

شیمی کانی‌ها و زمین دما - فشارسنجی توده نفوذی اسپید (غرب قم)

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

۱- دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

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

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

واژه‌های کلیدی: شیمی کانی؛ زمین دما - فشارسنجی؛ توده نفوذی اسپید؛ گریزندگی اکسیژن.

مقدمه

در این توده با استفاده از شیمی کانی‌های فلدسپار و آمفیبول مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین با استفاده از شیمی کانی-های 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 - فشارسنجی و ارزیابی گریزندگی اکسیژن توده نفوذی اسپید، تجزیه ریزپردازش الکترونی (EMPA) بر روی ۷۰ نقطه از کانی‌های پلاژیوکلاز، 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 ریزکاوا ۱۵ nA و ولتاژ شتاب‌دهنده

توده نفوذی اسپید در ۶۰ کیلومتری غرب قم، بین طول‌های جغرافیایی $50^{\circ} 18' 44''$ و $50^{\circ} 22' 10''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $34^{\circ} 39' 18''$ و $34^{\circ} 41' 12''$ شمالی واقع است. این توده نفوذی دارای ترکیب کالک آلکالن است و از نظر جایگاه زمین‌ساختی در کرانه‌های فعال قاره‌ای و محیط‌های فرورانش 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

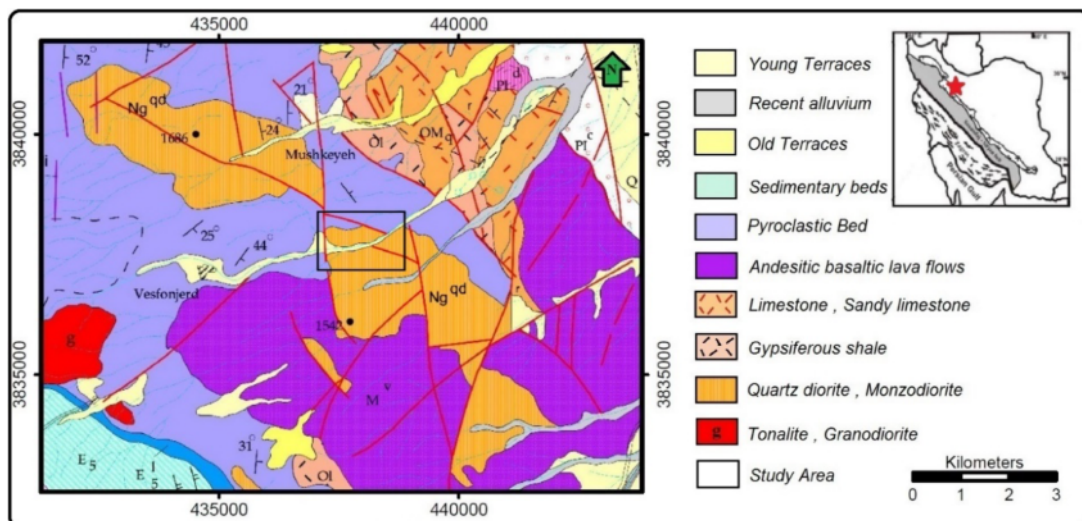
براساس بررسی‌های میکروسکوپی، توده نفوذی اسپید دارای ترکیب دیوریت تا مونزودیوریت است. بافت‌های مشاهده شده در این توده بیشتر دانه‌ای، ریزدانه‌ای، پورفیروئیدی و به مقدار کمتر خال خال و غربالی است. پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم و آمفیبول مهم‌ترین کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده‌ی این سنگ‌ها هستند. کوارتز، مگنتیت، آپاتیت، زیرکن و تیتانیت نیز کانی‌های فرعی موجود را تشکیل می‌دهند. این مجموعه کانیایی برای زمین‌دماسنجی هورنبلند - پلاژیوکلاز و زمین‌فشارسنجی Al در هورنبلند بسیار مناسب است [۷-۱۰]. کانی‌های سرسیت، کلریت، اپیدوت، تیتانیت، کلسیت، کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن (هماتیت) نیز به صورت ثانویه و در اثر دگرسانی توده تشکیل شده‌اند. پلاژیوکلاز درشت بلور غالب این سنگ‌ها بوده و به صورت تخته‌ای، شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار و همراه با ماکل کارلسباد، آلبیتی و چندریخت دیده می‌شود (شکل ۲ الف) همچنین برخی از بلورهای پلاژیوکلاز منطقه - بندی ضعیفی را نشان می‌دهند که بیشتر در بخش مرکزی به سرسیت تبدیل شده‌اند. دانه‌های کوارتز بیشتر بی‌شکل‌اند و در به‌طور معمول فضای بین بلورهای درشت پلاژیوکلازها و فلدسپارهای قلیایی را اشغال کرده‌اند (شکل ۲ ب). بلورهای فلدسپار قلیایی نیز بیشتر نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل هستند.

۱۵ Kev و زمان ۴۰ ثانیه انجام شد. سپس با بهره‌گیری از نمودارهای مربوطه، نوع کانی‌ها، زمین‌دما - فشارسنجی 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 کانی - های نام‌برده برآورد شده است.

