



ترکیب تورمالین در پگماتیت‌های چاه رویی، جنوب غربی نهبندان

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 نهبندان، 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-شورل 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 فرایندهای ماگمای گرانیتوئیدی چاه رویی در مراحل تأخیری- گرمایی 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.

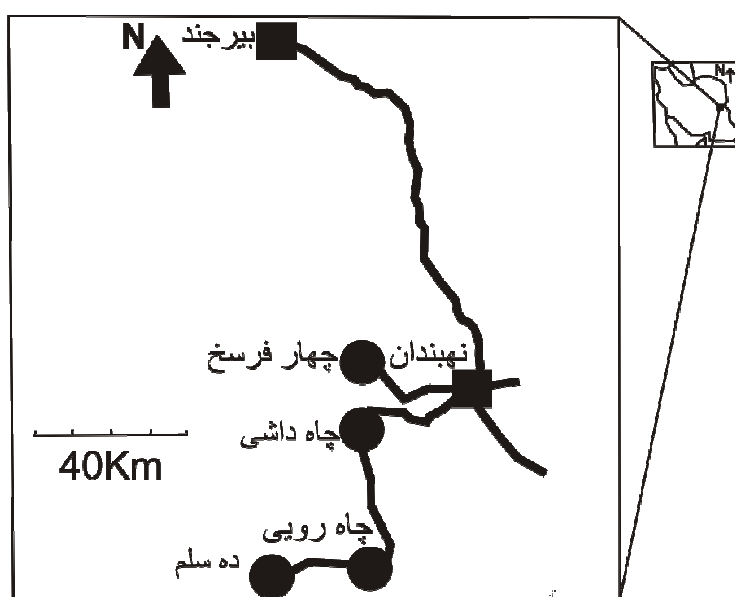
مقدمه و زمین‌شناسی

از آنجاکه پگماتیت‌ها حاوی کانی‌ها و عناصر با ارزشی هستند، بنابراین، این ماده خواهان فراوانی دارد. پگماتیت‌های چاه‌رویی در جنوب شرقی بلوک لوت و در حاشیه‌ی خاوری بخش میانی بلوک لوت و در مرز بلا فصل زمین درز سیستان (Sistan suture zone) قرار دارند، و در فاصله‌ی ۱۰۳ کیلومتری جنوب غربی نهبندان (شکل ۱) و در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چاه داشی [۱] (شکل ۲) و تقریباً در عرض‌های جغرافیایی ۵۹°: ۳۱' و ۳۱°: ۱۰' شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۹°: ۳۵' و ۴۰': ۵۹° 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

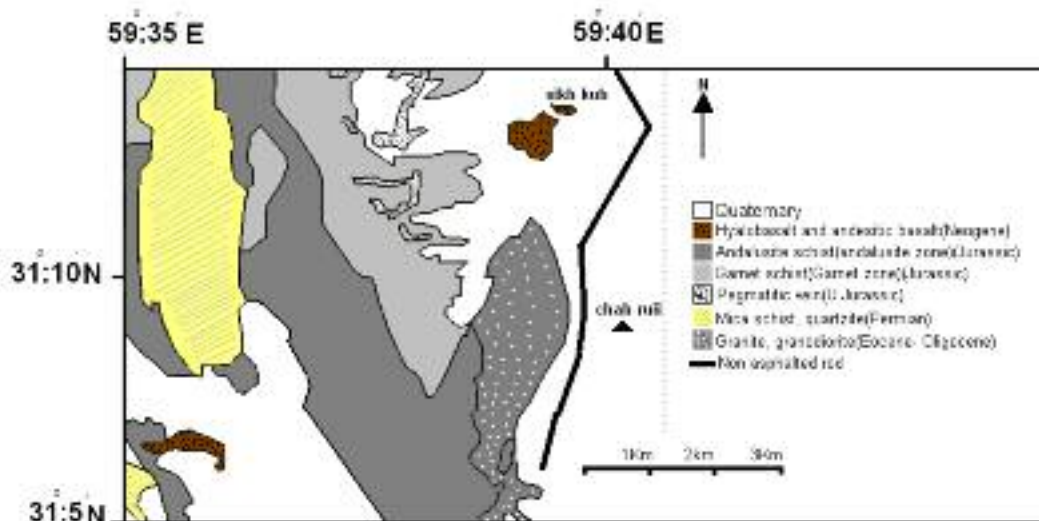
نوع دوم با علامت اختصاری (D) پیرامون توده‌ی گرانیتوئیدی و در درون سنگ‌های دگرگونی با دو کانی مشخص تورمالین و مسکویت دیده شده‌اند. گسترش پگماتیت‌های نوع دوم تا فاصله‌ی ۲-۳ کیلومتری از توده گرانیتوئیدی چاه رویی است. تورمالین در هر دو نوع پگماتیت به صورت دانه‌های منشوری و به رنگ سیاه دیده می‌شود (شکل‌های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

