

استفاده از شیمی کانی آمفیبول در بررسی ویژگی‌های ماگمایی و سازنده و زمین دما- فشارسنجی توده‌های گرانیتوئیدی شمال غرب ساوه، ایران مرکزی

داریوش اسماعیلی^۱، امیرعلی طبخ شعبانی^۲، حورا نجار^{۱*}، مهدی رضایی^۱

۱- دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکده زمین شناسی

۲- دانشگاه خوارزمی، دانشکده علوم زمین، تهران

(دریافت مقاله: ۹۱/۱/۱۶، نسخه نهایی: ۹۱/۳/۲۷)

چکیده: در این پژوهش داده‌های ترکیب شیمی کانی آمفیبول و فلدسپار در توده‌های گرانیتوئیدی شمال غرب ساوه واقع در ایران مرکزی (توده نشوه و توده سیلیجرده) به منظور آگاهی بیشتر مسائل سنگ‌زایی، بررسی‌های تکتونوماگمایی و نیز تعیین دما و فشار این توده‌ها به کار گرفته شد. ترکیب شیمی آمفیبول‌ها در توده‌های سیلیجرده و نشوه در شمال غرب ساوه در گروه آمفیبول‌های کلسیک و از نوع اکتینولیت تا منیزیهورنبلند قرار می‌گیرد. این آمفیبول‌ها وابسته به فرورانش بوده که با ویژگی‌های تکتونوماگمایی پیشنهادی برای این توده‌ها یعنی محیط حاشیه فعال قاره‌ای مرتبط با فرورانش همخوانی دارد. این آمفیبول‌ها در محیطی با گریزندگی اکسیژن نسبتاً بالا تشکیل شده‌اند. مطابق تمامی روش‌های به کار گرفته شده برای دما- فشارسنجی، این توده‌ها در دمای ۷۰۰ تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد و فشار پایین ۰/۳ تا ۱/۲ کیلوبار معادل عمق تقریبی ۱ تا ۴/۵ کیلومتر تشکیل شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: گرانیتوئید؛ آمفیبول؛ ژئوترموبارومتري؛ ساوه.

مقدمه

کاربرد ترکیب شیمی کانی آمفیبول در تعیین شرایط محیطی تشکیل گرانیتوئیدها موضوعی شناخته شده است [۱]. آمفیبول‌ها در دامنه‌ی گسترده‌ای از شرایط فشار و دما ظاهر می‌شوند و از سازندگان عادی سنگ‌های آذرین به ویژه سنگ‌های آذرین سری آهکی- قلیایی و سنگ‌های دگرگون به شمار می‌آیند. این کانی در سنگ‌های پلوتونیک و بسیاری از سنگ‌های آتشفشانی وجود دارند. هدف از این پژوهش بررسی ترکیب شیمیایی کانی آمفیبول و پلاژیوکلاز در توده‌های گرانیتوئیدی شمال غرب ساوه به منظور شناخت مسائل سنگ‌زایی و تکتونوماگمایی این توده هاست. در این خصوص نظریه‌های قبلی مبنی بر وابسته بودن این توده‌ها با محیط فرورانش را که بر پایه‌ی بررسی ژئوشیمی سنگ کل ارائه شده

نیز با نتایج حاصل مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

روش بررسی

در این پژوهش، نخست نمونه‌برداری دقیقی از توده‌های گرانیتوئیدی نشوه و سیلیجرده در شمال غرب ساوه صورت گرفت. حدود ۲۳۰ مقطع نازک از این نمونه‌ها تهیه شدند و مورد بررسی دقیق با میکروسکوپ قطبشی قرار گرفتند و پس از آشنایی با ویژگی‌های کانی‌شناختی و سنگ‌شناسی، تعداد ۷ مقطع که نمونه‌هایی سالم و فاقد دگرسانی بودند، برای آنالیز نقطه‌ای انتخاب شدند (جدول‌های ۱ و ۲). تجزیه‌های نقطه‌ای در دانشگاه اسلو نروژ -۲۳ نقطه (۱۳ نقطه آمفیبول و ۱۰ نقطه پلاژیوکلاز همزیست) از توده‌ی نشوه و ۶ نقطه (۴ نقطه آمفیبول و ۲ نقطه پلاژیوکلاز همزیست) از توده‌ی سیلیجرده- با یک

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۳۷۲۷۵۵۶۵۵، پست الکترونیکی: houra.najjar@gmail.com

ریزپردازنده‌ی الکترونی مدل CAMECA SX 50 با باریکه‌ی پرتو ایکس ۱۵ کیلو ولت و شدت جریان ۲۰ نانو آمپر صورت گرفت و نتایج آنالیزها در نرم افزارهای Minpet 2.02 و Excel بررسی شدند.

جدول ۱ نتایج آنالیز ریزپردازش الکترونی کانی آمفیبول برای دو توده نشوه (SN) و سیلیگرد (SS).

Sample	SN ۱۰-۱	SN ۱۰-۲	SN ۱۰-۳	SN ۱۰-۴	SN ۱۱-۱	SN ۱۱-۲	SN ۴۴-۱	SN ۴۴-۲	SN ۴۴-۳
SiO ₂	۴۹٫۹۸	۴۶٫۸۹	۴۸٫۸۸	۵۰٫۲۸	۵۰٫۶۱	۵۰٫۴۹	۴۷٫۶۳	۴۸٫۶۹	۴۷٫۶۰
Al ₂ O ₃	۳٫۴۵	۴٫۴۹	۴٫۱۸	۳٫۵۳	۳٫۶۳	۳٫۵۹	۶٫۳۰	۵٫۰۳	۶٫۰۶
TiO ₂	۰٫۵۳	۰٫۷۹	۰٫۴۸	۰٫۶۳	۰٫۷۶	۰٫۶۳	۱٫۶۳	۱٫۲۶	۱٫۴۶
Cr ₂ O ₃	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۰۴
FeO*	۱۷٫۵۵	۱۶٫۵۹	۱۵٫۸۲	۱۵٫۱۱	۱۴٫۹۱	۱۴٫۹۶	۱۳٫۵۹	۱۴٫۱۴	۱۳٫۴۷
MgO	۱۳٫۶۲	۱۲٫۵۴	۱۳٫۹۴	۱۴٫۲۱	۱۴٫۲۳	۱۴٫۴۳	۱۴٫۰۲	۱۳٫۹۶	۱۴٫۱۹
MnO	۰٫۴۵	۰٫۳۳	۰٫۴۶	۰٫۳۹	۰٫۶۱	۰٫۶۲	۰٫۴۳	۰٫۵۵	۰٫۴۴
K ₂ O	۰٫۳۶	۰٫۴۸	۰٫۲۷	۰٫۳۳	۰٫۲۷	۰٫۲۸	۰٫۵۳	۰٫۴۸	۰٫۶۸
CaO	۹٫۸۴	۱۱٫۶۷	۱۱٫۲۲	۱۱٫۰۶	۱۱٫۵۲	۱۱٫۰۱	۱۱٫۲۷	۱۱٫۱۷	۱۱٫۵۷
Na ₂ O	۰٫۶۵	۰٫۸۶	۰٫۸۳	۰٫۵۹	۰٫۷۴	۰٫۶۲	۱٫۳۹	۱٫۳۲	۱٫۵۵
Cl	۰٫۵۲	۰٫۵۰	۰٫۲۸	۰٫۳۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸	-	۰٫۰۸	۰٫۰۸
F	۰٫۰۵	۰٫۱۲	۰٫۲۸	۰٫۱۰	۰٫۲۶	۰٫۱۹	-	۰٫۲۳	۰٫۶۰
Total	۹۷٫۰۸	۹۵٫۲۹	۹۶٫۶۸	۹۶٫۶۶	۹۷٫۶۹	۹۶٫۹۵	۹۶٫۸۳	۹۶٫۹۸	۹۷٫۸۰
O-F-Cl	۰٫۱۴	۰٫۱۷	۰٫۱۸	۰٫۱۳	۰٫۱۳	۰٫۱۰	-	۰٫۱۲	۰٫۲۸
O-F	۰٫۰۲	۰٫۰۵	۰٫۱۲	۰٫۰۴	۰٫۱۱	۰٫۰۸	-	۰٫۱۰	۰٫۲۶
O-Cl	۰٫۱۲	۰٫۱۱	۰٫۰۶	۰٫۰۹	۰٫۰۲	۰٫۰۲	-	۰٫۰۲	۰٫۰۲
Si	۷٫۳۴	۷٫۱۴	۷٫۲۳	۷٫۴۰	۷٫۳۹	۷٫۳۸	۷٫۰۱	۷٫۱۹	۷٫۰۲
Al	۰٫۵۶	۰٫۸۰	۰٫۷۱	۰٫۵۶	۰٫۵۹	۰٫۵۷	۰٫۹۸	۰٫۸۰	۰٫۹۷
Fe ₃	۰٫۰۹	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Ti	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Sum_T	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰
Al	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۱۱	۰٫۰۷	۰٫۰۷
Cr	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe ₃	۰٫۷۱	۰٫۴۳	۰٫۵۹	۰٫۴۴	۰٫۳۵	۰٫۴۹	۰٫۳۰	۰٫۳۱	۰٫۲۳
Ti	۰٫۰۵	۰٫۰۹	۰٫۰۵	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰٫۰۶	۰٫۱۸	۰٫۱۴	۰٫۱۶
Mg	۲٫۹۸	۲٫۸۴	۳٫۰۷	۳٫۱۲	۳٫۰۹	۳٫۱۴	۳٫۰۸	۳٫۰۷	۳٫۱۲
Fe ₂	۱٫۱۷	۱٫۶۱	۱٫۲۳	۱٫۳۹	۱٫۳۹	۱٫۲۰	۱٫۲۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷
Mn	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۲
Ca	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Sum_C	۵٫۰۰	۵٫۰۰	۵٫۰۰	۵٫۰۰	۵٫۰۰	۵٫۰۰	۵٫۰۰	۵٫۰۰	۵٫۰۰
Mg	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe ₂	۰٫۱۸	۰٫۰۲	۰٫۰۷	۰٫۰۹	۰٫۰۵	۰٫۰۹	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۵
Mn	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۲
Ca	۱٫۵۵	۱٫۹۰	۱٫۷۷	۱٫۷۴	۱٫۸۰	۱٫۷۲	۱٫۷۸	۱٫۷۶	۰٫۸۲
Na	۰٫۰۹	۰٫۰۵	۰٫۱۱	۰٫۰۸	۰٫۱۰	۰٫۰۸	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۰۹
Sum_B	۱٫۸۵	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۱٫۹۴	۲٫۰۰	۱٫۹۴	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰
Ca	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Na	۰٫۰۹	۰٫۲۰	۰٫۱۲	۰٫۰۸	۰٫۱۰	۰٫۰۹	۰٫۲۸	۰٫۲۵	۰٫۳۵
K	۰٫۰۶	۰٫۰۹	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۱۰	۰٫۰۹	۰٫۱۲
Sum_A	۰٫۱۶	۰٫۲۹	۰٫۱۷	۰٫۱۴	۰٫۱۵	۰٫۱۴	۰٫۳۸	۰٫۳۴	۰٫۴۸
Sum_cat	۱۵٫۰۱	۱۵٫۲۹	۱۵٫۱۷	۱۵٫۰۹	۱۵٫۱۶	۱۵٫۰۸	۱۵٫۳۸	۱۵٫۳۴	۱۵٫۴۸
Cl	۰٫۱۳	۰٫۱۳	۰٫۰۷	۰٫۰۹	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۲
F	۰٫۰۲	۰٫۰۶	۰٫۱۳	۰٫۰۴	۰٫۱۲	۰٫۰۹	۰٫۰۰	۰٫۱۰	۰٫۲۸