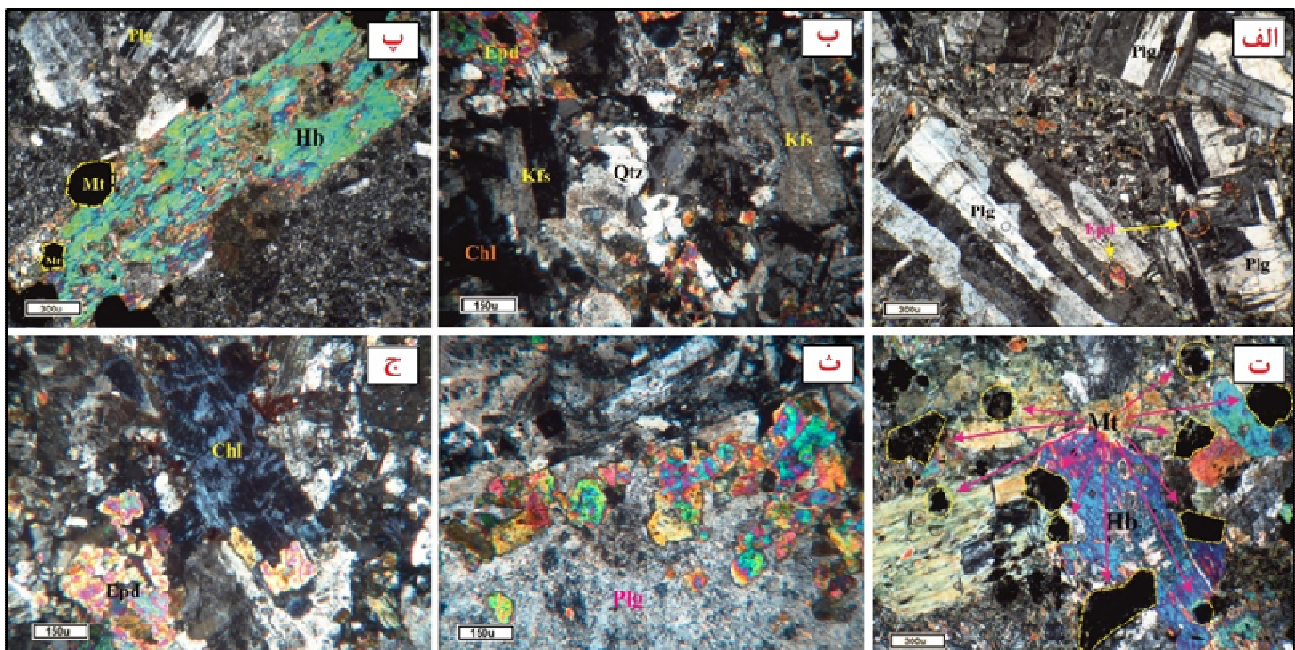
بحث و بررسی

زمین‌شناسی محدوده مورد بررسی

توده نفوذی اسپید، در نقشه تقسیمات ساختاری ایران در کمربند ماگمایی ارومیه - دختر قرار می‌گیرد. این توده به درون سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن نفوذ کرده و با ایجاد دگرسانی گسترده باعث تشکیل کانیه‌زایی اسکارن آهن شده است (شکل ۱). در محل تماس این توده با سنگ‌های آتشفشانی، کانیه‌زایی آهن به صورت هماتیت ایجاد شده است. سنگ میزبان توده مورد بررسی واحد آتشفشانی با سن ائوسن پسین شامل لایه‌های آذرآواری، لایه‌های رسوبی، توفیت‌های رسی، توفیت‌های ماسه‌ای - کنگلومرایی و سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی است که بیشترین گستردگی را بین واحدهای میزبان منطقه نشان می‌دهد [۶]. به‌طور کلی سن عمومی منطقه مورد بررسی مربوط به دوران سوم زمین‌شناسی بوده و به‌طور 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 قابل‌توجه رابطه این شکستگی‌ها و گسل‌ها با



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی منطقه برگرفته از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰۰ 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 پلاژیوکلاز (Plg) با بافت چندریختی در واحد دیوریتی. ب) تصویری از بلورهای کوارتز (Qtz) بی شکل و فلدسپار قلیایی (Kfs) در واحد مونوزدیوریت. پ) بلور هورنبلند (Hb) همراه کانی پلاژیوکلاز. ت) همراهی دانه‌های مگنتیت (Mt) با کانی آمفیبول در واحد دیوریتی. ث) دگرسان شدن پلاژیوکلاز به اپیدوت (Epd) در واحد مونوزدیوریتی. ج) جایگزینی کامل کلریت (Chl) در قالب آمفیبول در واحد مونوزدیوریتی. مخفف کانی‌ها برگرفته از مرجع [۱۱].

بیشتر با ماکل چندریخت و کارلسباد دیده می‌شود. نتایج حاصل از تجزیه ریزپردازشگر الکترونی و همچنین فرمول ساختاری محاسبه‌شده برای برخی از پلاژیوکلازها در دو نمونه دیوریتی در جدول ۱ ارائه شده است. ترکیب کانی‌های پلاژیوکلاز 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 آلبيت 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).

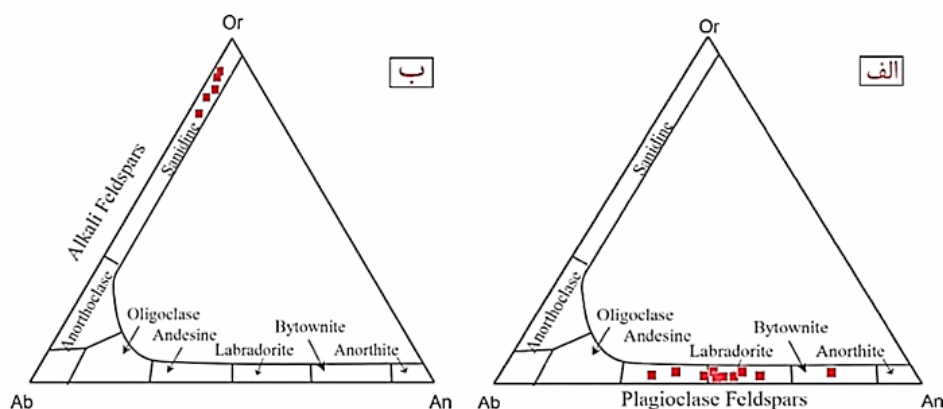
آمفیبول تنها کانی مافیک موجود در توده نفوذی اسپید است که به صورت نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل دیده می‌شود و حدود ۱۰ درصد حجمی سنگ را شامل می‌شود (شکل ۲ پ). در این توده، پلاژیوکلاز و آمفیبول بدون حاشیه واکنشی در تعادل هستند که یکی از شرط‌های لازم برای زمین دما - فشارسنجی است [۱۰]. همراه با کانی هورنبلند، مگنتیت‌های خود شکل و ماگمایی نیز حضور دارند (شکل ۲ ت). علاوه بر این، ادخال‌هایی از مگنتیت در بلورهای هورنبلند دیده می‌شود. کانی آمفیبول در اثر دگرسانی به کلریت، اکسیدهای آهن و اپیدوت تبدیل شده است. دگرسانی غالب در این سنگ‌ها، سریستی 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