بررسی‌های زیادی منجر به این حقیقت شد که تورمالین در گستره‌ی گسترده‌ای از فشار و دما پایدار است، و در برابر هوازگی 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

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



شکل ۱ نقشه‌ی راه‌های دسترسی به منطقه‌ی چاه رویی.



شکل ۲ نقشه‌ی زمین شناسی منطقه‌ی چاه رویی [۱].

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

[۲-۵]. 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 ماگمایی متبلور شود، و یا به عنوان یک کانی در شرایط انتقال از مرحله‌ی مرز انجماد تاخیری (ماگمایی) تا نیمه جامد آغازی (گرمایی) تشکیل شود [۲].

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



شکل ۳ عکس ماهواره ای از منطقه چاه رویی.



(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۴ عکس‌هایی از منطقه‌ی مورد بررسی. الف) نمایی از گرانیتوئید 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 نزدیک از تورمالین در صحرا 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

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 تورمالین موجود در آن‌ها با اسفاده از یک ریزپردازنده الکترونی (model JEOL Superprobe 737) دانشگاه نیوبرانزویک با ولتاژ شتاب دهنده ۱۰ کیلو ولت، زمان شمارش ۲۰ ثانیه بر عنصر و با شعاع باریکه‌ی الکترونی ۱ آنکستروم به روش آنالیز نقطه‌ای تحلیل شوند. به این ترتیب تمام کانی‌ها با گمانه زنی به روش WDS آنالیز شدند، و نتایج

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 CH]، چهار نمونه از پگماتیت‌های درون سنگ‌های دگرگون [نوع ID] 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.

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	۳۵.۳۱	۳۵.۲۱	۳۵.۴۴	۳۵.۰۳	۳۵.۱۶	۳۴.۷۳	۳۴.۶۵
Al ₂ O ₃	۳۳.۷۱	۳۵.۰۳	۳۴.۰۷	۳۴.۹۳	۳۴.۳۰	۳۴.۵۵	۳۴.۲۷
MgO	۵.۲۱	۲.۸۲	۵.۳۵	۴.۲۶	۳.۸۹	۴.۳۶	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) بر پایه				فرمول ساختمانی			
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	۰.۰۴	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 دگرگونی				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	۷۳٫۴	۸۰٫۵	۱۲۰	۴٫۵	۳٫۴	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	۳۳٫۸	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	۳۰٫۹	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	۰٫۲۳	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	۰٫۸۰	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	۳٫۶۵	۳٫۷۹	۵٫۲۳	۳٫۴۹

