

ترموبارومتری آمفیبولیت‌های سیرجان براساس محتوای Zr در کانی اسفن (تیتانیت) و روتیل

الهام صفرزاده^{۱*}، فریبرز مسعودی^۲، سید محمد پورمعافی^۳

۱- دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۲- استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۳- دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۵

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۴/۵/۲۰

چکیده

بخشی از کمپلکس دگرگونی جنوب سیرجان را توده‌های آمفیبولیتی تشکیل داده‌است. این توده‌ها بصورت همیافت با گارنت مسکوویت شیست‌ها و هورنبلند شیست‌ها در منطقه دیده می‌شوند. ترکیب سنگ شناسی آن‌ها شامل آمفیبول از نوع مگنزویو هورنبلند تا چرماکیت، پلاژیوکلاز سدیک (Ab70)، کوارتز و کانی‌های فرعی اپیدوت، بیوتیت، اسفن و روتیل است. در این تحقیق با استفاده از محتوای Ti و Zr در کانی‌های اسفن و روتیل شرایط فشار و حرارت تشکیل این سنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج آنالیز نقطه‌ای انجام شده بر روی کانی‌های اسفن و روتیل در نمونه‌های انتخاب شده، بطور متوسط $Zr=317.57 \text{ ppm}$, $TiO_2=37.23 \text{ wt\%}$ برای کانی اسفن و $Zr=439.57 \text{ ppm}$, $TiO_2=98.48 \text{ wt\%}$ برای کانی روتیل نشان می‌دهد که محدوده فشار-دمایی این آمفیبولیت‌ها براساس کانی اسفن $T=608-691^\circ\text{C}$ و براساس کانی روتیل $T=572-723^\circ\text{C}$, $P=7.6-9 \text{ Kbar}$ است. براساس این نتایج و تطابق آن‌ها با محدوده رخساره‌های مختلف دگرگونی می‌توان گفت این آمفیبولیت‌ها در طی دگرگونی ناحیه‌ای و شرایط رخساره آمفیبولیت درجه بالا تشکیل شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: آمفیبولیت، ترموبارومتری، اسفن، روتیل، کمپلکس دگرگونی سیرجان.

