

شیمی کانی‌ها و زمین دما – فشارسنگی توده نفوذی اسپید (غرب قم)

نیما رحیمی^۱، حسن میرنژاد^۱، مریم شیبی^{*۲}، سروش مدبری^۱

۱- دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، ایران

۲- دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهروود، ایران

(دریافت مقاله: ۹۵/۱۱/۱۸، نسخه نهایی: ۹۶/۴/۱۴)

چکیده: توده نفوذی اسپید با سن نتوژن در کمربند ماگمایی ارومیه - دختر بیرون‌زدگی دارد. آمفیبول‌های موجود در این توده نفوذی از نوع کلسیمی و ماگمایی بوده و ترکیب آن‌ها از مگنزیو-هورنبلند تا اکتینولیت در تغییر است که نشان می‌دهد که توده مورد بررسی نوع I است. بررسی‌های زمین‌شناسی حاکی از آن است که بلورهای آمفیبول در فشار حدود ۲/۵ تا ۳/۷ کیلو بار که معادل با اعمق ۸ تا ۱۲ کیلومتری زمین است متبلور شده‌اند. همچنین بر اساس زمین‌دماسنجی زوج کانی هورنبلند - پلازیوکلاز و آمفیبول‌ها، دمای بین ۷۵۲ تا ۸۶۵ درجه سانتی‌گراد، برای تبلور این دو کانی در توده نفوذی اسپید به دست آمده است. همچنین مقادیر $\log fO_2$ بین ۱۵/۲۷ تا ۱۲/۱۸ است که نشان‌دهنده بالا بودن نسبی گریزندگی اکسیژن در ماگمای سازنده‌ی این توده و شاهدی بر تشکیل این توده در محیط‌های فروزانش است.

واژه‌های کلیدی: شیمی کانی؛ زمین دما – فشارسنگی؛ توده نفوذی اسپید؛ گریزندگی اکسیژن.

در این توده با استفاده از شیمی کانی‌های فلدسپار و آمفیبول موردنظر ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین با استفاده از شیمی کانی‌های فلدسپار پتاسیم، مگنتیت، تیتانیت، اپیدوت و کلریت به تعبیر و تفسیر سنگزایی، بررسی دگرسانی‌ها و همچنین تعیین شرایط تشکیل و تبلور این توده نفوذی پرداخته می‌شود.

روش بررسی

به منظور مطالعه دقیق کانی‌شناسی، بررسی تغییرات شیمیایی و کانیایی حاصل از دگرسانی، تعیین دمای تشکیل دگرسانی و زمین دما – فشارسنگی و ارزیابی گریزندگی اکسیژن توده نفوذی اسپید، تجزیه ریزپردازش الکترونی (EMPA) بر روی ۷۰ نقطه از کانی‌های پلازیوکلاز، فلدسپار پتاسیم، آمفیبول، مگنتیت، کلریت، اپیدوت و تیتانیت صورت گرفت. این تجزیه‌ها در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران به کمک دستگاه EMPA مدل SX100 ساخت شرکت کامکا فرانسه و با جریان ریزکاو nA ۱۵ و ولتاژ شتابدهنده

مقدمه

توده نفوذی اسپید در ۶۰ کیلومتری غرب قم، بین طول‌های جغرافیایی "۱۸°۴۴' و "۱۰°۵۰' و "۵۰°۲۲' شرقی و عرض‌های جغرافیایی "۱۸°۳۹' و "۳۴°۴۱' و "۱۲°۳۴' شمالی واقع است. این توده نفوذی دارای ترکیب کالک آلکالن است و از نظر جایگاه زمین‌ساختی در کرانه‌های فعال قاره‌ای و محیط‌های فروزانش قرار می‌گیرد [۱]. مجموعه کانی‌ها و ترکیب آن‌ها در سنگ‌های آذرین با ترکیب و شرایط فیزیکوشیمیایی ماگما طی جایگیری ارتباط تنگاتنگی داشته و محاسبه فشار و دمای یک توده نفوذی، نقش مهمی در شناخت سنگزایی و فعالیت زمین‌ساختی ناحیه‌ای دارد [۲-۴]؛ بنابراین استفاده از ترکیب کانی‌ها، بهویژه کانی‌های همزیست می‌تواند شناخت بهتری از پارامترهای فیزیکوشیمیایی از جمله فشار، دما و گریزندگی اکسیژن ماگمای در حال تبلور ارائه دهد. لذا در این پژوهش شرایط فشار، دما و گریزندگی اکسیژن ماگمای در حال تبلور

کانه‌زایی آهن و انواع دگرسانی‌های موجود در توده نفوذی اسپید است.

سنگنگاری توده نفوذی اسپید

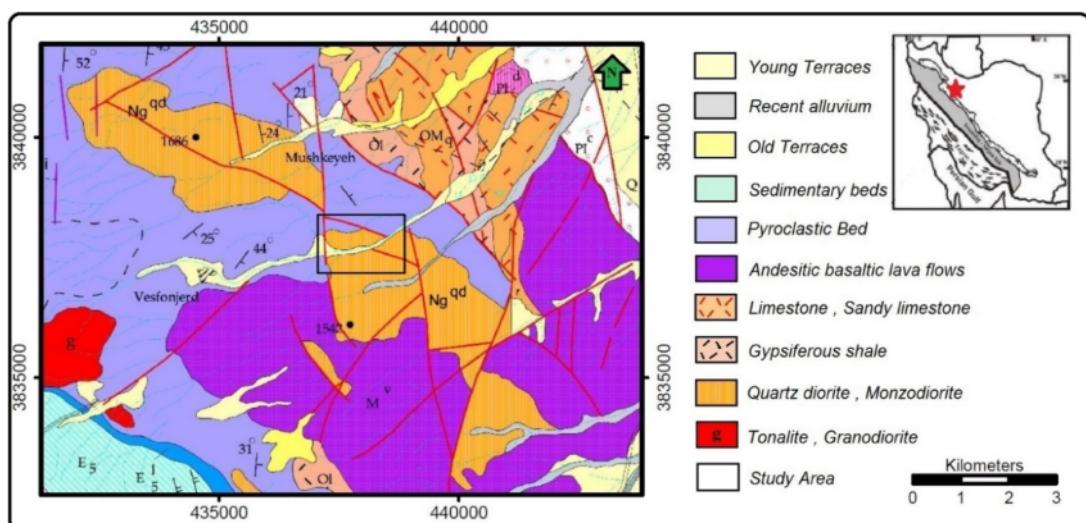
براساس بررسی‌های میکروسکوپی، توده نفوذی اسپید دارای ترکیب دیوریت تا مونزودیوریت است. بافت‌های مشاهده شده در این توده بیشتر دانه‌ای، ریزدانه‌ای، پورفیروئیدی و به مقدار کمتر خال خال و غربالی است. پلازیوکلаз، فلدسپار پتاسیم و آمفیبول مهم‌ترین کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها هستند. کوارتز، مکنتیت، آپاتیت، زیرکن و تیتانیت نیز کانی‌های فرعی موجود را تشکیل می‌دهند. این مجموعه کانی‌ای برای زمین‌دماسنجی هورنبلنده - پلازیوکلاز و زمین‌فسارستجی Al در هورنبلنده بسیار مناسب است [۵-۷]. کانی‌های سرسیت، کلریت، اپیدوت، تیتانیت، کلسیت، کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن (هماتیت) نیز به صورت ثانویه و در اثر دگرسانی توده تشکیل شده‌اند. پلازیوکلاز درشت بلور غالب این سنگ‌ها بوده و به صورت تخته‌ای، شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار و همراه با ماکل کارلسپاد، آلبیتی و چندريخت دیده می‌شود (شکل ۲ الف) همچنین برخی از بلورهای پلازیوکلاز منطقه-بندي ضعیفی را نشان می‌دهند که بیشتر در بخش مرکزی به سرسیت تبدیل شده‌اند. دانه‌های کوارتز بیشتر بی‌شکل‌اند و در بهترین فضای بین بلورهای درشت پلازیوکلازها و فلدسپارهای قلیایی را اشغال کرده‌اند (شکل ۲ ب). بلورهای فلدسپار قلیایی نیز بیشتر نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل هستند.

Kev ۱۵ و زمان ۴۰ ثانیه انجام شد. سپس با بهره‌گیری از نمودارهای مربوطه، نوع کانی‌ها، زمین دما - فشارستجی و عمق جایگیری توده تعیین شد. لازم به توضیح است که تفکیک مقادیر Fe^{2+} و Fe^{3+} در فرمول ساختاری کانی‌ها طبق روش استفاده شده در مرجع [۵] و بر اساس تناسب عنصری کانی‌های نامبرده برآورد شده است.