سنگ‌نگاری

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

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

تحلیل ریزپردازش الکترونی

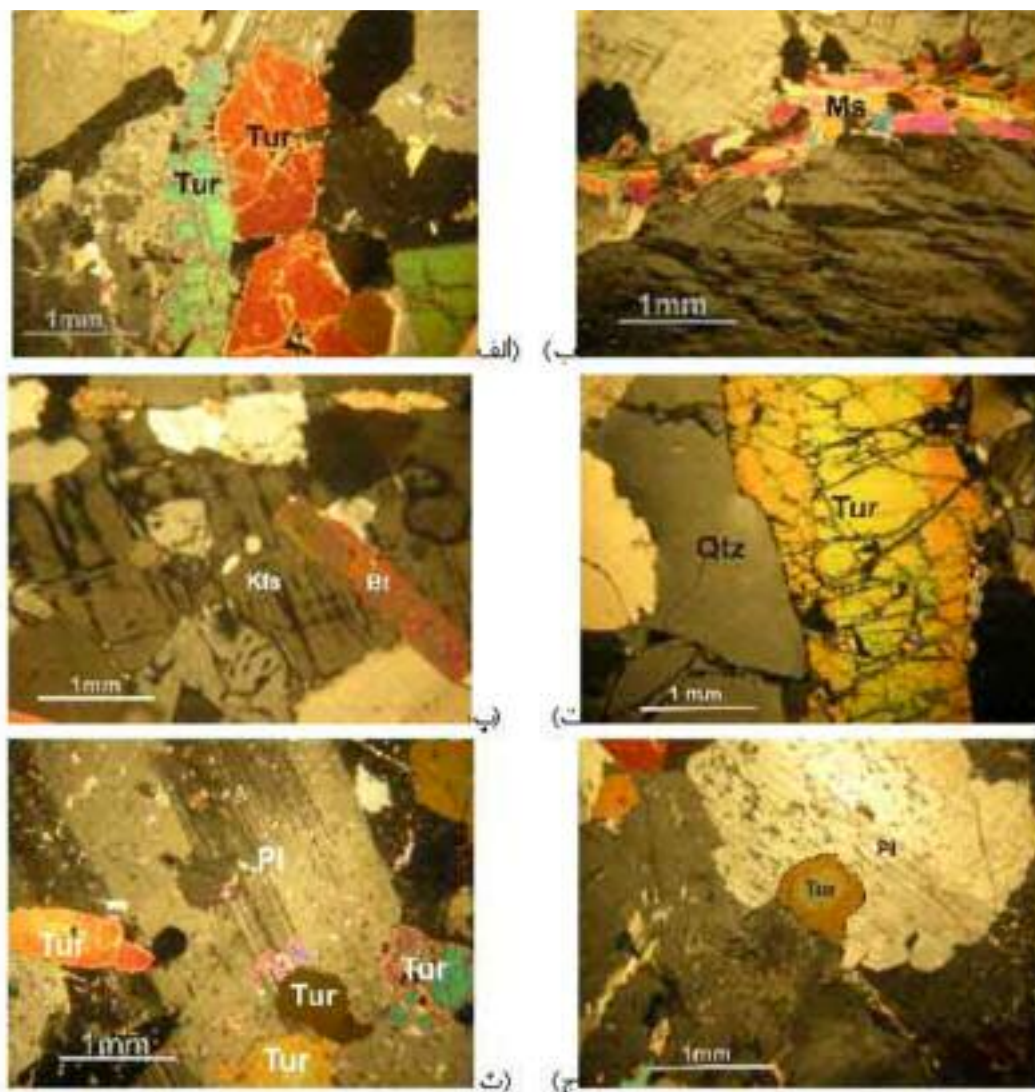
فرمول عمومی استفاده شده برای تورمالین به صورت زیر است و نتایج تجزیه‌ی ریزپردازش الکترونی در جدول ۱ آورده شده‌اند.



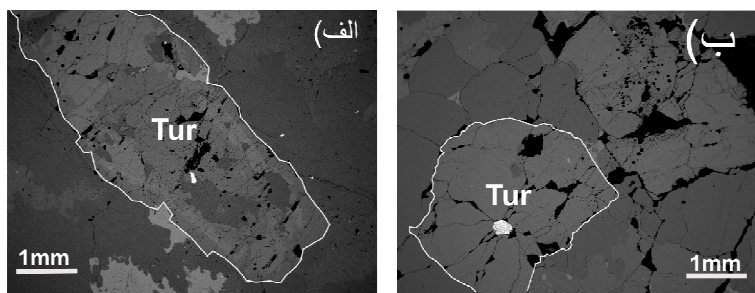
X = Ca, Na, K, [vacant]

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

Y = Li, Mg, Fe^{2+} , Mn^{2+} , Al, Cr^{3+} , V^{3+} , Fe^{3+} , (Ti^{4+})
Z = Mg, Al, Fe^{3+} , V^{3+} , Cr^{3+}
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 به وسیله 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.

