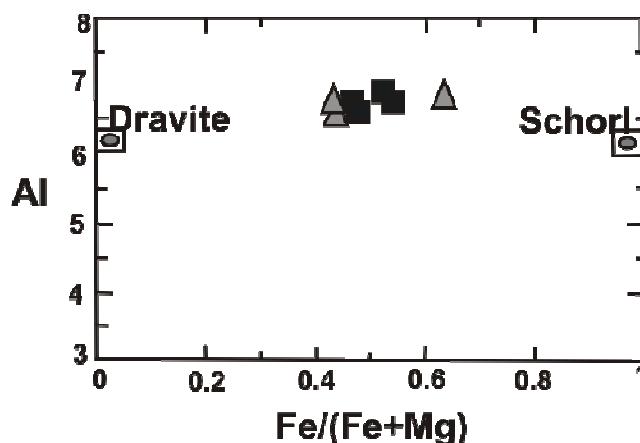
شکل ۷ (الف) نمودار سه تایی $K - Ca - Na$ + $Xvac - MgAl_2 - LiAl_2 - FeAl_2$ [۸] زیرگروه تورمالین‌ها بر اساس قرارگیری در جایگاه X ب) نمودار سه تایی [۸] زیرگروه قلیایی تورمالین‌ها بر اساس قرارگیری در جایگاه X و Y. نشانه‌ها مانند شکل ۸.



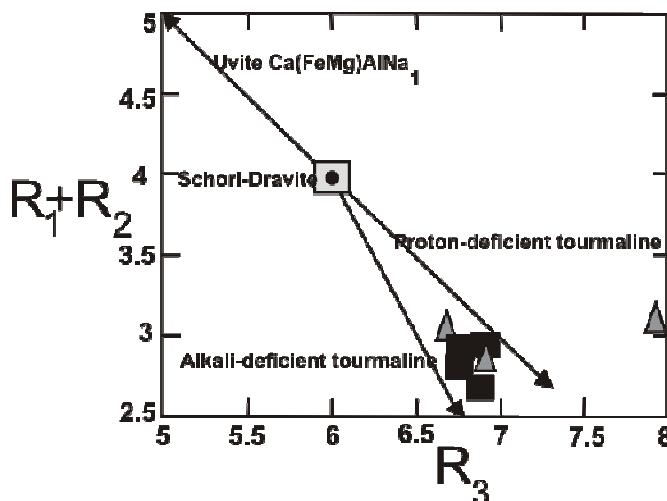
شکل ۸ الف) نمودار $\text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ در برابر $\text{Xvac}/(\text{Na} + \text{Xvac})$ [۸] زیرگروه تورمالین بر اساس موقعیت X و Y. ب) نمودار $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ در برابر $\text{Na}/(\text{Na} + \text{Ca})$ [۸] زیرگروه تورمالین بر اساس موقعیت X و Y.



شکل ۹ نمودار Mg نسبت به Fe برای نمونه‌های تورمالینی [۹]. نمونه‌های تورمالین چاه رویی در پائین خط ($\sum \text{Fe} + \text{Mg} = 3$) قرار گرفته‌اند. نشانه‌ها مانند شکل ۸ ب.



شکل ۱۰ نمودار Al نسبت به $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ [۱۵] و مقایسه‌ی ترکیب تورمالین‌های چاه رویی با ترکیب ایده آل شورل-دراویت. نمونه‌های تورمالین چاه رویی غنی از آلمینیم. نشانه‌ها مانند شکل ۸ ب.



شکل ۱۱ نمودار $\text{R}_3 + \text{R}_1 + \text{R}_2$ نسبت به R_3 برای نمایش سازوکارهای جانشینی معمول در تورمالین [۱۵].

