

زمین دما - فشارسنجی داسیت مارکوه (شمال شرق بیرجند) و برونوم‌های آمفیبولیتی آن

محمدحسین یوسف زاده^{۱*}، مسیب سبزه‌ئی^۲

۱- گروه پژوهشی علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۲- پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران.

(دریافت مقاله: ۸۹/۹/۶، نسخه نهایی: ۹۰/۱/۱۴)

چکیده: برونوم‌های آمفیبولیتی فراوان‌ترین برونوم گنبد داسیتی مارکوه واقع در شمال شرقی بیرجندند. این داسیت حاوی پلاژیوکلاز، کوارتز، هورنبلند سبز، بیوتیت و مگنتیت و برونوم‌های آمفیبولیتی دارای هورنبلندهای سبز و قهوه‌ای، پلاژیوکلاز $\pm$ بیوتیت $\pm$ کوارتز $\pm$ پیروکسن هستند. برآورد دما و فشار بر پایه‌ی مقدار Al موجود در آمفیبول‌ها نشان می‌دهد که هورنبلندهای سبز سنگ میزبان در دمای 804°C - 784°C و فشار ۶ Kbar - ۵ در اعماق ۲۳/۵۲ - ۲۰/۴۴ Km و هورنبلندهای سبز و قهوه‌ای موجود در برونوم آمفیبولیتی در دمای 845°C - 777°C و فشار ۷/۵۰ - ۵ در عمق ۳۰ - ۲۰ Km تشکیل شده‌اند. دلیل گسترده تر بودن گستره‌ی دما و فشار برای برونوم نسبت به سنگ میزبان، این است که برونوم‌های آمفیبولیتی حاوی هورنبلند سبز و پلاژیوکلاز نخست از دگرگونی دماجنشی واحدهای بازی پی سنگ افیولیتی منطقه، در رخساره‌ی آمفیبولیت تشکیل شده‌اند. در ادامه با افزایش دما و فشار در اواخر این رخساره و اوایل رخساره‌ی گرانولیت هورنبلند سبز به هورنبلند قهوه‌ای تبدیل، پلاژیوکلازها کلسیم دارتر شدند، حتی کلینوپیروکسن هم به وجود آمده است. در نهایت، با سقوط آمفیبولیت‌های وابسته به پی سنگ منطقه به داخل ماگما، جایی که شرایط برای تشکیل هورنبلند سبز در سنگ میزبان فراهم بوده، هورنبلندهای قهوه‌ای برونوم نیز دوباره به هورنبلند سبز تبدیل شده‌اند. نتایج آنالیز نقطه‌ای و شواهد میکروسکوپی تأیید کننده این فرایند است. پلاژیوکلازهای برونوم ها نسبت به پلاژیوکلازهای داسیت کلسیم دارند.

واژه‌های کلیدی: زمین دما - فشارسنجی؛ داسیت؛ آمفیبولیت؛ برونوم؛ بیرجند.

مقدمه

که در اواخر کرتاسه [۴] همزمان با بسته شدن حوضه‌ی اقیانوسی بین بلوک لوت و بلوک افغان دستخوش دگرگونی دماجنشی شده‌اند. معمولاً به دلیل طولانی نبودن فاصله‌ی زمانی بین سقوط برونوم‌ها به داخل ماگما، فوران، تعادلی در ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی آن‌ها صورت نخواهد گرفت. بنابراین، برونوم‌ها اطلاعات مفیدی را در خصوص تاریخچه‌ی تشکیل خود و ماگمای میزبان، فراهم می‌کند [۵]. در همین

گنبد داسیتی مارکوه در شمال شرق بیرجند در گستره‌ای با مشخصات $59^{\circ} 20' 00''$ طول شرقی و $32^{\circ} 57' 33''$ عرض شمالی قرار گرفته است (تصویر ۱) [۱]. این داسیت به ترشیری وابسته بوده و دارای برونوم‌های متنوع آمفیبولیتی، متاپلیتی و گنیسی است [۳، ۲]. برونوم‌های یادشده بقایای پی سنگ افیولیتی و متافلیش‌های کرتاسه و پالتوسن منطقه هستند [۲]

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۵۳۶۲۰۱۱۸، نمابر: ۲۵۰۲۵۱۵ (۰۵۶۱)، پست الکترونیکی: mhyousefzadeh@yahoo.com

راستا و با توجه به فراوانی برونوم‌ها در این گنبد، بر آن شدید پس از بررسی کانی‌شناسی، سنگ‌نگاری و مقایسه‌ی شیمی کانی‌های متشکله آن‌ها و سنگ میزبان که منتج به اثبات برونوم بودن و عدم ارتباط ژنتیکی اولیه آن‌ها با سنگ میزبان شد [۳]، در این پژوهش، دما و فشار تشکیل آن‌ها را محاسبه و با سنگ میزبان مقایسه کنیم و از عمق تشکیل آن‌ها و تغییرات احتمالی بعدی که تحت تأثیر گرمای ماگما رخ داده، است برآوردی داشته باشیم.

روش بررسی

در راستای این کار پژوهشی، نخست ضمن کاوش‌های صحرایی، نمونه‌برداری کاملی از سنگ‌های آتشفشانی ترشیری مارکوه و برونوم‌های آن انجام داریم. سپس مقاطع نازک میکروسکوپی زیادی تهیه و ویژگی‌های کانی‌شناسی و بافتی آن‌ها به وسیله‌ی یک میکروسکوپ قطبشی نوع لایتز بررسی شدند. برای شناسائی نوع و ترکیب شیمیائی کانی‌ها، با همکاری دکتر گیلز دروپ در دانشگاه منچستر انگلستان، دوباره آن مقاطع نازک میکروسکوپی بررسی و سپس آنالیز نقطه‌ای به روش EPMA روی کانی‌های وابسته به یک داسیت و دو برونوم آن، انجام گرفت که نتایج آن در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده‌اند. برای نام گذاری دقیق کانی‌ها برنامه‌ی Min Pet به کار گرفته شد و درستی کارهای میکروسکوپی در شناسایی کانی‌ها به ویژه نوع هورنبلندهای سبز و قهوه‌ای تأیید شد [۳،۲]. در پایان، دما بر اساس روش [۶] و فشار بر اساس روش [۷] اندازه‌گیری شدند.

بحث و بررسی

بافت اصلی داسیت مارکوه پورفیری با خمیره‌ی ریز دانه‌ای است. درشت بلورهای شکل‌دار با منطقه‌بندی نوسانی پلاژیوکلاز (اولیگوکلاز و آندزین) شاخص‌ترین کانی آن است (تصویر ۲ الف) (نمودار ۱ الف). درشت بلورهای گرد و با کناره‌های خلیجی کوارتز نیز، به فراوانی یافت می‌شوند. مهم‌ترین کانی‌های فرومنیزین این سنگ‌ها بلورهای شکل‌دار و نیمه شکل‌دار عبارتند از هورنبلند سبز و بیوتیت (تصویر ۲ الف). هورنبلندها در بخش بالائی این گستره ترکیبی ادنیت هورنبلند (نمودار ۱ ب) و بیوتیت در گستره‌ی ترکیبی آنیت و متمایل به فلوگوپیت (نمودار ۱ پ) قرار می‌گیرند. بلورهای ریز فلدسپار پتاسیم نیز در این سنگ‌ها وجود دارند. کانی‌های کدر شامل مگنتیت و

ایلمنیت به صورت بلورهای ریز نیمه شکل‌دار دیده می‌شوند (تصویر ۲ الف).