میزان لیتیم در تورمالین با استفاده از رابطه‌ی $(Li = 3 - \sum Y)$ 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:

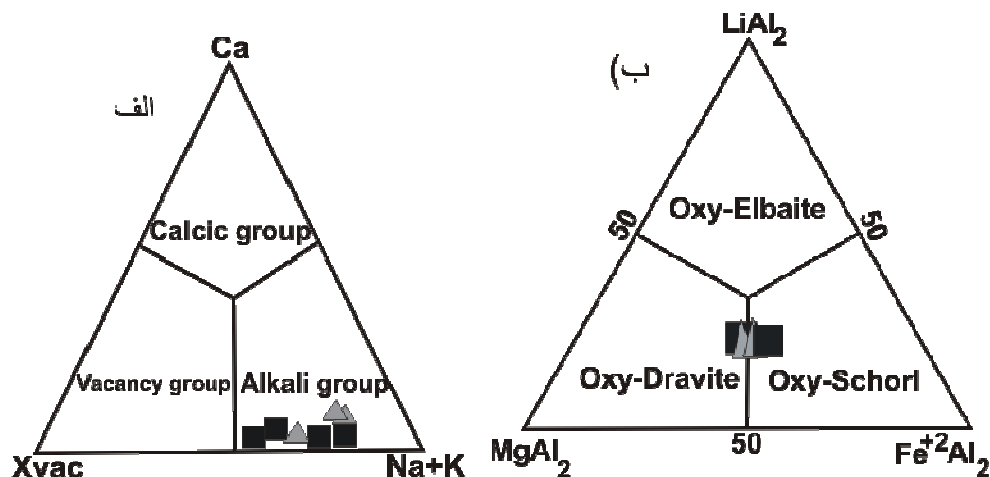
Schorl: $Na Fe_3^{+2} Al_6 Si_6 O_{18} (BO_3)_3 (OH)_3 (OH)$ -
 Dravite: $Na Mg_3 Al_6 Si_6 O_{18} (BO_3)_3 (OH)_3 (OH)$

نمونه‌های تورمالین چاه رویی در پائین خط

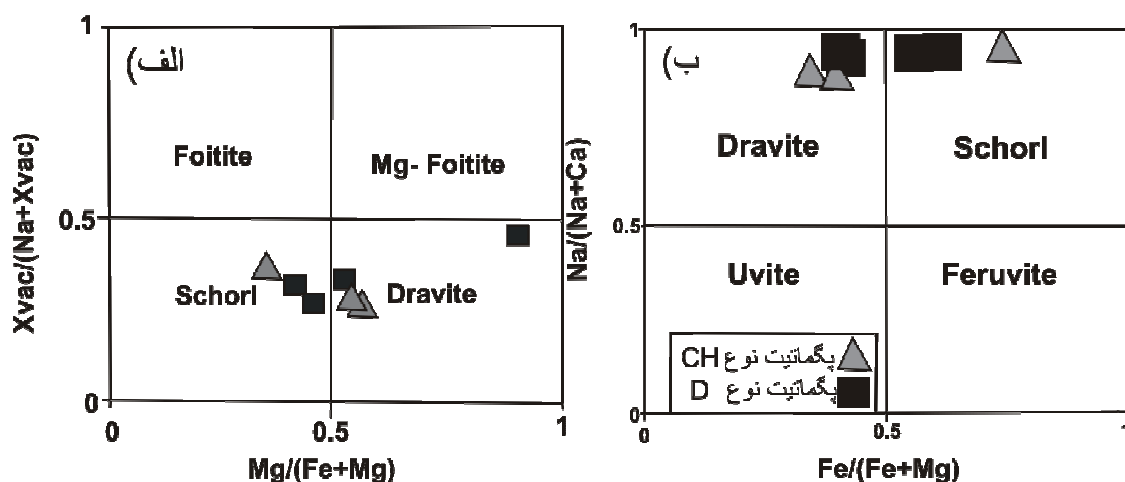
میزان لیتیم در تورمالین با استفاده از رابطه‌ی $(Li = 3 - \sum Y)$ برآورد شد [۷]. تورمالین‌های منطقه‌ی چاه‌رویی در گستره‌ی تورمالین‌های قلیایی قرار می‌گیرند (شکل ۷ الف)، که نشان دهنده‌ی میزان پائین فضای خالی و کلسیم در جایگاه X دارد، و نمونه‌های تورمالین منطقه‌ی چاه رویی از نوع شورل-دراویت‌اند (شکل‌های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