مقدمه

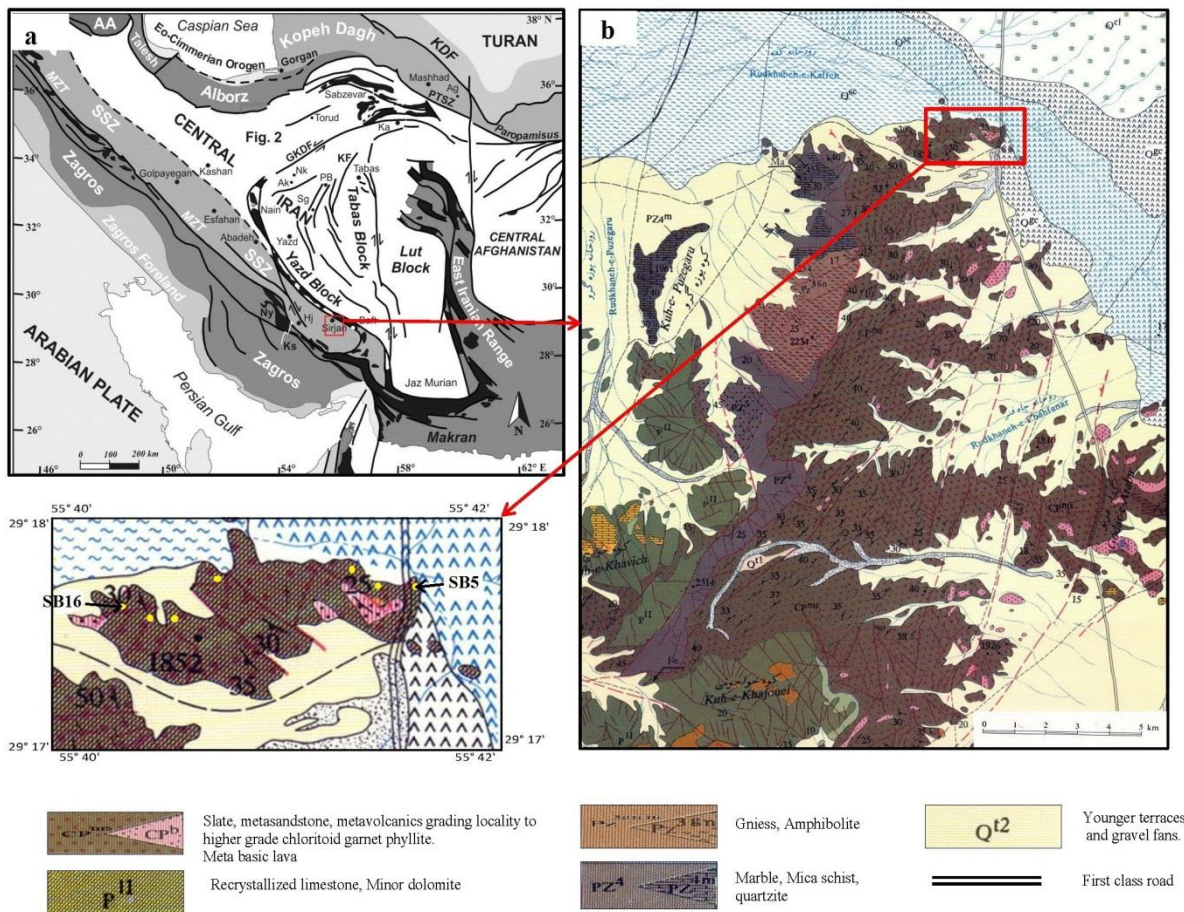
و دمایی بالاتر از رخساره‌های ذکر شده است. با توجه به فرارگیری این کمپلکس دگرگونی در انتهای زون سنندج- سیرجان، این سنگ‌ها تحت-تأثیر فرآیندهای متعدد دگرگونی در طی فرورانش نئوتتیس به زیر صفحه ایران قرار گرفته‌اند و دارای پیشینه دگرگونی پیچیده‌ای هستند از جمله این فرایندها می‌توان به روراندگی‌های مکرر از جانب شمال بسمت جنوب در طی فرورانش و تغییر هویت دگرشکلی در منطقه از شکنا به خمیری و پلاستیک در اثر دخالت گرمای حاصل از نفوذ توده‌های نفوذی در اعماق در برخی از مناطق اشاره کرد (سبزه‌ای و همکاران، ۱۹۹۳). مطالعه شرایط دگرگونی این آمفیبولیت‌ها می‌تواند در حل مسائل ژئودینامیکی و آشکار سازی روند فرایندهای دگرگونی این بخش از زون سنندج- سیرجان کمک بسیاری نماید. در این تحقیق با ارائه داده‌های جدید پتروگرافی و مینرال شیمی شرایط دما و فشار تشکیل آمفیبولیت‌های منطقه براساس محتوای زیرکن در کانی‌های اسفن و روتیل و تعیین درجه دگرگونی آن‌ها بررسی شده است.

زمین‌شناسی منطقه: کمپلکس دگرگونی سیرجان در منتهی‌الیه جنوب شرق زون دگرگونی سنندج- سیرجان و در جنوب-جنوب غرب شهر سیرجان قرار گرفته‌است (سبزه‌ای و همکاران، ۱۹۹۳). (شکل ۱a). این مجموعه از انواع متنوعی از سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای شامل فیلیت، میکا شیست، هورنبلند شیست، گارنت مسکویت شیست، کالک شیست، آمفیبولیت، گارنت آمفیبولیت و متاولکانیک تشکیل شده‌است. آمفیبولیت‌ها مورد بررسی در این تحقیق در محدوده طول‌های جغرافیایی شرقی $42^{\circ} 55' - 40^{\circ} 55'$ و عرض‌های جغرافیایی شمالی $29^{\circ} 18' 00'' - 15' 29''$ واقع شده‌اند (شکل ۱a). براساس مشاهدات