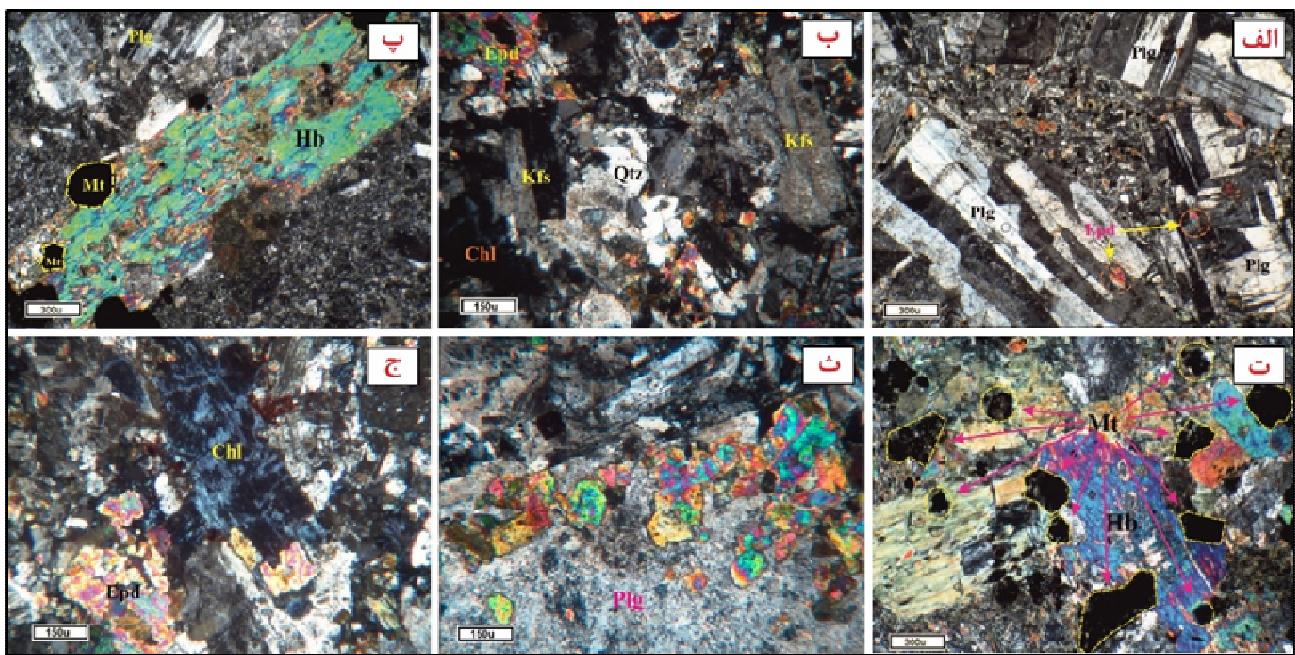
بحث و بررسی

زمین‌شناسی محدوده مورد بررسی

توده نفوذی اسپید، در نقشه تقسیمات ساختاری ایران در کمربند ماقمایی ارومیه - دختر قرار می‌گیرد. این توده به درون سنگ‌های آتش‌فشانی و آذرآواری ائوسن نفوذ کرده و با ایجاد دگرسانی گسترده باعث تشکیل کانه‌زایی اسکارن آهن شده است (شکل ۱). در محل تماس این توده با سنگ‌های آتش‌فشانی، کانه‌زایی آهن به صورت هماتیت ایجاد شده است. سنگ میزان توده مورد بررسی واحد آتش‌فشانی با سن ائوسن پسین شامل لایه‌های آذرآواری، لایه‌های رسوبی، توفیت‌های رسی، توفیت‌های ماسه‌ای - کنگلومراپی و سنگ‌های آتش‌فشانی آندزیتی است که بیشترین گستردگی را بین واحدهای میزان منطقه نشان می‌دهد [۶]. بهطور کلی سن عمومی منطقه مورد بررسی مربوط به دوران سوم زمین‌شناسی بوده و به طور عمده رخنمونهای واحدهای سنگی موجود در این منطقه متعلق به ائوسن و الیگوسن است. اغلب گسل‌های منطقه دارای روند شمال شرقی - جنوب غربی و شرقی - غربی هستند. نکته قابل توجه رابطه این شکستگی‌ها و گسل‌ها با



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی منطقه برگرفته از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ تفرش [۶]. موقعیت منطقه مورد بررسی با یک مستطیل مشخص شده است.



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپی معرف بافت و مجموعه کانی‌های موجود در توده نفوذی اسپید. (الف) درشت بلورهای پلازیوکلاز (Plg) با بافت چندریختی در واحد دیوریتی. (ب) تصویری از بلورهای کوارتز (Qtz) بی‌شکل و فلدسپار قلیایی (Kfs) در واحد مونزودیوریت. (پ) بلور هورنبلنده (Hb) همراه کانی پلازیوکلاز. (ت) همراهی دانه‌های مگنتیت (Mt) با کانی آمفیبول در واحد دیوریتی. (ث) دگرسان شدن پلازیوکلاز به اپیدوت (Epd) در واحد مونزودیوریتی. (ج) جایگزینی کامل کلریت (Chl) در قالب آمفیبول در واحد مونزودیوریتی. (ج) مخفف کانی‌ها برگرفته از مرجع [۱۱].

بیشتر با ماکل چندریخت و کارلسپاد دیده می‌شود. نتایج حاصل از تجزیه ریزپردازشگر الکترونی و همچنین فرمول ساختاری محاسبه شده برای از پلازیوکلازلها در دو نمونه دیوریتی در جدول ۱ ارائه شده است. ترکیب کانی‌های پلازیوکلاز بر نمودار تفکیک فلدسپارها [۱۲] نشان می‌دهد که این کانی‌ها بیشتر دارای ترکیب لابرادوریت و آندزین هستند (شکل ۳ الف).

فلدسپار پتاسیم: این کانی بیشتر به صورت بی‌شکل در توده نفوذی اسپید دیده می‌شود که نشان‌دهنده تشکیل آن در مراحل آخر تبلور توده است. نتایج حاصل از تجزیه ریزپردازش الکترونی بر این کانی در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس این بررسی‌ها، مقدار آنورتیت فلدسپارهای پتاسیم بسیار پایین بوده و همچنین مقدار آلیت آن‌ها از ۴ تا ۱۶ درصد متغیر است. ترکیب کانی‌های فلدسپار پتاسیم بر نمودار تفکیک فلدسپارها [۱۲] نشان می‌دهد که اغلب کانی‌های فلدسپار پتاسیم در توده نفوذی اسپید، دارای Or_{81} تا Or_{95} و ترکیب ارتوکلاز هستند (شکل ۳ ب).

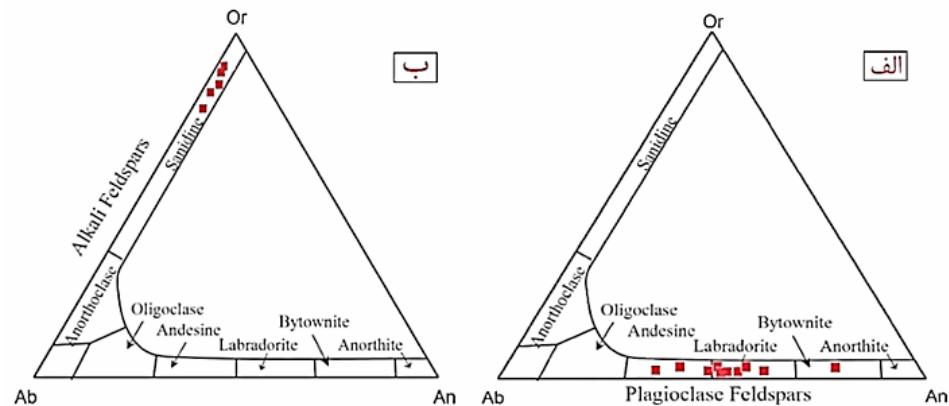
آمفیبول تنها کانی مافیک موجود در توده نفوذی اسپید است که به صورت نیمه شکل دار تا بی‌شکل دیده می‌شود و حدود ۱۰ درصد حجمی سنگ را شامل می‌شود (شکل ۲ پ). در این توده، پلازیوکلاز و آمفیبول بدون حاشیه واکنشی در تعادل هستند که یکی از شرط‌های لازم برای زمین دما – فشارسنگی است [۱۰]. همراه با کانی هورنبلنده، مگنتیت‌های خود شکل و ماقمایی نیز حضور دارند (شکل ۲ ت). علاوه بر این، ادخال‌هایی از مگنتیت در بلورهای هورنبلنده دیده می‌شود. کانی آمفیبول در اثر دگرسانی به کلریت، اکسیدهای آهن و اپیدوت تبدیل شده است. دگرسانی غالب در این سنگ‌ها، سریسیتی شدن، اپیدوتی شدن و رسی شدن فلدسپارها و کلریتی شدن آمفیبول‌هاست (شکل‌های ۲ ث و ج). بر اساس مشاهدات صحرایی و بررسی‌های میکروسکوپی، انواع دگرسانی‌های پروپیلیتی و آرژیلیتی این توده نفوذی را تحت تأثیر قرار داده‌اند.

شیمی کانی‌ها

پلازیوکلاز: این کانی فراوان‌ترین کانی فلزیک تشکیل‌دهنده توده نفوذی اسپید است که به صورت تخته‌ای و خودشکل

جدول ۱ نتایج تجزیه ریزپردازشی و محاسبه فرمول ساختاری کانی‌های پلازیوکلاز و فلدسپار قلیایی در توده نفوذی اسپید.