ادامه جدول ۱ نتایج آنالیز ریزپردازش الکترونی کانی آمفیبول دو توده‌ی نشوه (SN) و سلیچرد (SS).

Sample	SN ۴۴-۴	SN ۵۲-۱	SN ۵۲-۲	SN ۵۲-۳	SS ۲۳-۱	SS ۲۳-۲	SS ۲۳-۳	SS ۶۱-۱
SiO ₂	۴۸,۸۹	۵۱,۵۱	۴۸,۸۹	۵۱,۶۹	۴۵,۷۳	۴۸,۱۸	۵۰,۱۰	۵۴,۰۹
Al ₂ O ₃	۵,۱۴	۳,۰۶	۵,۲۴	۰,۰۶	۵,۹۱	۳,۹۷	۳,۰۷	۲,۲۲
TiO ₂	۱,۲۳	۰,۶۱	۱,۱۵	۰,۵۷	۱,۴۸	۰,۶۲	۰,۷۴	۰,۳۵
Cr ₂ O ₃	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۳
FeO*	۱۴,۶۵	۱۳,۷۸	۱۴,۲۱	۱۴,۰۸	۱۸,۳۶	۲۲,۰۲	۱۹,۳۱	۸,۵۷
MgO	۱۳,۷۷	۱۵,۰۸	۱۳,۹۰	۱۵,۱۴	۱۱,۲۳	۹,۷۵	۱۱,۷۰	۱۸,۵۶
MnO	۱,۶۰	۱,۰۱	۰,۸۸	۰,۰۴	۰,۳۲	۰,۴۷	۰,۴۰	۰,۲۹
K ₂ O	۰,۵۲	۰,۲۶	۰,۴۹	۰,۲۵	۰,۷۷	۰,۴۲	۰,۳۷	۰,۱۸
CaO	۱۰,۹۲	۱۰,۹۳	۱۱,۴۸	۱۰,۹۸	۱۰,۸۳	۱۰,۵۳	۱۱,۱۴	۱۲,۱۸
Na ₂ O	۱,۲۹	۰,۸۸	۱,۳۲	۰,۸۴	۱,۸۹	۱,۱۶	۰,۹۵	۰,۵۱
Cl	۰,۱۱	-	-	-	-	-	-	۰,۰۹
F	۰,۶۸	-	-	-	-	-	-	۰,۸۶
Total	۹۷,۸۶	۹۷,۱۷	۹۷,۶۰	۹۷,۶۹	۹۶,۵۸	۹۷,۱۶	۹۷,۷۳	۹۷,۹۶
O-F-Cl	۰,۳۱	-	-	-	-	-	-	۰,۳۸
O-F	۰,۲۹	-	-	-	-	-	-	۰,۳۶
O-Cl	۰,۰۳	-	-	-	-	-	-	۰,۰۲
Si	۷,۱۹	۷,۴۸	۷,۱۶	۷,۴۶	۶,۹۵	۷,۳۰	۷,۴۴	۷,۶۷
Al	۰,۸۰	۰,۴۷	۰,۸۳	۰,۴۸	۱,۰۱	۰,۶۶	۰,۵۱	۰,۳۲
Fe ₃	۰,۰۰	۰,۰۳	۰,۰۰	۰,۰۴	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۰۰
Ti	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Sum_T	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰
Al	۰,۰۹	۰,۰۴	۰,۰۷	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۲	۰,۰۴
Cr	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Fe ₃	۰,۳۵	۰,۴۰	۰,۲۸	۰,۴۲	۰,۲۸	۰,۴۱	۰,۳۰	۰,۲۱
Ti	۰,۱۳	۰,۰۶	۰,۱۲	۰,۰۶	۰,۱۷	۰,۰۷	۰,۰۸	۰,۰۳
Mg	۳,۰۲	۳,۲۶	۳,۰۳	۳,۲۶	۲,۵۴	۲,۲۰	۲,۵۹	۳,۹۲
Fe ₂	۱,۳۵	۱,۱۵	۱,۴۲	۱,۱۵	۱,۹۳	۲,۲۳	۱,۹۷	۰,۷۵
Mn	۰,۰۳	۰,۰۶	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۱
Ca	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Sum_C	۵,۰۰	۵,۰۰	۵,۰۰	۵,۰۰	۵,۰۰	۵,۰۰	۵,۰۰	۵,۰۰
Mg	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Fe ₂	۰,۰۹	۰,۰۷	۰,۰۳	۰,۰۷	۰,۰۸	۰,۱۰	۰,۰۸	۰,۰۵
Mn	۰,۰۳	۰,۰۶	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۱
Ca	۱,۷۲	۱,۷۰	۱,۸۰	۱,۷۰	۱,۷۶	۱,۷۱	۱,۷۷	۱,۸۵
Na	۰,۱۴	۰,۱۲	۰,۱۰	۰,۱۱	۰,۱۲	۰,۱۵	۰,۱۲	۰,۰۷
Sum_B	۲,۰۰	۱,۹۶	۲,۰۰	۱,۹۵	۲,۰۰	۲,۰۰	۲,۰۰	۱,۹۹
Ca	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Na	۰,۲۲	۰,۱۲	۰,۲۷	۰,۱۲	۰,۴۳	۰,۱۸	۰,۱۵	۰,۰۷
K	۰,۰۹	۰,۰۴	۰,۰۹	۰,۰۴	۰,۱۵	۰,۰۸	۰,۰۵	۰,۰۳
Sum_A	۰,۳۲	۰,۱۷	۰,۳۶	۰,۱۶	۰,۵۸	۰,۲۷	۰,۲۰	۰,۱۰
Sum_cat	۱۵,۳۲	۱۵,۱۳	۱۵,۳۶	۱۵,۱۲	۱۵,۵۸	۱۵,۲۷	۱۵,۲۰	۱۵,۰۹
Cl	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۲
F	۰,۳۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۳۸

جدول ۲ نتایج آنالیز ریزپردازش الکترونی کانی پلاژیوکلاز برای دو توده نشوه (SN) و سلیجر (SS).