تعیین دما و فشار آمفیبولیت‌ها اطلاعات بسیار ارزشمندی درباره جایگاه پالئوتکتونیک یک منطقه دگرگونی فراهم می‌آورد ولی با توجه به اینکه بیشتر واکنش‌های انجام شده در آمفیبولیت‌ها در طی فرایند دگرگونی بصورت پیوسته‌است و در محدوده وسیعی از فشار و دما تغییرات اندکی در کانی‌شناسی این سنگ‌ها صورت می‌گیرد، تعیین شرایط دگرگونی این سنگ‌ها نسبتاً مشکل می‌باشد (تامپسون، ۱۹۸۲؛ لارید، ۱۹۸۰). استفاده از محتوای زیرکن در کانی‌هایی مانند اسفن و روتیل یکی از جدیدترین روش‌های دما- فشارسنجی و تخمین شرایط دگرگونی در این سنگ‌ها است (زاک و همکاران، ۲۰۰۴؛ واتسون و همکاران، ۲۰۰۶؛ فری و واتسون، ۲۰۰۷؛ تامکینز و همکاران، ۲۰۰۷). ساختار کانی‌شناسی اسفن و روتیل به‌گونه‌ای است که در یک محدوده فشار و دمای معین مقادیر مشخصی از عنصر زیرکن می‌تواند جانشین Ti موجود در ساختمان آن‌ها شود (واتسون و همکاران، ۲۰۰۶؛ تامکینز و همکاران، ۲۰۰۷). آمفیبولیت‌های جنوب سیرجان بخشی از کمپلکس دگرگونی سیرجان است که از لحاظ تقسیمات پهنه‌های زمین‌شناسی ایران، بخشی از زون دگرگونی سنندج - سیرجان می‌باشد (سبزه‌ای و همکاران، ۱۹۹۳). مطالعات متعددی بر روی سنگ‌های دگرگونی این منطقه در سال‌های گذشته صورت گرفته است (مؤذن، ۲۰۰۴؛ عسگری و همکاران، ۲۰۱۲؛ بیاتی-راد و همکاران، ۲۰۱۳؛ ارنج و مهاجل، ۲۰۱۳) و بیشتر محققان معتقد هستند که درجه دگرگونی آمفیبولیت‌های سیرجان در حد رخساره شیست‌سبز یا آمفیبولیت‌های درجه پایین است (پیغمبری و همکاران، ۲۰۰۵؛ عسگری و همکاران، ۲۰۱۲)، ولی شواهد کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی بیانگر احتمال تشکیل این سنگ‌ها در شرایط فشار

پسین، دگرگون شده‌اند مشاهده می‌شوند (آقنابتی، ۱۳۸۳) (شکل ۱b). از نظر ساختاری این آمفیبولیت‌ها از روند کلی سنگ‌های در برگیرنده که دارای روند شمال غرب- جنوب شرق هستند، تبعیت می‌کنند.

صحرائی این سنگ‌ها برونزد محدودی داشته و در بخش‌های مختلف منطقه بصورت رگه‌ها تا دایک‌های کوچک و پراکنده، همیافت با گارنت مسکویت شیست‌ها و هورنبلند شیست‌های منسوب به کربونیفر پایانی-پرمین آغازین که به دلیل تاثیر شدید رویداد سیمین پیشین، در زمان تریاس



شکل ۱: (a) موقعیت منطقه مورد مطالعه در زون سندج- سیرجان، ایران. (b) نقشه زمین‌شناسی ساده شده سیرجان و موقعیت نمونه‌های آنالیز شده بر روی نقشه.

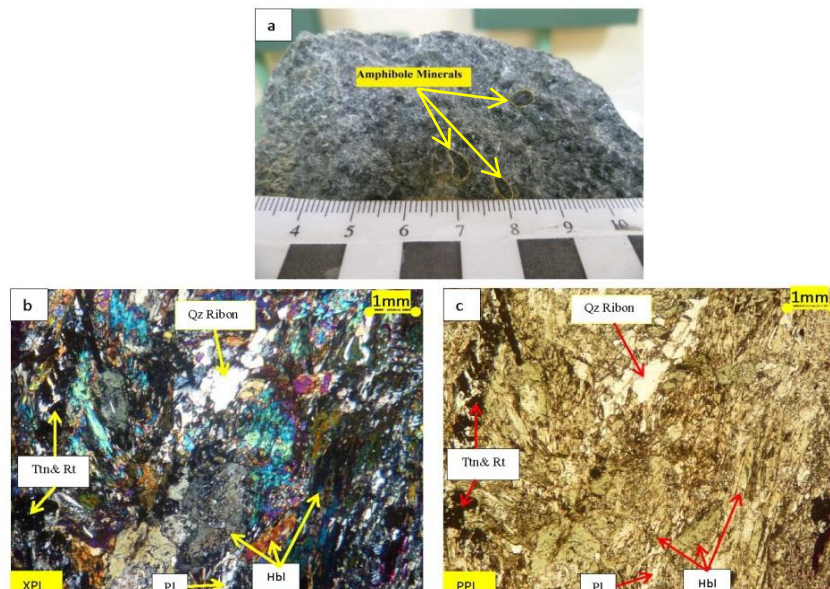
بصورت کمی از طریق آنالیز میکرو پروب با استفاده از دستگاه JEOL 8200 Super Probe در بخش زمین‌شناسی دانشگاه میلان ایتالیا مورد بررسی قرار گرفته است. ولتاژ شتاب دهنده مورد استفاده برای آنالیز ۱۵ KV و قطر پرتو تابشی ۹-۱۰*۵ است، با توجه به قطر پرتو تابشی بلورهایی با قطر بزرگتر از ۱۰ μm جهت آنالیز انتخاب شدند.