Min.	Plg	Afs	Afs	Afs	Afs	Afs						
<i>Oxide composition (wt. %)</i>												
<i>SiO₂</i>	۴۷,۰۵	۵۵,۱۴	۵۵,۱	۵۴,۸۳	۶۲,۰۴	۵۳,۶۶	۵۶,۳	۵۴,۶۸	۵۷,۴۷	۶۴,۴۷	۶۴,۳۸	۶۵,۳۴
<i>TiO₂</i>	۰,۰۲	۰,۰۷	۰,۰۲	۰,۰۲	۰	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۲	۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱
<i>Al₂O₃</i>	۳۲,۷۲	۲۸,۵۵	۲۹,۱۱	۲۷,۳۱	۲۰,۸۴	۲۸,۸۹	۲۸,۲۷	۲۸,۷۷	۲۸,۳۸	۱۹,۱۱	۱۸,۷۳	۱۸,۶۳
<i>FeO</i>	۰,۴۵	۰,۳۸	۰,۴۱	۰,۴۶	۰,۳۴	۰,۳۳	۰,۴	۰,۴۹	۰,۱۳	۰,۱۵	۰,۰۶	۰,۰۴
<i>CaO</i>	۱۷,۱۹	۱۱,۴۹	۱۰,۲۹	۱۱,۸۱	۷,۹۳	۱۱,۹۶	۹,۷۳	۱۱,۲۱	۸,۰۱	۰,۱۱	۰,۰۷	۰,۱۲
<i>Na₂O</i>	۲,۱۳	۴,۲	۵,۴	۴,۶۱	۶,۸۵	۳,۹۶	۵,۰۴	۵,۴۸	۵,۳۹	۱,۱	۰,۵۴	۱,۰۶
<i>K₂O</i>	۰,۰۴	۰,۱۳	۱,۰۱۳	۰,۱۱	۰,۱۱	۰,۱۲	۰,۱۴	۰,۱۱	۰,۱۱	۱۵,۳۸	۱۵,۰۷	۱۵,۵۲
<i>Total</i>	۹۹,۶	۹۹,۹۶	۱۰۰,۴	۹۹,۱۵	۹۹,۱۱	۹۸,۹۵	۹۹,۸۹	۹۹,۴۹	۱۰۰,۷	۹۸,۸۶	۱۰۰,۰	۹۴,۳۶
<i>Structural formula based on 32 Oxygen</i>												
<i>Si</i>	۸,۷۱	۹,۹۳۳	۹,۸۸۵	۹,۹۹۵	۱۱,۳	۹,۷۸۸	۱۰,۱	۹,۸۲۶	۱۰,۲۶	۱۱,۸۶	۱۱,۹۶	۱۱,۹۶
<i>Al</i>	۷,۱۳۹	۶,۰۶۱	۶,۱۵۴	۵,۸۶۷	۴,۴۰۵	۶,۲۱	۵,۹۷۹	۶,۹۳	۵,۹۷۶	۴,۱۴۶	۴,۱۰۳	۴,۰۲۱
<i>Fe(ii)</i>	۰,۰۷	۰,۰۵۷	۰,۰۶۲	۰,۰۷	۰,۰۵۱	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۰۷۴	۰,۰۱۹	۰,۰۲۳	۰,۰۰۹	۰,۰۰۶
<i>Ca</i>	۳,۴۰۹	۲,۲۱۷	۱,۹۷۸	۲,۳۰۶	۱,۵۲۴	۲,۳۳۷	۱,۸۷۱	۲,۱۵۸	۱,۵۳۳	۰,۰۲۲	۰,۰۱۴	۰,۰۲۴
<i>Na</i>	۰,۷۶۴	۱,۴۶۷	۱,۸۷۸	۱,۶۲۹	۲,۳۲۸	۱,۴۰۴	۱,۷۵۳	۱,۹۰۹	۱,۸۶۷	۰,۳۹۳	۰,۱۹۵	۰,۳۷۶
<i>K</i>	۰,۰۰۹	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۲۶	۰,۰۲۵	۰,۰۲۸	۰,۰۳۲	۰,۰۳۲	۰,۰۲۵	۳,۶۱۱	۳,۵۷۳	۳,۶۲۶
<i>Total</i>	۲۰,۱	۱۹,۷۷	۱۹,۹۸	۱۹,۸۹	۱۹,۶۹	۱۹,۸۲	۱۹,۷۹	۲۰,۰۹	۱۹,۶۱	۲۰,۰۶۲	۱۹,۸۶	۲۰,۰۲
<i>Feldspar components (mole fractions, %)</i>												
<i>An%</i>	۸۱,۵	۵۹,۷	۵۰,۸۹	۵۸,۲۲	۳۸,۷۶	۶۲,۰۱	۵۱,۱۶	۵۲,۶۴	۴۴,۴۶	۰,۵۳۹	۰,۳۶۹	۰,۵۸۵
<i>Ab%</i>	۱۸,۲۷	۳۹,۴۹	۴۸,۳۳	۴۱,۱۲	۶۰,۰۹	۳۷,۲۴	۴۷,۹۵	۴۶,۵۷	۵۴,۵	۹,۷۵۲	۵,۱۴۶	۹,۳۴۹
<i>Or%</i>	۰,۲۲۶	۰,۱۰۴	۰,۷۶۶	۰,۶۴۶	۰,۶۴	۰,۷۴۱	۰,۸۷۷	۰,۷۸۳	۰,۷۳۲	۸۹,۷۱	۹۴,۴۸	۹۰,۰۶



شکل ۳ ترکیب کانی‌های پلازیوکلاز (الف) و فلدسپار قلیایی (ب) توده نفوذی اسپید بر روی نمودار تقسیم‌بندی فلدسپارها [۱۲].

اپیدوت: این کانی یکی از کانی‌های شاخص دگرسانی پروپیلیتی در توده نفوذی اسپید است و روابط بافتی حاکی از تشکیل آن طی سوسوریتی شدن پلازیوکلازهاست [۱۶]. افزایش شاره‌ها همراه با افزایش CO_2 طی فرایند دگرسانی گرمابی پروپیلیتی در توده نفوذی اسپید منجر به تشکیل کانی‌های اپیدوت و تیتانیت شده است. نتایج حاصل از ساختاری آن در جدول ۲ ارائه شده است. یکی از پارامترهای کلیدی برای تعیین خاستگاه اپیدوت‌ها مقدار Fe^{3+} موجود در ساختار این کانی است و نرخ اکسایش تأثیر چشمگیری بر

تیتانیت: نتایج حاصل از تجزیه ریزپردازش الکترونی و همچنین محاسبه فرمول ساختاری کانی تیتانیت در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به میزان Fe و Al موجود در ساختار این کانی که جایگزین کلسیم و تیتان می‌شود می‌توان خاستگاه تیتانیت-های را تعیین کرد [۱۴, ۱۳]. پایین بودن مقدار Al_2O_3 در تیتانیت‌های توده نفوذی اسپید (۱-۲ درصد) نشان‌دهنده ثانویه بودن این کانی و بیانگر خاستگاه تجزیه و دگرسانی برای این کانی است [۱۵]. کانی تیتانیت در این توده ناشی از فرایند پسامگماهی بوده و طی فرایند دگرسانی گرمابی تشکیل شده است.

مقدار FeO در این مگنتیت‌ها از ۸۰ تا ۸۹ درصد در تغییر است و دارای مقادیر کمی TiO_2 هستند (۰،۶۸ تا ۰،۹ درصد) (جدول ۳). چنان که در نمودار سه‌تایی $\text{FeO}-\text{MgO}-\text{TiO}_2$ مشاهده می‌شود (شکل ۵ الف) بیشترین درصد ترکیب به قطب FeO اختصاص دارد. با توجه به شکل ۵ ب نیز بین دو عضو انتهایی مگنتیت – الواسپینل بیشترین فراوانی به مگنتیت تعلق می‌گیرد. چنان که در این دو نمودار نیز دیده می‌شود، کانی مگنتیت در نمونه‌های دگرسان شده از Ti کمتری برخوردار است در صورتی که مگنتیت‌های موجود در سنگ‌های فاقد دگرسانی دارای مقادیر Ti بالاتری هستند و در رده تیتانومگنتیت‌ها قرار می‌گیرند.

ترکیب اپیدوت‌ها دارد [۱۷]. با توجه به مقدار Fe^{3+} موجود در اپیدوت‌ها می‌توان درصد پیستاشیت را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد:

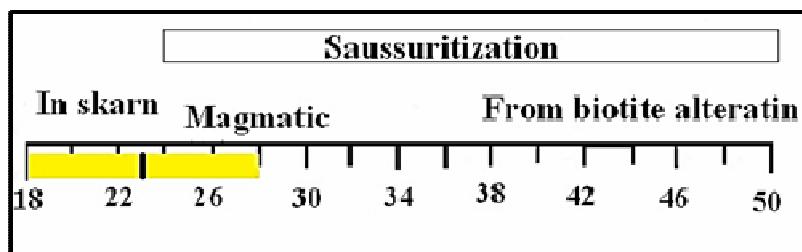
$$\text{PS} = 100 \times \frac{\text{Fe}^{3+}}{(\text{Fe}^{3+} + \text{Al})} \quad (1)$$

میانگین پیستاشیت محاسبه شده برای اپیدوت‌های توده نفوذی اسپید، ۲۲،۴۳ درصد است که به نظر می‌رسد این اپیدوت‌ها ناشی از سوسوریتی شدن پلاژیوکلازها بوده و طی دگرسانی پروپیلیتی تشکیل شده‌اند (شکل ۴).

مگنتیت: تجزیه نقطه‌ای بر کانی‌های کدر موجود در سنگ‌های توده نفوذی اسپید، مگنتیت بودن این کانی‌ها را تأیید کرد. نتایج حاصل از تجزیه ریزپردازش الکترونی نشان می‌دهد که

جدول ۲ نتایج تجزیه ریزپردازشی و محاسبه فرمول ساختاری کانی‌های تیتانیت و اپیدوت در توده نفوذی اسپید.