Sample	SN ۱۰-۱	SN ۱۰-۲	SN ۱۰-۳	SN ۱۰-۴	SN ۱۱-۱	SN ۱۱-۲	SN ۴۴-۱	SN ۴۴-۲	SN ۴۴-۳	SN ۴۴-۴	SS ۲۳-۱	SS ۶۱-۱
SiO ₂	۵۳,۵۵	۴۷,۵۵	۵۶,۴۶	۵۱,۱۰	۴۵,۳۲	۵۷,۰۵	۵۳,۹۹	۵۴,۶۰	۵۶,۱۹	۶۳,۰۸	۵۷,۳۵	۵۸,۱۸
Al ₂ O ₃	۲۸,۵۱	۳۲,۴۷	۲۶,۵۸	۲۹,۶۹	۳۳,۴۰	۲۶,۴۰	۲۸,۳۹	۲۷,۷۹	۲۶,۷۲	۲۲,۲۷	۲۶,۲۳	۲۴,۷۴
FeO*	۰,۳۲	۰,۴۱	۰,۲۶	۰,۴۱	۰,۵۰	۰,۳۸	۰,۳۳	۰,۳۲	۰,۳۳	۰,۱۶	۰,۲۷	۰,۶۶
K ₂ O	۰,۲۲	۰,۰۶	۰,۲۳	۰,۱۷	۰,۰۳	۰,۳۲	۰,۲۳	۰,۳۰	۰,۲۵	۰,۵۲	۰,۳۳	۰,۲۶
CaO	۱۱,۹۳	۱۶,۷۱	۹,۶۷	۱۳,۵۰	۱۸,۳۷	۹,۳۰	۱۱,۸۱	۱۱,۱۸	۱۰,۰۰	۴,۱۳	۹,۰۳	۸,۲۰
Na ₂ O	۴,۸۴	۲,۱۸	۶,۳۱	۳,۷۹	۱,۲۹	۶,۲۱	۴,۷۸	۵,۲۸	۵,۹۸	۹,۱۰	۶,۴۷	۶,۹۹
TiO ₂	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۰۱	۰,۰۳	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۳	۰,۰۳
MgO	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	-	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	-
MnO	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۱
Cr ₂ O ₃	۰,۰۳	۰,۰۰	۰,۰۱	-	۰,۰۳	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۱	-
Total	۹۹,۴۵	۹۹,۴۵	۹۸,۴۸	۹۸,۷۲	۹۸,۹۹	۹۹,۷۲	۹۹,۵۷	۹۹,۵۲	۹۹,۵۰	۹۹,۳۰	۹۹,۷۷	۹۹,۱۱
Si	۹,۷۶	۸,۷۹	۱۰,۲۲	۹,۴۳	۸,۴۷	۱۰,۲۹	۹,۸۲	۹,۹۳	۱۰,۱۸	۱۱,۲۵	۱۰,۳۳	۱۰,۵۵
Al	۶,۱۲	۷,۰۷	۵,۶۶	۶,۴۵	۷,۳۵	۵,۶۱	۶,۰۸	۵,۹۵	۵,۷۰	۴,۶۸	۵,۵۶	۵,۲۸
Ti	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Fe ₂	۰,۰۴	۰,۰۶	۰,۰۴	۰,۰۶	۰,۰۷	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۴	۰,۰۵	۰,۰۲	۰,۰۴	۰,۱۰
Ca	۲,۳۳	۳,۳۱	۱,۸۷	۲,۶۷	۳,۶۸	۱,۷۹	۲,۳۰	۲,۱۷	۱,۹۴	۰,۷۹	۱,۷۴	۱,۵۹
Na	۱,۷۱	۰,۷۸	۲,۱۸	۱,۳۵	۰,۴۶	۲,۱۷	۱,۶۸	۱,۸۶	۲,۱۰	۲,۱۵	۲,۲۶	۲,۴۶
K	۰,۰۵	۰,۰۱	۰,۰۵	۰,۰۴	۰,۰۰	۰,۰۷	۰,۰۵	۰,۰۷	۰,۰۶	۰,۱۲	۰,۰۷	۰,۰۶
Ab	۴۱,۸۰	۱۹,۱۰	۵۳,۱۰	۳۳,۳۰	۳۰,۱۱	۵۳,۷۰	۴۱,۷۰	۴۵,۳۰	۵۱,۲۰	۷۷,۶۰	۵۵,۴۰	۵۹,۸۰
An	۵۶,۹۰	۸۰,۵۰	۴۵,۶۰	۶۵,۶۰	۸۸,۵۰	۴۴,۴۰	۵۶,۹۰	۵۳,۰۰	۴۷,۳۰	۱۹,۵۰	۴۲,۷۰	۳۸,۷۰
Or	۱,۳۰	۰,۴۰	۱,۳۰	۱,۰۰	۰,۲۰	۱,۹۰	۱,۴۰	۱,۷۰	۱,۵۰	۳,۰۰	۱,۹۰	۱,۵۰

زمین‌شناسی و سنگ‌نگاری توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی شمال غربی ساوه

از نظر زمین‌شناسی منطقه‌ی ساوه بخشی از ایران مرکزی بوده و در کمان ماگمایی ارومیه- دختر واقع شده است [۲]. توده‌های نفوذی مورد بررسی شامل توده‌ی گرانودیوریتی نشوه و توده‌ی گرانودیوریتی، کوارتزیدیوریتی، گرانیتی سلیجر در شمال غرب ساوه قرار دارند (شکل ۱). توده‌ی گرانودیوریتی نشوه با گسترش تقریبی ۱۰ کیلومتر مربع در جنوب روستای نشوه قرار دارد. سن توده جوانتر از سنگ‌های آتشفشانی ائوسن است. سنگ‌های مورد بررسی در گستره‌ی نشوه از نوع گرانودیوریت، کوارتز موزودیوریت، کوارتزیدیوریت و گرانیت هستند [۳]. کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی سنگ‌های این توده از کوارتزهای بی‌شکل، پلاژیوکلازهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار، فلدسپار قلیایی، بیشتر عمدتاً از نوع ارتوکلاز، کانی‌های آمفیبول و بیوتیت و کانی‌های ثانوی نظیر کلریت و سربیسیت تشکیل شده‌اند. مهم‌ترین و فراوانترین کانی مافیک موجود در مقاطع آمفیبول است. این کانی معمولاً زیر نور طبیعی به رنگ سبز، قهوه‌ای و یا زرد متمایل به قهوه‌ای و به‌صورت شکل‌دار دیده

می‌شود. ترکیب آمفیبول‌ها، با توجه به زاویه‌ی خاموشی بیشتر از نوع هورنبلند هستند. معمولاً مقدار کانی‌های مافیک در گرانیتوئیدها خیلی کمتر از کانی‌های فلسیک است و تقریباً ۱۰ تا ۱۵ درصد حجم کل مقاطع را اشغال می‌کنند. پیروکسن به‌عنوان کانی فرعی در برخی از نمونه‌ها به صورت سبز کم‌رنگ مایل به زرد، بی‌شکل و با برجستگی‌هایی دیده می‌شوند. دیگر کانی مافیک موجود در مقاطع، بیوتیت است که معمولاً به رنگ قهوه‌ای تا سبز زیتونی دیده می‌شود. این کانی در مقاطع مورد بررسی بیشتر شکل‌دار و بیشتر با اندازه‌های ریز تا میان دانه دیده می‌شود و در مواردی به‌صورت جزئی یا کامل برخی از دانه‌های بیوتیت به کلریت تبدیل شده‌اند [۴،۳].

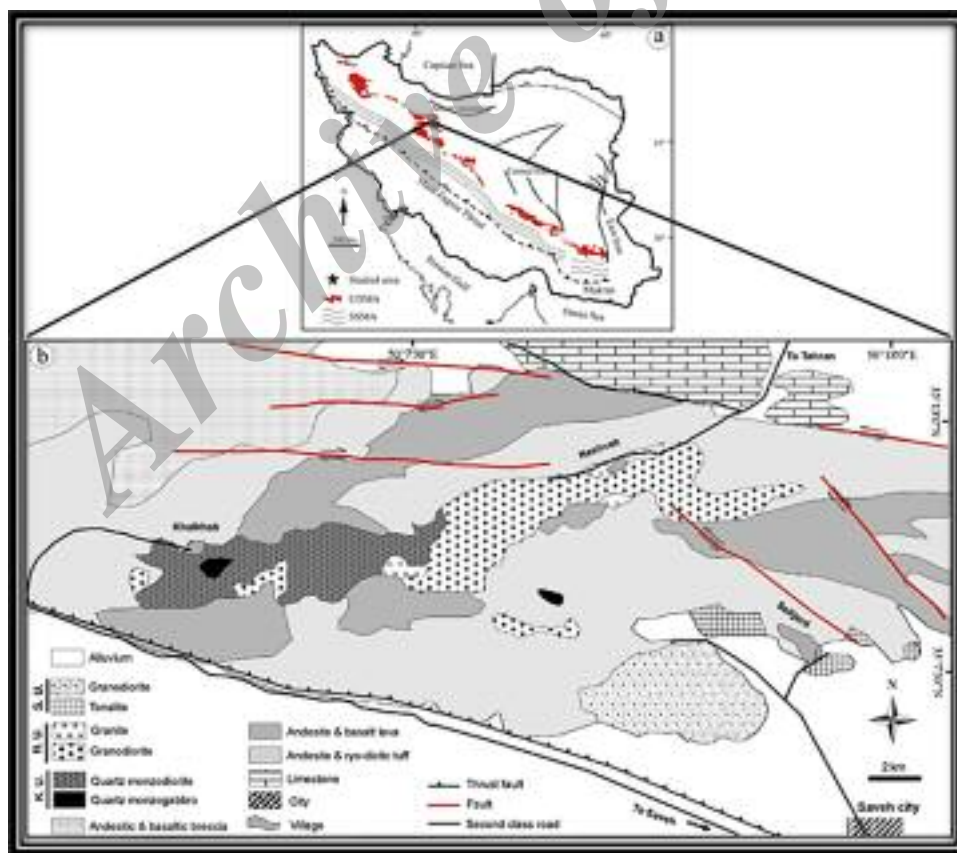
توده‌ی نفوذی بزرگ سلیجر با گستردگی حدود ۲۰ کیلومتر مربع در شمال غربی ساوه در اطراف روستای سلیجر، با ترکیب کوارتزیدیوریت، گرانیت و تونالیت، واحدهای آتشفشانی ائوسن را در بخش شمالی توده‌ی قطع کرده است. توده مورد نظر در جنوب با رانش‌های آبرفتی جوان و مخروط‌افکنه‌های درشت دانه کم ارتفاع و رانش‌های قدیمی احاطه شده است. در بعضی قسمت‌های این توده، آبرفت‌های رودخانه‌ای کواترنری