بلورهای شکل‌دار و نیمه شکل‌دار هورنبلندهای سبز و قهوه‌ای، فراوان‌ترین برونوم‌های آمفیبولیتی را تشکیل می‌دهند (تصویر ۳ الف و ب). داده‌های تجزیه‌ی نقطه‌ای، ترکیب ادنیت هورنبلند، پارگازیت هورنبلند آهن‌دار و ادنیت را برای این آمفیبول‌ها نشان می‌دهند (نمودارهای ۱ ب و ۲ الف). بلورهای نیمه شکل‌دار میکا در گستره‌ی ترکیبی آنیت (بیوتیت غنی از منیزیم) فلوگوپیت (نمودار ۱ پ و ۲ ب)، بلورهای نیمه شکل‌دار پلاژیوکلاز در گستره‌ی ترکیبی اواسط آندزین تا اوایل بیتونیت (نمودار ۱ الف و ۲ پ) و بلورهای شکل‌دار کلینوپیروکسن در گستره‌ی ترکیبی دیوپسید (نمودار ۲ ت) قرار می‌گیرند [۲،۳]. هورنبلندها و بیوتیت‌های دارای کناره‌های اپاسیتی غنی از اکسیدهای آهن (مگنتیت) هستند. ولی برخی از نمونه‌ها دارای کوارتز نیز می‌باشند. بافت اصلی این بیگانه سنگ‌ها، گرانوبلاستیک است (تصویر ۳). پاراژنز یادشده به ویژه حضور کلینوپیروکسن با هورنبلند قهوه‌ای فراوان، نشان می‌دهد که درجه‌ی دگرگونی دماجنشی این برونوم‌ها اواخر رخساره‌ی آمفیبولیت و مرز آن با رخساره‌ی گرانولیت است، به نحوی که با افزایش دما، Fe^{+2} موجود در هورنبلند سبز به Fe^{+3} تبدیل و هورنبلند قهوه‌ای تشکیل شده است [۱۱]. مقایسه‌ی برونوم‌های یاد شده با [۱۲،۱۳] که برای همبافت منطقه بروکن هیل در نیوساوث ولز استرالیا یک دنباله‌ی منطقه‌ای ارائه کرده و تحول تدریجی از رخساره آمفیبولیت به گرانولیت را با سه منطقه‌ی A (رخساره آمفیبولیت)، B (زون حدواسط یا زون دگرگونی) و C (رخساره گرانولیت) نشان داده و برابر [۱۴]، معلوم می‌شود که برونوم‌های منطقه تا حد اوایل رخساره‌ی گرانولیت دگرگون شده‌اند. هر چند در آن، تعداد برونوم‌های مارکوه بررسی شده گارنت مشاهده نشد، ولی این به معنی عدم وجود آن به صورت مطلق نیست، به ویژه که در برونوم‌های موجود در منطقه خوسف که در فاصله‌ی نسبتاً نزدیکی وجود دارند گارنت یافت شده است [۲]. پیدایش دوباره‌ی هاله‌ای از هورنبلند سبز پیرامون هورنبلند قهوه‌ای ناشی از رخداد یک دگرگونی مجاورتی در دمای پائین‌تر است.



تصویر ۱ نقشه‌ی راه‌های ارتباطی منطقه‌ی [۱]. مقیاس: ۲۰ Km

جدول ۱ نتایج آنالیز نقطه‌ای آمفیبول‌های موجود در داسیت مارکوه.

نمونه	۷۶۵	۷۶۵	۷۶۵	۷۶۵	۷۶۵	۷۶۵
نقطه تجزیه شده	۱۸Hbl	۱۹Hbl	۲۰Hbl	۲۱Hb	۲۲Hbl	۲۳Hbl
کانی	هورنبلند	هورنبلند	هورنبلند	هورنبلند	هورنبلند	هورنبلند
موقعیت	کناره	مرکز	مرکز	کناره	مرکز	مرکز
SiO_2	۴۵٫۳۶	۴۶٫۰۰	۴۶٫۰۶	۴۵٫۸۵	۴۵٫۶۷	۴۵٫۳۲
TiO_2	۲٫۰۹	۱٫۸۱	۱٫۷۳	۱٫۹۲	۱٫۱۹	۱٫۷۲
Al_2O_3	۱۰٫۸۳	۱۰٫۵۰	۱۰٫۲۴	۱۰٫۱۶	۱۰٫۶۰	۱۱٫۲۰
Cr_2O_3	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe_2O_3	۳٫۴۸	۳٫۸۳	۳٫۴۲	۲٫۸۲	۵٫۱۴	۳٫۶۳
FeO	۵٫۲۶	۴٫۸۱	۴٫۶۶	۶٫۴۹	۶٫۰۳	۵٫۲۱
MnO	۰٫۱۱	۰٫۱۱	۰٫۰۷	۰٫۱۱	۰٫۱۳	۰٫۱۳
MgO	۱۶٫۷۹	۱۷٫۱۸	۱۷٫۳۸	۱۶٫۳۴	۱۵٫۷۵	۱۶٫۶۵
CaO	۱۰٫۸۸	۱۰٫۸۸	۱۱٫۱۰	۱۱٫۰۵	۱۰٫۶۷	۱۰٫۸۳
Na_2O	۲٫۵۷	۲٫۵۴	۲٫۳۷	۲٫۵۸	۲٫۱۱	۲٫۷۶
K_2O	۰٫۸۴	۰٫۷۲	۰٫۷۶	۰٫۷۲	۰٫۳۶	۰٫۶۲
Total	۹۸٫۱۹	۹۸٫۳۸	۹۷٫۷۸	۹۸٫۰۳	۹۷٫۶۶	۹۸٫۰۶
Formula (corr.)	(O)۲۳	(O)۲۳	(O)۲۳	(O)۲۳	(O)۲۳	(O)۲۳
Si	۶٫۴۷۵	۶٫۵۳۵	۶٫۵۷۱	۶٫۵۷۴	۶٫۵۶۴	۶٫۴۷۱
Ti	۰٫۲۲۴	۰٫۱۹۳	۰٫۱۸۶	۰٫۲۰۷	۰٫۱۲۹	۰٫۱۸۴
Al	۱٫۸۲۱	۱٫۷۵۸	۱٫۷۲۱	۱٫۷۱۷	۱٫۷۹۶	۱٫۸۸۴
Cr	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Fe³⁺	۰٫۳۷۴	۰٫۴۰۹	۰٫۳۶۷	۰٫۳۰۴	۰٫۵۵۶	۰٫۳۹۰
Fe²⁺	۰٫۶۲۸	۰٫۵۷۱	۰٫۵۵۶	۰٫۷۷۹	۰٫۷۲۵	۰٫۶۲۲
Mn	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۳	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱۳	۰٫۰۱۶	۰٫۰۱۵
Mg	۳٫۵۷۲	۳٫۶۳۹	۳٫۶۹۶	۳٫۴۹۳	۳٫۳۷۵	۳٫۵۴۵
Ca	۱٫۶۶۴	۱٫۶۵۶	۱٫۶۹۷	۱٫۶۹۷	۱٫۶۴۳	۱٫۶۵۶
Na	۰٫۷۱۲	۰٫۷۰۰	۰٫۶۵۶	۰٫۷۱۶	۰٫۵۸۸	۰٫۷۶۵
K	۰٫۱۵۲	۰٫۱۳۱	۰٫۱۳۹	۰٫۱۳۱	۰٫۰۶۶	۰٫۱۱۳
Total	۱۵٫۶۳۶	۱۵٫۶۰۴	۱۵٫۵۹۷	۱۵٫۶۳۲	۱۵٫۴۵۸	۱۵٫۶۴۶