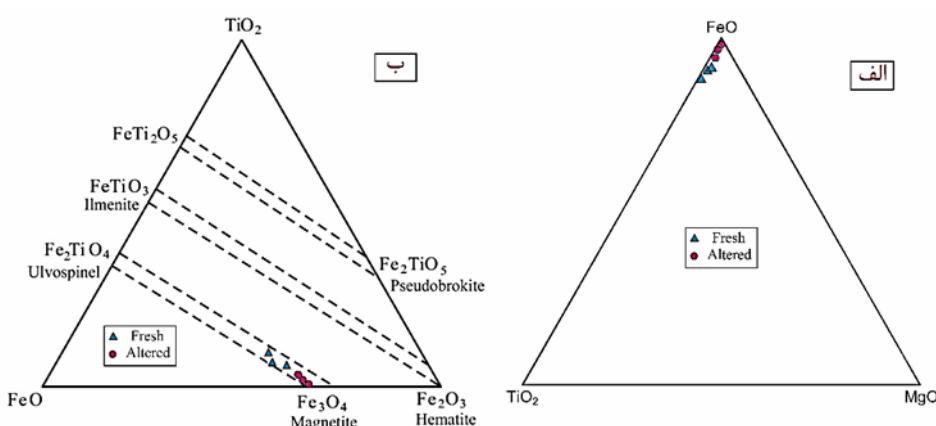
Min.	Epd	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn								
<i>Oxide composition (wt. %)</i>													
SiO_2	۳۲،۱۵	۳۸،۵۲	۳۷،۹۲	۴۰،۴	۳۸،۵۷	۳۸،۱۲	۳۸،۵۱	۳۷،۶	۳۳،۵۲	۲۰،۰۴	۲۸،۳	۳۱،۶۹	۱۷،۸۸
TiO_2	۰،۱۷	۰،۰۱	۰،۲۵	۰،۱۳	۰	۰	۰،۰۵	۶،۰۳	۰	۵۷،۱۳	۴۱،۹۲	۳۴،۴۵	۴۷،۱۴
Al_2O_3	۲۰،۶۶	۲۲،۰۶	۲۲،۵۲	۲۵،۲۵	۲۲،۸۱	۲۲،۶۷	۲۳،۸۳	۱۹	۱۸،۵۲	۱،۲۴	۱،۲۲	۴،۰۶	۱،۵۱
FeO	۱۰،۶۸	۱۲،۷	۱۲،۵۲	۱۰،۲	۱۳،۱	۱۲،۳۸	۱۱،۴۶	۱۱،۵۲	۱۶،۰۵	۲،۳۵	۱،۲۹	۰،۷۲	۸،۴
MnO	۰،۲۲	۰،۴۴	۰،۱۲	۰،۹۱	۰،۳۶	۰،۳	۰،۱۸	۰،۲۱	۰،۲	۰،۱۸	۰،۰۵	۰،۰۲	۸،۵۶
MgO	۰،۰۷	۰،۱۱	۰	۰،۰۶	۰،۰۲	۰،۰۶	۰	۰،۲۵	۰،۴۴	۰،۰۲	۰	۰،۱	۰،۱۴
CaO	۲۲،۶۸	۲۲،۶۲	۲۳،۶۷	۲۲،۷۷	۲۳،۴۸	۲۳،۷۱	۲۳،۵۳	۲۴،۳	۲۲،۹۲	۱۹،۱۱	۲۶،۷	۲۸،۷۵	۱۶،۶۴
Na_2O	۰،۱۲	۰،۰۸	۰	۰،۷۶	۰	۰،۲۲	۰،۱۶	۰،۴۱	۰،۰۹	۰،۰۷	۰،۲	۰،۳۷	۰،۱
K_2O	۰	۰	۰	۰،۰۲	۰،۰۱	۰	۰	۰	۰،۰۲	۰،۰۱	۰	۰،۰۲	۰
Total	۸۸،۷۵	۹۸،۷۱	۹۷،۰۷	۱۰۰،۵	۹۸،۳۵	۹۸،۶۶	۹۷،۷۲	۹۹،۳۲	۹۱،۷۶	۱۰۰،۱۵	۹۹،۶۸	۱۰۰،۱۸	۱۰۰،۳۷
<i>based on 13 Oxygen Structural formula</i>													
<i>based on 5 Oxygen</i>													
Si	۲،۹۱۳	۳،۰۱۱	۳،۰۱۳	۳،۰۷۱	۳،۰۲۵	۳،۰۰۴	۳،۰۲۵	۲،۹۵	۲،۸۸۲	۰،۶۶	۰،۹۲۹	۱،۱۲۵	۰،۶۱۵
Ti	۰،۰۱۱	۰،۰۰۱	۰،۰۱۵	۰،۰۰۷	۰	۰	۰،۰۰۳	۰،۳۵۶	۰	۱،۴۱۵	۱،۰۳۵	۰،۸۳۸	۱،۲۲۱
Al	۲،۲۴	۲،۱۱۴	۲،۱۱۵	۲،۲۶۲	۲،۱۰۸	۲،۲۹۴	۲،۴۱۲	۲	۱،۸۷۶	۰،۰۴۸	۰،۰۴۷	۰،۱۵۵	۰،۰۶۱
Fe^{3+}	۰،۶۱۸	۰،۶۰۴	۰،۶۳۲	۰،۶۴۸	۰،۸۵۹	۰،۷۴۱	۰،۵۴۶	۰،۷۵۶	۰،۸۲۱	۰،۰۶۵	۰،۰۳۵	۰،۰۱۹	۰،۲۴۲
Mn	۰،۰۱۶	۰،۰۲۹	۰،۰۰۸	۰،۰۵۹	۰،۰۲۴	۰،۰۲	۰،۰۱۲	۰،۰۱۴	۰،۰۱۵	۰،۰۰۵	۰،۰۰۱	۰،۰۰۱	۰،۲۵
Mg	۰،۰۰۹	۰،۰۱۳	۰	۰،۰۰۷	۰،۰۰۲	۰،۰۰۷	۰	۰،۰۲۹	۰،۰۵۶	۰،۰۰۱	۰	۰،۰۰۵	۰،۰۰۷
Ca	۲،۲۲۹	۱،۹۶۱	۲،۰۱۵	۱،۸۵۵	۱،۹۷۳	۱،۹۹۱	۱،۹۸۱	۲،۰۴۳	۲،۱۱۱	۰،۶۷۴	۰،۹۳۹	۰،۹۹۶	۰،۶۱۴
Na	۰،۰۲	۰،۰۱۲	۰	۰،۱۱۲	۰	۰،۰۳۳	۰،۰۲۴	۰،۰۶۲	۰،۰۱۵	۰،۰۰۴	۰،۰۱۳	۰،۰۲۳	۰،۰۰۷
K	۰	۰	۰	۰،۰۰۲	۰،۰۰۱	۰	۰	۰	۰،۰۰۲	۰	۰،۰۰۱	۰	۰
Total	۸،۱۲۴	۸،۰۰۵	۷،۹۹۸	۸،۰۲۳	۷،۹۹۲	۸،۰۲۷	۸،۰۰۴	۷،۹۶۸	۸،۱۱۲	۲،۸۷۲	۳،۰۰۱	۳،۰۶۲	۳،۰۱۶
PS%	۲۱،۶۴	۲۲،۱۴	۲۳	۲۲،۲۷	۲۸،۹۵	۲۴،۴۱	۱۸،۴۵	۲۴،۴۳	۲۴،۸۶	-	-	-	-



شکل ۴ نمودار تعیین خاستگاه اپیدوت‌های توده نفوذی اسپید بر اساس میزان پیستاشیت [۱۸] که خاستگاه دگرسانی را برای این کانی پیشنهاد می‌کند.

جدول ۳ نتایج تجزیه ریز پردازش الکترونی و محاسبه فرمول ساختاری کانی مگنتیت در توده نفوذی اسپید. به منظور تعیین درصد وزنی- FeO و تعیین فاز نهایی مگنتیت و ایلمنیت با روش استفاده شده در مرجع [۱۹].

Min.	Fresh			Altered		
	Mt	Mt	Mt	Mt	Mt	Mt
Oxide composition (wt. %)						
SiO_2	۰,۷۸	۰,۸۶	۰,۸۹	۰,۱	۰,۰۷	۰,۴۵
TiO_2	۰,۶۸	۳,۲۶	۱,۹۱	۹,۲	۶,۱۸	۹,۴۶
Al_2O_3	۰,۴۴	۰,۲۳	۰,۲۹	۰	۱,۳	۲,۲۵
FeO	۸۹,۱۶	۸۵,۵۸	۸۷,۵۶	۸۰,۰۱	۸۲,۰۱	۸۱,۸۱
MnO	۰,۲۲	۱,۴۴	۰,۵۷	۲,۱۱	۲,۹۸	۰,۲۱
MgO	۰,۱	۰,۰۲	۰,۰۷	۰,۱۱	۰,۰۳	۰,۲۴
CaO	۰,۲	۰,۷	۰,۳۴	۰,۱۲	۰,۰۷	۰,۱۴
Na_2O	۰	۰,۰۱	۰,۰۶	۰	۰	۰
Total	۹۱,۵۸	۹۲,۱	۹۱,۷	۹۱,۶۵	۹۲,۶۴	۹۱,۵۶
Structural formula based on 4 Oxygen						
Si	۰,۰۳۰	۰,۰۳۳	۰,۰۳۵	۰,۰۰۴	۰,۰۰۳	۰,۰۱۸
Ti	۰,۰۲۰	۰,۰۹۵	۰,۰۵۶	۰,۲۷۳	۰,۱۸۰	۰,۱۸۹
Al	۰,۰۲۰	۰,۰۱۱	۰,۰۱۳	۰	۰,۰۵۹	۰,۱۰۳
Fe^{+3}	۱,۸۷۹	۱,۷۳۲	۱,۸۰۴	۱,۴۴۶	۱,۵۷۵	۱,۴۸۳
Fe^{+2}	۱,۰۲۹	۱,۰۵۱	۱,۰۵۳	۱,۱۹۵	۱,۰۸۰	۱,۱۸۰
Mn	۰,۰۰۷	۰,۰۴۷	۰,۰۱۹	۰,۰۷۱	۰,۰۹۸	۰,۰۰۷
Mg	۰,۰۰۶	۰,۰۰۱	۰,۰۰۴	۰,۰۰۶	۰,۰۰۲	۰,۰۱۴
Ca	۰,۰۰۸	۰,۰۲۹	۰,۰۱۴	۰,۰۰۵	۰,۰۰۳	۰,۰۰۶
Na	۰	۰,۰۰۱	۰,۰۰۵	۰	۰	۰
Total	۳	۳	۳	۳	۳	۳
Fe_2O_3 wt. %	۶۴,۰۲۷	۵۹,۱۸۸	۶۱,۴۴۲	۴۸,۶۸۱	۵۴,۰۶۲	۵۰,۶۳۷
FeO wt. %	۳۱,۵۴۸	۲۲,۳۲۲	۳۲,۲۷۴	۳۶,۲۰۶	۳۳,۳۶۴	۳۶,۲۴۶
Total	۹۷,۹۹۵	۹۸,۰۳۰	۹۷,۸۵۶	۹۶,۵۲۷	۹۸,۰۵۷	۹۶,۶۳۳
Ulvospinel %	۵,۰۴	۱۲,۸۸	۹,۰۸	۲۷,۷۱	۱۸,۷۷	۲۰,۶۷
Magnetite %	۹۴,۶	۸۷,۱۲	۹۰,۹۲	۷۲,۲۹	۸۱,۷۳	۷۹,۳۳



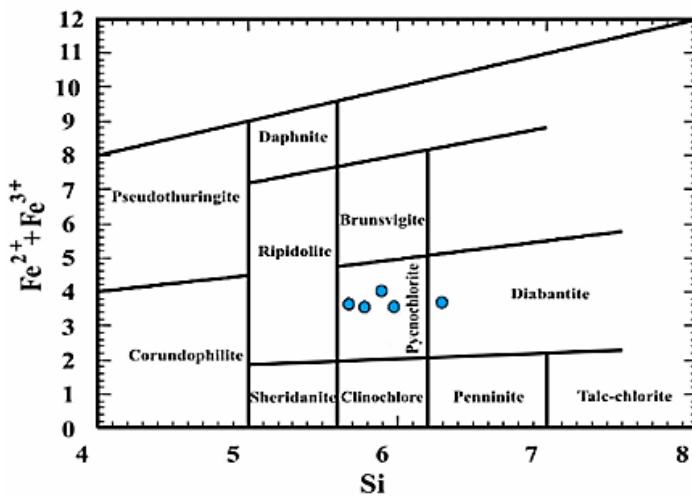
شکل ۵ ترکیب کانی‌های کدر در بردارنده اکسیدهای Fe-Ti در توده نفوذی اسپید بر نمودارهای (الف) FeO-TiO₂-MgO و (ب) FeO-TiO₂-FeO- Fe_2O_3 که نشان‌دهنده مگنتیت بودن این کانی‌ها هستند.