مواد و روش‌ها

پس از انجام مطالعات صحرائی و میکروسکوپی ۲ نمونه SB5 و SB16 که دارای هر دو کانی اسفن و روتیل بصورت همزیست بودند، برای تهیه مقطع نازک دوبر صیقل و مطالعات میکروپروب انتخاب شدند. شیمی کانی‌های اصلی و فرعی، اسفن و روتیل، تشکیل دهنده آمفیبولیت‌های مورد مطالعه

هورنبلند+ کوارتز+ پلاژیوکلاز+ بیوتیت+ ایلمنیت ±
 اسفن ± روتیل ± کلریت ثانویه ± اپیدوت ثانویه
 آمفیبولیت‌های گروه یک دارای فابریک
 گرانوبلاستیک، پوئی کیلوبلاستیک و در برخی
 نمونه‌ها پورفیروبللاستیک هستند. بلورهای آمفیبول
 ساب هدرال تا یوهدرال هستند و غنی از ادخال‌های
 کوارتز می‌باشند و تحت تاثیر دگرگونی پس رونده
 در برخی قسمت‌ها به کلریت تبدیل شده‌اند.
 پلاژیوکلازها عمدتاً ساب هدرال تا یوهدرال و ریزبلور
 هستند و در برخی قسمت‌ها تبدیل شدگی به
 اپیدوت نشان می‌دهند. بلورهای کوارتز دارای
 مرزهای مهاجرتی هستند و وجود ریبون‌های کوارتز
 در این نمونه‌ها نشان دهنده وجود تنش در زمان
 تبلور مجدد آنها است. بیوتیت نیز بصورت کانی
 فرعی و ساب هدرال در این آمفیبولیت‌ها مشاهده
 می‌شود. بلورهای اسفن و روتیل عمدتاً همزیست
 بوده و بصورت پراکنده و گاهی بصورت تجمعی
 مشاهده می‌شوند (شکل ۲b, c).