پلاژیوکلاز: این کانی فراوان‌ترین کانی فلسیک تشکیل‌دهنده توده نفوذی اسپید است که به صورت تخته‌ای و خودشکل

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

Min.	Plg	Plg	Plg	Plg	Plg	Plg	Plg	Plg	Plg	Afs	Afs	Afs	Afs	Afs
<i>Oxide composition (wt. %)</i>														
SiO ₂	۴۷,۰۵	۵۵,۱۴	۵۵,۱	۵۴,۸۳	۶۳,۰۴	۵۳,۶۶	۵۶,۳	۵۴,۶۸	۵۷,۴۷	۶۴,۴۷	۶۴,۳۸	۶۵,۳۴	۴۹,۸۷	۶۵,۲
TiO ₂	۰,۰۲	۰,۰۷	۰,۰۲	۰,۰۲	۰	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۲	۰	۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۲
Al ₂ O ₃	۳۲,۷۲	۲۸,۵۵	۲۹,۱۱	۲۷,۳۱	۲۰,۸۴	۲۸,۸۹	۲۸,۲۷	۲۸,۷۷	۲۸,۳۸	۱۹,۱۱	۱۸,۷۳	۱۸,۶۳	۳۴,۵۴	۱۸,۱۷
FeO	۰,۴۵	۰,۳۸	۰,۴۱	۰,۴۶	۰,۳۴	۰,۳۳	۰,۴	۰,۴۹	۰,۱۳	۰,۱۵	۰,۰۶	۰,۰۴	۰,۸	۰,۳۹
CaO	۱۷,۱۹	۱۱,۴۹	۱۰,۲۹	۱۱,۸۱	۷,۹۳	۱۱,۹۶	۹,۷۳	۱۱,۲۱	۸,۰۱	۰,۱۱	۰,۰۷	۰,۱۲	۰,۲۹	۰,۰۶
Na ₂ O	۲,۱۳	۴,۲	۵,۴	۴,۶۱	۶,۸۵	۳,۹۶	۵,۰۴	۵,۴۸	۵,۳۹	۱,۱	۰,۵۴	۱,۰۶	۱,۰۲	۰,۴۷
K ₂ O	۰,۰۴	۰,۱۳	۰,۱۳	۰,۱۱	۰,۱۱	۰,۱۲	۰,۱۴	۰,۱۴	۰,۱۱	۱۵,۳۸	۱۵,۰۷	۱۵,۵۲	۷,۸۳	۱۶,۲۳
Total	۹۹,۶	۹۹,۹۶	۱۰۰,۴	۹۹,۱۵	۹۹,۱۱	۹۸,۹۵	۹۹,۸۹	۱۰۰,۷	۹۹,۴۹	۱۰۰,۳	۹۸,۸۶	۱۰۰,۷	۹۴,۳۶	۱۰۰,۵
<i>Structural formula based on 32 Oxygen</i>														
Si	۸,۷۱	۹,۹۳۳	۹,۸۸۵	۹,۹۹۵	۱۱,۳	۹,۷۸۸	۱۰,۱	۹,۸۲۶	۱۰,۲۶	۱۱,۸۶	۱۱,۹۶	۱۱,۹۶	۹,۵۱۲	۱۲,۰۰
Al	۷,۱۳۹	۶,۰۶۱	۶,۱۵۴	۵,۸۶۷	۴,۴۰۵	۶,۲۱	۵,۹۷۹	۶,۰۹۳	۵,۹۷۶	۴,۱۴۶	۴,۱۰۳	۴,۰۲۱	۷,۷۶۴	۳,۹۴۴
Fe(ii)	۰,۰۷	۰,۰۵۷	۰,۰۶۲	۰,۰۷	۰,۰۵۱	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۰۷۴	۰,۰۱۹	۰,۰۲۳	۰,۰۰۹	۰,۰۰۶	۰,۱۲۸	۰,۰۶
Ca	۳,۴۰۹	۲,۲۱۷	۱,۹۷۸	۲,۳۰۶	۱,۵۲۴	۲,۳۳۷	۱,۸۷۱	۲,۱۵۸	۱,۵۳۳	۰,۰۲۲	۰,۰۱۴	۰,۰۲۴	۰,۰۵۹	۰,۰۱۲
Na	۰,۷۶۴	۱,۴۶۷	۱,۸۷۸	۱,۶۲۹	۲,۳۸۲	۱,۴۰۴	۱,۷۵۳	۱,۹۰۹	۱,۸۶۷	۰,۳۹۳	۰,۱۹۵	۰,۳۷۶	۰,۳۷۷	۰,۱۶۸
K	۰,۰۰۹	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۲۶	۰,۰۲۵	۰,۰۲۸	۰,۰۳۲	۰,۰۳۲	۰,۰۲۵	۳,۶۱۱	۳,۵۷۳	۳,۶۲۶	۱,۹۰۹	۳,۸۱۳
Total	۲۰,۱	۱۹,۷۷	۱۹,۹۸	۱۹,۸۹	۱۹,۶۹	۱۹,۸۲	۱۹,۷۹	۲۰,۰۹	۱۹,۶۸	۲۰,۰۶۲	۱۹,۸۶	۲۰,۰۲	۱۹,۷۴	۲۰,۰۰
<i>Feldspar components (mole fractions, %)</i>														
An%	۸۱,۵	۵۹,۷	۵۰,۸۹	۵۸,۲۲	۳۸,۷۶	۶۲,۰۱	۵۱,۱۶	۵۲,۶۴	۴۴,۴۶	۰,۵۳۹	۰,۳۶۹	۰,۵۸۵	۲,۵۳۱	۰,۲۹۷
Ab%	۱۸,۲۷	۳۹,۴۹	۴۸,۳۳	۴۱,۱۲	۶۰,۵۹	۳۷,۲۴	۴۷,۹۵	۴۶,۵۷	۵۴,۵	۹,۷۵۲	۵,۱۴۶	۹,۳۴۹	۱۶,۱۰	۴,۲۰۳
Or%	۰,۲۲۶	۰,۸۰۴	۰,۷۶۶	۰,۶۴۶	۰,۶۴	۰,۷۴۱	۰,۸۷۷	۰,۷۸۳	۰,۷۳۲	۸۹,۷۱	۹۴,۴۸	۹۰,۰۶	۸۱,۳۶	۹۵,۵