Schorl: $Na Fe_3^{+2} Al_6 Si_6 O_{18} (BO_3)_3 (OH)_3 (OH)$ -
 Dravite: $Na Mg_3 Al_6 Si_6 O_{18} (BO_3)_3 (OH)_3 (OH)$

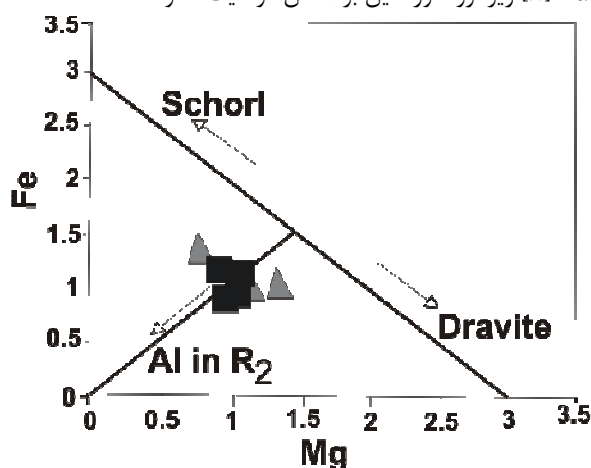
نمونه‌های تورمالین چاه رویی در پائین خط



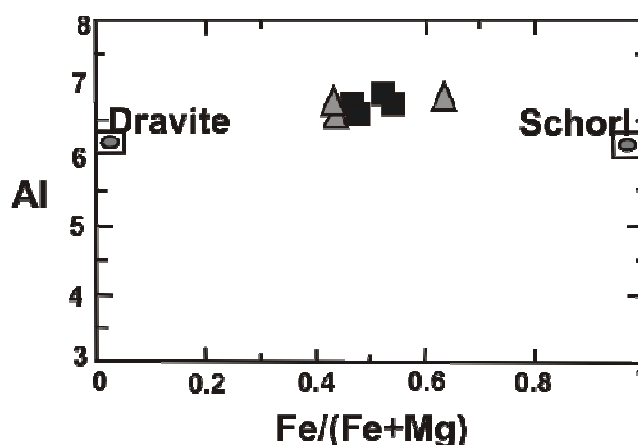
شکل ۷ الف) نمودار سه تایی $Xvac - Ca - Na + K$ [۸] زیرگروه تورمالین‌ها بر اساس قرارگیری در جایگاه X (ب) نمودار سه تایی $MgAl_2 - LiAl_2 - FeAl_2$ [۸] زیرگروه قلیایی تورمالین‌ها بر اساس قرارگیری در جایگاه X و Y. نشانه‌ها مانند شکل ۸ ب.