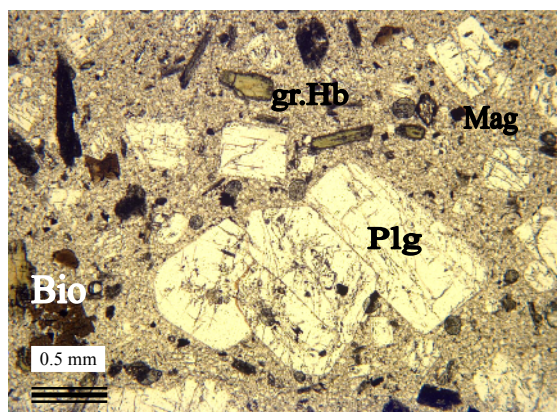
جدول ۲ نتایج آنالیز نقطه‌ای آمفیبول‌های موجود در برونوبوم آمفیبولیتی .

نمونه	۷۶۵	۷۶۵	۷۶۵	۷۶۵	۷۶۵	۷۶۵
نقطه آنالیز شده	۱Hbl	۲Hbl	۳Hbl	۴Hbl	۵Hbl	۶Hbl
کانی	هورنبلند	هورنبلند	هورنبلند	هورنبلند	هورنبلند	هورنبلند
موقعیت	مرکز قهوه‌ای	مرکز قهوه‌ای	مرکز قهوه‌ای	کناره سبز	مرکز قهوه‌ای	کناره سبز
<i>SiO₂</i>	۴۳٫۶۸	۴۴٫۰۰	۴۵٫۰۱	۴۵٫۴۵	۴۴٫۸۳	۴۵٫۴۰
<i>TiO₂</i>	۰٫۶۵	۰٫۷۵	۱٫۱۶	۰٫۹۷	۱٫۰۰	۱٫۱۳
<i>Al₂O₃</i>	۱۱٫۹۴	۱۱٫۶۸	۱۱٫۳۸	۱۰٫۸۶	۱۱٫۵۵	۱۱٫۲۷
<i>Cr₂O₃</i>	۰٫۱۱	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰
<i>Fe₂O₃</i>	۱٫۵۱	۱٫۴۰	۱٫۳۱	۱٫۷۰	۱٫۶۱	۱٫۴۹
<i>FeO</i>	۱۲٫۵۳	۱۲٫۹۱	۱۲٫۹۰	۱۲٫۲۲	۱۲٫۳۵	۱۲٫۲۱
<i>MnO</i>	۰٫۲۹	۰٫۲۷	۰٫۲۸	۰٫۲۹	۰٫۲۹	۰٫۳۰
<i>MgO</i>	۱۱٫۷۱	۱۱٫۵۸	۱۱٫۹۵	۱۲٫۲۵	۱۲٫۰۵	۱۲٫۳۷
<i>CaO</i>	۱۱٫۴۹	۱۱٫۶۱	۱۱٫۶۱	۱۱٫۴۱	۱۱٫۵۲	۱۱٫۵۵
<i>Na₂O</i>	۲٫۲۴	۲٫۲۳	۲٫۲۸	۱٫۹۸	۲٫۱۲	۲٫۲۶
<i>K₂O</i>	۰٫۷۱	۰٫۵۵	۰٫۵۳	۰٫۷۱	۰٫۶۵	۰٫۴۷
<i>Total</i>	۹۶٫۹۵	۹۷٫۰۲	۹۸٫۴۲	۹۷٫۸۴	۹۷٫۹۹	۹۸٫۴۴
<i>Formula (corr.)</i>	(O)۲۳	(O)۲۳	(O)۲۳	(O)۲۳	(O)۲۳	(O)۲۳
<i>Si</i>	۶٫۵۰۳	۶٫۵۴۴	۶٫۵۸۵	۶٫۶۶۷	۶٫۵۷۷	۶٫۶۱۵
<i>Ti</i>	۰٫۰۷۳	۰٫۰۸۴	۰٫۱۲۷	۰٫۱۰۶	۰٫۱۱۰	۰٫۱۲۴
<i>Al</i>	۲٫۰۹۵	۲٫۰۴۷	۱٫۹۶۳	۱٫۸۷۸	۱٫۹۹۷	۱٫۹۳۵
<i>Cr</i>	۰٫۰۱۳	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
<i>Fe³⁺</i>	۰٫۱۶۹	۰٫۱۵۶	۰٫۱۴۴	۰٫۱۸۷	۰٫۱۷۸	۰٫۱۶۳
<i>Fe²⁺</i>	۱٫۵۶۰	۱٫۶۰۶	۱٫۵۷۹	۱٫۵۰۰	۱٫۵۱۵	۱٫۴۸۸
<i>Mn</i>	۰٫۰۳۷	۰٫۰۳۵	۰٫۰۳۵	۰٫۰۳۷	۰٫۰۳۶	۰٫۰۳۷
<i>Mg</i>	۲٫۵۹۹	۲٫۵۶۸	۲٫۶۰۶	۲٫۶۷۸	۲٫۶۳۶	۲٫۶۸۶
<i>Ca</i>	۱٫۸۳۳	۱٫۸۵۰	۱٫۸۲۰	۱٫۷۹۳	۱٫۸۱۱	۱٫۸۰۴
<i>Na</i>	۰٫۶۷۵	۰٫۶۴۲	۰٫۶۴۶	۰٫۵۶۲	۰٫۶۰۴	۰٫۶۳۹
<i>K</i>	۰٫۱۳۵	۰٫۱۰۴	۰٫۰۹۹	۰٫۱۳۲	۰٫۱۲۲	۰٫۰۸۶
<i>Total</i>	۱۵٫۶۹۱	۱۵٫۶۴۱	۱۵٫۶۰۵	۱۵٫۵۴۱	۱۵٫۵۸۸	۱۵٫۵۷۶

