

The comparison of Varity Amphibole and geothermobarometry Intrusive body of Astaneh (Sanandaj-Sirjan zone)

Z. Tahmasbi¹, M. Khalili¹, A. Ahmadi-khalaji², M. A. Makizadeh¹

1- Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

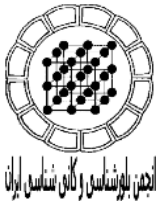
2- Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Lorestan, Khorramabad, Iran

Email: Zahra_tak@yahoo.com

(Received: 18/6/2008, in revised form: 28/1/2009)

Abstract: The results of microprobe analysis indicate four different kinds of amphiboles in Astaneh pluton and its subvolcanic rocks in the Sanandaj-Sirjan zone. The composition of these amphiboles in this area are magnesio hornblende in tonalite and quartz dioritic enclaves, actinolite in granodiorite and monzogranite, pargasite in dacitic enclaves and anthophyllite in one tonalitic sample formed by replacement of orthopyroxene at the rim. All of the amphiboles crystallized at high fO_2 which imply I-type nature. Application of different barometers and thermometers show that pargasite in dacitic enclave formed at higher pressure and temperature (767 °C, 6.6 Kbar) than the magnesio hornblende in quartz dioritic enclave (734°C, 2.8 Kbar) and magnesio hornblende in tonalites (708°C, 1.4 Kbar).

Keywords: *Astaneh, Tonalite, Granodiorite, Sanandaj- Sirjan zone, Thermometry, Barometry.*



مقایسه انواع آمفیبول‌ها و ژئوترموبارومتری توده نفوذی آستانه (زون سنندج - سیرجان)

زهرا طهماسبی^۱، محمود خلیلی^۲، احمد احمدی خلجی^۳، محمد علی مکی زاده^۲

۱- گروه معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان

۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان

۳- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان

پست الکترونیکی: Zahra_tak@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۸۷/۳/۲۹، نسخه نهایی: ۸۷/۱۱/۹)

چکیده: نتایج تجزیه ریزگمانه الکترونی (EPMA) انواع آمفیبول‌ها در توده گرانیتوئیدی آستانه و سنگ‌های نیمه آتشفشانی آن واقع در زون سنندج - سیرجان وجود چهار نوع آمفیبول را در این سنگ‌ها نشان می‌دهد. ترکیب آمفیبول‌ها از منیزوهورنبلند در تونالیت و برونوم‌های کوارتز دیوریتی، اکتینولیت در گرانودیوریت و مونزوگرانیت، پارگازیت در برونوم‌های داسیتی و آنتوفیلیت حاصل از تجزیه اورتوپیروکسن در یک نمونه تونالیتی متغیر است. همه این آمفیبول‌ها در فوگاسیته بالای اکسیژن تشکیل می‌شوند که نشانه سری مگنتیتی ایشیهارا و I بودن نوع این گرانیت‌هاست. روش‌های متفاوت محاسبه فشار و دمای تشکیل آمفیبول‌ها نشان می‌دهد که پارگازیت برونوم‌های داسیتی در گستره فشار و دمای‌های بالاتر (767°C و 6.6 Kbar) نسبت به منیزوهورنبلند در برونوم کوارتز دیوریتی (734°C و 2.8 Kbar) و منیزوهورنبلند در تونالیت‌های منطقه (708°C و 1.4 Kbar) تشکیل شده است.

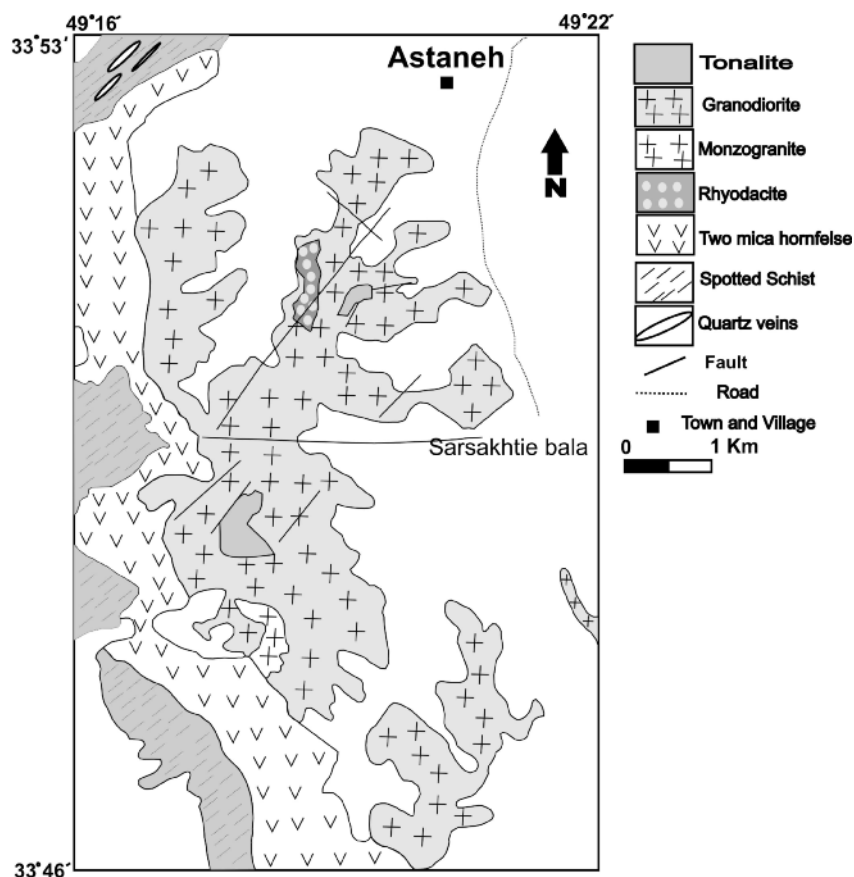
واژه‌های کلیدی: آستانه، تونالیت، گرانودیوریت، تجزیه نقطه‌ای، زون سنندج-سیرجان، دماسنجی، فشارسنجی.

۱- مقدمه

گرانیتوئیدی ناحیه آستانه - گوشه مورد بررسی قرار داده است [۲]. همچنین مسعودی در سال ۱۹۹۷ در رساله دکتری خود مسئله دگرگونی مجاورتی و ایجاد پگماتیت‌های منطقه را مورد بررسی قرار داده است [۳]. این مقاله اولین نتایج ریز پردازش بر روی انواع آمفیبول‌ها در سنگ‌های آذرین منطقه است که در اسپانیا شهر هلو^۱ توسط نگارنده اول طی فرصت مطالعاتی انجام گرفته است. در این مقاله سعی شده است تا با توجه به نتایج بررسی‌های صحرایی، سنگ‌شناسی و نتایج ریز پردازش به بررسی ارتباط بین بخش‌های مختلف توده و شرایط جایگزینی توده (دما و فشار) پرداخته شود.