$R3 = \text{totalAl} + 1.33\text{Ti}$ و $R1 = \text{Ca} + \text{Na}$ $R2 = \text{Fe} + \text{Mg} + \text{Mn}$

پگماتیت با یک خاستگاه مشخص کرد. اول پگماتیت‌هایی با مقدار عناصر کم مقدار (trace element) بالا و بیهنجاری منفی Ti و با کانی‌شناسی همچون تورمالین، بیوتیت، پلاژیوکلاز، ارتوکلاز، کوارتز، زیرکن، آپاتیت و گارنت که در حاشیه‌ی توده‌ی گرانیت‌وئیدی چاه رویی و متمایل به سمت سنگ‌های دگرگونی‌اند. دوم پگماتیت‌هایی با مقدار عناصر کم مقدار (trace element) پائین و بیهنجاری مثبت Ti و با کانی‌شناسی همچون تورمالین، مسکویت، ارتوکلاز، پلاژیوکلاز و کوارتز که در اطراف توده‌ی گرانیت‌وئیدی چاه رویی و در درون سنگ‌های دگرگونی‌اند. میزان عناصر نادر خاکی در تورمالین بازتاب دهنده‌ی میزان عناصر نادر خاکی در مکانی است که تورمالین در آن متبلور شده است [۱۱]. با توجه به الگوی یکسان در روند عناصر نادر خاکی در هر دو نوع تورمالین با نمونه‌های توده‌ی گرانیت‌وئیدی چاه رویی (شکل ۱۲)، خاستگاه هر دو نوع تورمالین در ارتباط با گرانیت‌وئید چاه رویی است، و به دلیل وجود پگماتیت‌های نوع CH در درون توده‌ی گرانیت‌وئیدی چاه رویی، میزان $\sum \text{REE}$ در تورمالین‌های این نوع پگماتیت‌ها نسبت به پگماتیت‌های نوع D افزایش یافته است. میزان $(\text{Fe} + \text{Mg}) / (\text{Fe} + \text{Mg})$ در سنگ‌های گرانیت‌وئیدی چاه رویی در حدود ۰.۶۶ (جدول ۳) است که در تورمالین‌های چاه رویی بین ۰.۴۳ تا ۰.۶۷ است. همچنین میزان $\text{Na}/(\text{Na} + \text{Ca})$ در سنگ‌های گرانیت‌وئیدی چاه رویی در حدود ۰.۶۶ (جدول ۳)، و در تورمالین‌های چاه رویی بین ۰.۸۸ تا ۰.۹۶ است. بنابراین بر حسب مقدار این نسبت‌ها می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب تورمالین‌های چاه رویی با ترکیب گرانیت‌وئیدی چاه رویی هم پوشی خوبی نشان نمی‌دهند و ترکیب تورمالین‌ها به طور کامل بهوسیله‌ی سنگ‌های گرانیت‌وئیدی اطراف کنترل نمی‌شود.

محلول آبکی ماقمای گرانیت‌وئیدی چاه رویی در مراحل تأخیری-گرمابی، زمینه‌ی انتشار بور را مهیا کرده و تورمالین از طریق واکنش بین سنگ‌های دگرگون اطراف توده‌ی گرانیت‌وئیدی با شاره شکل گرفته است. پر شدن شکستگی‌ها در توده‌ی گرانیت‌وئیدی چاه رویی بهوسیله‌ی پگماتیت‌های تورمالین‌دار، و قرار گرفتن پگماتیت‌های تورمالین‌دار در اطراف توده‌ی گرانیت‌وئیدی، نشان از ارتباط این پگماتیت‌ها با بور غنی شده در ماقمای باقی مانده یا گرمابی‌های وابسته به ماقمای گرانیتی دارد. از طرفی نمونه‌های تورمالین منطقه‌ی چاه رویی

آنالیز ICP

نتایج آنالیز ICP برای نمونه‌های تورمالینی و سنگ‌های گرانیت‌وئیدی چاه رویی در جدول ۳ آورده شده‌اند. در نمودار عناصر نادر خاکی (شکل ۱۲ الف)، برای نمونه‌های تورمالینی، پیروی از یک روند برای تورمالین‌های هر دو نوع پگماتیت دیده می‌شود؛ به این صورت که در LREE روند نزولی و در HREE روند مسطح و تخت دارند. اما در میزان REE در این دو نوع پگماتیت تفاوت دیده می‌شود. در تورمالین‌های موجود در گرانیت‌وئید چاه رویی (نوع CH) میزان REE با میانگین ۷۱.۲۷ بالاست، ولی در تورمالین‌های موجود در سنگ‌های دگرگون (نوع D)، میزان REE پائین و با مقدار میانگین ۱۰.۲۶ دیده شد. هر دو نوع پگماتیت دارای بیهنجاری منفی یوروپیوم‌اند. میانگین بنهنجار شده‌ی La، Lu و Dy نسبت به داده‌های پیشنهادی ناکامورا [۱۰] برای کندریت در تورمالین-های نوع D به ترتیب ۰.۹۱ و ۱/۵۴ در مقابل میانگین بنهنجار شده‌ی این عناصر در تورمالین‌های نوع CH به ترتیب ۱۱/۸۸ و ۷/۵۶ و ۴۵/۰۷ است.