سنگ میزان کنترل می‌شود. کلریت‌های توده نفوذی اسپید دارای نسبت $(\text{Fe} + \text{Mg})/\text{Fe}$ برابر با ۰,۴۴ تا ۰,۳۹ و مقدار Si برابر با ۵,۷۱ تا ۶,۲۴ اتم در واحد فرمول مولکولی (apfu) هستند که بر اساس نمودار تقسیم‌بندی کلریت‌ها [۲۰] در گستره پیکنوكلریت و دیاباننتیت قرار می‌گیرند (شکل ۶).

کلریت: کلریت‌های حاصل از دگرسانی کانی‌های فرومیزین از جمله آمفیبول، در توده نفوذی اسپید مورد تجزیه نقطه‌ای قرار گرفتند که نتایج حاصل از تجزیه ریزپردازشی به همراه محاسبه فرمول ساختاری آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. تنوع ترکیبی این کلریت‌ها به وسیله ترکیب آمفیبول‌ها و ترکیب

جدول ۴ نتایج تجزیه ریز پردازش الکترونی و محاسبه فرمول ساختاری کانی‌های کلریت و آمفیبول در توده نفوذی اسپید.

Min.	Am	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl								
Oxide composition (wt. %)														
<i>SiO₂</i>	۴۵,۸۵	۴۵,۲۶	۴۵,۸	۴۶,۵۱	۵۴,۱۱	۵۳,۲۹	۵۲,۰۴	۵۴,۱۲	۵۱,۹۵	۳۱,۱۲	۲۹,۱۹	۳۰,۰۷	۳۰	۳۰,۰۷
<i>TiO₂</i>	۱,۷۶	۱,۹	۱,۹۴	۱,۸۹	۰,۰۶	۰,۰۳	۰,۲۶	۰	۰,۱۱	۰,۰۴	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۹۹	۰,۰۱
<i>Al₂O₃</i>	۸,۲	۸,۴۲	۸,۱۴	۷,۷۴	۱,۸	۳۳۸	۴۳۷	۳۲۶	۳۳۳	۱۸,۸۶	۱۸,۱۷	۲۱,۴۴	۲۰,۱	۱۹,۲۱
<i>Fe₂O₃</i>	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۸۲	۰,۱۸	۰,۹۳	۱,۴۴	۱,۵۳
<i>FeO</i>	۱۱,۸۳	۱۱,۴۹	۱۱,۳۲	۱۱,۶۴	۱۷,۹۷	۱۷,۸۸	۱۶,۶۷	۱۶,۰۲	۱۶,۸	۱۸,۷۴	۲۱,۹۶	۲۱,۸۳	۲۱,۰۱	۱۹,۷۲
<i>MnO</i>	۰,۵۱	۰,۴۱	۰,۳۹	۰,۴۲	۰,۳۷	۰,۴۷	۰,۳۱	۰,۴۳	۰,۲۸	۰,۸	۰,۷۹	۰,۹	۰,۸۵	۰,۶
<i>MgO</i>	۱۴,۳۴	۱۴,۳۷	۱۴,۰۹	۱۴,۴۱	۱۱,۴۹	۱۰,۷۱	۱۲,۶	۱۰,۵۴	۱۲,۳۵	۱۵,۲۴	۱۸,۹۲	۱۹,۲۳	۱۹,۰۲	۱۸,۰۱
<i>CaO</i>	۱۱,۰۲	۱۱,۲۸	۱۱,۴	۱۱,۲۴	۱۲,۵۶	۱۲,۳۷	۱۰,۵۴	۱۲,۲۴	۱۲,۵۲	۰,۵۶	۰,۲۴	۰,۲	۰,۲۳	۰,۲۶
<i>Na₂O</i>	۲,۱۴	۱,۹۳	۱,۹۱	۲,۰۸	۰,۱۷	۰,۲۷	۰,۳۳	۰,۴۵	۰,۲۶	۰,۰۵	۰,۲۲	۰,۰۸	۰,۰۴	۰,۲۱
<i>K₂O</i>	۰,۵۴	۰,۵۸	۰,۵۹	۰,۵۵	۰,۱۱	۰,۲۱	۰,۲۳	۰,۲۱	۰,۱۴	۰,۰۴	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۳	۰,۰۳
Total	۹۶,۱۹	۹۵,۶۴	۹۶,۰۸	۹۶,۰۵	۹۸,۰	۹۸,۴	۹۸,۲	۹۸,۱	۹۸,۷	۸۸,۷۲	۸۹,۷	۹۴,۶۳	۹۳,۵۸	۸۹,۶۲
Structural formula based on 23 Oxygen														
<i>Si</i>	۹,۷۳۲	۶,۸۸۷	۶,۷۲۵	۶,۸۱۴	۷,۷۸	۷,۵۶۳	۷,۷۱۴	۷,۶۵۵	۷,۶۱۱	۶,۲۴۲	۵,۸۹۳	۵,۷۱۹	۵,۷۶۶	۵,۹۸۶
<i>Al^{IV}</i>	۱,۲۶۸	۱,۱۳	۱,۲۶۵	۱,۱۸۶	۰,۲۲	۰,۴۷	۰,۵۸۴	۰,۴۵	۰,۳۹	۱,۷۵۶	۲,۱۰۶	۲,۲۸	۲,۲۴۳	۲,۰,۱۳
<i>Al^{VI}</i>	۰,۱۵۱	۰,۱۵۳	۰,۱۴۶	۰,۱۵۱	۰,۰۸۵	۰,۱۲۹	۰,۱۵۱	۰,۱۹۸	۰,۱۶۵	۲,۷۵	۲,۲۲۶	۲,۵۴	۲,۲۳۹	۲,۵۲۴
<i>Ti</i>	۰,۱۹۴	۰,۲۱۱	۰,۲۱۵	۰,۲۰۸	۰,۰۰۶	۰,۰۰۳	۰,۲۸	۰	۰,۰۱۲	۰,۰۰۶	۰,۰۰۱	۰,۰۰۲	۰,۱۴۳	۰,۰۰۱
<i>Fe³⁺</i>	۰,۵۵۱	۰,۵۰۵	۰,۴۴۲	۰,۳۹۶	۰,۱۸۶	۰,۴۲۷	۰,۴۱۳	۰,۲۷۵	۰,۳۱۹	۰,۵۴۷	۰,۲۸	۰,۱۳۳	۰,۲۰۸	۰,۲۲۹
<i>Fe²⁺</i>	۰,۹۰۲	۰,۹۱۵	۰,۹۵	۱,۰۳	۲,۲۱۵	۱,۶۹۵	۱,۶۹۳	۱,۶۲	۱,۶۶۳	۲,۱۴۵	۲,۷۰۸	۲,۴۷۲	۳,۲۷۸	۳,۲۸۶
<i>Mn</i>	۰,۰۶۳	۰,۰۵۱	۰,۰۴۹	۰,۰۵۲	۰,۰۴۵	۰,۰۵۷	۰,۰۳۷	۰,۰۵۲	۰,۰۳۳	۰,۱۲۵	۰,۱۳۵	۰,۱۴۵	۰,۱۳۸	۰,۱۰۱
<i>Mg</i>	۳,۱۳۹	۳,۱۶۵	۳,۱۹۹	۳,۱۶۳	۲,۴۶۳	۲,۶۸۹	۲,۶۷۷	۲,۸۵۵	۲,۸۰۸	۴,۵۵۷	۵,۶۹۴	۵,۴۵۲	۵,۴۴۹	۵,۳۴۵
<i>Ca</i>	۱,۷۳۴	۱,۷۸۶	۱,۷۹۶	۱,۷۶۴	۱,۹۳۵	۱,۸۸۱	۱,۹۱۵	۱,۸۵۵	۱,۸۲	۰,۱۲	۰,۰۵۱	۰,۰۴	۰,۰۴۷	۰,۰۵۵
<i>Na</i>	۰,۶۰۹	۰,۵۵۳	۰,۵۴۵	۰,۵۹۱	۰,۰۴۷	۰,۰۷۴	۰,۰۹۱	۰,۱۲۳	۰,۰۷۱	۰,۰۳۸	۰,۱۷۲	۰,۰۵۹	۰,۰۲۹	۰,۲۳۹
<i>K</i>	۰,۱۰۱	۰,۱۰۹	۰,۱۱۱	۰,۱۰۳	۰,۰۲	۰,۰۳۸	۰,۰۴۲	۰,۰۳۸	۰,۰۲۵	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۰۴	۰,۰۱۴	۰,۰۱۵
Total	۱۵,۴۴	۱۵,۴۴	۱۵,۴۵	۱۵,۴۵	۱۵,۰۰	۱۵,۹۹	۱۵,۰۴	۱۵,۰۱	۱۵,۹۸	۱۹,۳۲	۲۰,۰۲	۱۹,۸۵	۱۹,۷۵	۱۹,۷۹
<i>T (°C)</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲۳۷,۳	۲۷۰,۷	۲۸۹,۷	۲۸۴,۲	۲۶۰,۸



شکل ۶ ترکیب کلریت‌های توده نفوذی اسپید بر نمودار تقسیم‌بندی کلریت‌ها [۲۰].