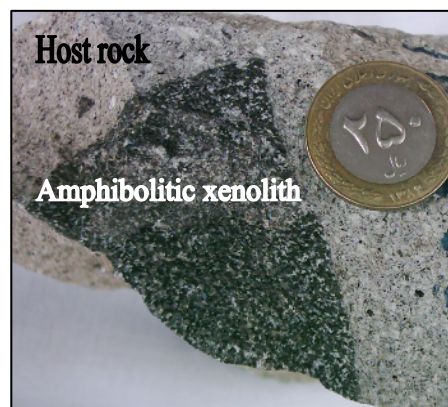
ادامه جدول ۲

نمونه	۷۶۵	۷۶۵	۷۶۵	۷۶۵	۷۶۵
نقطه آنالیز شده	Hbl۱۲	Hbl۱۴	Hbl۱۵	Hbl۱۶	Hbl۱۷
کانی	هورنبلند	هورنبلند	هورنبلند	هورنبلند	هورنبلند
موقعیت	مرکز قهوه‌ای	مرکز قهوه‌ای	مرکز قهوه‌ای	کناره سبز	مرکز قهوه‌ای
<i>SiO₂</i>	۴۷٫۰۷	۴۵٫۱۵	۴۴٫۰۶	۴۵٫۲۸	۴۵٫۴۲
<i>TiO₂</i>	۰٫۹۵	۰٫۸۴	۰٫۸۹	۱٫۲۷	۱٫۰۹
<i>Al₂O₃</i>	۱۰٫۳۹	۱۲٫۸۹	۱۲٫۵۸	۱۱٫۵۵	۱۱٫۰۷
<i>Cr₂O₃</i>	۰٫۰۱	۰٫۰۶	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۱
<i>Fe₂O₃</i>	۰٫۹۴	۰٫۹۷	۱٫۵۶	۱٫۰۶	۱٫۳۳
<i>FeO</i>	۱۱٫۸۷	۱۳٫۰۶	۱۳٫۰۹	۱۲٫۸۰	۱۲٫۴۶
<i>MnO</i>	۰٫۲۵	۰٫۲۶	۰٫۲۷	۰٫۳۰	۰٫۲۹
<i>MgO</i>	۱۳٫۱۲	۱۱٫۲۴	۱۱٫۳۲	۱۱٫۹۸	۱۲٫۱۸
<i>CaO</i>	۱۱٫۵۷	۱۱٫۲۳	۱۱٫۵۱	۱۱٫۴۷	۱۱٫۴۴
<i>Na₂O</i>	۲٫۳۳	۲٫۴۷	۲٫۳۶	۲٫۴۴	۲٫۲۵
<i>K₂O</i>	۰٫۴۶	۰٫۶۳	۰٫۵۸	۰٫۵۱	۰٫۵۴
<i>Total</i>	۹۸٫۹۴	۹۸٫۷۹	۹۸٫۲۶	۹۸٫۶۹	۹۸٫۰۸
<i>Formula (corr.)</i>	۲۳(O)	۲۳(O)	۲۳(O)	۲۳(O)	۲۳(O)
<i>Si</i>	۶٫۷۸۲	۶٫۵۶۳	۶٫۴۷۳	۶٫۵۹۵	۶٫۶۴۷
<i>Ti</i>	۰٫۱۰۳	۰٫۰۹۲	۰٫۰۹۸	۰٫۱۳۹	۰٫۱۲۰
<i>Al</i>	۱٫۷۶۴	۲٫۲۰۹	۲٫۱۷۹	۱٫۹۸۲	۱٫۹۰۹
<i>Cr</i>	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۱
<i>Fe³⁺</i>	۰٫۱۰۲	۰٫۱۰۶	۰٫۱۷۲	۰٫۱۱۶	۰٫۱۴۶
<i>Fe²⁺</i>	۱٫۴۳۰	۱٫۵۸۷	۱٫۶۰۸	۱٫۵۵۹	۱٫۵۲۵
<i>Mn</i>	۰٫۰۳۰	۰٫۰۳۲	۰٫۰۳۴	۰٫۰۳۷	۰٫۰۳۶
<i>Mg</i>	۲٫۸۱۷	۲٫۴۳۵	۲٫۴۸۰	۲٫۶۰۱	۲٫۶۵۸
<i>Ca</i>	۱٫۷۸۵	۱٫۷۴۹	۱٫۸۱۲	۱٫۷۹۰	۱٫۷۹۴
<i>Na</i>	۰٫۶۵۰	۰٫۶۹۵	۰٫۶۷۲	۰٫۶۸۹	۰٫۶۳۸
<i>K</i>	۰٫۰۸۴	۰٫۱۱۶	۰٫۱۰۸	۰٫۰۹۵	۰٫۱۰۱
<i>Total</i>	۱۵٫۵۴۹	۱۵٫۵۹۱	۱۵٫۶۴۱	۱۵٫۶۰۷	۱۵٫۵۷۴

الف

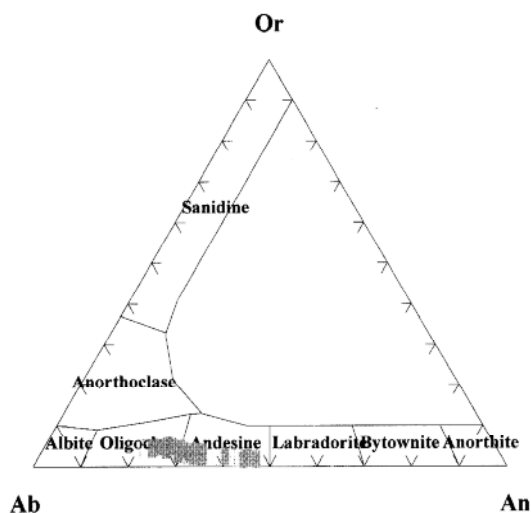


ب

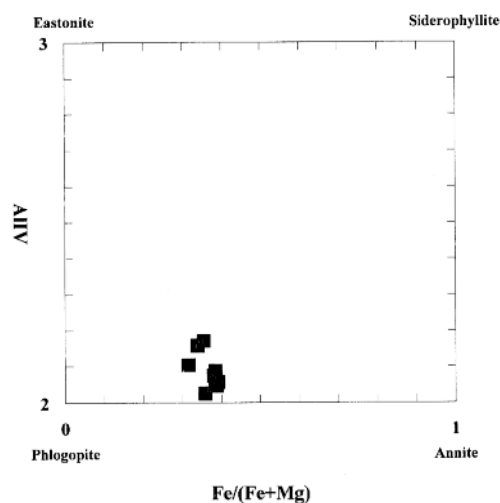
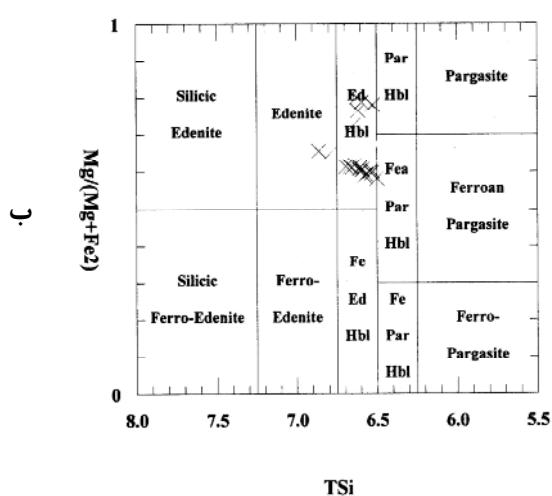


تصویر ۲ درشت بلورهای پلاژیوکلاز و هورنبلند سبز دو تشکیل دهنده اصلی داسیت با بافت پورفیری (الف) (ppl) و برونومهای آمفیبولیتی موجود در آن (ب).