شکل ۳ ترکیب کانی‌های پلاژیوکلاز (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 پلاژیوکلازهاست [۱۶]. افزایش شاره‌ها همراه با افزایش فعالیت CO₂ طی فرایند دگرسانی گرمایی پروپیلیتی در توده نفوذی اسپید منجر به تشکیل کانی‌های اپیدوت و تیتانیت شده است. نتایج حاصل از تجزیه ریزپردازشی بر این کانی به همراه محاسبه فرمول ساختاری آن در جدول ۲ ارائه شده است. یکی از پارامترهای کلیدی برای تعیین خاستگاه اپیدوت‌ها مقدار Fe³⁺ 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-ها را تعیین کرد [۱۴، ۱۳]. پایین بودن مقدار Al₂O₃ در تیتانیت‌های توده نفوذی اسپید (۲-۱ 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 پساگمایی بوده و طی فرایند دگرسانی گرمایی تشکیل شده است.

مقدار FeO در این مگنتیت‌ها از ۸۰ تا ۸۹ درصد در تغییر است و دارای مقادیر کمی TiO₂ هستند (۰/۶۸ تا ۹ درصد) (جدول ۳). چنان که در نمودار سه‌تایی FeO-MgO-TiO₂ 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 - الواسینل 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 Fe³⁺ موجود در اپیدوت‌ها می‌توان درصد پیستاشیت را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد:

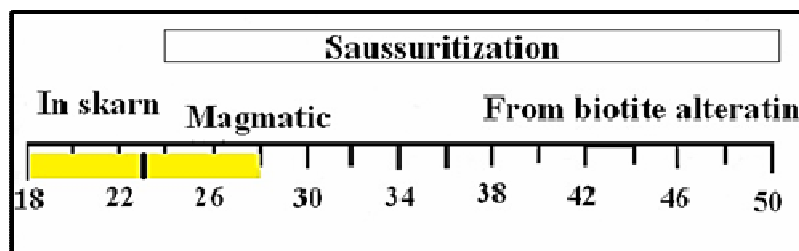
$$PS = 100 \times Fe^{3+} / (Fe^{3+} + Al) \quad (1)$$

میانگین پیستاشیت محاسبه‌شده 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.

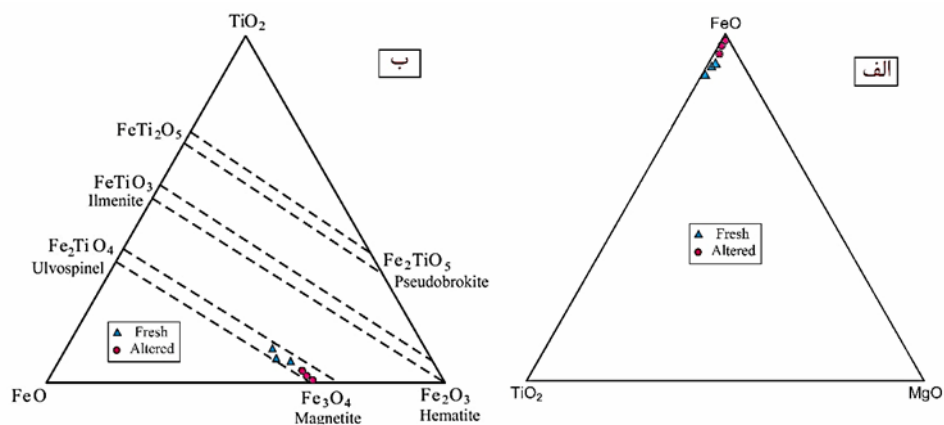
Min.	Epd	Epd	Epd	Epd	Epd	Epd	Epd	Epd	Epd	Epd	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn
<i>Oxide composition (wt. %)</i>														
SiO ₂	۳۳/۱۵	۳۸/۵۲	۳۷/۹۲	۴۰/۴	۳۸/۵۷	۳۸/۳۲	۳۸/۵۱	۳۷/۶	۳۳/۵۲	۲۰/۰۴	۲۸/۳	۳۱/۶۹	۱۷/۸۸	
TiO ₂	۰/۱۷	۰/۰۱	۰/۲۵	۰/۱۳	.	.	۰/۰۵	۶/۰۳	.	۵۷/۱۳	۴۱/۹۲	۳۴/۴۵	۴۷/۱۴	
Al ₂ O ₃	۲۰/۶۶	۲۳/۰۶	۲۲/۵۹	۲۵/۲۵	۲۲/۸۱	۲۲/۶۷	۲۳/۸۳	۱۹	۱۸/۵۲	۱/۲۴	۱/۲۲	۴/۰۶	۱/۵۱	
FeO	۱۰/۶۸	۱۳/۰۷	۱۲/۵۲	۱۰/۲	۱۳/۱	۱۳/۳۸	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	.	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۶	.	۰/۲۵	۰/۴۴	۰/۰۲	.	۰/۱	۰/۱۴	
CaO	۲۳/۶۸	۲۳/۴۲	۲۳/۶۷	۲۲/۷۷	۲۳/۴۸	۲۳/۷۱	۲۳/۵۳	۲۴/۳	۲۲/۹۲	۱۹/۱۱	۲۶/۷	۲۸/۷۵	۱۶/۶۴	
Na ₂ O	۰/۱۲	۰/۰۸	.	۰/۷۶	.	۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۴۱	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۲	۰/۳۷	۰/۱	
K ₂ O	.	.	.	۰/۰۲	۰/۰۱	.	.	.	۰/۰۲	۰/۰۱	.	۰/۰۲	.	
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	۱/۰۲۵	۰/۶۱۵	
Ti	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱۵	۰/۰۰۷	.	.	۰/۰۰۳	۰/۳۵۶	.	۱/۴۱۵	۱/۰۳۵	۰/۸۲۸	۱/۲۲۱	
Al	۲/۲۴	۲/۱۲۴	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	۰/۶۲۱	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	۰/۰۲۵	
Mg	۰/۰۰۹	۰/۰۱۳	.	۰/۰۰۷	۰/۰۰۲	۰/۰۰۷	.	۰/۰۲۹	۰/۰۵۶	۰/۰۰۱	.	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	.	۰/۱۱۲	.	۰/۰۳۳	۰/۰۲۴	۰/۰۶۲	۰/۰۱۵	۰/۰۰۴	۰/۰۱۳	۰/۰۲۳	۰/۰۰۷	
K	.	.	.	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	.	.	.	۰/۰۰۲	.	.	۰/۰۰۱	.	
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-Fe₂O₃ و تعیین فاز نهایی مگنتیت و ایلمنیت با روش استفاده شده در مرجع [۱۹].