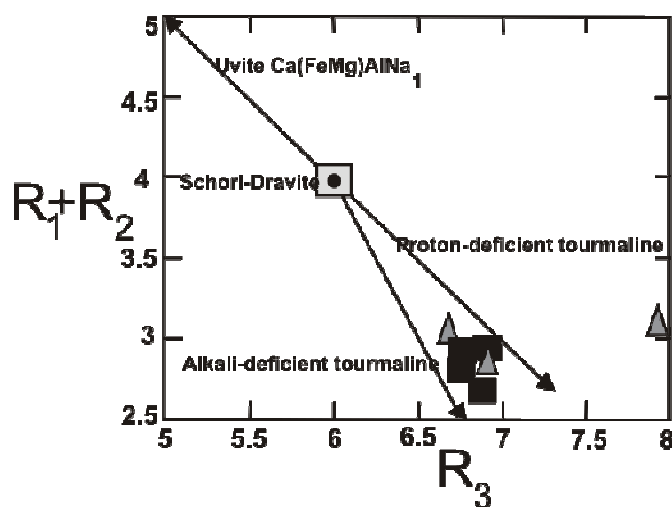
شکل ۸ الف) نمودار $Mg/(Fe + Mg)$ در برابر $X_{vac}/(Na + X_{vac})$ [۸] زیرگروه تورمالین بر اساس موقعیت X و Y. ب) نمودار $Na/(Na + Ca)$ در برابر $Fe/(Fe + Mg)$ [۸] زیرگروه تورمالین بر اساس موقعیت X و Y.



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



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



شکل ۱۱ نمودار $R1 + R2$ نسبت به $R3$ برای نمایش سازوکارهای جانشینی معمول در تورمالین [۱۵].

$R3 = \text{totalAl} + 1.33\text{Ti}$ و $R1 = \text{Ca} + \text{Na}$ $R2 = \text{Fe} + \text{Mg} + \text{Mn}$. نشانه‌ها مانند شکل ۸.

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 روندی 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 REE، ۷۱/۲۷ بالاست، ولی در تورمالین‌های موجود در سنگ‌های دگرگون (نوع D)، میزان REE پائین و با مقدار میانگین REE، ۱۰/۲۶ دیده شد. هر دو نوع پگماتیت دارای بیهنجاری منفی یوروپیوم‌اند. میانگین بهنجار شده‌ی Dy، La و Lu نسبت به داده‌های پیشنهادی ناکامورا [۱۰] برای کندریت در تورمالین-های نوع D به ترتیب ۷، ۰/۹۱ و ۱/۵۴ در مقابل میانگین بهنجار شده‌ی این عناصر در تورمالین‌های نوع CH به ترتیب ۴۵/۰۷، ۷/۵۶ و ۱۱/۸۸ 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 گرمایی‌های ماگمایی در مراحل تأخیری، از بور غنی باشند. بر اساس نظر لندن و منینگ [۹] سنگ‌های گرمایی غنی از تورمالین از مخلوط شدن دو شاره یا چند چشمه شکل می‌گیرند، و نیز به عقیده‌ی آنها رگه‌های گرمایی و برش‌های تورمالینی که در سیستم شیمیایی بازند، شاره‌ی تشکیل دهنده‌ی آنها از خارج گرانیته‌ها ریشه گرفته است و ماگمای گرانیته‌ی خاستگاه بور است. با توجه به بررسی‌های مقاطع نازک، آنالیزهای ریزپردازشی الکترونی و ICP، می‌توان دو نوع