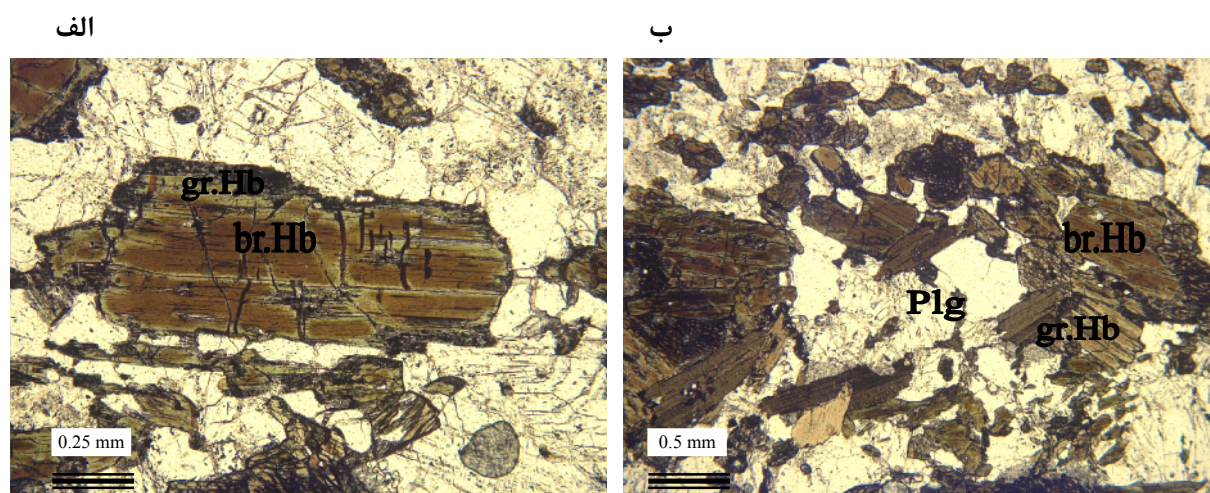
الف



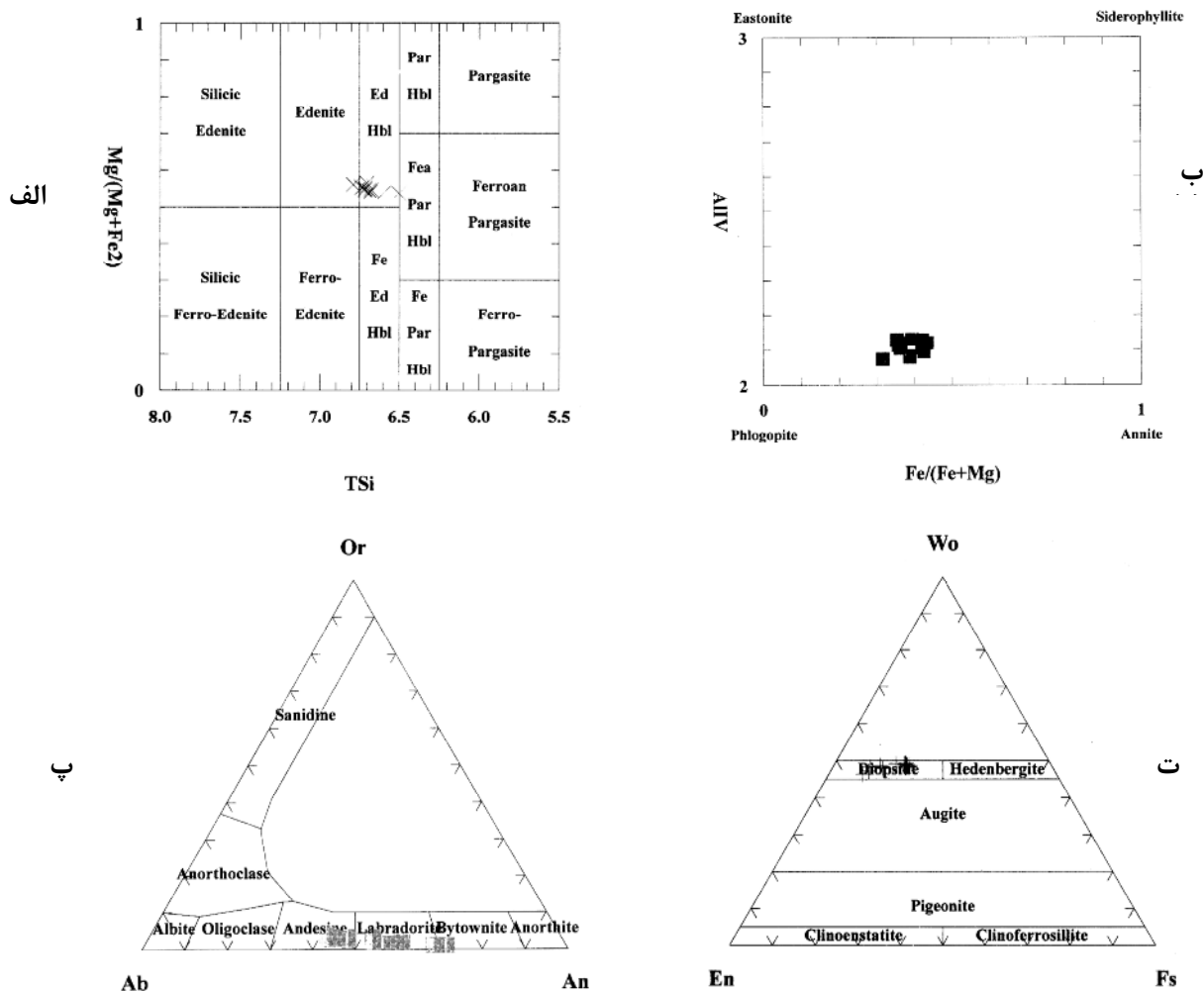
نمودار ۱ (الف) گستره ترکیبی پلاژیوکلازهای موجود در داسیت مارکوه و برونوم کوارتز آمفیبولیتی آن (نمونه ۷۶۵)، در نمودار *Or-Ab-An*.



ادامه‌ی نمودار ۱ (ب) ترکیب آمفیبول‌های سنگ میزبان و برونوم کوارتز آمفیبولیتی (نمونه ۷۶۵)، در نمودار $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ در برابر TSi [۸] و (پ) ترکیب میکاهای موجود در آن‌ها در نمودار Al^{IV} نسبت به $Fe/(Fe+Mg)$ [۹].



تصویر ۳ هورنبلندهای قهوه‌ای (*br.Hbl*) که در بخش کناری به هورنبلند سبز (*gr.Hbl*) تبدیل شده و پلاژیوکلاز دو تشکیل دهنده اصلی برونوم‌های آمفیبولیتی (*PPL*).