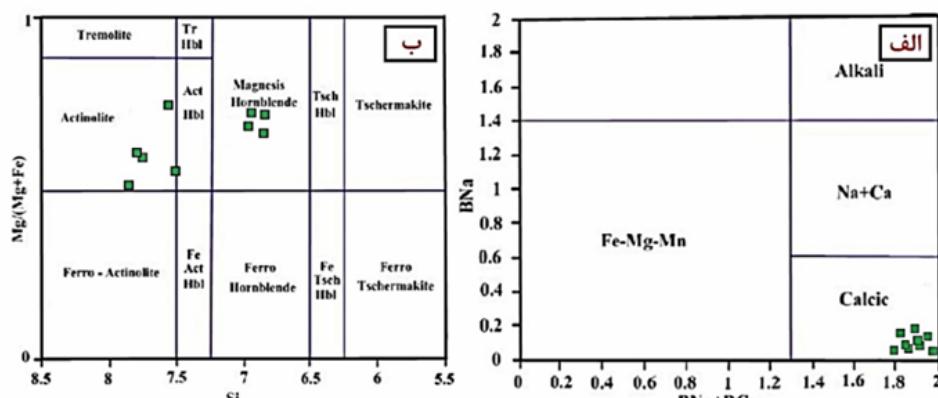
کلسیمی هستند (شکل ۷‌الف) که شاخص توده‌های نفوذی نوع I هستند [۲۱]. همچنین این آمفیبول‌ها بر اساس تقسیم‌بندی مرجع [۲۲] دارای ترکیب مگنزیو-هورنبلند و اکتینولیت هستند که گروه اخیر در مراحل آخر تبلور ماقمایی (زیر خط انجماد) و بر اثر واکنش آمفیبول‌های گروه نخست با سیالات ماقمایی ایجاد شده‌اند. (شکل ۷ ب). بر اساس نمودار مرجع [۲۲] همه

آمفیبول: این کانی مهم‌ترین کانی مافیک در توده نفوذی اسپید است. نتایج حاصل از تجزیه ریزپردازش الکترونی به همراه محاسبه فرمول ساختاری این کانی در جدول ۴ آرائه شده است. از آنجا که در همه آمفیبول‌های مورد بررسی، مقدار (Na_B)_{۰,۵} تا ۰,۷ (Ca+Na)_B است، بنابراین همه آمفیبول‌های توده نفوذی اسپید جزء آمفیبول‌های

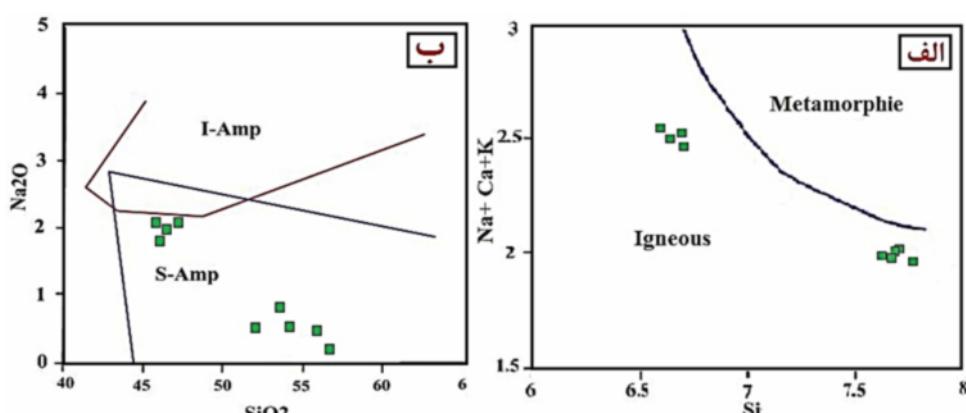
برآورد کرد. در این پژوهش با استفاده از شیمی دو کانی آمفیبول و پلاژیوکلаз، شرایط فشار، دما و گریزندگی اکسیژن-ماگمای در حال تبلور توده نفوذی اسپید تعیین شد. برای محاسبه دما و فشار بر اساس ترکیب آمفیبول‌ها، می‌بایست نمونه‌های مورد بررسی دارای ویژگی‌های زیر باشند: ۱- شامل مجموعه‌ای همزیست از کانی‌های کوارتز، فلدسپار قلیایی، پلاژیوکلاز، هورنبلند، بیوتیت، مگنتیت و ایلمنیت باشند [۱۰]. ۲- گریزندگی اکسیژن نسبتاً بالا بوده و رابطه $\text{Fe}_{\text{tot}}/(\text{Fe}_{\text{tot}} + \text{Mg}) < 6.6$ در آمفیبول‌ها برقرار باشد. ۳- در محاسبات باید از آمفیبول‌هایی که ترکیب اکتینولیتی یا حاشیه اکتینولیتی دارند چشمپوشی نمود، زیرا این احتمال وجود دارد که اکتینولیت در فاز زیر نقطه تبلور بر اثر دگرسانی پیروکسن و هورنبلند ایجاد شود [۲۴]. ۴- هورنبلند بایستی فاقد منطقه‌بندی و غیر دگرسان باشد [۱۰، ۲۴] و ۵- در فرمول ساختاری هورنبلند باید تعداد کاتیون Si و Ca به ترتیب کمتر از $7/5$ و بیشتر از $1/5$ باشد [۹].

آمفیبول‌های مورد بررسی در گستره‌ی آمفیبول‌های ماگمایی (آذرین) قرار می‌گیرند (شکل ۸ الف). ویژگی‌های زمین-شیمیایی آمفیبول‌های به دست‌آمده از زینولیت‌های گوشته‌ای برای تعدادی از محیط‌های درون‌صفحه‌ای و فرورانش با هدف شناخت ویژگی‌های دگرنهادی محیط‌های زمین‌شناسی مختلف توسط کولتوری و همکاران [۲۳] مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، آمفیبول‌های وابسته به فرورانش نسبت به انواع درون‌صفحه‌ای دارای TiO_2 کمتری هستند هرچند که همپوشی قابل توجهی بین دو گروه نام بده وجود دارد. بر این اساس، آمفیبول‌های مورد بررسی در رده آمفیبول‌های وابسته به مناطق فرافرورانش (S-Amph) قرار می‌گیرند (شکل ۸ ب).

ارزیابی دما - فشار توده نفوذی اسپید
مجموعه کانی‌شناسی و ترکیب آن‌ها در سنگ‌های آذرین رابطه تنگاتنگی با شکل‌گیری و تبلور ماگما دارند. با توجه به این امر، می‌توان با استفاده از ترکیب شیمیایی کانی‌ها، پارامترهای ترمودینامیکی تبلور از جمله فشار، دما و گریزندگی اکسیژن را



شکل ۷ نمایش موقعیت بلورهای آمفیبول در نمودار رده‌بندی آسفید [۱۲] (الف) و آمفیبول‌های کلسیمی (ب) در توده نفوذی اسپید [۲۲].



شکل ۸ الف) ترکیب بلورهای آمفیبول توده نفوذی اسپید که همه نقاط در گستره آمفیبول‌های آذرین قرار می‌گیرند [۲۲]. ب) نمودار تعیین محیط زمین ساختی آمفیبول‌ها [۲۳]، که براساس آن آمفیبول‌های توده نفوذی اسپید در گستره فرافرورانش قرار می‌گیرند.

هورنبلند نیز استفاده شد [۹، ۲۵، ۲۶]. نتایج به دست آمده همراه با فرمول مربوط به هر روش در جدول ۵ ارائه شده است. چنانکه دیده می‌شود متوسط فشارهای محاسبه شده برای تبلور این کانی در توده نفوذی اسپید بین ۲/۵ تا ۳/۷ کیلوبار در تغییر است. برای تبدیل فشارهای به دست آمده به عمق (بر حسب کیلومتر)، از میانگین چگالی پوسته‌ی قاره‌ای ($2/37 \text{ g/cm}^3$) استفاده شد که بر این اساس عمق برآورد شده برای تبلور آمفیبیول در توده نفوذی اسپید برابر با ۸ تا ۱۲ کیلومتر است.

زمین‌دما‌سنجی آمفیبیول – پلازیوکلاز

روش زمین‌دما‌سنجی بر پایه زوج کانی آمفیبیول – پلازیوکلاز، یکی از روش‌های معمول برای دما‌سنجی توده‌های آذرین محسوب می‌شود [۲۷، ۳]. بلاندی و همکارش [۲۸] دما‌سنجی را بر اساس تبادل Na و Al , Si برای هورنبلند همزیست با پلازیوکلاز در سنگ‌های نفوذی پیشنهاد کردند. برای برآورد دما به این روش باید کانی‌های هورنبلند و پلازیوکلاز به صورت همزیست در کنار هم حضور داشته باشند و هورنبلند فاقد حاشیه اکتینولیتی باشد [۲۴]. برای محاسبه دما به روش زوج کانی هورنبلند – پلازیوکلاز از روش [۲۸] طبق رابطه (۳) استفاده گردید:

$$T(\pm 311K) = \frac{0.677P - 48.98 + Y}{-0.0429 - 0.008314Ln\left[\left(\frac{Si - 4}{8 - Si}\right) X_{ab}^{Al}\right]} \quad (3)$$

در این رابطه، Si تعداد اتم‌های سیلیسیم در واحد فرمولی آمفیبیول، P فشار بر حسب کیلو بار و T دما بر حسب کلوین است. Y نشان‌دهنده ناهمگونی پلازیوکلاز، بر اساس فرمول درجه دوم دارکن (DQF) است. Y برای $X_{ab} > 0.5$ برابر با صفر و برای $0.5 < X_{ab} < 0.5$ برابر $(1 - X_{ab})^{-0.06} + 25.5$ است. بر اساس این روش، دمای تبلور این دو کانی در توده نفوذی اسپید با فرض اینکه فشار حاکم بر مخزن بین ۲/۵ تا ۳/۷ کیلو بار بوده است، به ترتیب بین ۷۵۲ تا ۸۶۵ (میانگین ۸۰۸) درجه سانتی‌گراد بدست آمد.