Min.	Fresh			Altered		
	Mt	Mt	Mt	Mt	Mt	Mt
<i>Oxide composition (wt. %)</i>						
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 ₂ O ₃	۰.۴۴	۰.۲۳	۰.۲۹	.	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	۰.۰۷	۰.۳۴	۰.۱۲	۰.۰۷	۰.۱۴
Na ₂ O	.	۰.۰۱	۰.۰۶	.	.	.
Total	۹۱.۵۸	۹۲.۱	۹۱.۷	۹۱.۶۵	۹۲.۶۴	۹۱.۵۶
<i>Structural formula based on 4 Oxygen</i>						
Si	۰.۰۲۰	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	.	۰.۰۵۹	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	.	۰.۰۰۱	۰.۰۰۵	.	.	.
Total	۳	۳	۳	۳	۳	۳
Fe ₂ O ₃ wt. %	۶۴.۰۲۷	۵۹.۱۸۸	۶۱.۴۴۲	۴۸.۶۸۱	۵۴.۰۶۳	۵۰.۶۳۷
FeO wt. %	۳۱.۵۴۸	۳۲.۳۲۲	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	۱۸.۲۷	۲۰.۶۷
Magnetite %	۹۴.۶	۸۷.۱۲	۹۰.۹۲	۷۲.۲۹	۸۱.۷۳	۷۹.۳۳



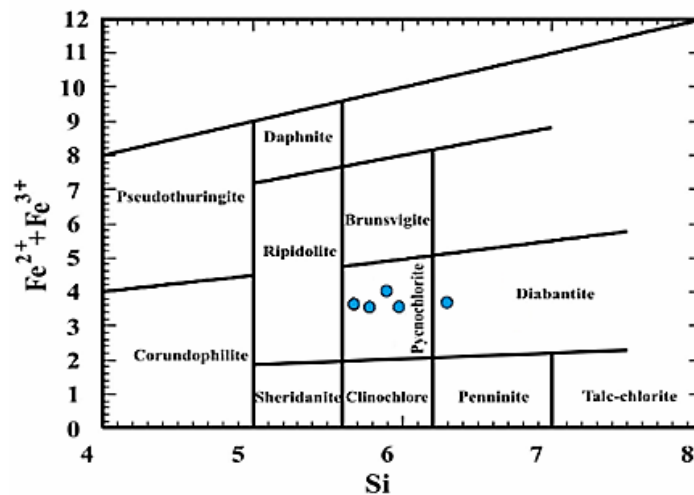
شکل ۵ ترکیب کانی‌های کدر در بردارنده اکسیدهای Fe-Ti در توده نفوذی اسپید بر نمودارهای (الف) FeO-TiO₂-MgO و (ب) TiO₂-FeO-Fe₂O₃ که نشان‌دهنده مگنتیت بودن این کانی‌ها هستند.

کلیت: سنگ میزبان کنترل می‌شود. کلیت‌های توده نفوذی اسپید دارای نسبت Fe/(Fe + Mg) برابر با ۰.۳۹ تا ۰.۴۴ و مقدار Si برابر با ۵.۷۱ تا ۶.۲۴ اتم در واحد فرمول مولکولی (apfu) هستند که بر اساس نمودار تقسیم‌بندی کلیت‌ها [۲۰] در گستره پیکنوکلریت و دیابانتیت قرار می‌گیرند (شکل ۶).