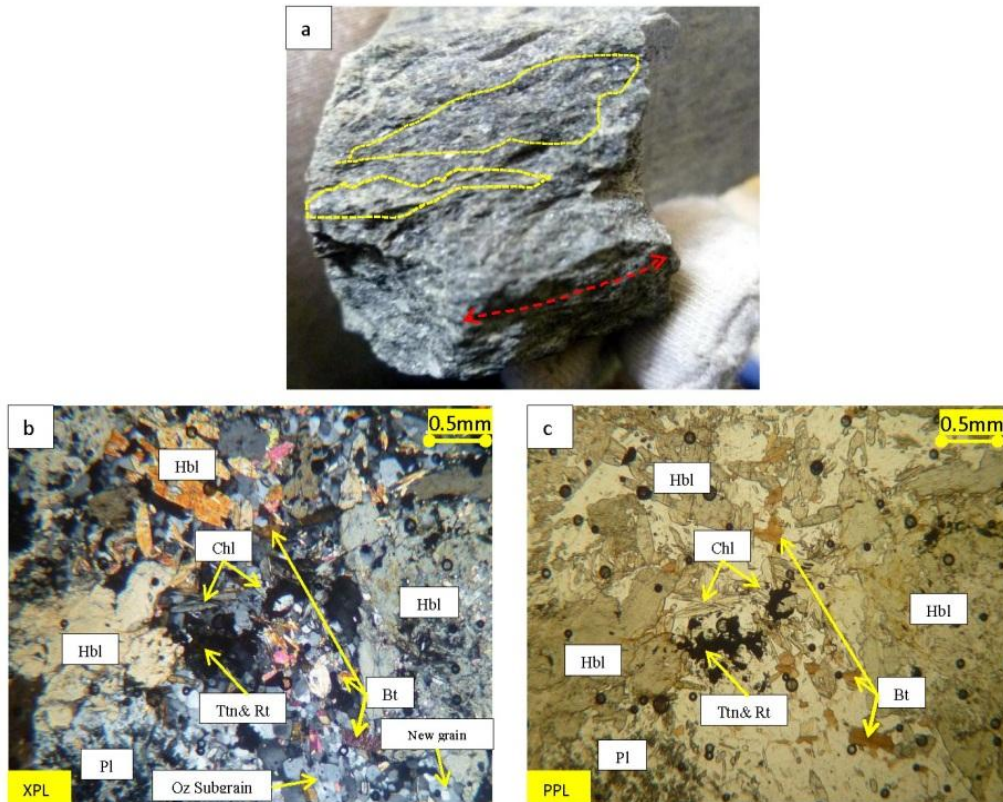
مشاهدات صحرایی و پتروگرافی: براساس مشاهدات
 صحرایی و پتروگرافی می‌توان آمفیبولیت‌های
 سیرجان را به دو گروه تقسیم‌بندی کرد.
 گروه اول: آمفیبولیت‌های درشت بلور (نمونه
 SB16)، ابعاد برخی از بلورهای آمفیبول در نمونه
 دستی به ۰.۵ تا ۱ سانتی متر نیز می‌رسد، که
 بصورت رگه‌های پراکنده همیافت با هورنبلند
 شیس‌ها و متاولکانیک‌ها مشاهده می‌شوند و
 برگوارگی ضعیفی دارند (شکل ۲a). گروه دوم که
 ریزبلورتر هستند (نمونه SB5)، بصورت توده‌هایی
 کوچک و همیافت با فیلیت و گارنت شیس‌ها
 مشاهده می‌شوند و نسبت به گروه اول برگوارگی
 واضح‌تری نشان می‌دهند (شکل ۳a). جهت عمومی
 برگوارگی این آمفیبولیت‌ها تقریباً از جهت عمومی
 برگوارگی شیس‌های منطقه تبعیت می‌کند. این
 سنگ‌ها در نمونه دستی به رنگ سبز تیره تا
 خاکستری تیره دیده می‌شوند. هر دو گروه
 آمفیبولیت‌ها با ترکیب کانی‌شناسی زیر همراه
 هستند:



شکل ۲: (a) آمفیبولیت با بلورهای درشت هورنبلند (گروه ۱). (b) تصویر میکروسکوپی XPL از آمفیبولیت گروه ۱،
 ادخال‌های فراوان کوارتز در بلورهای آمفیبول، ریبون کوارتز و تجمع گلومروپورفیریک اسفن (تیتانیت) و روتیل. (c)
 تصویر میکروسکوپی PPL.

مقدار کوارتز از پلاژیوکلاز بیشتر است، کوارتزها عمدتاً دارای مرزهای مهاجرتی و فابریک سابگرین و نیوگرین هستند. بیوتیت در این سنگها فراوانتر از آمفیبولیت‌های گروه ۱ بوده و بصورت سابهدرال دیده می‌شوند. بلورهای اسفن و روتیل نیز بصورت همزیست در کنار یکدیگر و پراکنده در بخش‌های مختلف نمونه‌ها بصورت فرعی قابل مشاهده‌اند و ابعاد آنها بین $5 \mu\text{m}$ تا $70 \mu\text{m}$ است (شکل ۳b, c و شکل ۴a,b,c).

آمفیبولیت‌های گروه دوم دارای فابریک گرانوماتوبلاستیک بوده و تا حدی جدایش بین کانی‌های تیره و روشن در آنها مشاهده می‌شود (شکل ۳a). بلورهای آمفیبول یوهدرال تا سابهدرال با ادخال‌های کوارتز هستند و تا حدی در محل شکستگی و رخ‌های بلور، به کلریت تبدیل شده‌اند. این گروه از آمفیبولیت‌ها دارای مقادیر کمتری پلاژیوکلاز نسبت به گروه اول هستند و تبدیل شدگی بیشتری به اپیدوت دارند. بلورهای کوارتز فراوانتر از گروه یک است و در برخی نمونه‌ها