با توجه به این معیارها برای انجام محاسبات دما – فشارسنجی، از مونزودیویریت‌های توده نفوذی اسپید به دلیل داشتن پاراژنز مناسب و دارا بودن هورنبلند کلسیمی و فقدان منطقه‌بندی استفاده شد. همچنین برای واحد دیویریتی به دلیل داشتن آمفیبیول‌های اکتینولیتی و وجود دگرسانی در برخی آمفیبیول‌ها و پلازیوکلازها، از انجام محاسبات زمین‌دما – فشارسنجی صرف‌نظر شد.

زمین‌فشارسنجی آمفیبیول

هورنبلند موجود در توده‌های نفوذی آهکی قلیایی در کمریندهای کوه‌زایی، کاربردی‌ترین کانی به منظور تعیین زمین‌دما – فشارسنجی محسوب می‌شود، زیرا این کانی در گستره P-T وسیعی یعنی در فشار ۱-۲۳ کیلو بار و دمای ۱۱۵۰ – ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد پایدار است [۳]. محاسبه‌ی مقدار Al^{VI} و Al_{Tot} اساس سنجش فشار با استفاده از ترکیب آمفیبیول است؛ زیرا مقدار Al_{Tot} در آمفیبیول تابع غلظت این عنصر در ماقما نیست، بلکه بیشتر تابع فشار حاکم بر تبلور آن است. از این رو می‌توان برای تعیین فشار تبلور و در نتیجه عمق توده‌های نفوذی از ترکیب شیمی‌آمفیبیول‌ها استفاده کرد. پژوهشگران مختلف فرمول‌های متعددی را برای این منظور ارائه نموده‌اند [۷، ۹، ۲۵، ۲۶]. اشمیت [۷] رابطه زیر را برای تعیین فشار با استفاده از مقدار Al_{Tot} در کانی هورنبلند ارائه کرده است:

$$P(\pm 0.6Kb) = -3.01 + 4.76At_{\text{tot}} \quad (2)$$

در این رابطه P فشار بر حسب کیلوبار و At_{tot} مقدار کل آلومینیوم ($\text{Al}^{\text{IV}} + \text{Al}^{\text{VI}}$) در ترکیب کانی آمفیبیول است. به این ترتیب، فشار بدست آمده برای تبلور این کانی در توده نفوذی اسپید برابر با $3/7 \pm 0.6$ کیلو بار است که نسبت به روش‌های دیگر زمین‌فشارسنجی بیشتر است. برای برآورد فشار تبلور آمفیبیول‌های توده نفوذی اسپید، علاوه بر روش اشمیت [۷] از سه روش متدائل دیگر زمین‌فشارسنجی بر پایه مقدار Al_{tot} در

جدول ۵ نتایج فشارسنجی آمفیبیول‌های توده نفوذی اسپید با استفاده از چهار روش زمین‌فشارسنجی.

P (kbars)	رابطه	Am	Am	Am	Am	متوسط
Hammarstrom & Zen (1986)	$P(\pm 3 \text{ kbar}) = -3.92 + 5.03 \text{ Al (total)}$	۳,۲	۳,۵	۳,۲	۲,۸	۳,۲
Hollister et al. (1987)	$P(\pm 1.0 \text{ kbar}) = -4.76 + 5.64 \text{ Al (total)}$	۳,۲	۳,۵	۳,۲	۲,۸	۳,۲
Johnson & Rutherford (1989)	$P(\pm 0.5 \text{ kbar}) = -3.46 + 4.23 \text{ Al (total)}$	۲,۵	۳,۵	۲,۵	۲,۲	۲,۵
Schmidt (1992)	$P(\pm 0.6 \text{ kbar}) = -3.01 + 4.76 \text{ Al (total)}$	۳,۷	۴	۳,۷	۳,۴	۳,۷

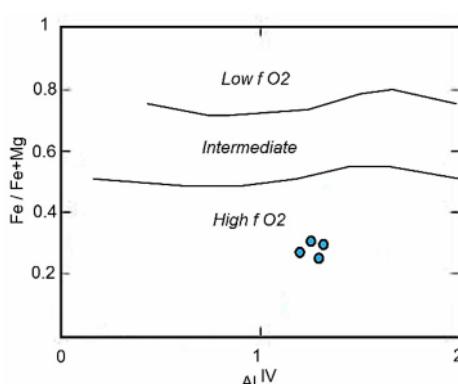
۲۸۹ درجه سانتیگراد هستند که دمای میانگین ۲۶۸ درجه سانتیگراد برای تشکیل این کلریت‌ها برآورد شد و با میانگین دمای تشکیل کلریت‌های حاصل از دگرسانی کانی آمفیبول هم خوانی دارد.

گریزندگی اکسیژن

کانی‌شناسی و شیمی کانی‌ها می‌تواند برای شناخت چگونگی اکسایش مagma مورد استفاده قرار گیرد. در این زمینه دو روش نیمه کمی و کمی برای برآورد گریزندگی اکسیژن magma می‌باشد که توده نفوذی اسپید به کار رفت. در روش نیمه کمی، با استفاده از شیمی آمفیبول‌ها [۸] می‌توان میزان گریزندگی اکسیژن را در محیط تشکیل این کانی محاسبه کرد. چنان‌که در شکل ۹ نیز دیده می‌شود میزان گریزندگی اکسیژن توده نفوذی اسپید نسبتاً بالاست. به طورکلی حضور هم‌زمان تیتانیت، مگنتیت، کوارتز، هماه با آمفیبول در توده مورد بررسی نشان دهنده بالا بودن گریزندگی اکسیژن در magma می‌باشد. علاوه بر این، آمفیبول‌های توده نفوذی اسپید بیشتر غنی از منیزیم هستند که این خود شاهدی بر بالا بودن گریزندگی اکسیژن در magma سازنده توده نفوذی اسپید است [۳۷، ۲۴]. برای محاسبه کمی گریزندگی اکسیژن توده نفوذی اسپید از رابطه زیر استفاده شد [۳۷]:

$$(6) \quad \log fO_2 = -30930/T + 14.98 + 0.142(P-1)/T$$

در این رابطه T دما بر حسب درجه کلوین و P فشار بر حسب کیلو بار است. مقادیر $\log fO_2$ برای توده نفوذی اسپید برابر با -12.18 - 15.27 - 15.27 است که نشان‌دهنده بالا بودن نسبی گریزندگی اکسیژن در magma سازنده آن است که این مقدار با نوع I بودن این گرانیت‌ها هم خوانی دارد. گریزندگی اکسیژن برآورد شده در توده نفوذی اسپید، مشابه با دیگر توده‌های نفوذی در کمان magma ارومیه - دختر از جمله توده‌های نشوو و سیلیجرد [۳۸]، نیاسر [۳۹] و نطنز [۴۰] است.



شکل ۹ ارزیابی گریزندگی اکسیژن magma تشكیل‌دهنده توده نفوذی اسپید با استفاده از ترکیب شیمیایی آمفیبول‌ها [۸].

زمین‌دماسنجدی آمفیبول

یکی از جانشینی‌های مهم در ساختار بلوری آمفیبول‌ها جانشینی Ti است به طوری که با افزایش دما مقدار در جایگاه M_2 آمفیبول افزایش می‌باید [۲۹]، اما به دلیل شعاع یونی نسبتاً بزرگ این کاتیون در مقایسه با Al ، با افزایش فشار افزایش نمی‌باید؛ بنابراین مقدار Ti در آمفیبول‌های کلسیمی با دما رابطه مستقیم و با فشار رابطه معکوس دارد [۲۹]. از این‌رو، جانشینی Ti در کانی آمفیبول می‌تواند به عنوان زمین‌دماسنجد مورد استفاده قرار گیرد [۳۱، ۳۰]. به منظور انجام زمین‌دماسنجدی به کمک کانی آمفیبول از روش ارائه شده در مرجع [۳۱] که بر پایه مقدار Ti موجود در ساختار آمفیبول‌هاست استفاده شد. افزایش مقدار Ti در کانی آمفیبول مستقل از میزان TiO_2 موجود در سنگ کل بوده و در اصل وابسته به دماس است [۳۴-۳۰]. به این ترتیب، دمای ۷۷۹ تا $80^{\circ}C$ درجه سانتی‌گراد برای تبلور کانی آمفیبول بدست آمد. این دما با دمای برآورد شده بر پایه زوج کانی هورنبلند - پلاژیوکلاز هم خوانی دارد.

زمین‌دماسنجدی کلریت

به منظور بررسی کانی‌شناسی، ویژگی‌های شیمیایی و برآورد دمای دگرسانی گرمابی در توده نفوذی اسپید از شیمی کانی کلریت به عنوان محصول دگرسانی گرمابی کانی آمفیبول استفاده شد. کلریت همواره به عنوان زمین‌دماسنجد به کار رفته است زیرا ساختار و ترکیب شیمیایی آن شرایط تشکیل کانی را بازتاب می‌دهد. در واقع عامل اصلی که ترکیب کلریت را در محیط‌های دگرگونی و گرمابی کنترل می‌کند، دماس است. پژوهشگران مختلف، وابستگی بین ترکیب کلریت و دما را مورد بررسی قرار داده‌اند (برای مثال [۳۶، ۳۵]). این پژوهشگران زمین‌دماسنجدی را برای کلریت‌هایی ارائه کردند که در محیط‌های گرمابی اشباع از آلومینیوم، یعنی در حضور کانی‌های دیگر آلومینیوم‌دار تشکیل می‌شوند [۳۶]. کرانیدیوس و همکارش [۳۶] مقدار آلومینیوم چار وجهی را به صورت رابطه زیر تصحیح کردند

$$(4) \quad Alc^{IV} = Al^{IV} + 0.7Fe/(Fe + Mg)$$

و رابطه زمین‌دماسنجدی زیر را ارائه دادند:

$$(5) \quad T(^{\circ}C) = 106Al^{IV} + 18$$

زمین‌دماسنجدی کلریت‌های توده نفوذی اسپید با توجه به رابطه $Fe/(Fe + Mg)$ در ساختار کلریت است محاسبه شد. به این ترتیب، کلریت‌های توده نفوذی اسپید دارای گستره دمایی 237 تا