منطقه مورد بررسی به عرض‌های جغرافیایی 33° تا 45° شمالی و طول جغرافیایی 49° تا 25° تا 49° خاوری محدود شده است. این منطقه از سنگ‌های دگرگون تشکیل یافته و در آن توده گرانیتوئیدی آستانه به طول ۱۰ کیلومتر و پهنای ۳ کیلومتر رخنمون دارد (شکل ۱).

اولین بررسی‌های سیستماتیک و کامل در این منطقه در سال ۱۹۷۴ توسط برتیه و همکاران در قالب رساله دکتری تحت عنوان چینه‌شناسی، سنگ‌شناسی و زمین‌ساختی چهارگوش خرم‌آباد انجام گرفته است [۱] و رادفر در سال ۱۳۶۶ این منطقه را در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان بررسی‌های زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی سنگ‌های



شکل ۱ نقشه ساده شده‌ای از زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی.

۲- زمین‌شناسی عمومی

منطقه مورد بررسی در بخش شمال باختری نوار سنندج - سیرجان و در باختر و جنوب باختری شهرستان اراک قرار گرفته است. قدیمی‌ترین نهشته‌های موجود در این منطقه به تریاس وابسته بوده که در جنوب منطقه رخنمون دارند و شامل سنگ‌های آتشفشان دگرگون با درون لایه‌هایی از مرم‌های نازک تا ضخیم لایه‌اند و جدیدترین نهشته‌های آن، آبرفت‌های عهد حاضر است. مهمترین رویداد زمین‌شناسی که در پی آن توده گرانیتوئیدی آستانه شکل گرفته است، در زمان مزوزوئیک (ژوراسیک میانی) رخ داد است [۴]. با نفوذ توده گرانیتوئیدی در فیلیت‌های منطقه، مجموعه‌ای دگرگون مجاورتی (هورنفلس‌ها) حاصل شده است. مجموعه کانی‌های واقع در این سنگ‌ها شامل مسکوویت، بیوتیت، آلپیت، کلریت و اپیدوت است که همزیستی این مجموعه نشان می‌دهد رخساره دگرگون پیرامون توده نفوذی آستانه از نوع رخساره آلپیت-

اپیدوت هورنفلس است. نکته قابل توجه اینکه در حاشیه سنگ‌های نیمه آتشفشانی ریوداسیتی، مجموعه کانی‌های متشکل از کاردوم، اسپینل و آنورتیت (بر اساس بررسی‌های انجام شده روی این سنگ‌ها) دیده می‌شود که حاکی از وجود رخساره ای با دما و فشار بالاتر در حاشیه این سنگ‌هاست.

۳- روش بررسی

بررسی‌های صحرایی و نمونه برداری از واحدهای مختلف سنگ‌شناسی توده نفوذی آستانه در طول سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۶ انجام شده است. پس از تهیه مقاطع نازک و بررسی دقیق سنگ شناسی از سنگ‌های توده نفوذی، سنگ‌های نیمه عمیق و برونیوم‌های آن‌ها، تعداد ۱۲ مقطع نازک انتخاب شدند. این مقاطع برای تجزیه نقطه‌ای با پودر الماس ۶، ۳ و یک میکرون صیقل داده شدند و سپس در این نمونه‌ها ۶۷ نقطه از کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز با دستگاه ابر ریز پردازنده JXA-8200 در شهر هلواای اسپانیا مورد بررسی قرار

آلومینیم، انستاتیت برای منیزیم، فایالیت برای آهن و منگنز و آپاتیت برای فسفر بکار رفته‌اند. جدایش مقادیر Fe^{3+} و Fe^{2+} در فرمول ساختاری آمفیبول با استفاده از روش پیشنهادی لیک [۵] انجام شده است.

گرفتند. از هر یم از آمفیبول‌ها و پلاژیوکلازها نمونه‌هایی به عنوان معرف در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده‌اند. ولتاژ شتاب دهنده دستگاه در طول کار ۱۵ کیلوولت و شدت جریان ۵ نانوآمپر بوده است. استانداردهای سیلیکاتی ژادئیت برای سدیم، ولاستونیت برای کلسیم، پتاسیم فلدسپار برای پتاسیم و

جدول ۱ خلاصه داده‌های حاصل از تجزیه نقطه‌ای کانی آمفیبول در واحدهای مختلف سنگی که تنها تجزیه‌های معرف (از هر نمونه دو نقطه) ارائه شده است.