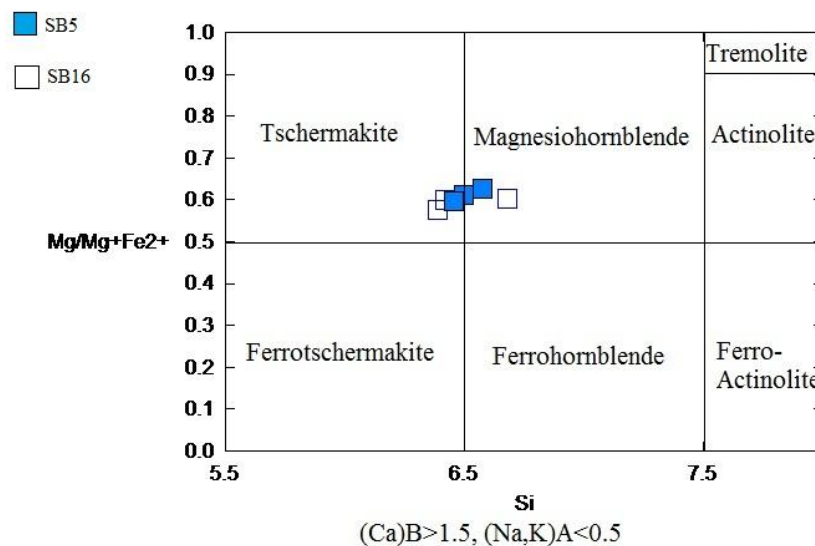
شکل ۳: (a) آمفیبولیت گروه ۲، برگوارگی (خط چین قرمز) و باندهای تفکیک یافته مافیک از فلسیک. (b) تصویر میکروسکوپی XPL از آمفیبولیت گروه ۲، خاموشی موجی، فابریک سابگرین و new grain در بلور کوارتز. (c) تصویر میکروسکوپی PPL.

بحث و نتایج

مینرال شیمی: محاسبه فرمول شیمیایی و ساختاری کانی‌ها براساس نتایج آنالیز EPMA و با استفاده از نرم افزار Norm13، (پلی و آلمر، ۲۰۰۱) انجام شده‌است، نتایج آنالیز و محاسبات نورماتیو در جدول‌های ۱ تا ۵ ارائه شده‌است.

آمفیبول: برای محاسبه فرمول ساختمانی آمفیبول‌ها از روش نرمالیزه کردن براساس ۲۳ اکسیژن و ۱۳ کاتیونی استفاده شده است (لیک،

۱۹۷۸؛ راک و لیک، ۱۹۸۴؛ موگزیه و همکاران، ۱۹۹۰؛ کوسکا و همکاران، ۱۹۹۱). براساس رده بندی آمفیبول‌ها (لیک و همکاران، ۱۹۹۷ و ۲۰۰۳؛ هاسورن و همکاران، ۲۰۰۶)، تمام آمفیبول‌های گروه ۱ و ۲ جزو آمفیبول‌های کلسیک می‌باشند و در زیر گروه منیزیو هورنبلند تا چرماکیت قرار گرفته‌اند (شکل ۴). نتایج آنالیز عناصر اصلی و محاسبات ساختاری کانی آمفیبول در نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده‌است.



شکل ۴: طبقه‌بندی آمفیبول، نمونه‌های SB5 و SB16 بر پایه ترکیب شیمیایی آن‌ها

(شکل ۵b). همچنین با توجه به موقعیت قرارگیری نمونه‌ها در نمودار ناچیت و همکاران (۲۰۰۵)، بیوتیت‌های موجود در این آمفیبولیت‌ها از نوع بیوتیت‌های اولیه تبلور مجدد یافته هستند (شکل ۵c).