بحث و بررسی

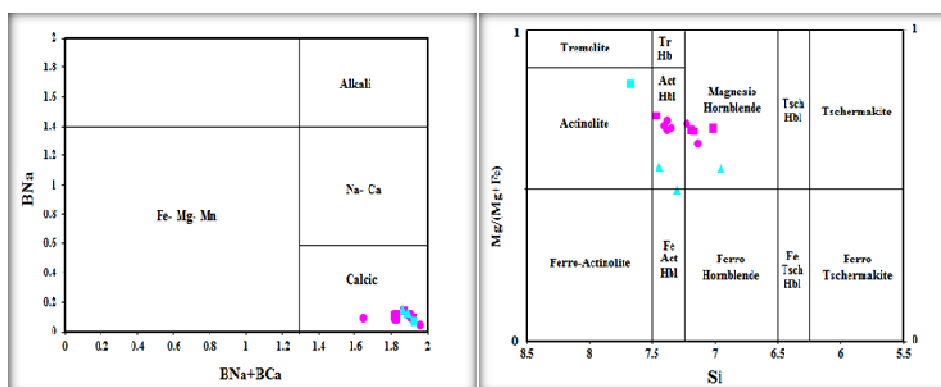
ترکیب شیمی کانی آمفیبول

در مجموعه‌ی نفوذی شمال غرب ساوه، آمفیبول مهم‌ترین کانی مافیک موجود در سنگ‌های منطقه است. برای بررسی آمفیبول‌های این دو توده، در کل ۱۷ نقطه مورد تجزیه‌ی ریز پردازش الکترونی قرار گرفتند که ۱۳ نقطه به توده‌ی نشوه و ۴ نقطه از توده سلجرد بوده‌اند و نتایج محاسبه فرمول ساختاری آن‌ها بنابر فرمول استاندارد [۵] آمفیبول $AB_2C_5^{IV}T_8O_{22}(OH)_2$ بر پایه‌ی ۲۳ اکسیژن و ۱۵ کاتیون در موقعیت چار وجهی و هشت وجهی در جدول ۱ ارائه شده‌اند. چنانکه شکل ۲ نشان می‌دهد، بر اساس رده‌بندی لیک [۵] ترکیب آمفیبول‌های مورد بررسی، جزء گروه آمفیبول‌های کلسیک و در زیر گروه اکتینولیت‌هورنبلند تا منیزیوهورنبلند قرار می‌گیرند. برخی از پژوهشگران [۶، ۷]، حضور آمفیبول‌های کلسیک در سنگ‌های گرانیتوئیدی را نشانه‌ی وابستگی این سنگ‌ها به توده‌های نفوذی نوع I می‌دانند.

سطح گرانیت‌ها را پوشانده است. این توده از نظر قلیایی بودن، دارای ویژگی‌های ماگماتیسم نوع آندی یعنی آهکی-قلیایی و نوع I بوده و ترکیب شیمیایی آن از حاشیه به مرکز اسیدی‌تر می‌شود [۴]. ترکیب کانی‌های اصلی این سنگ‌ها شامل پلاژیوکلاز (آلبیت و الیگوکلاز)، فلدسپار قلیایی، کوارتز و آمفیبول (هورنبلند، ترمولیت و اکتینولیت) است. سنگ‌های گرانیتی این توده عموماً میان دانه‌های هستند و دارای بافت‌های دانه‌ای و ریز دانه‌ای بوده و از کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز، کوارتز و فلدسپار قلیایی و کانی‌های فرعی آمفیبول و بیوتیت تشکیل شده‌اند. کانی‌های منیتیت و اسفن و دیگر کانی‌های کدر به صورت ادخال در کانی‌های پلاژیوکلاز، کوارتز و بیوتیت دیده می‌شوند [۳، ۴]. رضایی و همکاران [۳] با استفاده از شواهد زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی نشان دادند که این توده‌ها در اثر فرورانش لیتوسفر اقیانوسی نفوتیس به زیر لیتوسفر قاره‌ای ایران مرکزی تشکیل شده و ویژگی‌های گرانیتوئیدهای قوسی را نشان می‌دهند.



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه اقتباس از نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ساوه [۲] که توسط [۳] تصحیح شده است. KN توده‌ی خلخاب- نشوه و Se توده‌ی سلجرد.



شکل ۲ رده‌بندی آمفیبول‌های توده‌های گرانیتوئیدی نشوه و سلیچرد بر اساس ترکیب شیمیایی آن‌ها [۵]. (نمادهای تیره رنگ توده نشوه و نمادهای خاکستری توده سلیچرد را به نمایش می‌گذارند. دایره‌ها نشانگر نمونه‌های گرانودیوریتی و مربع‌ها نشانگر نمونه‌های گرانیتی‌اند.)

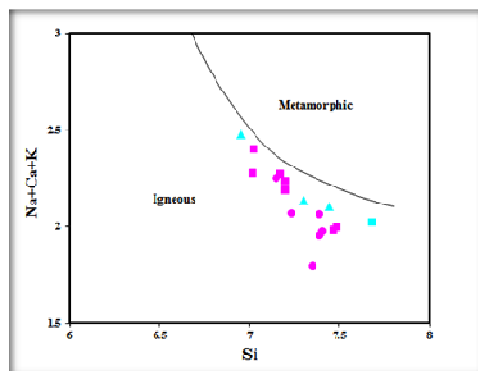
آمفیبول‌های وابسته به مناطق فرورانش قرار می‌گیرند (شکل ۴). این نتیجه با نتایج حاصل از تعیین محیط زمین‌ساختی با استفاده از ترکیب عناصر اصلی بیوتیت‌های موجود در همین توده‌ها [۴] و نیز با نتایج ژئوشیمی سنگ کل همخوانی دارند [۳]. از طرف دیگر مقدار $Al^{IV} = 1.5$ به عنوان مرز و جدایش محیط تکتونوماگمایی آمفیبول‌ها در نظر گرفته شده است. به گونه‌ای که ارقام بالاتر از ۱/۵ به آمفیبول‌هایی وابسته‌اند است که در فشارهای در حدود ۱۰ کیلو بار و در محیط‌های زمین-ساختی جزائر قوسی شکل می‌گیرند و ارقام پایین‌تر از ۱/۵ معرف آمفیبول‌های تشکیل شده در کرانه‌های فعال قاره‌ای در فشارهای کمتر از ۵ کیلو بار هستند [۱۰-۱۲]. بر این اساس و با توجه به مقادیر Al^{IV} (جدول ۱) همه ی آمفیبول‌های منطقه‌ی مورد بررسی مقادیر کمتر از ۱/۵ داشته و در قلمرو حاشیه‌ی فعال قاره‌ای وابسته به فرورانش قرار می‌گیرند که با نتایج حاصل از بررسی ژئوشیمی سنگ کل همخوانی دارند [۳].

تمیز دادن آمفیبول‌های آذرین از آمفیبول‌های دگرگون

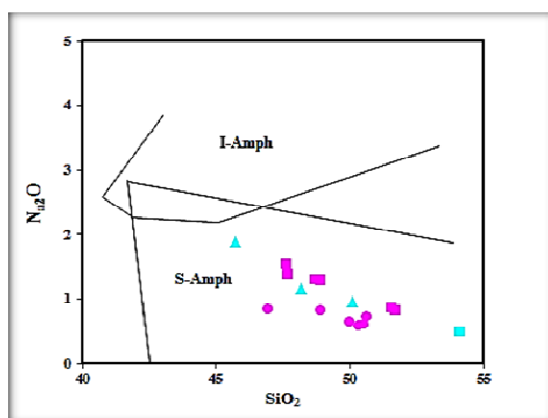
آمفیبول‌های آذرین و دگرگون به‌وسیله شماره [۸] براساس مجموع کاتیون‌های $Na + K + Ca$ نسبت به Si از هم جدا می‌شوند. بنابراین رده‌بندی، نمونه‌های مورد بررسی در گستره‌ی آمفیبول‌های حاصل از تبلور ماگما قرار گرفته و از آمفیبول‌های حاصل از فرآیند دگرگونی تمیز داده شدند (شکل ۳).