	آتوفیلیت		پارگازیت در اتکلاو داسیتی		اکتینولیت در گرانودیوریت		منیزو هورنبلند در تونالیت		منیزو هورنبلند اتکلاو تونالیتی	
SiO ₂	۵۳/۹۵	۵۴/۲۶	۴۲/۳۱	۴۳/۴۲	۵۱/۱۹	۵۱/۷۴	۴۹/۷۶	۴۹/۵۳	۴۷/۷۴	۴۷/۷۶
TiO ₂	۰/۱۰	۰/۰۶	۳/۲۷	۲/۶۷	۰/۲۰	۰/۲۲	۰/۵۲	۰/۵۹	۱/۳۲	۱/۳۷
Al ₂ O ₃	۰/۶۵	۰/۶۷	۱۱/۸۳	۱۱/۰۲	۳/۹۷	۳/۸۳	۴/۵۶	۴/۵۵	۶/۸۳	۶/۵۹
FeO*	۲۳/۴۷	۲۲/۷۲	۱۰/۳۶	۱۱/۷۷	۱۲/۴۹	۱۲/۶۵	۱۴/۳۱	۱۴/۴۴	۱۵/۲۱	۱۵/۶۴
MgO	۱۷/۱۵	۱۸/۰۴	۱۵/۲۷	۱۴/۳۵	۱۶/۰۳	۱۵/۷۲	۱۴/۳۶	۱۴/۷۴	۱۲/۳۱	۱۲/۲۸
MnO	۰/۷۰	۰/۶۱	۰/۱۴	۰/۲۲	۰/۲۹	۰/۳۴	۰/۲۷	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۲۹
CaO	۰/۹۰	۰/۵۴	۱۱/۳۳	۱۱/۰۱	۱۱/۰۵	۱۱/۱۷	۱۱/۱۸	۱۰/۹۶	۱۱/۰۸	۱۱/۱۰
Na ₂ O	۰/۰۶	۰/۰۴	۲/۴۰	۲/۴۱	۰/۵۸	۰/۵۴	۰/۶۴	۰/۶۵	۰/۶۱	۰/۶۰
K ₂ O	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۶۴	۰/۴۹	۰/۳۴	۰/۲۶	۰/۳۸	۰/۳۵	۰/۴۸	۰/۵۰
Sum	۹۷/۰۹	۹۷/۰۵	۹۸/۴۲	۹۷/۷۶	۹۶/۷۰	۹۶/۷۱	۹۶/۱۴	۹۶/۲۶	۹۶/۰۱	۹۶/۲۱
T-sites										
Si	۷/۹۵	۷/۹۶	۶/۲۰	۶/۳۹	۷/۵۰	۷/۵۵	۷/۳۹	۷/۳۶	۷/۱۵	۷/۱۵
Aliv	۰/۰۵	۰/۰۴	۱/۸۰	۱/۶۱	۰/۵۰	۰/۴۵	۰/۶۱	۰/۶۴	۰/۸۵	۰/۸۵
Al(total)	۰/۱۱	۰/۱۲	۲/۰۵	۱/۹۱	۰/۶۹	۰/۶۶	۰/۸۰	۰/۸۰	۱/۲۱	۱/۱۶
M1,2,3 sites										
Alvi	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۲۵	۰/۳۱	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۳۵	۰/۳۱
Ti	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۳۶	۰/۳۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۱۵	۰/۱۵
Fe ₃₊	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Mg	۳/۷۷	۳/۹۴	۳/۳۴	۳/۱۵	۳/۵۰	۳/۴۲	۳/۱۸	۳/۲۶	۲/۷۵	۲/۷۴
Mn	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۴
Fe ₂₊	۱/۰۷	۱/۰۰	۱/۰۴	۱/۲۲	۱/۲۵	۱/۳۰	۱/۵۴	۱/۴۹	۱/۷۱	۱/۷۶
Ca	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰
M4 site										
Fe	۱/۸۳	۱/۸۹	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۸	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۳۱	۰/۱۹	۰/۲۰
Ca	۰/۱۴	۰/۰۸	۱/۷۷	۱/۷۴	۱/۷۲	۱/۷۵	۱/۷۶	۱/۶۹	۱/۷۸	۱/۷۸
Na	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۲
	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰
A site										
Ca	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰
Na	-۰/۰۱	-۰/۰۲	۰/۶۸	۰/۶۵	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۱۴	۰/۱۵
K	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۱۰
Sum A	-۰/۰۱	-۰/۰۲	۰/۸۱	۰/۷۵	۰/۲۴	۰/۱۹	۰/۲۸	۰/۳۱	۰/۲۳	۰/۲۵
Mg/(Mg+Fe ₂₊)	۰/۷۸	۰/۸۰	۰/۷۶	۰/۷۲	۰/۷۴	۰/۷۲	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۶۲	۰/۶۱
Fe/(Fe+Mg)	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۳۰	۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۴۱	۰/۴۲

جدول ۲ تجزیه ریزپردازشی پلاژیوکلاز در تعادل با آمفیبول منیزیهورنبلند در تونالیت، برونوم کوارتز دیوریتی و پلاژیوکلاز در تعادل با پارگازیت در برونوم داسیتی.

	پلاژیوکلاز در برونوم کوارتز دیوریتی				پلاژیوکلاز در تونالیت			پلاژیوکلاز در برونوم	
SiO ₂	۵۶/۷۷	۵۲/۳۱	۵۲/۴۷	۵۲/۳۰	۵۸/۲۷	۵۷/۶۲	۵۸/۰۷	۶۱/۵۸	۶۱/۶۰
TiO ₂	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۶
Al ₂ O ₃	۲۷/۰۶	۲۸/۷۰	۲۹/۴۶	۲۹/۵۷	۲۵/۹۷	۲۶/۳۲	۲۵/۹۱	۲۳/۵۵	۲۳/۸۱
Cr ₂ O ₃	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۱۴	۰/۰۰
FeO	۰/۱۲	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۲۰	۰/۲۶	۰/۱۶	۰/۱۶
MnO	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰
MgO	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۲
CaO	۸/۶۰	۱۱/۱۰	۱۱/۸۵	۱۲/۳۲	۸/۰۱	۸/۵۲	۷/۷۹	۴/۵۴	۴/۶۹
Na ₂ O	۶/۵۹	۵/۳۳	۴/۶۱	۴/۶۷	۷/۰۶	۶/۶۵	۶/۸۵	۹/۲۵	۹/۰۶
K ₂ O	۰/۲۸	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۱۰	۰/۱۷	۰/۱۸
NiO	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۱
TOTAL	۹۹/۵۶	۹۸/۶۱	۹۸/۶۵	۹۹/۲۵	۹۹/۷۱	۹۹/۴۳	۹۹/۴۳	۹۹/۵۳	۹۹/۶۳
کاتیون‌ها بر اساس ۱۸ اکسیژن محاسبه شده است.									
Si	۲/۵۶	۲/۴۴	۲/۴۱	۲/۳۹	۲/۶۲	۲/۶۰	۲/۶۲	۲/۷۵	۲/۷۵
Al	۱/۴۴	۱/۵۵	۱/۵۹	۱/۵۹	۱/۳۸	۱/۴۰	۱/۳۸	۱/۲۴	۱/۲۵
Fe ⁺⁺	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
Ca	۰/۴۲	۰/۵۴	۰/۵۸	۰/۶۰	۰/۳۹	۰/۴۱	۰/۳۸	۰/۲۲	۰/۲۲
Na	۰/۵۸	۰/۴۷	۰/۴۱	۰/۴۱	۰/۶۱	۰/۵۸	۰/۶۰	۰/۸۰	۰/۷۸
K	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
Xab	۰/۵۷	۰/۴۶	۰/۴۱	۰/۴۱	۰/۶۱	۰/۵۸	۰/۶۱	۰/۷۸	۰/۷۷
XAn	۰/۴۱	۰/۵۳	۰/۵۹	۰/۵۹	۰/۳۸	۰/۴۱	۰/۳۸	۰/۲۱	۰/۲۲

۴- سنگ‌شناسی توده
بخش اعظم توده گرانیتوئیدی آستانه، ترکیب گرانودیوریتی دارد و به صورت یک توده نفوذی چند شاخه‌ای و کوچک نمایان می‌شود (شکل ۱). درون این توده، سنگ‌های نیمه آتشفشانی ریوداسیتی به صورت زائده همراه با توده‌های نفوذی کوچکی با ترکیبی بیشتر به صورت مونزوگرانییتی و تونالیتی ظاهر می‌شوند. در اینجا به اختصار این تنوع سنگی را معرفی می‌کنیم.