نمودار ۲ (الف) ترکیب آمفیبول‌های موجود در برونوم پیروکسن آمفیبولیتی (نمونه ۷۵۸)، در نمودار $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ نسبت به Tsi [۸]، (ب) ترکیب میکاهای آن در نمودار Al^{IV} نسبت به $Fe/(Fe+Mg)$ [۹]، (پ) ترکیب پلاژیوکلازهای آن در نمودار $Or-Ab-An$ و (ت) ترکیب کلینوپروکسن‌های آن در نمودار $Ca-Mg-Fe\ Cpx-En-Fs-Wo$ [۱۰].

زمین دما- فشارسنجی

آمفیبول‌ها، سیلیکات‌های زنجیره‌ای مضاعفی را تشکیل می‌دهند که از نظر ترکیب شیمیایی و ساختار کانی‌شناسی، دارای تنوع قابل ملاحظه‌ای هستند [۱۵]. تنوع ترکیب شیمیایی و ساختاری، سبب می‌شود که آن‌ها قادر باشند در گستره وسیعی از انواع سنگ‌ها، با شرایط مختلف دما و فشار، تشکیل شوند. آمفیبول‌ها تقریباً در تمامی سنگ‌های آذرین فلسیک، حد واسط و مافیک و در گستره‌ی وسیعی از دما (۱۱۵۰°C - ۴۰۰) و فشار (۲۳Kb - ۱) حضور دارند [۱۶]. مقدار Ti, Ca, Na و Al موجود در ترکیب آمفیبول، تابع فشار، دما و گریزندگی اکسیژن است. هم‌چنین کاتیون‌های مثل Al, Ti کل و Al موقعیت‌های چهاروجهی، نسبت به دما حساس‌اند به طوری که افزایش دما، سبب افزایش مقدار Ti و نیز افزایش میزان Al^{IV} می‌شود [۱۷]. معمولاً به ازای هر ۱۰۰ درجه افزایش دما، تقریباً ۰/۳ کاتیون به میزان Al^{IV} افزوده می‌شود [۱۷]. بر خلاف Al^{IV} ، میزان Al^{VI} متناسب با افزایش فشار، زیاد شده و دما، تأثیری بر آن ندارد. محاسبه‌ی مقدار Al^{VI} و Al_{Total} ، مبنای اندازه‌گیری فشار با استفاده از ترکیب آمفیبول است؛ زیرا مقدار Al در آمفیبول، تابع غلظت آن در ماگمای مادر نبوده، بلکه تابع فشار حاکم در زمان تبلور آن است. مقدار Si در آمفیبول، تابع مقدار آن در ماگماست و دما و فشار بر آن تأثیری ندارد [۱۷].

برای محاسبه‌ی فشار و دما، با استفاده از ترکیب آمفیبول، لازم است نمونه‌ها دارای ویژگی‌های زیر باشند:

۱- دارای مجموعه‌ای همزیست از کانی‌های کوارتز، فلدسپار قلیایی، پلاژیوکلاز، هورنبلند، بیوتیت، مانیتیت و ایلمنیت باشند [۱۸].

۲- گریزندگی اکسیژن، نسبتاً بالا بوده و رابطه $Mg < 0.6 + Fe_{Total} / Fe_{Total}$ در آمفیبول‌ها صدق کند. برای تشخیص آن، بهتر است از پارائز کانی‌ها استفاده شود [۱۸].

۳- در برآوردها، بایستی از آمفیبول‌هایی که ترکیب اکتینولیتی دارند چشم‌پوشی کرد؛ زیرا ممکن است این کانی در فاز زیر نقطه انجماد و در اثر دگرسانی، تولید پیروکسن و هورنبلند نماید [۱۹].

۴- هورنبلندها باید فاقد منطقه‌بندی و نیز نادگرسان باشند [۱۹، ۱۸].

۵- در فرمول ساختاری هورنبلند، بایستی تعداد کاتیون‌های آن $Si \leq 7.5$ و $Ca \geq 1.5$ باشند [۱۷].

تا کنون روش‌های زیادی برای محاسبه‌ی فشار، با استفاده از ترکیب هورنبلند، ارائه شده است [۱۷، ۲۰-۲۳]. در تمام روش‌های یادشده، به استثنای [۲۴]، فشار بر اساس مقدار Al موجود در هورنبلند و بدون در نظر گرفتن پارامترهای دیگری نظیر دما، به دست می‌آید. دما سنج آمفیبول- پلاژیوکلاز ارائه شده توسط [۲۴، ۱۶] بر اساس تعداد Si و کاتیون‌های Al در موقعیت‌های تترائدر آمفیبول چهار وجهی، کنترل می‌شود.

زمین فشار سنجی بر اساس مقدار آلومینیوم موجود در هورنبلند

بررسی‌های تجربی، گویای آن است که ترکیب آمفیبول، علاوه بر فشار به دما، گریزندگی اکسیژن، ترکیب کل و فازهای همزیست وابسته است [۱۷]. با در نظر گرفتن پارامترهای یاد شده و به خصوص مقدار Al_{Total} آمفیبول، تا کنون فرمول‌های زیادی توسط پژوهشگران یاد شده، برای محاسبه‌ی فشار ارائه شد که قابل قبول‌ترین آن‌ها [۶] است. بنابراین، با استفاده از زمین فشار سنج، فشار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P [\pm 0.6 \text{ Kbar}] = -3.01 + 4.76 Al_{Total}$$

در این فرمول، P، فشار بر حسب کیلو بار و Al_{Total} ، میزان آلومینیوم کل در ترکیب آمفیبول است. لازم به یادآوری که اندازه‌گیری فشار از این روش، بالاترین مقدار را نسبت به روش‌های دیگر نشان می‌دهد [۲۵].

به‌طور کلی هورنبلندهایی که در شرایط گریزندگی بالای اکسیژن متبلور شده‌اند، نسبت به هورنبلندهای تبلور یافته در شرایط گریزندگی پائین اکسیژن، نتایج مطمئن‌تر و بهتری را برای زمین دما- فشار سنجی نشان می‌دهد [۱۷]. فراوانی مانیتیت و ایلمنیت حکایت از بالا بودن فشار بخشی اکسیژن دارند. در جدول ۱ و ۲ به ترتیب داده‌های آنالیز نقطه‌ای آمفیبول‌های وابسته به داسیت و برونوم‌های آمفیبولیتی و در جدول ۳ فشار محاسبه شده از [۷] ارائه شده‌اند.

زمین دماسنجی

برای محاسبه‌ی دما، نمونه‌های مورد بررسی، فرمول [۶] مورد استفاده قرار گرفته است (جدول ۲). نامبردگان در راستای ارزیابی ارتباط‌های ممکن بین فشار، دما و ترکیب شیمیایی فرمول زیر را برای اندازه‌گیری دما مطرح کرده‌اند:

$$T = 25.3P + 654.9$$

نداشته باشد [۱۹].