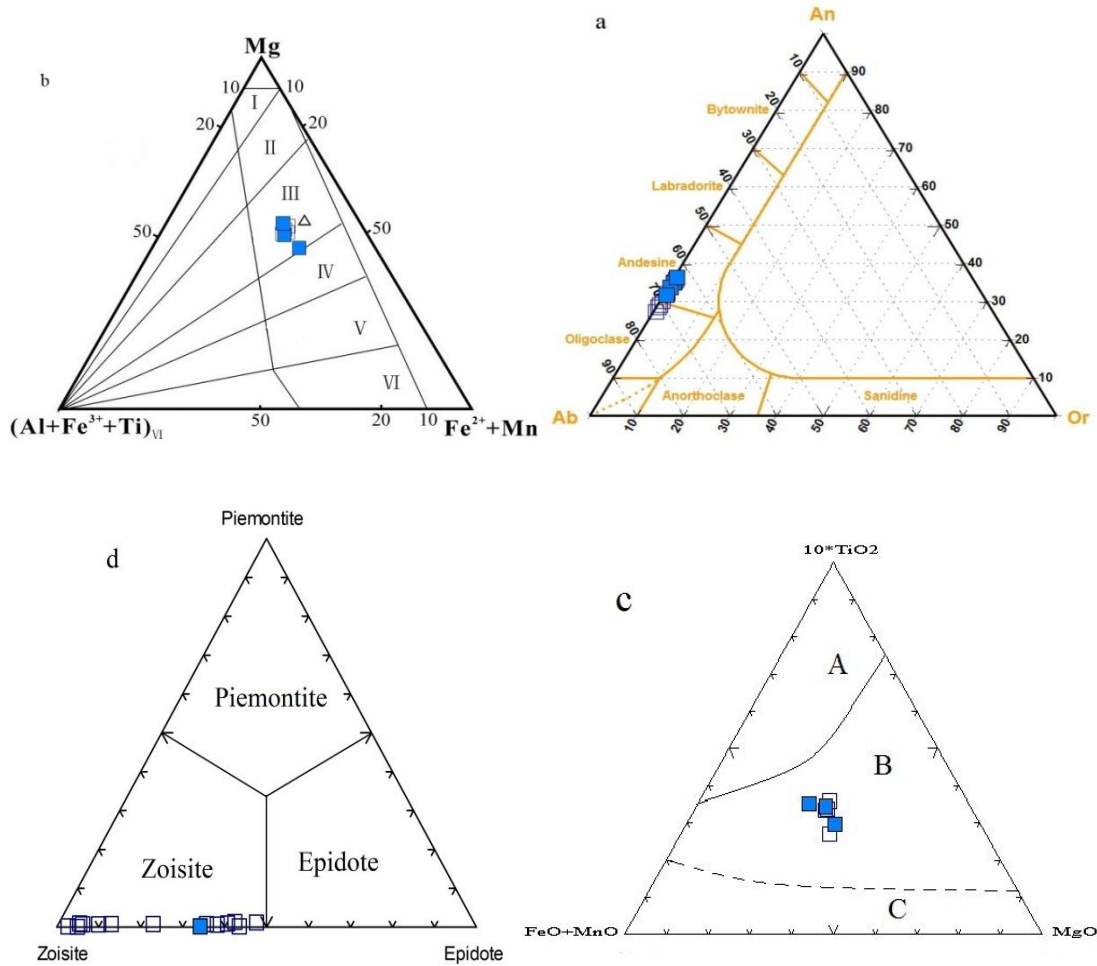
شیمی اپیدوت: با انتقال نتایج آنالیز (جدول ۴) بر روی نمودار سه‌تایی زوئزیت، اپیدوت و پیمونتیت تمامی نمونه‌ها در محدوده زوئزیت قرار گرفته‌است (شکل ۵d و شکل ۷c).

شیمی اسفن (تیتانیت) و روتیل: براساس نتایج آنالیز EPMA، مقدار TiO₂ در کانی روتیل-35.13

پلاژیوکلاز: نتایج آنالیز میکروپروب پلاژیوکلازها (جدول ۲) نشان می‌دهد که ترکیب پلاژیوکلازها از An32 تا An36 در نمونه SB5 و An28 تا An36 در نمونه SB16 متغیر می‌باشد و بطور کلی پلاژیوکلازهای هر دو نمونه براساس نمودار مثلثی Ab-Or-An (دیبر و همکاران، ۱۹۹۶) در رده الیگوکلاز- آندزین قرار می‌گیرند (شکل ۵a).

بیوتیت: براساس آنالیز EPMA انجام شده بر روی کانی بیوتیت و انتقال نتایج آن (جدول ۳) بر روی نمودار مثلثی فاستر (۱۹۶۰) ترکیب آن‌ها در محدوده استونیت تا منیزیو بیوتیت قرار گرفته‌است

38.67 wt% و در کانی روتیل 97.83- 99.07 wt% و مقدار عنصر زیرکن به ترتیب 192-414 ppm و 118-751 ppm است (جدول ۵).