۴-۱- واحد گرانودیوریت

این واحد بخش بزرگ توده نفوذی موجود در منطقه را تشکیل می‌دهد که به شدت هوازده و فرسوده بوده و ریخت‌شناسی کلی آن به صورت تپه‌های فرسوده کم ارتفاع است. ترکیب سنگ‌های این واحد از گرانودیوریت تا تونالیت متغیر است. این

۴-۲- واحد تونالیت

این سنگ‌ها در درون واحد گرانودیوریت برونزد دارند (شکل ۱) و ارتفاعات منطقه را تشکیل داده‌اند و خاکستری رنگ و از نظر درجه رنگین مزوکرات تند. ترکیب سنگ‌شناسی آن از تونالیت

ریز پردازشی آمفیبول در واحدهای سنگی مختلف منطقه (تجزیه‌های معرف) در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند. آمفیبول‌های موجود در سنگ‌های منطقه مورد بررسی در دو گروه آمفیبول‌های Fe-Mg-Mn و آمفیبول‌های کلسیک قرار می‌گیرند [۷]. آمفیبول حاصل از تجزیه حاشیه اورتوپروکسن انستاتی از نوع Fe-Mg-Mn یعنی آنتوفیلیت (ثانویه) (شکل ۲ الف و ت) است در صورتی که آمفیبول تونالیت‌ها و برونوم-های کوارتزیدیوریتی از نوع کلسیک (منیزبوهورنبلند و اولیه) (شکل ۲ ج و ح) است. همچنین آمفیبول گرانودیوریت‌ها از نوع اکتینولیت (ثانویه) و آمفیبول برونوم‌های داسیتی از نوع پارگازیت و اولیه است (شکل ۲، ب).

بنابراین رده بندی، همه آمفیبول‌های تجزیه شده جزء گروه آمفیبول‌های کلسیک (جز نمونه آنتوفیلیت که حاصل تجزیه اورتوپروکسن است که در گروه اول قرار می‌گیرد) هستند که شاخص توده‌های نوع I هستند [۸] و چنانکه در شکل ۳ دیده می‌شود همه آن‌ها در زیر گروه منیزبوهورنبلند و تا حدودی اکتینولیت قرار می‌گیرند.

آمفیبول‌های پارگازیتی با رنگ قهوه‌ای و به صورت فنوکریست، از جمله کانی‌های شاخص برونوم‌های داسیتی واقع در سنگ‌های نیمه آتش فشانی منطقه است که همراه با دو نوع پلاژیوکلاز یکی با $An = 30$ در زمینه و دیگری با $An = 92-86$ به صورت فنوکریست دیده می‌شود. شواهد بافتی نظیر خود شکل بودن فنوکریست‌های پارگازیت در زمینه ریز دانه نشان می‌دهد که پارگازیت در برونوم‌های داسیتی اولین فازی است که متبلور شده است [۶]. پارگازیت از کانی‌های شاخص سنگ‌های آندزیتی و داسیتی است که حضور آن در سنگ‌های آتشفشانی توسط پژوهشگران مختلفی به اختلاط میان ماگما‌های بازالتی و ریوداسیتی نسبت داده می‌شود [۹، ۱۰].

در مورد شرایط تشکیل اورتوپروکسن در سنگ‌های گرانیته و گرانودیوریتی باید گفت که در دمای حدود ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و میزان آب کمتر از ۳/۵wt% اورتوپروکسن تنها فاز فرومنیزین پایدار است ولی چنانچه دما به زیر ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و میزان آب به ۳/۵wt% برسد آمفیبول جایگزین اورتوپروکسن می‌شود [۱۱، ۱۲].

تا گرانودیوریت تغییر می‌کند. کانی‌های اصلی این سنگ‌ها شامل پلاژیوکلاز، بیوتیت، آمفیبول و به مقدار کمتر پتاسیم فلدسپار و کوارتزند. آپاتیت و زیرکن بیشتر کانی‌های فرعی این سنگ‌ها را می‌سازند.

۴-۳- سنگ‌های نیمه آتشفشانی ریوداسیتی

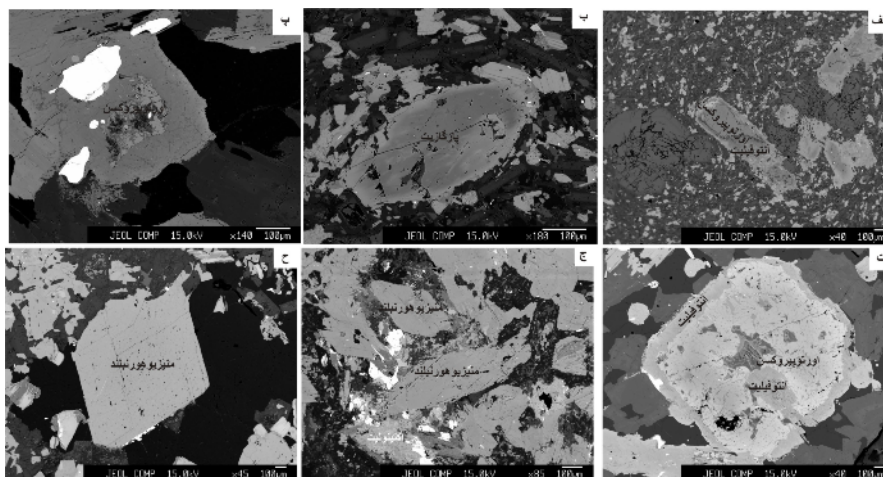
این سنگ‌ها به صورت زائده مستقل و بسیار کوچک درون واحد گرانودیوریت قرار دارند (شکل ۱). سنگ‌های یاد شده ریز دانه و به رنگ روشن‌اند. کانی‌های اصلی تشکیل دهنده شامل پلاژیوکلاز، کوارتز، پتاسیم فلدسپار و بیوتیت‌اند و از کانی‌های فرعی آن‌ها می‌توان به زیرکن و آپاتیت اشاره کرد که به صورت نفوذی در درون کانی‌های دیگر دیده می‌شوند.