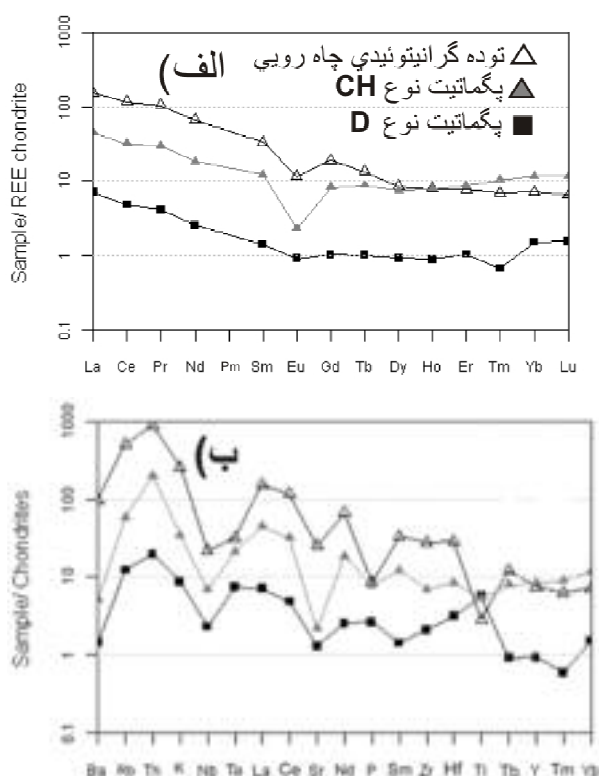
پگماتیت با یک خاستگاه مشخص کرد. اول پگماتیت‌هایی با مقدار عناصر کم مقدار (trace element) بالا و بیهنجاری منفی Ti و با کانی‌شناسی همچون تورمالین، بیوتیت، پلاژیوکلاز، ارتوکلاز، کوارتز، زیرکن، آپاتیت و گارنت که در حاشیه‌ی توده‌ی گرانیتوئیدی چاه رویی و متمایل به سمت سنگ‌های دگرگونی‌اند. دوم پگماتیت‌هایی 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 چاه‌رویی 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 چاه‌رویی (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 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ در سنگ‌های گرانیتوئیدی چاه رویی در حدود ۰/۶۶ (جدول ۳) است که در تورمالین‌های چاه‌رویی 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 گرانیتوئید چاه رویی هم پوشی خوبی نشان نمی‌دهند و ترکیب تورمالین‌ها به طور کامل به‌وسیله‌ی سنگ‌های گرانیتوئیدی اطراف کنترل نمی‌شود.

محلول آبکی ماگمای گرانیتوئیدی چاه رویی در مراحل تأخیری- گرمایی، 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 ماگمای باقی مانده یا گرمایی‌های وابسته به ماگمای گرانیته دارد. از طرفی نمونه‌های تورمالین منطقه‌ی چاه رویی

دارای میزان آلومینیم بالا و بیشتر بین دو بردار جانشینی
قلیایی و پروتون زدایی قرار می‌گیرد (شکل ۱۱) که جانشینی -
های یاد شده به دلیل جانشینی آلومینیم هشت وجهی در این
تورمالین‌هاست و بیانگر خاستگاه ماگمایی آنها دارد. همچنین

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

	G1	G2	G3	G4
SiO ₂	۷۰.۹	۷۰.۸	۷۰.۳	۷۰.۸
Al ₂ O ₃	۱۴.۹	۱۴.۷۶	۱۵.۱	۱۴.۹۶
FeO	۲.۵۱	۲.۳۴	۲.۵۸	۲.۶۸
CaO	۲.۴۵	۱.۹۸	۱.۹	۱.۹۶
MgO	۰.۸	۰.۶۳	۰.۸۹	۰.۸۶
Na ₂ O	۳.۸۳	۳.۸۱	۳.۹۵	۳.۷۴
K ₂ O	۳.۸۵	۳.۷۴	۳.۶۷	۳.۸۲
Fe	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۲
Mg	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱
Na	۰.۰۶۱	۰.۰۶۱	۰.۰۶۳	۰.۰۶
Ca	۰.۰۴۳	۰.۰۳۵	۰.۰۳۴	۰.۰۳۵
Fe/(Fe+Mg)	۰.۶۶	۰.۶۶	۰.۶۶	۰.۶۶
Na/(Na+Ca)	۰.۶	۰.۶۶	۰.۶۶	۰.۶