بر اساس واکنش ادنیت- ترمولیت، فرمول زیر برای دماسنجی آمفیبول- پلاژیوکلاز ارائه شده است [۲۶]. این دماسنج در سنگ‌های آذرین فلسیک و حد واسطی که دارای کوارتز، پلاژیوکلاز با $An < ۹۲\%$ و آمفیبول‌هایی با $Si \leq ۷.۸$ باشند کاربرد داشته و برای دماهای ۵۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه‌ی سانتیگراد، همسجی شده است [۲۶]:

$T [\pm 311^{\circ}K] = 0.667 P[Kbar] - 48.98 + Y_{Ab} / - 0.0429 - 0.0083144Ln\{(Si - 4) / (8-Si)X_{Ab}\}$
در این رابطه، T دمای تعادلی برحسب درجه‌ی کلون، P فشار بر حسب کیلوپار، Si تعداد کاتیون‌های سیلیس در فرمول ساختاری آمفیبول، X_{Ab} مقدار درصد آلبیت در پلاژیوکلاز است. مقدار Y_{Ab} از روابط زیر محاسبه می‌شود:

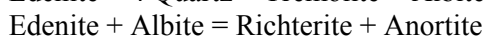
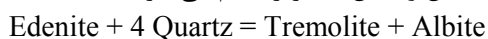
$$X_{Ab} > 0.5 \rightarrow Y_{Ab} = 0$$

$$X_{Ab} < 0.5 \rightarrow Y_{Ab} = 8.06 + 25.5(1 - X_{Ab})^2$$

در این رابطه، دما، بر حسب درجه‌ی سانتیگراد و فشار، بر حسب کیلوپار اندازه‌گیری می‌شوند.

روش دیگر دماسنجی استفاده از ترکیب هورنبلند و پلاژیوکلاز است. هر چند هنوز تردیدهایی در مورد روش دماسنجی هورنبلند- پلاژیوکلاز وجود دارد، ولی، فعلاً یکی از روش‌های رایج برای دماسنجی سنگ‌های آهکی- قلیایی به حساب می‌آید [۱۸]. برای محاسبه‌ی دما، با این روش، بایستی زوج درشت بلورهای آمفیبول کلسیم‌دار و پلاژیوکلاز به صورت همزیست بوده و آمفیبول‌ها، فاقد حاشیه‌ی اکتینولیتی باشند [۱۹].

این روش زمین دماسنجی، با یک زمین دماسنج تبادلی کار می‌کند که بر اساس واکنش‌های زیر انجام می‌گیرد [۱۹]:



واکنش اول در شرایطی است که سنگ، دارای کوارتز باشد و واکنش دوم مربوط به شرایطی است که در سنگ کوارتز وجود

جدول ۳ فشار و دمای محاسبه شده برای آمفیبول‌های موجود در داسیت مارکوه و برونوم‌های آمفیبولیتی آن.

شماره نمونه	نوع سنگ	نقاط تجزیه شده	فشار (Kbar) بر پایه [۷]	دما ($^{\circ}C$) بر پایه [۶]
۷۶۵	برونوم آمفیبولیتی	hbl۱ (مرکز قهوه‌ای)	۶,۹۶۲۲	۸۳۱,۰۴۳۶۶
۷۶۵	برونوم آمفیبولیتی	hbl۲ (مرکز قهوه‌ای)	۶,۷۳۳۷۲	۸۲۵,۲۶۳۱۱
۷۶۵	برونوم آمفیبولیتی	hbl۳ (مرکز قهوه‌ای)	۶,۳۳۳۸۸	۸۱۵,۱۴۷۱۶
۷۶۵	برونوم آمفیبولیتی	hbl۴ (کناره سبز)	۵,۹۲۹۲۸	۸۰۴,۹۱۰۷۸
۷۶۵	برونوم آمفیبولیتی	hbl۵ (مرکز قهوه‌ای)	۶,۴۹۵۷۲	۸۱۹,۲۴۱۷۱
۷۶۵	برونوم آمفیبولیتی	hbl۶ (کناره سبز)	۶,۲۰۰۶	۸۱۱,۷۷۵۱۸
۷۶۵	برونوم آمفیبولیتی	hbl۷ (مرکز قهوه‌ای)	۶,۴۸۱۴۴	۸۱۸,۸۸۰۴۳
۷۶۵	برونوم آمفیبولیتی	hbl۸ (مرکز قهوه‌ای)	۶,۳۲۹۱۲	۸۱۵,۰۲۶۷۳
۷۶۵	برونوم آمفیبولیتی	hbl۹ (کناره سبز)	۶,۲۰۵۳۶	۸۱۱,۸۹۵۶
۷۶۵	برونوم آمفیبولیتی	hbl۱۰ (مرکز قهوه‌ای)	۷,۰۸۱۲	۸۳۴,۰۵۴۳۶
۷۶۵	برونوم آمفیبولیتی	hbl۱۱ (مرکز قهوه‌ای)	۶,۹۹۰۷۶	۸۳۱,۷۶۶۲۲
۷۶۵	برونوم آمفیبولیتی	hbl۱۲ (مرکز قهوه‌ای)	۴,۸۳۴۴۸	۷۷۷,۲۱۲۳۴
۷۶۵	برونوم آمفیبولیتی	hbl۱۳ (مرکز قهوه‌ای)	۵,۳۸۶۶۴	۷۹۱,۱۸۱۹۹
۷۶۵	برونوم آمفیبولیتی	hbl۱۴ (مرکز قهوه‌ای)	۷,۵۰۴۸۴	۸۴۴,۷۷۲۴۵
۷۶۵	برونوم آمفیبولیتی	hbl۱۵ (مرکز قهوه‌ای)	۷,۳۶۲۰۴	۸۴۱,۱۵۹۶۱
۷۶۵	برونوم آمفیبولیتی	hbl۱۶ (کناره سبز)	۶,۴۲۴۳۲	۸۱۷,۴۳۵۲۹
۷۶۵	برونوم آمفیبولیتی	hbl۱۷ (مرکز قهوه‌ای)	۶,۰۷۶۸۴	۸۰۸,۶۴۴۰۵
۷۶۵	داسیت	hbl۱۸ (کناره)	۵,۵۸۶۵۶	۷۹۶,۲۳۹۹۶
۷۶۵	داسیت	hbl۱۹ (مرکز)	۵,۲۸۱۹۲	۷۸۸,۵۳۲۵۷
۷۶۵	داسیت	hbl۲۰ (مرکز)	۵,۱۱۵۳۲	۷۸۴,۳۱۷۵۹
۷۶۵	داسیت	hbl۲۱ (کناره)	۵,۱۱۰۵۶۲	۷۸۴,۱۹۷۱۶
۷۶۵	داسیت	hbl۲۲ (مرکز)	۵,۴۳۴۲۴	۷۹۲,۳۸۶۲۷
۷۶۵	داسیت	hb۲۳ (مرکز)	۵,۸۸۱۶۸	۸۰۳,۷۰۶۵