۴-۴- برونوم‌ها

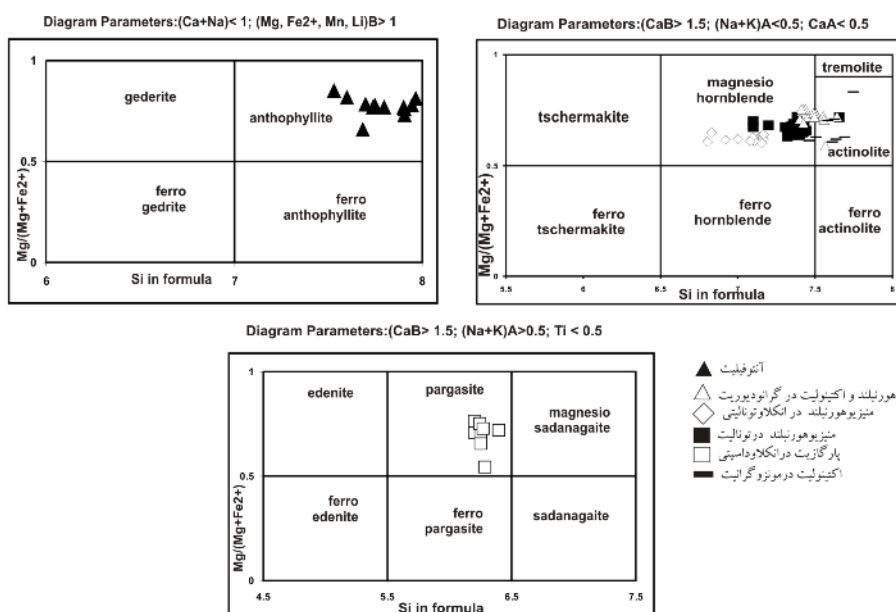
توده گرانیته‌ای آستانه دارای برونوم‌های متنوعی است به طوری که برونوم‌های واقع در گرانودیوریت‌ها ترکیب گابرو، دیوریت، کوارتزیدیوریت تا تونالیت-گرانودیوریت و برونوم‌های واقع در ریوداسیت‌ها ترکیب داسیتی دارند. برونوم‌ها بیشتر در فازهای مافیک‌تر و بخصوص در بخش‌های حاشیه‌ای مشاهده می‌شوند و اندازه آن‌ها از چند سانتیمتر تا چند دسیمتر متغیر است و شکل آن‌ها از حالت تقریباً زاویه‌دار تا کاملاً گرد شده تغییر می‌کند ولی به طور کلی شکل‌های تقریباً بیضوی غالب دارند. همه برونوم‌های منطقه مورد مطالعه از جنس ریز دانه‌ای مافیک هستند. برونوم‌های داسیتی معمولاً بافت ساب افیتییک دارند و مجموعه کانی‌های آن‌ها آمفیبول، پلاژیوکلاز، بیوتیت، ارتوکلاز و کوارتز است [۶].

۵- شیمی کانی آمفیبول در واحدهای سنگی مختلف توده

آمفیبول در واحدهای سنگی آستانه با رنگ‌های متنوعی نمایان می‌شوند که نشانگر ترکیب شیمیایی متفاوت آن‌ها در انواع سنگ‌هاست. در گرانودیوریت‌ها و مونزوگرانیته‌ها به صورت نیمه شکل‌دار به رنگ قهوه‌ای تا زرد دیده می‌شوند. در یک نمونه از سنگ‌های تونالیتی در حاشیه اورتوپروکسن هاله‌ای از اورتوآمفیبول مشاهده می‌شود (شکل ۲ الف و ت). در سنگ‌های کوارتزیدیوریتی، آمفیبول به صورت شکل‌دار با چند رنگی سبز تا آبی است. همچنین در برونوم‌های داسیتی به صورت شکل‌دار به رنگ سبز در زیر میکروسکوپ دیده می‌شود. نتایج



شکل ۲ تصاویری از آمفیبول‌ها در سنگ‌های مختلف منطقه آستانه. الف: آنتوفیلیت در حاشیه ارتوپروکسن انستاتیت در برونیوم داسیتی. ب و پ: پارگازیت در برونیوم داسیتی. ت، اورتوپروکسن و آنتوفیلیت در تونالیت آستانه. ج: منیزیوهورنبلند در تونالیت. ح: منیزیوهورنبلند در برونیوم تونالیتی.



شکل ۳ تقسیم‌بندی انواع آمفیبول در منطقه آستانه بر اساس روش لیک [۱۵].

در نمودار $Al^{IV} / Fe^{tot} + Mg$ نسبت به $Fe^{tot} / Fe^{tot} + Mg$ پارگازیت و منیزیوهورنبلند در گستره با فوگاسیته بالای اکسیژن قرار می‌گیرند (شکل ۴) که نشان می‌دهند توده گرانیوتییدی آستانه در ارتباط با مرز ورقه‌های همگرا تشکیل شده است [۱۳، ۱۴]. همچنین حضور مگنتیت در این سنگ‌ها دلالت بر سری مگنتیتی یا I بودن این گرانیت‌ها دارد [۱۵].

۵-۲- ژئوترموبارومتری آمفیبول

۵-۱- فوگاسیته اکسیژن

فوگاسیته اکسیژن از جمله فاکتورهایی است که مجموعه کانی‌های سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یکی از روش‌های ارزیابی فوگاسیته اکسیژن در سنگ‌های نفوذی، بررسی ترکیب آمفیبول‌هایی است که از نظر شیمیایی دارای $Al^{IV} > 0.75$ و $Fe^{tot} / Fe^{tot} + Mg > 0.3$ هستند [۱۳]. از میان آمفیبول‌های تجزیه شده منطقه، پارگازیت و منیزیوهورنبلندهای تونالیت این شرایط را دارا هستند.

آمفیبول بهترین کانی برای دما- فشارسنجی در سنگ‌های آذرین آهکی- قلیایی است، زیرا تقریباً در همه توده‌های نفوذی آهکی- قلیایی اسیدی و حدواسط، صرف نظر از ترکیبات بازیک، متبلور می‌شود. همچنین این کانی در گستره گسترده

در سنگ‌های تونالیتی و گرانودیوریتی با فشار کمتر از ۲ کیلوبار تأثیر دما روی Al^{tot} به قدری زیاد است که مستقل از فشار عمل می‌کند، لذا برای محاسبه فشار تشکیل آمفیبول در سنگ‌های گرانیتی منطقه آستانه از جدیدترین فشارسنجی که خطای اندازه گیری کمتر و در فشارهای کمتر از ۲ کیلوبار نیز قابل کاربرد است، یعنی روش فشارسنجی اشیمیت (۱۹۹۲) به صورت زیر استفاده شده است [۱۶]:

$$P (\pm 0.6 \text{Kbar}) = 4.76 Al^{tot} - 3.01$$

در این روش آمفیبول پارگازیتی برونوم‌های داسیتی فشار $0.6 \pm 6.58 \text{Kbar}$ ، آمفیبول منیزیوهورنبلند برونوم کوارتزیدیوریتی $0.6 \pm 2.75 \text{Kbar}$ و آمفیبول منیزیوهورنبلند تونالیت فشار $0.6 \pm 1.37 \text{Kbar}$ را نشان می‌دهند.