در نمودار عنکبوتی (شکل ۱۲ ب) برای نمونه‌های تورمالینی همانند نمودار عناصر نادر خاکی، دو نوع پگماتیت از یک روند پیروی می‌کند؛ اما میزان عناصر کم (Trace element) در پگماتیت‌های نوع CH بیشتر از میزان عناصر کم مقدار (Trace element) در پگماتیت‌های نوع D است. بیشترین بیهنجاری مثبت در Th و بیشترین بیهنجاری منفی در Sr و Nb دیده شدند. رفتار این پگماتیت‌ها در بیهنجاری Ti متفاوت است. در پگماتیت‌های نوع D، بیهنجاری مثبت Ti و در پگماتیت‌های نوع CH، بیهنجاری منفی Ti دیده می‌شود.

بحث و بررسی

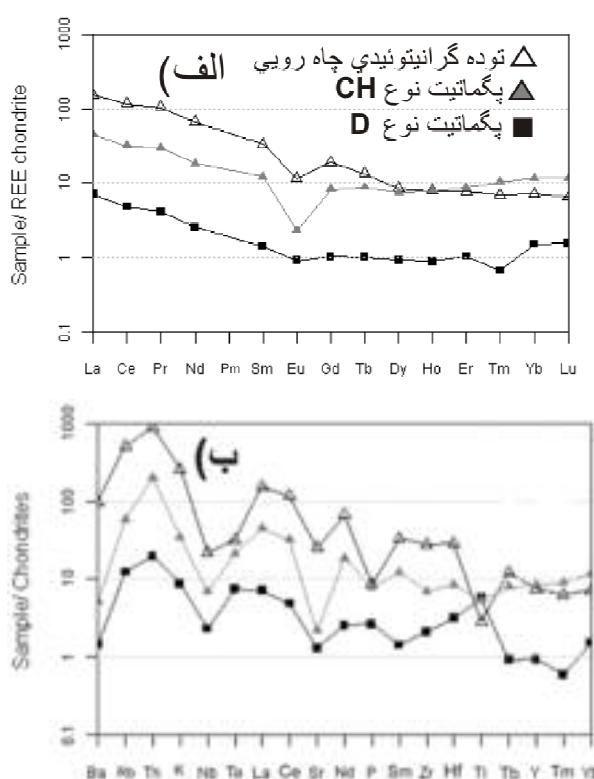
مهمترین عناصر لازم برای تشکیل تورمالین، سیلیس، بور، آلومینیم، آهن و منیزیم‌اند. معمولاً تورمالین موقعی تشکیل می‌شود که گرمابی‌های ماگمایی در مراحل تأخیری، از بور غنی باشند. بر اساس نظر لندن و منینگ [۹] سنگ‌های گرمابی غنی از تورمالین از مخلوط شدن دو شاره یا چند چشمۀ شکل می‌گیرند، و نیز به عقیده‌ی آنها رگه‌های گرمابی و برش‌های تورمالینی که در سیستم شیمیایی بازنده، شاره‌ی تشکیل دهنده‌ی آنها از خارج گرانیت‌ها ریشه گرفته است و ماقمای گرانیتی خاستگاه بور است. با توجه به بررسی‌های مقاطع نازک، آنالیزهای ریزپردازشی الکترونی و ICP، می‌توان دو نوع

های یاد شده به دلیل جانشینی آلومینیم هشت‌وجهی در این تورمالین‌هاست و بیانگر خاستگاه ماقمایی آنها دارد. همچنین