تعیین محیط زمین‌ساختی آمفیبول‌ها

از ویژگی‌های ژئوشیمیایی آمفیبول‌ها که بیشتر بر پایه‌ی بررسی زینولیت‌های گوشته‌ای حاصل شده‌اند، برای مقایسه ویژگی‌های دگرنهادی محیط‌های تکتونوماگمایی مختلف (به-ویژه محیط‌های فرورانش (subduction) و درون‌صفحه‌ای (intraplate) استفاده شده است [۹]. آمفیبول‌های وابسته به فرورانش، (S-Amph)، Na_2O و TiO_2 پایین‌تری نسبت به انواع میان‌صفحه‌ای (I-Amph) دارند. براساس نمودار رده‌بندی تکتونوماگمایی کولتورتی [۹] آمفیبول‌های منطقه در گستره‌ی



شکل ۳ جداسازی آمفیبول‌های حاصل از فرآیندهای آذرین و آمفیبول‌های حاصل از فرآیندهای دگرگونی به روش شاری [۸]. علائم شبیه شکل ۲ انتخاب شده‌اند.



شکل ۴ نمودار رده‌بندی تکتونوماگمایی آمفیبول‌های توده‌های شمال غرب ساوه [۹]. علائم شبیه شکل ۲ انتخاب شده‌اند.

زمین‌دما-فشارسنجی

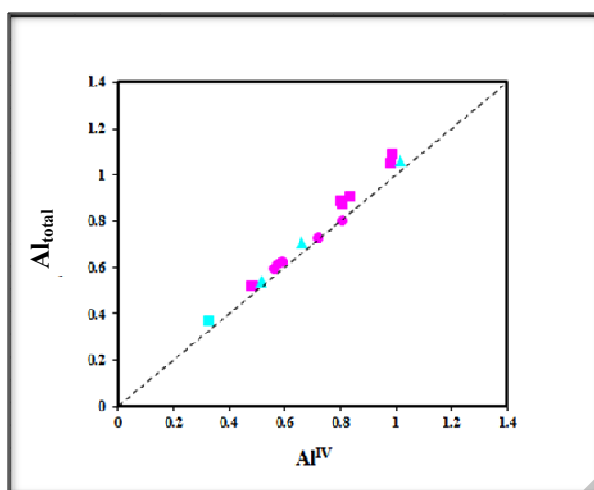
خواهد بود. ولی مقدار Al موجود در آمفیبول‌ها با شرایط محیط و مجموعه‌ای از عوامل تغییر کرده و در نتیجه باعث خطا در فشار محاسبه شده می‌شود. لذا آمفیبول باید دارای ویژگی‌هایی به شرح زیر باشد تا تعیین فشار واقعی انجام شود [۱۳-۱۶]. اولین ویژگی وجود مجموعه کانی‌های کوارتز، فلدسپار قلیایی، پلاژیوکلاز، بیوتیت، هورنبلند، اکسیدهای آهن، تیتانیم و تیتانیت در سنگ است. دیگر پارامترهای مؤثر، فشار، دما، گریزندگی اکسیژن و ترکیب سنگ کل است که همگی در مقدار Al موجود در هورنبلند نقش دارند. هورنبلند در ماه‌های نزدیک به مرز انجماد علاوه بر کانی‌های یاد شده با گدازه و فاز شاری به تعادل می‌رسد که به دنبال انجماد و سردشدگی 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 [۷، ۱۶، ۱۷]. در همه‌ی روش‌های برآورد فشار به جز روش اندرسون و اشمیت [۱۸]، فقط از روی میزان آلومینیوم موجود در هورنبلند و بدون توجه به پارامترهای دیگری چون دما محاسبه می‌شود. بیشتر فشارسنجی‌های یاد شده در فشارهای بالا کاربرد دارند و در فشار پائین مقادیر به‌دست آمده گاهی کمتر (و حتی منفی) از میزان خطای فرمول فشارسنجی است.

با استفاده از نمودار ۶ که براساس پارامتر Al کل نسبت به $Fe^*/(Mg+Fe^*)$ طراحی شده است [۱۶]، می‌توان ارزیابی کرد که آمفیبول‌های دو توده‌ی نشوه و سلیجرد در گستره‌ی فشاری ۰٫۳ تا ۱٫۲۵ کیلو بار (عمق تقریبی ۱ تا ۴٫۵ کیلومتر) متبلور شده باشند. وجود بافت گرانوفیری و پورفیروئیدی در مقاطع میکروسکوپی سنگ‌های این دو توده نیز فشار کمتر از ۲ کیلو بار را برای این سنگ‌ها پیشنهاد می‌کند [۶].

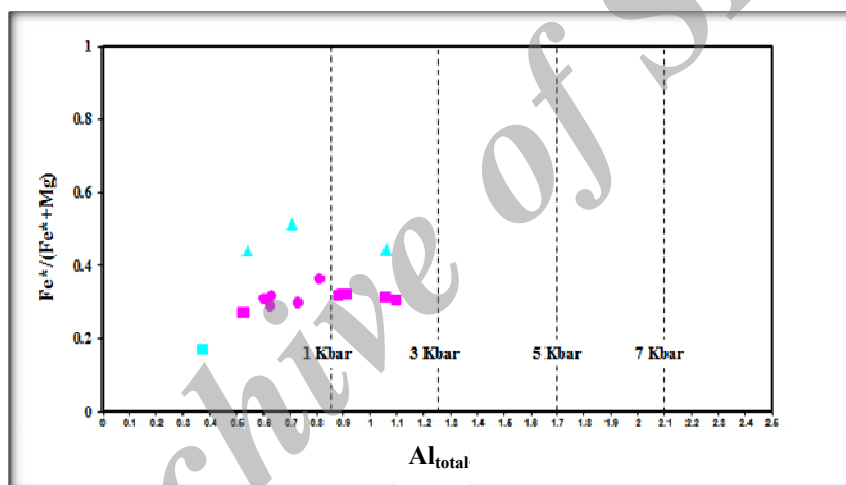
آمفیبول یکی از فراوان‌ترین کانی‌های تیره در توده‌های آذرین نفوذی شمال غرب ساوه است. این پدیده گویای غنی بودن ماگمای در حال تبلور از سازند آب است. معمولاً از آمفیبول برای تعیین فشار حاکم بر محیط تبلور ماگما در مجموعه‌های گرانیتوئیدی استفاده می‌شود (البته با در نظر گرفتن شرایط خاصی که به وجود تعادل بین کانی‌های مورد نظر وابسته است). آمفیبول بهترین کانی در دما و فشارسنجی در سنگ‌های آذرین آهکی-قلیایی است، زیرا تقریباً در تمام توده‌های نفوذی آهکی-قلیایی صرفنظر از ترکیب‌های بازی، حدواسط یا اسیدی متبلور می‌شود و در گستره‌ی گسترده‌ای از دما و فشار از ۱ تا ۲۳ کیلو بار و در دمای ۴۰۰ تا ۱۱۵۰ درجه‌ی سانتیگراد پایدار است [۵، ۷].

زمین‌فشارسنجی

آمفیبول‌های گرانیتوئیدها به‌طور وسیعی برای برآورد فشار و عمق جایگزینی توده‌های گرانیتوئیدی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۳-۱۶]. به عقیده‌ی هامرسترام [۱۳] نیز در سنگ‌های گرانیتی فشار تبلور شدیداً مقدار Al را کنترل می‌کند. شکل ۵ نشان می‌دهد که یک برازش خوبی بین Al کل و Al^{IV} آمفیبول‌های توده‌های گرانیتوئیدی نشوه و سلیجرد وجود دارد و کاملاً شبیه به مواردی است که توسط هامرسترام و زن [۱۳] برای زمین‌فشارسنجی مورد استفاده قرار گرفته است. روش‌های فشارسنجی برای آمفیبول، مبتنی بر اندازه‌گیری مقدار Al موجود در آمفیبول‌اند، زیرا مقدار Al در ارتباط مستقیم با عمق جایگیری توده‌هاست. هرچه مقدار Al موجود در آمفیبول بیشتر باشد مقدار محاسبه شده‌ی عمق بیشتر



شکل ۵ همخوانی خطی Al^{IV} و Al_{total} در آمفیبول‌های واحد کوارتز دیوریتی توده‌های گرانیتوئیدی نشوه و سلیجرد. علائم شبیه شکل ۲ انتخاب شده‌اند.



شکل ۶ نمودار Al_{total} نسبت به XFe^* آمفیبول‌ها که محدوده‌ی فشار تشکیل توده‌های گرانیتوئیدی نشوه و سلیجرد را نشان می‌دهد [۱۶].

است. مقادیر منفی فشار و عمق محاسبه شده می‌تواند بدلیل عمق بسیار کم تشکیل توده‌ها باشد.

اندرسون و اشمیت (۱۹۹۵) [۱۸] نشان دادند که مقدار Al کل نه تنها به فشار بلکه به دمای محیط و گریزندگی اکسیژن نیز در ارتباط است و فرمولی را به صورت زیر ارائه دادند:

$$P (\pm 0.6 \text{ kbar}) = -3.01 + 4.76 Al_{total} - \left\{ (T [^{\circ}C] - 675) / 85 \right\} * \{ 0.53 Al_{total} + 0.005294 * (T [^{\circ}C] - 675) \}$$

$$r^2 = 0.99$$

این رابطه دارای کمترین خطا نسبت به روش‌های دیگر است. نتایج محاسبات فشارسنجی با این روش در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. چنانکه پیش‌تر از این گفته شد فقط می‌توان از آنالیزهای حاشیه‌ی بلور از این رابطه استفاده کرد.