از طرف دیگر با توجه به نمودار شکل ۵ الف که بر اساس مقادیر Al^{tot} نسبت به $Fe/Fe + Mg$ ترسیم شده است [۱۶] می‌توان گستره فشار ۶/۵-۷ کیلوبار را برای پارگازیت در برونوم داسیتی، ۳-۲/۵ کیلوبار را برای منیزیوهورنبلند در برونوم کوارتزیدیوریتی و ۱/۵-۰/۹ کیلوبار را برای منیزیوهورنبلند در تونالیت برآورد کرد. وجود بافت گرانوفیری و پورفیروئیدی در مقاطع میکروسکوپی سنگ‌های تونالیتی نیز فشار کمتر از ۲ کیلوبار را برای این سنگ‌ها تأیید می‌کند.

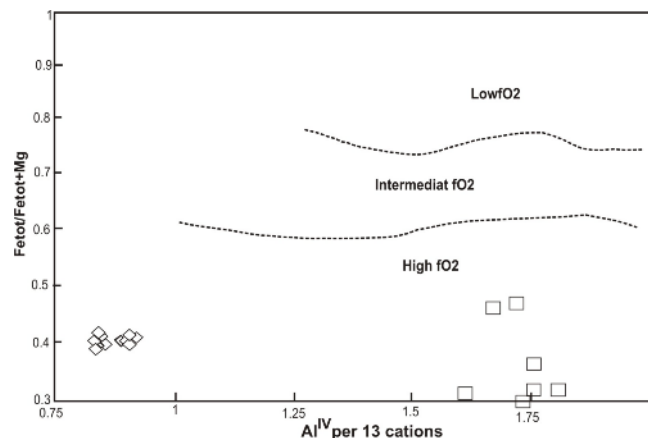
برای محاسبه دمای تقریبی سه واحد سنگی یاد شده نیز با استفاده از نمودار شکل ۵، ب که بر اساس مقادیر فشار (کیلوبار) نسبت به Al^{tot} رسم شده است [۱۶، ۲۰] می‌توان گستره دمایی بین 800°C - 750°C برای پارگازیت در برونوم داسیتی، 760°C - 730°C برای برونوم کوارتزیدیوریتی و 750°C - 700°C را برای تونالیت برآورد کرد.

ای از فشار-دما از ۱ تا 23Kbar و 400 تا 1150 درجه سانتی‌گراد پایدار است [۷، ۸].

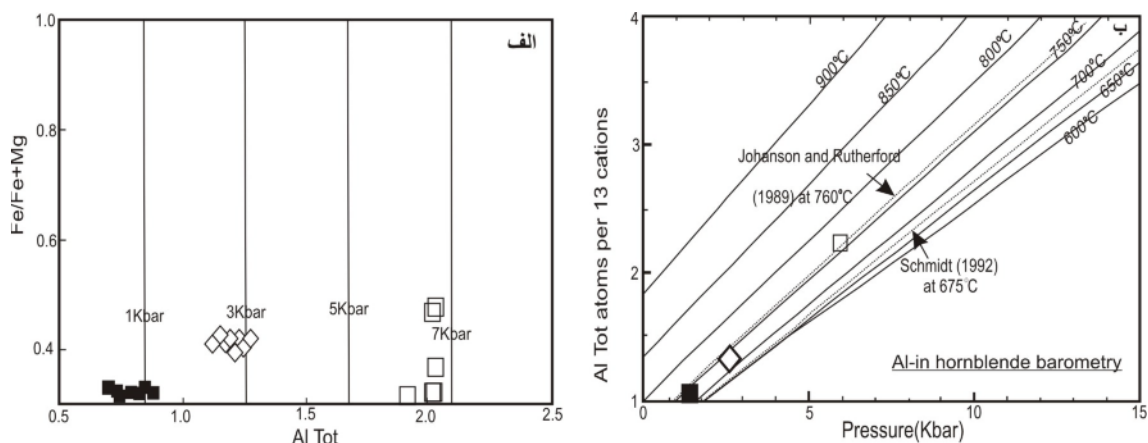
روش‌های تعیین عمق (فشار) یک توده نفوذی بر اساس میزان Al در آمفیبول است. ژئوبارومترهای Al در آمفیبول برای مجموعه کوارتز-قلیایی فلدسپار-پلاژیوکلاز-بیوتیت - تیتانیت - مگنتیت یا ایلمنیت کاربرد دارد که با توجه به اینکه مگنتیت و مجموعه بالا در گرانیت‌های آستانه معمول است لذا می‌توان با استفاده از مقدار Al در آمفیبول، فشار تبلور آمفیبول را محاسبه کرد.

هورنبلند در دماهای نزدیک به مرز انجماد علاوه بر کانی-های یاد شده با مذاب و فاز شاری به تعادل می‌رسد، به دنبال انجماد و سردایش ماگما تعادل هورنبلند با کانی‌های یاد شده نقصان می‌یابد تا در نهایت ماگما کاملاً متبلور شود. بنابراین ترکیب هورنبلند، فشار (عمق تبلور) انجماد ماگما را بازتاب می‌دهد [۱۶، ۱۷]. در اینجا فشار تبلور آمفیبول پارگازیت در برونوم‌های داسیتی، منیزیوهورنبلند در برونوم-های کوارتزیدیوریتی و در سنگ‌های تونالیتی محاسبه شده است.

تاکنون روش‌های متعددی برای برآورد فشار از روی ترکیب هورنبلند ارائه شده‌اند [۱۳، ۱۶، ۱۸ تا ۲۲]. در همه این روش‌ها (جز روش آندرسون و اشیمیت [۱۳]) فشار فقط از روی میزان آلومینیم موجود در هورنبلند و بدون توجه به پارامترهای دیگری چون دما محاسبه می‌شود. بیشتر فشارسنجی‌های یاد شده در فشارهای بالا کاربرد دارند و به دلیل فشار پایین سنگ-های توده نفوذی منطقه (تونالیت‌ها) مقادیر به دست آمده گاهی کمتر (و حتی منفی) از میزان خطای فرمول فشارسنجی است که با فشار منطقه سازگاری ندارد. [۱۹] معتقد است که



شکل ۴ Al^{IV} نسبت به $Fe^{tot}/Fe^{tot}+Mg$ نشان می‌دهد که پارگازیت و منیزیوهورنبلند در فوگاسیته بالای اکسیژن تشکیل می‌شوند [۱۳]. علائم مشابه شکل ۳ هستند.



شکل ۵ الف: Al^{tot} نسبت به $Fe/Fe + Mg$ نشان می‌دهد که پارگازیت در گستره فشار بین ۶-۷، منیزیهورنبلند در برونوم کوارتز دیوریتی-تونالیتی فشاری بین ۲-۳ و منیزیهورنبلند در تونالیت در گستره فشار نزدیک به یک کیلو بار واقع می‌شود. ب: فشار بر اساس کیلو بار نسبت به Al^{tot} نشانگر تبلور پارگازیت در برونوم داسیتی بین ۷۵۰-۸۰۰، منیزیهورنبلند برونوم تونالیتی ۷۶۰-۷۳۰ و منیزیهورنبلند تونالیت ۷۵۰-۷۰۰ درجه سانتی گراد است. علائم مشابه شکل ۳ هستند.