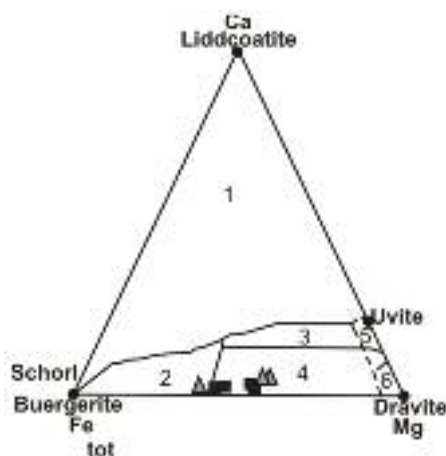


شکل ۱۲ الف) نمودار عناصر نادر خاکی نمونه‌های تورمالینی و توده‌ی گرانیتوئیدی چاه رویی و به هنجار شده نسبت به کندریت ناکامورا [۹]. ب) نمودار عنکبوتی نمونه‌های تورمالینی و توده‌ی گرانیتوئیدی چاه رویی و به هنجار شده نسبت به کندریت تامپسون [۱۴]، نشانه‌ها مانند شکل الف.

خاستگاه تورمالین‌های چاه رویی بیشتر در گستره‌ی سنگ-
های کوارتز-تورمالین و متاسامیت‌ها و متاپلیت‌های فقیر از Ca
که تمایل به سمت گستره‌ی گرانیتوئیدهای فقیر از لیتیم و
پگماتیت‌ها و آپلیت‌های وابسته به آنها، تعیین شد (شکل ۱۳)،
و این نشان از این دارد که تورمالین‌ها در اثر واکنش‌های
سنگ‌های دگرگون اطراف توده‌ی گرانیتوئیدی با فرآیندهای
ماگمای گرانیتوئیدی چاه‌رویی در مراحل تأخیری- گرمایی 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،

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.

۴ج)، و این نشان دهنده‌ی این است که در اثر واکنش‌های فرآیندهای ماگمای گرانیتوئیدی



شکل ۱۳ نمودار سه تایی Ca، Mg، Fe [۱۲]. 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 ۶= متالترامافیک‌ها. نشانه‌ها مانند شکل ۸ب.

تشکیل از شاره‌ی خاستگاه فراهم باشد که این واکنش‌های بین شاره ماگمایی چاه رویی در مراحل تأخیری- گرمایی 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 ماگمایی 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 ماگمایی چاه رویی دارد. بنابراین در تأمین عناصر لازم برای تشکیل تورمالین، هم ماگمای گرانیتوئیدی چاه رویی در مراحل تأخیری- گرمایی 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.

چاه‌رویی در مراحل تأخیری- گرمایی 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. مشاهدات بیابانی نشان می‌دهد که با افزایش مقدار تورمالین در پگماتیت-های 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 بی‌ثبات 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-فلدسپات، مسکویت-تورمالین (نوع D) ایجاد می‌شوند که همه‌ی آنها بیشینه‌ی گرمایی-ماگمایی در مراحل تأخیری دارند. البته برای تشکیل تورمالین علاوه بر کاهش دما در گرمایی‌های-ماگمایی 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 گرانیتوئیدی چاه رویی به سمت سنگ‌های دگرگون ده سلم حرکت کنیم در اثر کاهش دما، کانی‌هایی با پایداری دمايي پائين تر ايجاد می‌شود يعنی اول بیوتیت، بعد تورمالین- بیوتیت، کوارتز- فلدسپات، مسکویت- تورمالین ايجاد می‌شود.

۴- خاستگاه هر دو نوع پگماتیت، در اثر واکنش‌های بین ماگمای گرانیتوئیدی چاه رویی در مراحل تأخیری- گرمایی با سنگ‌های دگرگون ده سلم موجود در اطراف آن (گارنت شلیست و آندالوزیت شلیست) است، که بیشتر بور مورد نیاز برای تشکیل تورمالین در هر دو نوع پگماتیت، به‌وسیله‌ی ماگمای چاه رویی در مرحله‌ی تأخیری- گرمایی 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 زحمت 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 ورودی 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: ۱:۱۰۰۰۰۰: چاه داشی"، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (شهریور ۱۳۸۳).
- [2] Burinnek D., Novak M., "Compositional evolution and substitutions in disseminated and nodular tourmaline from leucocratic granites: Example from the Bohemian Massif, Czech", Republic. Lithos, inpres (2006).
- [3] 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.