در این بررسی برای برآورد فشار تبلور آمفیبول‌های انتخابی از چهار روش مرسوم زمین‌شناختی، بر اساس محتوای Al موجود در هورنبلند استفاده شده است [۱۳-۱۶] و نتایج حاصل از محاسبه فشار تبلور آمفیبول‌های دو توده نشوه و سلیجرد، همراه با فرمول‌های مربوط در جدول ۳ ارائه شده‌اند. چنانکه ملاحظه می‌شود، میانگین فشارهای محاسبه شده در بهترین حالت بین ۰٫۳ تا ۱٫۲۵ کیلو بار (عمق تقریبی ۱ تا ۴٫۵ کیلومتر) است. به‌طور کلی میزان تغییرات با توجه به انحراف‌های استاندارد به دست آمده برای هر یک از این روش‌ها، نسبتاً ناچیز است. در همه‌ی روش‌های فوق چنانچه در بالا یادآوری شدند، فشار موجود در محیط فقط به مقدار Al کل نسبت داده شده و سایر پارامترها نظیر دمای محیط و مورد توجه نبوده

جدول ۳ محاسبه فشار تشکیل بلورهای مختلف آمفیبول توده‌های گرانیتوئیدی با استفاده از چهار روش زمین‌فشارسنجی (مستقل از دما) بر مبنای مقدار آلومینیوم کل موجود در هورنبلند.

Sample	۱	۲	۳	۴
نشوه				
SN ۱۰-۱	-۰.۹	۰.۹	-۰.۲	-۱.۴
SN ۱۰-۲	۰.۱	-۰.۱	۰.۸	-۰.۲
SN ۱۰-۳	-۰.۳	-۰.۴	۰.۵	-۰.۶
SN ۱۰-۴	۰.۸	۰.۹	-۰.۱	۱.۳
SN ۱۱-۱	-۰.۸	-۰.۸	۰.۰	۱.۲
SN ۱۱-۲	۰.۸	-۰.۸	-۰.۱	۱.۳
SN ۴۴-۱	۱.۶	۱.۲	۲.۲	۱.۴
SN ۴۴-۲	۰.۵	۰.۲	۱.۲	۰.۲
SN ۴۴-۳	۱.۴	۱.۰	۲.۰	۱.۲
SN ۴۴-۴	۰.۶	۰.۳	۱.۲	۰.۳
SN ۵۲-۱	-۱.۳	-۱.۲	-۰.۵	-۱.۸
SN ۵۲-۲	۰.۶	۰.۴	۱.۳	۰.۳
SN ۵۲-۳	۱.۳	۱.۳	-۰.۵	-۱.۸
Average[kbar]	-۰.۱	-۰.۳	۰.۶	-۰.۵
سیلیجر				
SS ۲۳-۱	۱.۴	۱.۰	۲.۰	۱.۲
SS ۲۳-۲	-۰.۴	-۰.۵	۰.۴	-۰.۸
SS ۲۳-۳	۱.۲	-۱.۲	-۰.۴	-۱.۷
SS ۶۱-۱	-۲.۱	۱.۹	-۱.۲	-۲.۷
Average[kbar]	-۰.۶	-۰.۶	۰.۲	-۱.۰

1.P (± 3 Kbar) = $-2.92 + 5.03 \text{ Al (total)}$, [۱۳]; 2. P (± 0.5 kbar) = $-2.46 + 4.23 \text{ Al (total)}$, [۱۵];
 3.P (± 0.6 kbar) = $-3.01 + 4.76 \text{ Al (total)}$, [۱۶]; 4. P (± 1.0 kbar) = $4.76 + 5.64 \text{ Al (total)}$, [۱۴].

جدول ۴ محاسبه‌ی فشار تشکیل بلورهای مختلف آمفیبول توده‌های گرانیتوئیدی با استفاده از روش زمین‌فشارسنجی اندرسون و اشمیت (۱۹۹۵) [۱۸] بر مبنای مقدار آلومینیوم کل موجود در هورنبلند با احتساب دمای تبلور.

Sample	T=۵۰۰°C	T=۶۰۰°C	T=۷۰۰°C	T=۸۰۰°C
نشوه				
SN ۱۰-۱	-۱۰.۲	-۸.۱	-۷.۲	-۷.۶
SN ۱۰-۲	-۴.۲	-۲.۷	-۲.۵	-۳.۵
SN ۱۰-۳	-۶.۴	-۴.۷	-۴.۲	-۵.۰
SN ۱۰-۴	-۹.۸	-۷.۷	-۶.۹	-۷.۳
SN ۱۱-۱	-۹.۵	-۷.۴	-۶.۶	-۷.۱
SN ۱۱-۲	-۹.۶	-۷.۶	-۶.۸	-۷.۲
SN ۴۴-۱	۴.۳	۴.۹	۴.۲	۲.۳
SN ۴۴-۲	-۲.۱	-۰.۸	-۰.۸	-۲.۰
SN ۴۴-۳	۱.۳	۳.۸	۳.۳	۱.۵
SN ۴۴-۴	-۱.۶	-۰.۴	-۰.۴	-۱.۷
SN ۵۲-۱	-۱۲.۴	-۱۰.۰	-۸.۹	-۹.۱
SN ۵۲-۲	-۱.۲	۰.۰	-۰.۱	-۱.۴
SN ۵۲-۳	-۱۲.۵	-۱۰.۱	-۰.۹	-۹.۱
Average[kbar]	-۵.۵	-۳.۹	-۳.۵	-۴.۴
سیلیجر				
SS ۲۳-۱	۳.۳	۴.۰	۳.۴	۱.۶
SS ۲۳-۲	-۷.۰	-۵.۲	-۴.۷	-۵.۴
SS ۲۳-۳	-۱۲.۰	-۹.۷	-۸.۶	-۸.۸
SS ۶۱-۱	-۱۶.۹	-۱۴.۱	-۱۲.۵	-۱۲.۲
Average[kbar]	-۸.۲	-۶.۳	-۵.۶	-۶.۲

$P (\pm 0.6 \text{ kbar}) = -2.01 + 4.76 \text{ Al}_{\text{Total}} - \{(T [^\circ\text{C}] - 675) / 85\} * \{0.53 \text{ Al}_{\text{Total}} + 0.005294 * (T [^\circ\text{C}] - 675)\}$

زمین‌دماسنجی

زمین‌دماسنجی هورنبلند

بررسی‌های هولیستر (۱۹۸۳) [۱۴] نشان می‌دهد که برای ماگماهای آبدار با ترکیب تونالیتی و گرانودیوریتی دمای گدازه بین ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه‌ی سانتیگراد متغیر است، و این دما تقریباً مستقل از فشار است. با این وجود، اندرسون [۱۹] نشان داد که مقدار تیتانیوم هورنبلند با افزایش دما افزایش می‌یابد. همچنین هلز [۲۰] با استفاده از تغییرات مقدار آلومینیوم نسبت به تیتانیوم در واحد فرمولی آمفیبول‌ها، دمای تشکیل این کانی‌ها را ارزیابی کرده است. در این پژوهش با استفاده از تغییرات Ti نسبت به Al^{IV} ، دمای حدود ۷۰۰ تا ۷۵۰ درجه‌ی سانتیگراد برای تبلور هورنبلندهای گرانیتوئیدهایی که ترکیب ماگمایی خود را حفظ کرده‌اند، به دست آمده است (شکل ۷).

زمین‌دماسنجی هورنبلند - پلاژیوکلاز

روش بلوندی و هولاند [۲۱]

مهم‌ترین و شاید کاربردی‌ترین روش تعیین دمای توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی، روش زمین‌دماسنجی هورنبلند-پلاژیوکلاز با سه رابطه‌ی متفاوت است. این روش یکی از روش‌های متداول برای دماسنجی سنگ‌های آهکی-قلیایی محسوب می‌شوند. بلوندی و هولاند [۲۱] روشی را برای دماسنجی بر اساس واکنش ادنیت-ترمولیت با استفاده از زوج آمفیبول-پلاژیوکلاز همزیست ارائه کردند. در این روش پلاژیوکلازها نباید دارای منطقه‌بندی باشند. بنابراین تنها از پلاژیوکلازهایی استفاده شد که فاقد منطقه‌بندی شده و با آمفیبول‌هایی که مورد دما-فشارسنجی قرار گرفته‌اند کاملاً همزیست باشند. این روش تنها برای سنگ‌های اسیدی و حدواسط که حاوی کوارتز

و درصد An پلاژیوکلاز آن‌ها کمتر از ۰/۹۲ بوده و تعداد اتم Si در فرمول ساختاری آن‌ها کمتر از ۷/۸ است، به کار می‌رود. نتایج آنالیز پلاژیوکلازهای دارای این خصوصیات در جدول ۲ ارائه شده‌اند. ترکیب شیمی این پلاژیوکلازها در گستره‌ی الیگوکلاز-لابرادوریت قرار می‌گیرد (شکل ۸). این زمین‌دماسنج برای دماهای بین ۵۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه‌ی سانتیگراد قابل استفاده است. از آنجا که محاسبه‌ی دما در این روش زمین‌دماسنجی تابعی از فشار است، لازم است تا فشار نیز محاسبه شود. به همین منظور آمفیبول و پلاژیوکلازهای همزیست را انتخاب کرده و محاسبات زمین‌دماسنجی و زمین‌فشارسنجی برای آن‌ها را انجام دادیم که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده‌اند. فشار در همه‌ی روابط دماسنجی با استفاده از زمین‌فشارسنجی اندرسون و اشمیت [۱۸] محاسبه شد. این دماسنج براساس رابطه زیر استوار است:

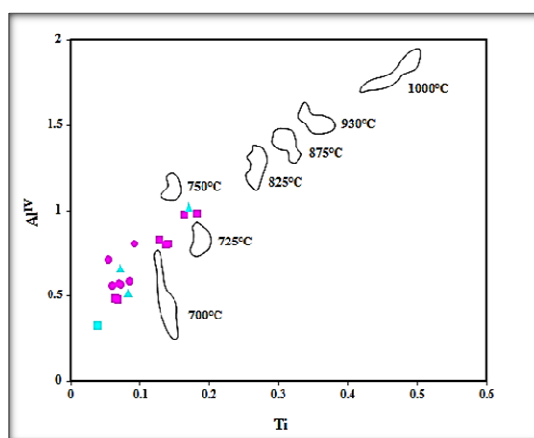
$$T (\pm 311 \text{ kbar}) = 0.677P (\text{kbar}) - 48.98 + Y_{Ab} / -0.0429 - 0.0083144 \ln (Si - 4/8 - Si) X_{Ab}^{Plag}$$

در این رابطه T دمای تعادلی بر حسب کلوین، P فشار بر حسب کیلوبار، Si تعداد کاتیون‌های سیلیسیم در فرمول ساختاری آمفیبول، X_{Ab}^{Plag} میزان درصد آلبنیت در پلاژیوکلاز است. مقدار Y_{Ab} از روابط زیر به دست می‌آید:

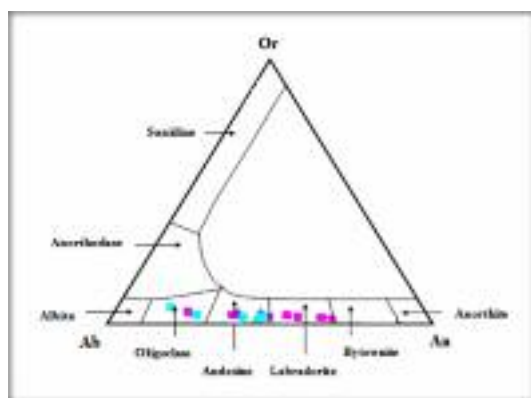
$$X_{Ab} > 0.5, \quad Y_{Ab} = 0$$

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

با استفاده از این روش دمای تعادل آمفیبول و پلاژیوکلاز در نمونه‌های گرانودیوریتی توده‌ی نشوه برابر با ۱۰۰۵/۶۹۳ درجه-ی کلوین (۷۳۲/۵۴ درجه‌ی سانتیگراد) و برای نمونه‌های گرانیتی همین توده معادل ۹۲۵/۶۹ درجه‌ی کلوین (۶۵۲/۵۴ درجه‌ی سانتیگراد) برآورد می‌شود.



شکل ۷ محاسبه‌ی تقریبی دمای تشکیل آمفیبول‌های توده‌های گرانیتوئیدی نشوه و سلیجراد براساس روش هلز [۲۰].



شکل ۸ رده‌بندی جدا کننده‌ی پلاژیوکلازها در توده‌های گرانیتوئیدی نشوه و سلیجرد.

جدول ۵ محاسبه فشار تشکیل بلورهای مختلف آمفیبول توده‌های گرانیتوئیدی با استفاده از روش زمین دماسنجی زوج هورنبلند- پلاژیوکلاز.

Sample	1		2
نشوه	T[±۳۱۱°K]	T [°C]	T [°C]
SN ۱۰-۱	۱۰۱۵,۰۸	۷۴۱,۹۳	۶۴۷,۵۴
SN ۱۰-۲	۱۰۵۳,۶۲	۷۸۰,۴۷	۶۷۱,۵۳
SN ۱۰-۳	۹۵۶,۱۵	۶۸۳,۰۰	۶۶۲,۶۸
SN ۱۰-۴	۱۰۰۰,۸۹	۷۲۷,۷۴	۶۴۹,۱۷
SN ۱۱-۱	۹۸۳,۴۰	۷۱۰,۲۵	۶۵۰,۵۶
SN ۱۱-۲	۹۲۰,۰۲	۶۴۶,۸۷	۶۴۹,۸۷
SN ۴۴-۱	۱۱۱۵,۸۶	۸۴۲,۷۱	۷۰۵,۰۸
SN ۴۴-۲	۱۰۸۲,۲۵	۸۰۹,۱۰	۶۷۹,۸۰
SN ۴۴-۳	۱۰۱۵,۹۴	۷۴۲,۷۹	۷۰۰,۳۰
SN ۴۴-۴	۹۱۳,۷۲	۶۴۰,۵۷	۶۸۱,۷۸
Average[kbar]	۱۰۰۵,۶۹	۷۳۲,۵۴	۶۶۹,۸۳
سلیجرد			
SS ۲۳-۱	۱۰۱۵,۶۸	۷۴۲,۵۳	۷۰۱,۱۲
SS ۶۱-۱	۸۳۵,۷۰	۵۶۲,۵۵	۶۲۰,۹۸
Average[kbar]	۹۲۵,۶۹	۶۵۲,۵۴	۶۶۱,۰۵

$$1. T (\pm 311 \text{ kbar}) = 0.67VP (\text{kbar}) - 48.98 + Y_{Ab} / 0.429 - 0.0083144 \ln (\text{Si}-4,8-\text{Si}) X_{ab}^{Plg}, [21].$$

$$2. T [^{\circ}\text{C}] = 654.9 + 25.3P, [12].$$

عمیق منطقه را متبلور کرده‌اند ولی شواهد سنگ‌شناختی مانند بافت پورفیری سنگ‌ها و وجود بافت‌های میرمکیتی و گرانوفیری حاکی از عمق نسبتاً کم توده‌های نشوه و سلیجرد (۱ تا ۴ کیلومتر) است.

تعیین گریزندگی اکسیژن محیط تشکیل آمفیبول‌ها

گریزندگی اکسیژن از جمله فاکتورهایی است که مجموعه کانی‌های سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یکی از روش‌های ارزیابی مقدار گریزندگی اکسیژن در سنگ‌های نفوذی، بررسی ترکیب آمفیبول‌هایی است که از نظر شیمیایی دارای $Al^{IV} > 0.75$ و مقدار نسبت $Fe^{*}/(Fe^{*}+Mg) > 0.3$ هستند [۱۸]. از میان نتایج ریز پردازشی آمفیبول‌های منطقه، منیزیهورنبلند‌های این سنگ‌ها دارای این شرایط هستند.

وینهل و همکاران [۱۲]

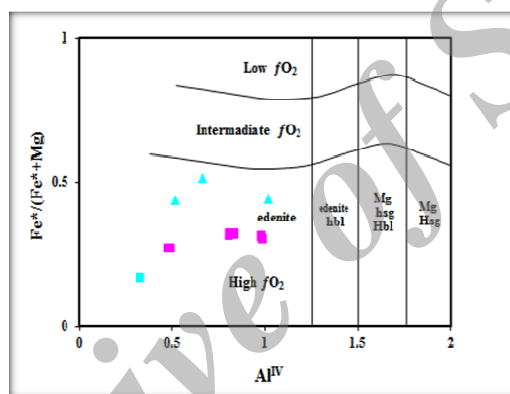
وینهل و همکاران [۱۲] نیز رابطه‌ی زیر را در فشارهای ۱-۲۰ کیلوبار و گریزندگی HM-QFM برای تعیین دمای تعادل هورنبلند همزیست با پلاژیوکلاز ارائه کرده‌اند.

$$T [^{\circ}\text{C}] = 654.9 + 25.3P$$

براساس فرمول بالا میانگین دمای توده‌ی نشوه و سلیجرد به ترتیب ۶۶۹,۸۳ و ۶۶۱,۰۴ درجه‌ی سانتیگراد به دست آمدند (جدول ۵) که به نتایج دماسنجی بلوندی و هولاند بسیار نزدیک‌اند. با توجه به کم بودن فشار در توده‌های منطقه، به نظر می‌رسد که آمفیبول نوع پارگاسیت همراه با پلاژیوکلاز کلسیک به صورت فنوکریست از عمق زیاد ریشه گرفته و بدون تغییر شیمیایی به نزدیکی سطح زمین رسیده و سنگ‌های نیمه

اکسیژن با رابطه‌ی زیر از وزن [۲۲] تأیید می‌شود. برای نمونه-های توده‌های نشوه و سلیجر، مقدار میانگین $\text{Log } f\text{O}_2$ در زمان تشکیل سنگ، به ترتیب برابر با ۱۵/۸۱ (bars) و ۱۸/۷۴- به دست آمده است (جدول ۶). قابل یادآوری است که حضور همزمان مگنتیت، اسفن و کوارتز همراه با آمفیبول در کوارتزومونوزودیوریت‌ها، گرانودیوریت‌ها و گرانیت‌های منطقه نیز مبین بالا بودن گریزندگی اکسیژن در ماگمای سازنده‌ی این سنگ‌هاست [۲۲]. گریزندگی بالای اکسیژن نشان‌دهنده‌ی تشکیل این توده‌های گرانیتوئیدی در ارتباط با مرزهای ورقه-های همگراست [۱۹، ۱۸]. همچنین حضور مگنتیت در این سنگ‌ها دلالت بر سری مگنتیت یا I-Type بودن این گرانیتوئیدها دارد [۲۳].