دارای میزان آلومینیم بالا و بیشتر بین دو بردار جانشینی قلیایی و پروتون‌زدایی قرار می‌گیرد (شکل ۱۱) که جانشینی -

جدول ۳ نتایج آنالیز ICP عنصر اصلی چهار نمونه‌ی توده‌ی گرانیتوئیدی چاه رویی

	G1	G2	G3	G4
SiO ₂	70.9	70.8	70.3	70.8
Al ₂ O ₃	14.9	14.76	15.1	14.96
FeO	2.51	2.34	2.58	2.68
Cao	2.45	1.98	1.9	1.96
MgO	0.8	0.63	0.89	0.86
Na ₂ O	3.82	3.81	3.95	3.74
K ₂ O	3.85	3.74	3.67	3.82
Fe	0.02	0.02	0.02	0.02
Mg	0.01	0.01	0.01	0.01
Na	0.061	0.061	0.063	0.06
Ca	0.043	0.035	0.034	0.035
Fe/(Fe+Mg)	0.66	0.66	0.66	0.66
Na/(Na+Ca)	0.6	0.66	0.66	0.6

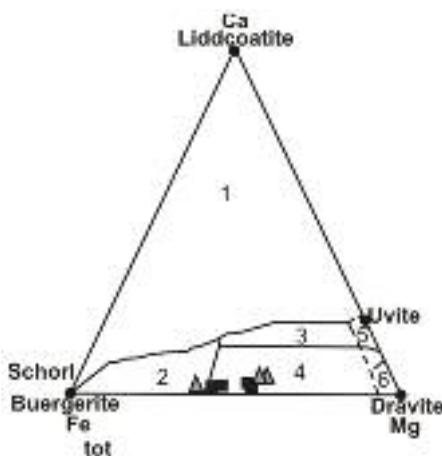


شکل ۱۲ (الف) نمودار عناصر نادر خاکی نمونه‌های تورمالینی و توده‌ی گرانیتوئیدی چاه رویی و به هنجار شده نسبت به کندریت ناکامورا [۹]. (ب) نمودار عنکبوتی نمونه‌های تورمالینی و توده‌ی گرانیتوئیدی چاه رویی و به هنجار شده نسبت به کندریت تامپسون [۱۴]، نشانه‌ها مانند شکل الف.

سنگ‌های دگرگون اطراف توده‌ی گرانیتوئیدی با فرآیندهای ماقمایی گرانیتوئیدی چاه رویی در مراحل تأخیری - گرمابی به وجود آمده‌اند. در مشاهدات صحرایی تورمالین در پگماتیت‌های نوع CH، در بخش‌هایی از گرانیتوئید که با سنگ‌های دگرگونی در تماس‌اند، از فراوانی زیادی برخوردار است (شکل‌های ۴،

خاستگاه تورمالین‌های چاه رویی بیشتر در گستره‌ی سنگ-های کوارتز-تورمالین و متاپسالمیت‌ها و متاپلیت‌های فقیر از Ca که تمایل به سمت گستره‌ی گرانیتوئیدهای فقیر از لیتیوم و پگماتیت‌ها و آپلیت‌های وابسته به آنها، تعیین شد (شکل ۱۳)، و این نشان از این دارد که تورمالین‌ها در اثر واکنش‌های

۴)، و این نشان دهنده‌ی این است که در اثر واکنش‌های



شکل ۱۳ نمودار سه تایی $\text{Li}[\text{Fe}, \text{Ca}, \text{Mg}]$. ۱ = گرانیتوئیدهای غنی از Li و پگماتیت‌ها و آپلیت‌های وابسته به آنها ۲ = گرانیتوئیدهای فقیر از Li و پگماتیت‌ها و آپلیت‌های وابسته به آنها ۳ = سنگ‌های کالکوسیلیکاتی و متاپسامیت‌ها و متاپلیت‌های غنی از Ca ۴ = سنگ‌های کوارتز-تورمالین و متاپسامیت‌ها و متاپلیت‌های فقیر از Ca ۵ = متاکربناتیت‌ها نشانه‌ها مانند شکل ۸ ب.