هولاند و بلاندى [۲۴] دماسنج دیگری را بر اساس این زوج کانی ارائه کرده‌اند که در سنگ‌های آذرین و دگرگون کوارتزار و بدون کوارتز کاربرد دارد. این دماسنج بر پایه رابطه زیر طراحی شده است:

$$T [\pm 313] = \{78.44 + Y_{ab-an} - 33.6X_{Na}^{M4} - (66.8 - 2.92P [kbar]) X_{Al}^{M2} + 78.5X_{Al}^{T1} + 9.4X_{Na}^A\} / 0.0721 - R \ln [(27X_{Na}^{M4} X_{Si}^{T1} X_{An}^{plg}) / (64X_{Ca}^{M4} X_{Al}^{T1} X_{Ab}^{plg})]$$

پارامترهای استفاده شده در همسنجی بالا شامل موارد زیر است:

$$X_{Si}^{T1} = (Si - 4) / 4$$

$$X_{Al}^{T1} = (8 - Si) / 4$$

$$X_{Al}^{M2} = (Al + Si - 8) / 2$$

$$X_K^A = K$$

$$X_{vac}^A = 3 - Ca - Na - K - Cm$$

$$X_{Na}^A = Ca + Na + Cm - 2$$

$$X_{Na}^{M4} = (2 - Ca - Cm) / 2$$

$$X_{Ca}^{M4} = Ca / 2$$

$$Cm = Si + Al + Ti + Fe^{3+} + Fe^{2+} + Mg + Mn - 13$$

$$R = 0.0083144 \text{ (kJ / k mol)}$$

در این رابطه، T دمای تعادلی بر حسب کلون و P فشار بر اساس کیلو بار است. Mg , Fe , Al , Si , Mn معرف تعداد کاتیون‌ها در فرمول ساختاری آمفیبول‌ها هستند. مقدار Y_{Ab-An} در فرمول بالا به صورت زیر به دست می‌آید.

$$X_{Ab} > 0.5, Y_{Ab-An} = 3KJ \quad X_{Ab} < 0.5, Y_{Ab-An} = 12(2X_{Ab} - 1) + 3KJ$$

۵-۳- دماسنجی پلاژیوکلاز-هورنبلند

در مورد دماسنجی به روش زوج هورنبلند-پلاژیوکلاز اتفاق نظر بین پژوهشگران وجود ندارد، ولی یکی از روش‌های متداول برای دماسنجی سنگ‌های آهکی-قلیایی محسوب می‌شود.

بلاندى و هولاند [۲۳] بر اساس واکنش آدنیت-ترمولیت، رابطه زیر را برای دماسنجی پلاژیوکلاز-هورنبلند پیشنهاد کرده‌اند. این دماسنج در سنگ‌های آذرین فلسیک و حدواسطی که حاوی کوارتز، پلاژیوکلاز با $An < 0.92$ و آمفیبول‌هایی با $Si < 7/8$ کاربرد دارد و برای دماهای بین ۵۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد قابل استفاده است.

$$T [\pm 311^\circ K] = 0.677 P [Kbar] - 48.98 + Y_{Ab} / 0.0429 - 0.0083144 \ln (Si - 4) / (8 - Si) X_{Ab}^{plg}$$

در این رابطه T دمای تعادلی بر حسب کلون، P فشار بر حسب کیلو بار، Si تعداد کاتیون‌های سیلیس در فرمول ساختاری آمفیبول، X_{Ab}^{plg} میزان درصد آلبیت در پلاژیوکلاز است. مقدار Y_{Ab} از روابط زیر به دست می‌آید.

$$X_{Ab} > 0.5, Y_{Ab} = 0$$

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

در این دماسنجی برای پارگازیت در برونوم داسیتی دمای $760^\circ C$ ، منیزیهورنبلند در برونوم کوارتز دیوریتی $738^\circ C$ و در تونالیت‌های توده آستانه $706^\circ C$ برآورد می‌شود.

تونالیت‌های منطقه ۱/۴ کیلوبار، برونوم داسیتی ۶/۶ کیلوبار و برونوم کوارتز دیوریتی ۲/۸ کیلوبار است. فشار بالاتر آمفیبول-های موجود در برونوم داسیتی نشان می‌دهد که آمفیبول‌ها در عمق زیاد متبلور شده و بدون تغییر شیمیایی زیاد تا سطوح بالاتر رسیده‌اند و سرانجام همراه با ماگمای موجود در سنگ داسیتی متبلور شده‌اند. فشار سنجی تونالیت و کوارتز دیوریت عمق تبلور را ۵-۸ Km برای این سنگ‌ها نشان می‌دهد که با شواهد سنگ‌شناختی مانند داشتن بافت پورفیری نیز تأیید می‌شود. از این عمق می‌توان برای بررسی چگونگی صعود ماگما و جایگیری آن، ضخامت پوسته منطقه هنگام نفوذ توده آذرین و بررسی مدل‌های ژئودینامیکی استفاده کرد. دماسنجی به روش پلاژیوکلاز-هورنبلند هولاند و بلاندی [۲۴]، میانگین دمای تونالیت‌های توده نفوذی 708°C ، برونوم داسیتی 767°C و برونوم کوارتز دیوریتی 734°C را برآورد می‌کند که نزدیک و سازگار با روش وینهل [۲۵] است. مجموعه کانی‌های دگرگون مجاورتی منطقه نیز با دمای برآورد شده توده نفوذی سازگار است. وجود مجموعه کانی‌های متشکل از کزندوم، اسپینل و آنورتیت در حاشیه سنگ‌های نیمه آتشفشانی منطقه نیز نشان از رخساره با دما و فشار بالا می‌دهد که با دما و فشارسنجی برونوم‌های این منطقه تا حدود زیادی سازگاری دارد.

مراجع

- [1] Berthier F., Billiaul H.P., Halbronn B., Marizot P., "Etude Stratigraphique, petrologique et structural de La région de khorramabad (Zagros, Iran)", Thèse De 3e cycle, Grenoble, (1974), 282p.
- [۲] رادفر، ج، "بررسی‌های زمین‌شناسی و پترولوژی سنگ‌های گرانیتوئیدی ناحیه آستانه-گوشه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه تهران (۱۳۶۶).
- [3] Masoudi F., "Contact metamorphism and pegmatite development in the region SW of Arak, Iran", (1997). Ph D Thesis, Leeds University, UK.
- [4] Ahmadi-Khalaji A., Esmaeily D., Valizadeh M.V., Rahimpour-Bonab H., "Petrology and Geochemistry of the Granitoid Complex of

دمای تعادلی تبلور کانی پارگازیت در برونوم داسیتی بر اساس روش هولاند و بلاندی 767°C ، منیزیوهورنبلند در برونوم کوارتز دیوریتی 734°C و منیزیوهورنبلند در تونالیت‌های آستانه 708°C برآورد می‌شود که به روش بلاندی و هولاند بسیار نزدیک است.