- [4] Şahin S.Y., Orgün Y., güngör Y., Goker A.F., Gültekin A.H., Karacik Z., "Mineral and whole-rock geochemistry of the Kestanbol granitoid (Ezine-Çanakkale) and its mafic microgranular enclaves in northwestern Anatolia: evidence of felsic and mafic magma interaction", *Turkish Journal of Earth Sciences* 19 (2010) 101-122.
- [5] Droop G.T.R., "A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria", *Mineralogical Magazin* 51 (1987) 431-435.
- [6] Chappell B.W., White A.J.R., "I-and S-type granites in the Lachlan Fold Belt, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*", *Earth Sciences* 83 (1983) 1-26.
- [7] Schmidt M.W., "Amphibole composition in tonalite as a function of pressure an experimental calibration of the Al-hornblende barometer", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 110 (1992) 304-310.
- [8] Anderson J.L., Smith D.R., "The effects of temperature and fO_2 on the Al-in hornblende barometer", *American Mineralogist* 80 (1995) 549-559.
- [9] Hammarstrom J.M., Zen E-an, "Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer", *American Mineralogist* 71 (1986) 1297-1313.
- [10] Stein E., Dietl E., "Hornblende thermo barometry of granitoids from the central Odenwald (Germany) and their implication for the geotectonic development of the Odenwald", *Mineralogy and Petrology* 72 (2001) 185-207.
- [11] Kretz R., "metamorphic crystallization", John Wiley and Sons Ltd, (1994) pp 507.
- [12] Deer W. A., Howie R. A. and Zussman J., "Introduction to the rock forming minerals", 2nd edition, Longman, London. (1992).
- [13] Harlov D., Seifert P., Nijland W., Forster H., "Formation of Al-rich titanite reaction rims on ilmenite in metamorphic rocks of fo_2 and fH_2O ", *Lithos* 88 (2006) 72-84.
- [14] Eggleton R., Banfield J. F., "The alteration of biotite to chlorite", *American Mineralogist*, 70 (1985) 902-910.
- [15] Franz G., Spear F. S., "Aluminous titanite (sphene) from the Eclogite Zone, South-Central Tauern Window, Austria", *Chemical Geology* 50 (1985) 33-46.
- [16] Mayer C., Hemly J. J., "Wall rock alteration in Geochemistry of hydrothermal ore deposits", (1967) 166-235.
- [17] Armbruster T., Bonazzi P., Akasaka M., Bemanec V., Heuss S., "Recommended

برداشت

مجموعه کانی‌ها در توده نفوذی اسپید شامل پلازیوکلаз، کوارتز، فلدسپار قلایی، هورنبلند، مگنتیت و تیتانیت است که این مجموعه برای بررسی زمین‌دما‌سنجی هورنبلند - پلازیوکلاز و زمین‌فشارسنجی Al در هورنبلند بسیار مناسب است. وجود آمفیبول‌های کلسیمی در این توده نشان‌دهنده نوع I بودن توده مورد بررسی است. همچنین بررسی جایگاه زمین‌دما‌ساختی این توده براساس شیمی کانی آمفیبول، نشان‌دهنده جایگاه زمین‌ساختی وابسته به مناطق فرورانش برای این توده است. در این پژوهش، از ترکیب کانی‌های آمفیبول و فلدسپار برای برآورد پارامترهای فیزیکوشیمیایی وابسته به تبلور ماقمای مولد استفاده شد. بر این اساس میانگین فشار حاکم در زمان تبلور هورنبلند در توده نفوذی مورد بررسی، ۲/۵ تا ۳/۷ کیلوبار است که معادل جایگزینی این توده در عمق ۸ تا ۱۲ کیلومتری است. همچنین نتایج حاصل از زمین‌دما‌سنجی برپایه شیمی کانی‌های هورنبلند و پلازیوکلاز، بیانگر دمای ۷۵۲ تا ۸۶۵ درجه سانتی‌گراد بر تبلور این کانی‌ها در توده نفوذی مورد بررسی است. بر اساس ترکیب آمفیبول‌ها و کنایایی کانی‌ای مگنتیت - تیتانیت - کوارتز در این توده، به نظر می‌رسد که میزان گریزندگی اکسیژن ماقمای مولد آن نسبتاً بالا بوده است. نتایج حاصل از زمین‌دما‌سنجی کلریت‌ها گستره دمایی ۲۳۷ تا ۲۸۹ درجه سانتی‌گراد را برای تشکیل دگرسانی پروپیلیتی در این توده تعیین می‌کند.

قدرتانی

بدین‌وسیله از همکاری صمیمانه جناب آقای مجتبی رحیمی شهید و مدیریت محترم سازمان توسعه و نوسازی معدن و صنایع معدنی ایران (IMIDRO) که حامی مالی این پژوهش بوده‌اند صمیمانه سپاسگزاری می‌گردد.

مراجع

- [1] Anderson J.L., Smith D.R., "The effects of temperature and fO_2 on the Al-in hornblende barometer", *American Mineralogist* 80 (1995) 549-559.
- [2] Gomes M.E.P., Neiva A.M.R., "Geochemistry of granitoids and their minerals from Rebordelo-Agrochao area, northern Portugal", *Lithos* 81 (2005) 235-254.
- [3] Zhang S. H., Zhao1 Y., Song B., "Hornblende thermobarometry of the Carboniferous granitoids from the Inner Mongolia Paleo-uplift: implications for the tectonic evolution of the northern margin of North China block", *Mineralogy and Petrology* 87 (2006) 123-141.

- plagioclase geothermometer", Contributions to Mineralogy and Petrology, 104 (1990) 208-224.*
- [29] Ernst W.G., Liu J., "Experimental phase equilibrium study of Al- and Ti-content of calcic amphibole in MORB- a semiquantitative thermobarometer", American mineralogist 83 (1998) 952-969.
- [30] Raase P., "Al and Ti content of hornblende, indicators of pressure and temperature of regional metamorphism", Contrib. Mineral. Petrol 45 (1974) 231-236.
- [31] Otten M., "The origin of brown hornblende in the Artfjallet gabbro and dolerites", Contrib. Mineral. Petrol 86 (1984) 189-199.
- [32] Spear F.S., "Metamorphic phase equilibria and pressure- temperature- time path". Mineralogical Society of America, Monograph, Washington. D.C. (1993).
- [33] Robinson P., Spear F.S., Schumacher J.C., Laird J., Klein C., Evans B.W., Doolan B.L., "Phase relations of metamorphic amphiboles: Natural occurrences and theory", In Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy 98 (1982) 1-227.
- [34] Hutchison C.S., "Ophiolite metamorphism in Northeast Borneo", Lithos 11 (1978) 195-208.
- [35] Cathelineau M., Nieva D., "A chlorite solid solution geothermometer The Los Azufres (Mexico) geothermal system", Contribution to Mineralogy and Petrology 91 (1985) 235-244.
- [36] Kranidiotis P. Y., MacLean W. H., "Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec", Economic Geology 82 (1987) 898-911.
- [37] Wones D.R., "Significance of the assemblage titanite + magnetite + quartz in granitic rocks", American Mineralogist 74 (1989) 744-749.
- [38] Tulloch A.J., Challis GA., "Emplacement depths of Paleozoic-Mesozoic plutons from western New Zealand estimated by hornblende-Al geobarometry. New Zealand", Journal of Geology and Geophysics 43 (2000) 555-567.
- [39] Wones D.R., "Significance of the assemblage titanite + magnetite + quartz in granitic rocks", American Mineralogist 74 (1989) 744-749.
- [40] Zhang S. H., Zhao1 Y., Song B., "Hornblende thermobarometry of the Carboniferous granitoids from the Inner Mongolia Paleo-uplift: implications for the tectonic evolution of the northern margin of North China block", Mineralogy and Petrology 87 (2006) 123-141.
- nomenclature of epidote group- minerals", Eur. J. Mineral 18 (2006) 551-567.*
- [18] Tulloch A.J., "Comment on 'Implications of magmatic epidote-bearing plutons on crustal evolution in the accreted terraines of north-western North America and Magmatic epidote and its petrologic significance", Geology 14 (1986) 186-7.
- [19] Carmichael I.S.E., "The iron-titanium oxides of salic volcanic rocks and their associated ferromagnesian silicates", Contributions to Mineralogy and Petrology 14 (1967) 36-64.
- [20] Hey M. H., "A new review of the chlorites", Mineral Magazine 30 (1954) 277-292.
- [21] Chappell B.W., White A.J.R., "I-and S-type granites in the Lachlan Fold Belt, Transactions of the Royal Society of Edinburgh", Earth Sciences 83 (1983) 1-26.
- [22] Leake B. E., Wooley A. R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J. D., Hawthorne F.C., Kato A., Kisch H. J., Krivovichev V. G., Linthout K., Laird J. A., Maresch W.V., Nicket E.H., Rock N.M.S., Schumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.N., Ungareti L., Whittaker E.J.W., Youzi G., "Nomenclature of amphibole: report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on new minerals and mineral names", European Journal of Mineralogy 9 (1998) 623-651.
- [23] Coltorti M., Bonadiman C., Faccini B., Grégoire M., O'Reilly S.Y., Powell W., "Amphiboles from suprasubduction and intraplate lithospheric mantle", Lithos 99 (2007) 68-84.
- [24] Helmy H.M., Ahmed A.F., ElMahallawi M.M., Ali S.M., "Pressure, temperature and oxygen fugacity conditions of calc-alkaline granitoids. Eastern Desert of Egypt and tectonic implication", Journal of African Earth Science 38 (2004) 255-268.
- [25] Hollister L.S., Grissom G.C., Peters E. K., Stowell P.H.H., Sisson V. B., "Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons", American Mineralogist 72 (1987) 231-239.
- [26] Johnson M.C., Rutherford M.J., "Experimental calibration of the aluminum-inhornblende geobarometer with application to Long Valley Caldera (California) volcanic rocks", Journal of Geology 17 (1989) 837-841.
- [27] Tulloch A.J., Challis GA., "Emplacement depths of Paleozoic-Mesozoic plutons from western New Zealand estimated by hornblende-Al geobarometry. New Zealand", Journal of Geology and Geophysics 43 (2000) 555-567.
- [28] Blundy J.D., Holland T.J. B., "Calcic amphibole equilibria and a new amphibole