تشکیل از شاره‌ی خاستگاه فراهم باشد که این واکنش‌های بین شاره ماجمایی چاه رویی در مراحل تأخیری- گرمابی و سنگ‌های دگرگون ده سلم فراهم می‌شود. در نمودار عنکبوتی، بیهنجاری مثبت تیتانیوم در تورمالین‌های نوع D، نشان از ریشه‌گیری تیتانیوم از سنگ‌های دگرگونی و یا اختلاط شاره ماجمایی با سنگ‌های دگرگون دارد، که باعث تغییر در بیهنجاری آن شده است، و در مقابل بیهنجاری منفی تیتانیوم در تورمالین‌های نوع CH، نشان از ریشه‌گیری تیتانیوم از شاره ماجمایی چاه رویی دارد. بنابراین در تأمین عناصر لازم برای تشکیل تورمالین، هم ماجمایی گرانیتوئیدی چاه رویی در مراحل تأخیری- گرمابی و هم سنگ‌های دگرگون ده سلم نقش داشته‌اند.

برداشت

۱- تورمالین‌های موجود در هر دو نوع پگماتیت از نوع دراویت-شورل و در گروه تورمالین قلیایی قرار می‌گیرند و در آنها میزان آلومینیم بالاست و دارای جانشینی‌های قلیایی و پروتون زدایی‌اند.

۲- در تورمالین هر دو نوع پگماتیت، روند عناصر کم مقدار در نمودارهای عنکبوتی و عناصر نادر خاکی مشابه‌اند، که نشان دهنده‌ی یکسان بودن خاستگاه دارد، و تفاوت در میزان عناصر کم مقدار به دلیل قرار گرفتن و متبلور شدن تورمالین‌ها در مکان‌های متفاوت است.

چاه رویی در مراحل تأخیری- گرمابی با سنگ‌های دگرگونی ده سلم در ایجاد آنها نقش داشته‌اند، و حتی این واکنش‌ها در کمی دورتر از توده‌ی چاه رویی ادامه داشته و ایجاد تورمالین در پگماتیت‌های نوع D و در سنگ‌های دگرگون ده سلم کرده است.

بر اساس نظر گرو و همکاران [۱۳]، تورمالین اولین فازی است که با کاهش دما از فاز آبگون ایجاد می‌شود. مشهدهای بیابانی نشان می‌دهد که با افزایش مقدار تورمالین در پگماتیت‌های نوع CH، از میزان فراوانی بیوتیت کاسته می‌شود، در بعضی مواقع بیوتیت دیده نمی‌شود، که نشان دهنده‌ی پائین رفتن دماست و بیوتیت در دمای پائین بی ثبات و به جای آن تورمالین تشکیل شده است، این یعنی هر چه از سمت پگماتیت‌های بیوتیت‌دار به سمت پگماتیت‌های مسکویت-تورمالین‌دار (نوع D) حرکت کنیم دمای تشکیل کانی‌ها کمتر می‌شود. به طور دقیق‌تر هر چه از توده‌ی چاه رویی دور شویم به تدریج در اثر کاهش دما کانی‌های با پایداری دمایی پائین‌تر ایجاد می‌شود یعنی بر اساس کاهش دما نخست پگماتیت‌های بیوتیت، سپس تورمالین - بیوتیت (نوع CH)، کوارتز-فلدسبات، مسکویت- تورمالین (نوع D) ایجاد می‌شوند که همه‌ی آنها بیشینه‌ی گرمابی- ماجمایی در مراحل تأخیری دارند. البته برای تشکیل تورمالین علاوه بر کاهش دما در گرمابی‌های ماجمایی خاستگاه نیز باید عناصر مورد نیاز برای