وینهل و همکاران نیز رابطه زیر را در فشارهای ۱-۲۰ کیلوبار و فوگاسیته HM-QFM برای تعیین دمای تعادل هورنبلند‌های همزیست با پلاژیوکلاز ارائه کرده‌اند [۲۵]:

$$T = 654/9 + 25/3P$$

بر اساس فرمول بالا دمای پارگازیت در برونوم‌های داسیتی 820°C و منیزیوهورنبلند در برونوم‌های کوارتز دیوریتی آستانه 724°C و منیزیوهورنبلند در سنگ‌های تونالیتی 690°C است که با داده‌های بلاندی و هولاند سازگار و نزدیک است. با توجه به بالا بودن فشار در داسیت‌های منطقه به نظر می‌رسد که پارگازیت همراه با پلاژیوکلاز کلسیک به صورت فنوکریست از عمق زیاد ریشه گرفته و بدون تغییر شیمیایی به نزدیکی سطح زمین رسیده و سنگ‌های نیمه آتش فشانی منطقه را متبلور ساخته‌اند، ولی شواهد سنگ‌شناختی مانند بافت پورفیری سنگ‌ها و وجود بافت‌های میرمکتیتی و گرانوفیری حاکی از عمق نسبتاً کم توده آستانه (۵-۸ کیلومتر) است.

۶- بحث و برداشت

نتایج ریز پردازش آمفیبول‌های توده نفوذی و سنگ‌های نیمه آتشفشانی منطقه آستانه وجود چهار نوع آمفیبول پارگازیت، آنتوفیلیت، منیزیوهورنبلند و اکتینولیت را نشان می‌دهد. غالب آمفیبول‌ها بر اساس رده بندی لیک [۷] در گروه آمفیبول‌های کلسیک قرار می‌گیرند. ویژگی بارز همه آن‌ها تشکیل در فوگاسیته بالای اکسیژن و سازگار با محیط‌های در ارتباط با مرز ورقه‌های همگرا و گرانیت‌های نوع I است. وجود پارگازیت به صورت فنوکریست‌های خود شکل همراه با پلاژیوکلاز با آنورتیت بالا در یک زمینه ریز دانه از پلاژیوکلاز الیگوکلاز-آندزین برونوم داسیتی نشانگر اختلاط ماگمایی در سنگ‌های نیمه آتشفشانی منطقه است. با استناد به فشارسنجی اشمیت [۱۶]، میانگین فشار حاکم بر توده نفوذی در زمان جایگزینی

- [12] Naney M. T., Swanson S., "The effect of Fe and Mg on crystallization in granitic systems", *American Mineralogist* 65(1980) 639-653.
- [13] 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.
- [14] Anderson J.L., "Proterozoic anorogenic granite plutonism of North America", *Geological Society of America Memoir* 161(1983) 133-152.
- [15] Ishihara S., "The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks", *Mining Geology* 27(1977) 293-305.
- [16] Schmidt M.W., "Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 110 (1992) 304-310.
- [17] Stone D., "Temperature and pressure variations in suites of Archean felsic plutonic rocks, Berens River area, Northwest superior province, Ontario", *Canada. Canadian Mineralogist* 38 (2000) 455-470.
- [18] Hammarstrom J.M., Zen E-an, "Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer", *American Mineralogist* 71(1986) 1297-1313.
- [19] Hollister L.S., Grissom G.e., Peters E.K., Stowell H.H., Sisson V.R., "Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons", *American Mineralogist* 72(1987) 231-239.
- [20] Johnson M.C., Rutherford M.J., "Experimental calibration of the aluminium-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley Caldera (California) volcanic rocks", *Geology* 17(1989) 837-841.
- [21] Thomas W. M., Ernest W. G., "The aluminum content of hornblende in calc-alkaline granitic rocks: a mineralogic barometer calibrated experimentally to 12 Kbar. In: Spencer Rj. Chou IM (eds) *Fluid mineral interactions: a tribute to HP Eugster*", *Geochemical Society Special Publication* 2 (1990) 59-63.
- [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 TJB", *Contribution to Mineralogy and Petrology* 111 (1992) 2773-282.
- Boroujerd, Sanandaj-Sirjan Zone, Western Iran*", *Jouranl of Asian Earth Sciences* 29(2007) 859-877.
- [5] Leake B.E., Woolley 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., Mandarino J.A., Maresch W.V., Nickel E.H., Rock N.M.S., Schumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.N., Ungaretti L., Whittaker E.J.W., Youzhi G., "Nomenclature of amphiboles: report 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.
- [6] Tahmasbi Z., Castro A., Khalili M., Ahmadi-Khalaji A., "Petrography and geochemical characteristics of enclaves in the Astaneh pluton (Sanandaj-Sirjan Zone, Western Iran)", *Journal of Applied Sciences* 8 (2008) 4251-4262.
- [7] Leake B.E., Woolley 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., Mandarino J.A., Maresch W.V., Nickel E.H., Rock N.M.S., Schumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.N., Ungaretti L., Whittaker E.J.W., Youzhi G., "Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on new minerals and mineral names", *Canadian Mineralogist* 35(1997) 219- 246.
- [8] Stein E., Dietl C., "Hornblende thermobarometry of granitoids from the Central Odenwald (Germany) and their implications for the geotectonic development of Odenwald", *Mineralogy and Petrology* 72(2001) 185-207.
- [9] Heiken G., Eichelberger J. C., "Eruptions at Chaos Crags, Lassen Volcanic National Park", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 7(1980) 443- 481.
- [10] Nakada S., "Magmatic processes in titanite-bearing dacites, central Andes of Chile and Bolivi", *American Mineralogist* 76(1991) 548-560.
- [11] Naney M. T., "Phase equilibria of rock-forming ferromagnesian silicates in granitic systems", *American Journal of Science* 283 (1983) 993-1033.

Contributions to Mineralogy and Petrology 116 (1994) 433–447.

[25] Vynhal C. R., Mcsween H. Y. Jr., "Hornblende chemistry in southern Appalachian granitoids Implications for aluminus hornblende thermobarometry and magmatic epidote stability", American Mineralogist 76 (1991) 176-188.

[23] Blundy J.D., Holland T.J.B., "Calcic amphibole equilibria and a new amphibole–plagioclase thermometer", Contributions to Mineralogy and Petrology 104 (1990) 208–224.

[24] Holland T., Blundy J., "Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole – plagioclase thermometry",