کلیت‌های حاصل از دگرسانی کانی‌های فرومنیزین 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 کلیت‌ها 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	Am	Am	Am	Am	Am	Am	Am	Am	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl
Oxide composition (wt. %)														
SiO ₂	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
TiO ₂	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
Al ₂ O ₃	۸.۲	۸.۴۲	۸.۱۴	۷.۷۴	۱.۸	۳.۳۸	۴.۳۷	۳.۲۶	۳.۳۳	۱۸.۸۶	۱۸.۱۷	۲۱.۴۴	۲۰.۱	۱۹.۲۱
Fe ₂ O ₃	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳.۶۲	۰.۱۸	۰.۹۳	۱.۴۴	۱.۵۳
FeO	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	۱۹.۷۳
MnO	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
MgO	۱۴.۳۴	۱۴.۳۷	۱۴.۵۹	۱۴.۴۸	۱۱.۴۹	۱۰.۷۱	۱۲.۶	۱۰.۵۴	۱۳.۳۵	۱۵.۲۴	۱۸.۹۲	۱۹.۲۳	۱۹.۰۲	۱۸.۰۱
CaO	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
Na ₂ O	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	۰.۳۱
K ₂ O	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	۹۶.۵۵	۹۸.۵	۹۸.۴	۹۸.۲	۹۸.۱	۹۸.۷	۸۸.۷۲	۸۹.۷	۹۴.۶۳	۹۳.۵۸	۸۹.۶۲
Structural formula based on 23 Oxygen										Structural formula based on 28 Oxygen				
Si	۶.۷۳۲	۶.۶۸۷	۶.۷۳۵	۶.۸۱۴	۷.۷۸	۷.۵۶۳	۷.۷۱۴	۷.۶۵۵	۷.۶۱۱	۶.۲۴۳	۵.۸۹۳	۵.۷۱۹	۵.۷۶۶	۵.۹۸۶
Al ^{iv}	۱.۲۶۸	۱.۳۱۳	۱.۲۶۵	۱.۱۸۶	۰.۲۲	۰.۴۳۷	۰.۵۸۳	۰.۳۴۵	۰.۳۸۹	۱.۷۵۶	۲.۱۰۶	۲.۲۸	۲.۲۳۳	۲.۰۱۳
Al ^{vi}	۰.۱۵۱	۰.۱۵۳	۰.۱۴۶	۰.۱۵۱	۰.۰۸۵	۰.۱۲۹	۰.۱۵۱	۰.۱۹۸	۰.۱۶۵	۲.۷۵	۲.۲۲۶	۲.۵۴	۲.۳۳۹	۲.۵۲۴
Ti	۰.۱۹۴	۰.۲۱۱	۰.۲۱۵	۰.۲۰۸	۰.۰۰۶	۰.۰۰۳	۰.۰۲۸	۰	۰.۰۱۲	۰.۰۰۶	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲	۰.۱۴۳	۰.۰۰۱
Fe ³⁺	۰.۵۵۱	۰.۵۰۵	۰.۴۴۲	۰.۳۹۶	۰.۱۸۶	۰.۴۲۷	۰.۴۱۳	۰.۲۷۵	۰.۳۱۹	۰.۵۴۷	۰.۰۲۸	۰.۱۲۳	۰.۲۰۸	۰.۲۲۹
Fe ²⁺	۰.۹۰۲	۰.۹۱۵	۰.۹۵	۱.۰۳	۲.۲۱۵	۱.۶۹۵	۱.۶۹۳	۱.۶۲	۱.۶۶۳	۳.۱۴۵	۳.۷۰۸	۳.۴۷۲	۳.۳۷۸	۳.۲۸۶
Mn	۰.۰۶۳	۰.۰۵۱	۰.۰۴۹	۰.۰۵۲	۰.۰۴۵	۰.۰۵۷	۰.۰۳۷	۰.۰۵۲	۰.۰۳۳	۰.۱۳۵	۰.۱۳۵	۰.۱۴۵	۰.۱۳۸	۰.۱۰۱
Mg	۳.۱۳۹	۳.۱۶۵	۳.۱۹۹	۳.۱۶۳	۲.۶۶۳	۲.۶۸۹	۲.۶۷۷	۲.۸۵۵	۲.۸۰۸	۴.۵۵۷	۵.۶۹۴	۵.۴۵۲	۵.۴۴۹	۵.۲۴۵
Ca	۱.۷۳۴	۱.۷۸۶	۱.۷۹۶	۱.۷۶۴	۱.۹۳۵	۱.۸۸۱	۱.۹۱۵	۱.۸۵۵	۱.۸۹۲	۰.۱۲	۰.۰۵۱	۰.۰۴	۰.۰۴۷	۰.۰۵۵
Na	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	۰.۳۳۹
K	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
T (□C)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲۳.۷۳	۲۷.۰۷	۲۸.۹۷	۲۸.۴۲	۲۶.۰۸



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

کلسیمی هستند (شکل ۷ الف) که شاخص توده‌های نفوذی نوع I هستند [۲۱]. همچنین این آمفیبول‌ها بر اساس تقسیم‌بندی مرجع [۲۲] دارای ترکیب مگنزیم‌یوهورنبلند و اکتینولیت هستند که گروه اخیر در مراحل آخر تبلور ماگمایی (زیر خط انجماد) و بر اثر واکنش آمفیبول‌های گروه نخست با سیالات ماگمایی 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 ارائه شده است. از آنجا که در همه آمفیبول‌های مورد بررسی، مقدار (Ca+Na)_B بزرگ‌تر از ۱ و (Na)_B کمتر از ۰.۵ است، بنابراین همه آمفیبول‌های توده نفوذی اسپید جزء آمفیبول‌های

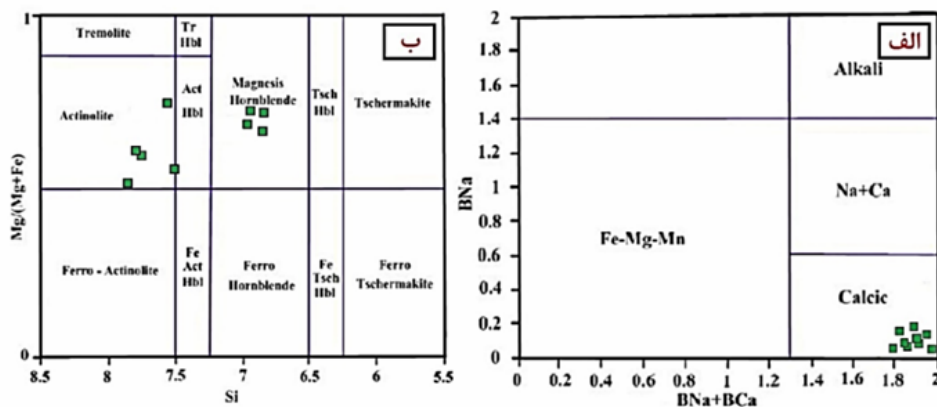
برآورد کرد. در این پژوهش با استفاده از شیمی دو کانی آمفیبول و پلاژیوکلاز، شرایط فشار، دما و گریزندگی اکسیژن ماگمای در حال تبلور توده نفوذی اسپید تعیین شد. برای محاسبه دما و فشار بر اساس ترکیب آمفیبول‌ها، می‌بایست نمونه‌های مورد بررسی دارای ویژگی‌های زیر باشند: ۱- شامل مجموعه‌ای همزیست از کانی‌های کوارتز، فلدسپار قلیایی، پلاژیوکلاز، هورنبلند، بیوتیت، مگنتیت و ایلمنیت باشند [۱۰].