- [4] Keller P., Roda E., Pesquera A., Fontan F., "Chemistry, paragenesis and significance of tourmaline in pegmatites of the Southern Tin Belt", central Namibia, Chemical Geology 158, (1999) 203–225.
- [5] Dutrow B., Henry D. J., "Complexly zoned fibrous tourmaline: A record of evolving magmatic and hydrothermal fluids", Canadian Mineralogist, Vol 38, (2000) 131-143.
- [6] Hawthorne F. C., "Bond – valence constraints on the chemical composition of tourmaline", Can. Mineral, Vol 40, (2002) 789 -797.
- [7] 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, Reviews in Mineralogy. Vol 33, (1996) 503– 557.
- [8] Hawthorne F. J., Henry D. J., Classification of the minerals of the tourmaline group". European Journal of Mineralogy. Vol 11,(1999) 201- 216..
- [9] London D., Manning D.A.C., "Chemical variation and significance of tourmaline from Southwest England", Economic Geology, Vol 90, (1995) 495– 519.
- [10] Nakamura N., "Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites", Geochim, Cosmochim, Acta 38, (1974) 757- 775.
- [11] King R.W., Kerrich R., "Chromian dravite associated with ultramafic-rock-hosted Archean lode gold deposits", Timmins–Porcupine district, Ontario, Canad Mineral 27, (1989) 419–426.
- [12] Henry D. J., Guidotti C.V., "Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite- grade metapelites of NW Maine", American Mineralogist, Vol 70, (1985) 1-15.
- [13] Grew, E. S., Anovitz, L. M., "Boron mineralogy, petrology and geochemistry", Reviews in mineralogy, 1st, 33p (1997).
- [14] Thompson R.N., "British Tertiary volcanic province", Scott, J., Geol, Vol 18, (1982) 49-107.
- [15] Trumbull, R. B., Chaussidon, M., "Chemical and boron isotopic composition of magmatic and hydrothermal tourmaline from the Sinceni granite-pegmatite system in Swaziland", Chemical geology, 153(1999)125-137.

۳- هر چه از توده‌ی گرانیت‌ئیدی چاه رویی به سمت سنگ‌های دگرگون ده سلم حرکت کنیم در اثر کاهش دما، کانی‌هایی با پایداری دمایی پائین‌تر ایجاد می‌شود یعنی اول بیوتیت، بعد تورمالین- بیوتیت، کوارتز- فلدسپات، مسکویت- تورمالین ایجاد می‌شود.

۴- خاستگاه هر دو نوع پگماتیت، در اثر واکنش‌های بین ماقمای گرانیت‌ئیدی چاه رویی در مراحل تأخیری- گرمابی با سنگ‌های دگرگون ده سلم موجود در اطراف آن (گارنت شیست و آندالوزیت شیست) است، که بیشتر بور مورد نیاز برای تشکیل تورمالین در هر دو نوع پگماتیت، به‌وسیله‌ی ماقمای چاه رویی در مرحله‌ی تأخیری- گرمابی تأمین شده است.

قدردانی

با تشکر و سپاس بسیار زیاد از استاد گرامی جناب دکتر علی احمدی عضو هیئت علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان که همیشه حامی و مشاور در انجام این پژوهش بودند و رحمت تجزیه و آنالیز نمونه‌ها در کانادا بر دوش ایشان بوده است. تشکر و قدردانی از جناب دکتر بومری عضو هیئت علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان به دلیل راهنمایی‌ها و پیشنهادات شان که در انجام بهتر این پژوهش سهم داشتند، همچنین سپاس فراوان از دانشجویان و رودی سال ۸۶ ژئوشیمی دانشگاه سیستان و بلوچستان به ویژه جناب آقایان مهندس ساسان غفاری و مهندس علی ویسی به دلیل همکاری و حمایتشان. در پایان از پیشنهادات سازنده‌ی داوران محترم مجله در ارائه بهتر

مقاله تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- [۱] نادری میقان ن., "نقشه: ۱:۱۰۰۰۰ چاه داشی"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (شهریور ۱۳۸۳).
- [۲] Burinnek D., Novak M., "Compositional evolution and substitutions in disseminated and nodular tourmaline from leucocratic granites: Example from the Bohemian Massif, Czech", Republic. Lithos, impres (2006).
- [۳] Jiang S.Y., Palmer M.R., Christopher J.Y., "Chemical and boron isotopic compositions of tourmaline from the Archean Big Bell and Mount Gibson gold deposits", Murchison Province, Yilgarn Craton, Western Australia. Chemical Geology 188, (2002) 229– 247.