نسبت $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})$ در منیزیوهورنبلندها با افزایش روند جدایش، از ۰/۳۱ تا ۰/۵۶ افزایش می‌یابد و مقدار آلومینیم چار وجهی از ۰/۴۷۹ تا ۱/۰۱۹ تغییر می‌کند. چنانکه در شکل ۹ نشان داده شد، آمفیبول‌های مورد بررسی در شرایط گریزندگی اکسیژن نسبتاً بالا تشکیل شده‌اند. در سنگ‌هایی که آمفیبول کلسیک دارند، ترکیب سنگ بیشتر غنی از سیلیس و آهن است. تغییر ترکیب آمفیبول‌ها، ناشی از تغییر در گریزندگی اکسیژن و فعالیت سیلیس ماگمایی است. در حقیقت هر چه گریزندگی اکسیژن کمتر باشد، Fe^{2+} می‌تواند به مقدار بیشتری در شبکه‌ی هورنبلند جایگزین شود. بالا بودن نسبت $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ باعث جاننشینی بیشتر Mg به وسیله Al می‌شود [۷]. این ادعا با محاسبه‌ی کمی مقدار گریزندگی (مدسانی)



شکل ۹ نمودار گریزندگی اکسیژن بر پایه‌ی ترکیب آمفیبول‌ها [۱۸]. نمودار بالا بودن نسبی گریزندگی اکسیژن در زمان تبلور آمفیبول را نشان می‌دهد.

جدول ۶ مقادیر محاسبه شده‌ی $\text{Log } f\text{O}_2$ نمونه‌های توده‌های نشوه و سلیجر [۲۲].

Sample	$\text{Log } f\text{O}_2$
نشوه	
SN ۱۰-۱	-۱۵/۵۳
SN ۱۰-۲	-۱۴/۲۹
SN ۱۰-۳	-۱۷/۳۲
SN ۱۰-۴	-۱۵/۹۵
SN ۱۱-۱	-۱۶/۵۰
SN ۱۱-۲	-۱۸/۶۷
SN ۴۴-۱	-۱۲/۴۹
SN ۴۴-۲	-۱۳/۴۷
SN ۴۴-۳	-۱۵/۲۱
SN ۴۴-۴	-۱۸/۷۱
Average[kbar]	-۱۵/۸۱
سلیجر	
SS ۲۳-۱	-۱۵/۲۲
SS ۶۱-۱	-۲۲/۲۶
Average[kbar]	-۱۸/۷۴

[۲] قلمقاش ج.، فنودی م.، "نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰۰ چهارگوش ساوه، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور"، (۱۳۷۷).

[3] Rezaei-Kahkhaei M., Esmaily D., Cor fu F., "Petrogenetic modeling of rock variety in the Khalkhab-Neshveh pluton, NW of Saveh, Iran", *Island Arc* (2011) 1440-1783.

[۴] النجار ح.، "بررسی شیمی کانی‌های اصلی توده های نفوذی شمال غرب ساوه، ایران مرکزی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه تهران (۱۳۹۰).

[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.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., 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.

[۶] داودیان دهکردی ع.، "شیمی کانی‌ها و شرایط فشار-دمای تبلور توده‌های گرانیتوئیدی حاشیه‌ی رودخانه‌ی زاینده‌رود، پهنه‌ی برشی شمال شهرکرد با نگرشی ویژه به حضور اپیدوت ماگمایی"، *مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران*، شماره ۳ (۱۳۸۹) ۴۹۵-۵۱۰.

[7] 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.

[8] Sial A.N., Ferreira V.P., Fallick A.E., Jeronimo M., Cruz M., "Amphibole-rich clots in calc-alkalic granitoids in the Borborema province northeastern Brazil", *Journal of South American Earth Science*, 11, (1998) 457-471.

[9] Coltorti M., Bondaiman C., Faccini B., Grégoire M., O'Reilly S.Y., Powell W., "Amphiboles from suprasubduction and intraplate lithospheric mantle", *Lithos*, 99 (2007) 68-84.

[10] Miyashiro A., "Volcanic rock series in island arcs and active continental margins", *American Journal of Sciences*, 247 (1974) 321-355.

[11] Ghent E.D.J., Nicholls P.S., Simony J.H., Seigny M.Z., "Hornblende barometry of the Nelson batholith, southeastern British Columbia: Tectonic implications", *Canadian Journal of Earth Sciences*, 28 (1991) 1982-1991.

$$\text{Log } fO_2 = -30930/T + 14.98 + 0.142 (P-1)/T$$
نتایج کمی و کیفی حاصل از تعیین گریزندگی اکسیژن با استفاده از کانی آمفیبول که در بالا به‌طور کامل بحث شد، با نتایج حاصل از تعیین گریزندگی اکسیژن به یاری کانی بیوتیت موجود در همین نمونه‌ها [۴] کاملاً همخوانی نشان داد.

برداشت

بررسی شیمی کانی آمفیبول در توده‌های منطقه‌ی شمال غرب ساوه نشان می‌دهد که:

۱- کلیه ی آمفیبول های مورد بررسی طی فرآیندهای آذرین تشکیل شده و در گروه آمفیبول‌های کلسیک و زیر گروه منیزوهورنبلند قرار می‌گیرند که شاخص توده‌های نفوذی نوع I هستند؛

۲- این آمفیبول‌ها بیشتر در گستره‌ی آمفیبول‌های وابسته به مناطق فرورانش (S-Amph) قرار می‌گیرند که با نتایج حاصل از تعیین محیط زمین‌ساختی با استفاده از ترکیب شیمیایی بیوتیت‌ها و ژئوشیمی سنگ کل که در بررسی‌های قبلی بررسی شده اند، نیز همخوانی دارند.

۳- زمین-فشارسنجی براساس مقدار آلومینیوم موجود در آمفیبول‌های مورد بررسی، کمینه و بیشینه‌ی فشار ارزیابی شده معادل ۰/۳ تا ۱/۵ کیلو بار و عمق تقریبی ۱ تا ۴/۵ کیلومتر را نشان می‌دهد.

۴- حضور همزمان مگنتیت، اسفن و کوارتز همراه با آمفیبول در کوارتزمونودوریت‌ها، گرانودیوریت‌ها و گرانیت‌های منطقه، نشان دهنده‌ی بالا بودن گریزندگی اکسیژن در ماگمای سازنده‌ی این سنگ‌هاست. این مطلب با محاسبه‌ی کمی مقدار گریزندگی (مدسانی) اکسیژن تأیید می‌شود که برای نمونه‌های توده‌های نشوه و سلیجر، میانگین $\text{Log } fO_2$ در زمان تشکیل سنگ، به ترتیب برابر با (bars) ۱۵/۸۱- و ۱۸/۷۳- به‌دست آمده است. گریزندگی بالای اکسیژن نشان‌دهنده‌ی تشکیل این توده‌های گرانیتوئیدی در ارتباط با مرزهای ورقه‌های همگراست.

مراجع

[1] Stone D., "Temperatue and pressure Variations in suites of Archean felsic plutonic rocks, Berens River area, North west superior province Ontario, Canada", *Canadian Mineralogist*, 38 (2000) 455-470.

- [17] Pal N., Pal D.C., Mishra B., Meyer F.M., "The evolution of the Palim granite in the Bastar tin province, Central India", *Mineralogy and Petrology*, 72 (2001) 281-304.
- [18] Anderson J.L., Smith D.R., "The effects of temperature and F_{O_2} on the Al- in hornblende barometer", *American Mineralogist* 80 (1995) 549-559.
- [19] Anderson J.L., "Proterozoic anorogenic granite plutonism of North American", *Geological Society of America Memoir* 161 (1983) 133-152.
- [20] Helz R., "Phase reactions of basalts in their melting range at $P_{H_2O} = 5\text{kb}$, Part 11, Melt composition", *Journal of Petrology*, 17 (1993) 139-193.
- [21] Blundy J.D., Holland T.J.B., "Calcic amphibole equilibria a new amphibole-plagioclase thermometer", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104 (1990) 208-224.
- [22] Wones D.R., "Significance of the assemblage titanite + magnetite + quartz in granitic rocks", *American Mineralogist*, 74 (1989) 744-749.
- [23] Ishihara S., "The magnetite series and ilmenite-series granitic rocks", *Mining Geology* 27 (1977) 293-305.
- [12] Vynhal C.R., Mcsween H.Y.Jr., "Hornblende Chemistry in southern Appalachian granitoids Implications for aluminum hornblende thermobarometry and magmatic epidote stability", *American Mineralogist* 76 (1991) 176-188.
- [13] Hammarstrom J.M., Zen E-an, "Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer", *American Mineralogist* 71(1986) 1297-1313.
- [14] 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 Phutons", *American Mineralogist* 72 (1987) 231-239.
- [15] 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.
- [16] Schmid 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.

Archive