برداشت

بررسی‌های انجام شده گویای تفاوت کانی‌شناسی، بافتی و شیمی کانی داسیت مارکوه و برونوم‌های آمفیبولیتی آن است. از جمله این تفاوت‌ها می‌توان به تفاوت شیمی کانی و سم‌گیری هورنبلندهای قهوه‌ای در برونوم اشاره کرد که گویای شرایط تشکیل متفاوت آن با هورنبلندهای سبز سنگ میزبان است. در این راستا فشار محاسبه شده برای هورنبلندهای سبز موجود در داسیت، بر اساس [۷]، در حدود ۵-۶ Kbar به دست می‌آید که حکایت از اعماق ۲۳،۵۲-۲۴ Km دارد. بنابر روش [۶] دمائی در حدود 804°C - 784°C برای تشکیل آن‌ها برآورد می‌شود. فشار برآورد شده برای تشکیل آمفیبول‌های برونوم‌های آمفیبولیتی موجود در این داسیت، برابر ۷،۵ Kbar-۵ است که با اعماق ۳۰-۲۰ Km برازش دارد. دمای تشکیل آن‌ها حدود 845°C - 777°C به دست آمده است. ارقام محاسبه شده نشان می‌دهد که بالاترین دماهای تشکیل به هسته‌ی قهوه‌ای رنگ هورنبلندهای برونوم و کمترین آن به حاشیه‌ی سبز رنگ آن‌ها و هورنبلندهای سبز سنگ میزبان وابسته است. دلیل آن این است که هورنبلندهای سبز و پلاژیوکلازهای سدیم دارتر موجود در برونوم در رخساره‌ی آمفیبولیت و هورنبلندهای قهوه‌ای، پلاژیوکلازهای کلسیم‌دارتر و کلینوپیروکسن آن‌ها در مرز دگرگونی رخساره‌های آمفیبولیت و گرانولیت و اوایل رخساره اخیر تشکیل شده‌اند. شرایط تبدیل دوباره بخش‌های کناری هورنبلندهای قهوه‌ای به هورنبلند سبز پس سقوط برونوم‌ها به داخل ماگما حاصل شده است؛ جایی که هورنبلندهای سبز سنگ میزبان نیز در حال تشکیل بوده است. بنابراین تبدیل اخیر یک دگرگونی پسروده محسوب می‌شود. با این توضیحات واضح است که برونوم‌ها هیچ ارتباط ژنتیکی اولیه‌ای با سنگ میزبان نداشته‌اند؛ هر چند امکان دارد بعداً آلودگی‌هایی را بر روی ماگما ایجاد کرده باشند.

مراجع

- [۱] مؤسسه جغرافیائی و کارتوگرافی گیتاشناسی، "نقشه راهای ایران"، (۱۳۸۴).
- [۲] یوسف زاده م.ح.، "پتروگرافی، ژئوشیمی و پتروژنز سنگ های آتشفشانی ترشیری منطقه بیرجند- خوسف با نگرشی ویژه بر انکلاوهای موجود در آن"، رساله دکتری، دانشگاه شهید

بهشتی، دانشکده علوم زمین، گروه زمین شناسی (۱۳۸۸)، ۲۸۶ صفحه.

[۳] یوسف زاده م.ح.، "سنگ شناسی و ژئوشیمی سنگ‌های آتشفشانی ترشیری شمال و غرب بیرجند و شناسایی برونوم های آن"، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۲ (۱۳۸۸) ص ۲۱۳-۲۳۰.

[4] Tirrulle R., Bell L.R., Griffis R.J., Camp V.E., "The Sistan Suture Zone of eastern Iran", G. S. A. Bulletin, Vol. 84 (1983) pp. 134-150.

[5] Didier J., Barbarin B., "Enclaves and granite petrology", Elsevier science publishers (1991), 625p.

[6] Vynhal C.R., McSween H.Y., Jr., "Hornblende chemistry in southern Appalachian granitoids Implications for aluminum hornblende thermobarometry and magmatic epidote stability", Am. Mineral. 76 (1991) 176-188.

[7] Schmidt M.W., "Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in hornblende barometer", Contrib Mineral Petrol 110 (1992) 304-310.

[8] Leake B.E., et al., "Nomenclature of amphiboles of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and mineral names", European Journal of Mineralogy 9 (1997) 623-651.

[9] Rieder M., Cavazzini G., D'yakonov Y., Frank-Kamenetskii V.A., Gottardi G., Guggenheim S., Koval P.V., Muller G., Neiva A.M.R., Radoslovich E., Robert J.L., Sassi F.P., Takeda H., Weiss Z., Wones D., "Nomenclature of the micas", The Canadian Mineralogist 36 (1998), x-xx.

[10] Morimoto N., "Nomenclature of pyroxenes", Mineralogical Magazine, 52 (1988) 535-550.

[۱۱] معین وزیری ح.، "پترولوژی سنگ‌های دگرگونی"، انتشارات دانشگاه تربیت معلم (۱۳۷۷)، ۳۳۶ صفحه.

[12] Binns R. A., "Metamorphic pyroxenes from the Broken Hill district, New South Wales", Mineralogical Magazine, 33 (1962) 320-338.

[13] Binns R. A., "The mineralogy of metamorphosed basic rocks from the Willyama complex, Broken Hill district, New South Wales", Mineralogical Magazine, 35, (1965) 306-326, 269-284.

[14] Spear F. S., "An experimental study oh hornblende stability and compositional variability in amphibolite", American Journal of Science, 281 (1981) 697-734.

- [21] Johnson M.C., Malcolm J. Rutherford., "Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks", *Geology* 17 (1989) 837-841.
- [22] Poli S., Schmidt M.W., "A comment on Calcic-amphibole-plagioclase equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer by Blundy, J.D., and Holland T.J.B.", *Contribution to Mineralogy and Petrology* 111 (1992) 273-282.
- [23] 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.
- [24] Holland T., Blundy J., "Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 116 (1994) 433-447.
- [25] Jarrar G., "Mineral chemistry in dioritic hornblendites from Wadi Araba, southwest Jordan", *J. of African Earth Science* 26 (1998) 285-295.
- [26] Blundy J.D., Holland T.J.B., "Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer-reply to the comment of Poli and Schmidt", *Contribution to Mineralogy and Petrology* 111 (1992) 278-282.
- [15] Esawi E.K., "AMPH-CLASS: An excel spreadsheet for the classification and nomenclature of amphibole based on the 1997 recommendations of the international mineralogical Association", *Computers Geosciences*, 30 (2004) 753-760.
- [16] Blundy J.D., Holland T.J.B., "Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer", *Contrib Mineral Petrol* 104 (1990) 208-224.
- [17] Hammarstrom Jane.M., E-AN Zen., "Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer", *American Mineralogist* 71 (1986) 1297-1313.
- [18] Stein E.M., Dietl C., "Hornblende thermometry of granitoids from the central Odenwald Germany and their implications for the geotectonic development of the Odenwald", *Mineralogy and Petrology* 72 (2001) 185-207.
- [19] Helmy H.M., Ahmed A.F., El Mahallawi M.M., Ali S.M., "Pressure, temperature and oxygen fugacity conditions of calc-alkaline granitoids, Eastern Desert of Egypt, and tectonic implications", *Journal of African Earth Science* 38 (2004) 255-268.
- [20] Hollister L.S., et al., "Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calcalkaline plutons", *American Mineralogists* 72 (1987) 231-239.