۲- گریزندگی اکسیژن نسبتاً بالا بوده و رابطه $Fe_{tot}/(Fe_{tot} + Mg) < 6.6$ 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 ۷/۵ و بیشتر از ۱/۵ باشد [۹].

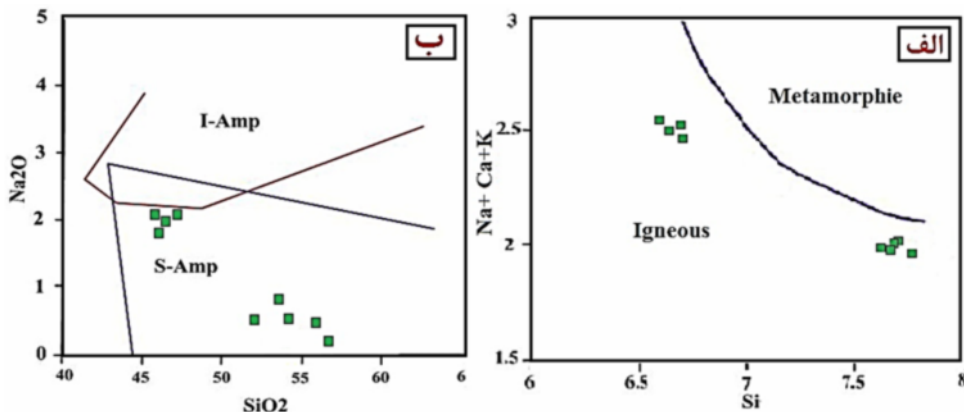
آمفیبول‌های مورد بررسی در گستره‌ی آمفیبول‌های ماگمایی (آذرین) قرار می‌گیرند (شکل ۸ الف). ویژگی‌های زمین-شیمیایی آمفیبول‌های به‌دست‌آمده از زینولیت‌های گوشته‌ای برای تعدادی از محیط‌های درون‌صفحه‌ای و فرورانش با هدف شناخت ویژگی‌های دگرنهاده‌ی محیط‌های زمین‌شناسی مختلف توسط کولتوری و همکاران [۲۳] مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، آمفیبول‌های وابسته به فرورانش نسبت به انواع درون‌صفحه‌ای دارای Na_2O و TiO_2 کمتری هستند هرچند که همپوشی قابل توجهی بین دو گروه نام برده وجود دارد. بر این اساس، آمفیبول‌های مورد بررسی در رده آمفیبول‌های وابسته به مناطق فرافروانش (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 آمفیبول‌ها [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 فرافروانش 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 کیلو بار در تغییر است. برای تبدیل فشارهای به دست آمده به عمق (برحسب کیلومتر)، از میانگین چگالی پوسته‌ی قاره‌ای (۲/۳۷g/cm³) استفاده شد که بر این اساس عمق برآورد شده برای تبلور آمفیبول در توده نفوذی اسپید برابر با ۸ تا ۱۲ کیلومتر است.

زمین‌دماسنجی آمفیبول - پلاژیوکلاز

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

$$T (\pm 311K) = \frac{0.677P - 48.98 + Y}{-0.0429 - 0.008814 \ln \left[\left(\frac{Si}{8} - 4 \right) X_{ab}^{T/9} \right]} \quad (3)$$

در این رابطه، Si تعداد اتم‌های سیلیسیم در واحد فرمولی آمفیبول، P فشار برحسب کیلو بار و T دما برحسب کلونین است. Y نشان‌دهنده ناهمگونی پلاژیوکلاز، بر اساس فرمول درجه دوم دارکن (DQF) است. Y برای $X_{ab} > 0.5$ برابر با صفر و برای $X_{ab} < 0.5$ برابر $-8.06 + 25.5(1 - X_{ab})$ 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 مونزودیوریت‌های توده نفوذی اسپید به دلیل داشتن پارائز مناسب و دارا بودن هورنبلند کلسیمی و فقدان منطقه‌بندی استفاده شد. همچنین برای واحد دیوریتی به دلیل داشتن آمفیبول‌های اکتینولیتی و وجود دگرسانی در برخی آمفیبول‌ها و پلاژیوکلازها، از انجام محاسبات زمین‌دما - فشارسنجی صرف‌نظر شد.

زمین‌فشارسنجی آمفیبول

هورنبلند موجود در توده‌های نفوذی آهکی قلیایی در کمرندهای 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 آمفیبول است؛ زیرا مقدار Al^{Tot} در آمفیبول تابع غلظت این عنصر در ماگما 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 شیمی آمفیبول‌ها 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:

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

در این رابطه P فشار برحسب کیلو بار و Al^{Tot} مقدار کل آلومینیوم (Al^{IV}+Al^{VI}) در ترکیب کانی آمفیبول است. به این ترتیب، فشار بدست آمده برای تبلور این کانی در توده نفوذی اسپید برابر با 3.7 ± 0.6 کیلو بار است که نسبت به روش‌های دیگر زمین‌فشارسنجی بیشتر است. برای برآورد فشار تبلور آمفیبول‌های توده نفوذی اسپید، علاوه بر روش اشمیت [۷] از سه روش متداول دیگر زمین‌فشارسنجی بر پایه مقدار Al^{Tot} در

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

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

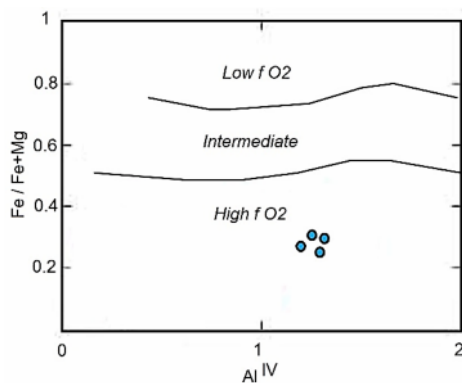
۲۸۹ درجه سانتی‌گراد هستند که دمای میانگین ۲۶۸ درجه سانتی‌گراد برای تشکیل این کلریت‌ها برآورد شد و با میانگین دمای تشکیل کلریت‌های حاصل از دگرسانی کانی آمفیبول هم‌خوانی دارد.

گریزندگی اکسیژن

کانی‌شناسی و شیمی کانی‌ها می‌تواند برای شناخت چگونگی اکسایش ماگما مورد استفاده قرار گیرد. در این زمینه دو روش نیمه کمی و کمی برای برآورد گریزندگی اکسیژن ماگمای تشکیل دهنده 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 طور کلی حضور همزمان تیتانیت، مگنتیت، کوارتز، همراه با آمفیبول در توده مورد بررسی نشان دهنده بالا بودن گریزندگی اکسیژن در ماگمای سازنده آن است [۳۷، ۲۴]. علاوه بر این، آمفیبول‌های توده نفوذی اسپید بیشتر غنی از منیزیم هستند که این خود شاهدهی بر بالا بودن گریزندگی اکسیژن در ماگمای سازنده توده نفوذی اسپید است [۲۴]. برای محاسبه کمی گریزندگی اکسیژن توده نفوذی اسپید از رابطه زیر استفاده شد [۳۷]:

$$\log f_{O_2} = -30930/T + 14.98 + 0.142(P-1)/T \quad (6)$$

در این رابطه T دما برحسب درجه کلوین و P فشار برحسب کیلو بار است. مقادیر $\log f_{O_2}$ برای توده نفوذی اسپید برابر با ۱۲/۱۸- تا ۱۵/۲۷- است که نشان‌دهنده بالا بودن نسبی گریزندگی اکسیژن در ماگمای سازندهی آن است که این مقدار با نوع I بودن این گرانیته‌ها هم‌خوانی دارد. گریزندگی اکسیژن برآورد شده در توده نفوذی اسپید، مشابه با دیگر توده‌های نفوذی در کمان ماگمایی ارومیه - دختر از جمله توده‌های نشو و سیلیجر [۳۸]، نیاسر [۳۹] و نطنز [۴۰] است.



شکل ۹ ارزیابی گریزندگی اکسیژن ماگمای تشکیل دهنده توده نفوذی اسپید با استفاده از ترکیب شیمیایی آمفیبول‌ها [۸].

زمین‌دماسنجی آمفیبول

یکی از جانشینی‌های مهم در ساختار بلوری آمفیبول‌ها جانشینی Ti است به طوری که با افزایش دما مقدار Ti در جایگاه M₂ آمفیبول افزایش می‌یابد [۲۹]. اما به دلیل شعاع یونی نسبتاً بزرگ این کاتیون در مقایسه با Al، با افزایش فشار افزایش نمی‌یابد؛ بنابراین مقدار Ti در آمفیبول‌های کلسیمی با دما رابطه مستقیم و با فشار رابطه معکوس دارد [۲۹]. از این رو، جانشینی Ti در کانی آمفیبول می‌تواند به عنوان زمین‌دماسنج مورد استفاده قرار گیرد [۳۱، ۳۰]. به منظور انجام زمین‌دماسنجی 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 TiO₂ موجود در سنگ کل بوده و در اصل وابسته به دماست [۳۰-۳۴]. به این ترتیب، دمای ۷۷۹ تا ۸۰۳ درجه سانتی‌گراد برای تبلور کانی آمفیبول بدست آمد. این دما با دمای برآورد شده بر پایه زوج کانی هورنبلند - پلاژیوکلاز هم‌خوانی دارد.

زمین‌دماسنجی کلریت

به منظور بررسی کانی‌شناسی، ویژگی‌های شیمیایی و برآورد دمای دگرسانی گرمایی در توده نفوذی اسپید از شیمی کانی کلریت به عنوان محصول دگرسانی گرمایی کانی آمفیبول استفاده شد. کلریت همواره به عنوان زمین‌دماسنج 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 گرمایی کنترل می‌کند، دماست. پژوهشگران مختلف، وابستگی بین ترکیب کلریت و دما را مورد بررسی قرار داده‌اند (برای مثال [۳۶، ۳۵]). این پژوهشگران زمین‌دماسنجی را برای کلریت‌هایی ارائه کردند که در محیط‌های گرمایی اشباع از آلومینیوم، یعنی در حضور کانی‌های دیگر آلومینیوم‌دار تشکیل می‌شوند [۳۶]. کرایدیوس و همکارش [۳۶] مقدار آلومینیوم چار وجهی را به صورت رابطه زیر تصحیح کردند

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

و رابطه زمین‌دماسنجی زیر را ارائه دادند:

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

زمین‌دماسنجی کلریت‌های توده نفوذی اسپید با توجه به رابطه که بر اساس تغییر در مقدار Al هشت‌وجهی و نسبت Fe/(Fe+Mg) در ساختار کلریت است محاسبه شد. به این ترتیب، کلریت‌های توده نفوذی اسپید دارای گستره دمایی ۲۳۷ تا

برداشت

[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 Magazine 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

مجموعه کانی‌ها در توده نفوذی اسپید شامل پلاژیوکلاز، کوارتز، فلدسپار قلیایی، هورنبلند، مگنتیت و تیتانیت است که این مجموعه برای بررسی زمین‌دماسنجی هورنبلند - پلاژیوکلاز 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 زمین‌ساختی این توده براساس شیمی کانی آمفیبول، نشان‌دهنده جایگاه زمین-ساختی وابسته به مناطق فرورانش برای این توده است. در این پژوهش، از ترکیب کانی‌های آمفیبول و فلدسپار برای برآورد پارامترهای فیزیکوشیمیایی وابسته به تبلور ماگمای 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 پلاژیوکلاز، بیانگر دمای ۷۵۲ تا ۸۶۵ درجه سانتی‌گراد بر تبلور این کانی‌ها در توده نفوذی مورد بررسی است. بر اساس ترکیب آمفیبول‌ها و کننازایی کانیایی مگنتیت - تیتانیت - کوارتز در این توده، به نظر می‌رسد که میزان گریزندگی اکسیژن ماگمای 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.

قدردانی

بدین‌وسیله از همکاری صمیمانه جناب آقای مجتبی رحیمی شهید و مدیریت محترم سازمان توسعه و نوسازی معادن 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., Zhao 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 821 (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., Zhao 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 terranes 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-hornblende 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