شکل ۵: (a) ترکیب شیمیایی پلاژیوکلازها در نمودار An-Ab-Or. (b) ترکیب شیمیایی بیوتیتها در نمودار (c) نمودار سه تایی ناچیت و همکاران (۱۹۸۶) جهت تمایز بیوتیت‌های اولیه و بیوتیت‌هایی که دچار تعادل مجدد در محیط شده‌اند از بیوتیت‌های ثانوی. (d) نمودار طبقه بندی اپیدوت، تمامی نمونه‌ها در محدوده زونزیت قرار گرفته‌اند. علائم مشابه شکل ۴ است.

جدول ۱: نتایج آنالیز EPMA معرف آمفيبول‌هاي موجود در نمونه‌هاي SB5 و SB16. فرمول‌ها براساس ۲۳ اکسيژن و ۱۳ کاتيون محاسبه شده است.

Sample Number	SB5-C3-9	SB5-C4-3	SB5-C4-4	SB16-C2-7	SB16-C2-8	SB16-C2-9
Mineral Type	magnesian hornblende	magnesian hornblende	magnesian hornblende	tschermakitic hornblende	tschermakitic hornblende	magnesian hornblende
SiO ₂	44.51	43.85	43.93	43.63	44.21	45.98
TiO ₂	0.41	0.36	0.42	0.33	0.44	0.37
Al ₂ O ₃	16.23	16.95	16.61	16.11	15.94	13.45
FeO	10.39	11.46	10.89	14.48	13.77	13.77
Sample Number	SB5-C3-9	SB5-C4-3	SB5-C4-4	SB16-C2-7	SB16-C2-8	SB16-C2-9
Fe ₂ O ₃	4.6	2.41	3.37	2.67	2.12	1.55
MnO	0.27	0.28	0.31	0.19	0.29	0.22
MgO	9.82	9.46	9.59	9.12	9.67	10.5
CaO	11.34	11.48	11.48	11.23	11.36	11.51
Na ₂ O	1.72	1.78	1.64	1.61	1.64	1.53
K ₂ O	0.06	0.10	0.10	0.39	0.32	0.36
H ₂ O*	2.03	2.04	2.03	2.04	2.05	2.06
Total	101.38	99.9	100.37	101.7	101.8	101.3
Structural formulae						
Si	6.573	6.456	6.499	6.39	6.42	6.68
Al ^{iv}	1.427	1.544	1.501	1.61	1.58	1.32
Sum T	8	8	8	8	8	8
Al ^{vi}	1.398	1.397	1.395	1.17	1.15	0.98
Ti	0.046	0.040	0.047	0.04	0.05	0.04
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.3	0.27	0.17
Fe ²⁺	1.283	1.411	1.347	1.47	1.40	1.50
Mn	0.034	0.035	0.039	0.02	0.03	0.03
Mg	2.162	2.076	2.115	1.99	2.09	2.27
Sum C	5	5	5	5	5	5
Ca(B)	1.794	1.811	1.820	1.76	1.77	1.79
Na(B)	0.493	0.508	0.470	0.23	0.23	0.20
(Na+K)(A)	0.298	0.338	0.309	0.293	0.289	0.29

جدول ۲: نتایج آنالیزهای معرف EPMA کانی پلاژیوکلاز

Sample Number	SB3-C3-13	SB3-C3-8	SB3-C2-5	SB16-C2-17	SB16-C1-10	SB16-C1-8
SiO ₂	59.22	60.25	59.42	61.56	59.86	59.98
TiO ₂	0.01	0.01	0.02	0.04	0.02	0
Al ₂ O ₃	26.47	25.39	25.9	24.26	25.4	25.43
Fe ₂ O ₃	0.05	0.3	0.11	0.08	0	0.09
FeO	0	0	0	0	0.06	0
MnO	0	0.01	0.01	0	0.01	0
MgO	0.02	0	0	0	0	0.01
CaO	7.77	6.8	7.15	6.2	7.54	7.7
Na ₂ O	7.42	7.98	7.64	8.51	7.39	7.74
K ₂ O	0.05	0.05	0.04	0.03	0.07	0.05
Total	101.01	100.8	100.3	100.72	100.38	101.02
Si	2.6143	2.6601	2.6389	2.7137	2.6637	2.6457
Ti	0.0003	0.0003	0.0007	0.0014	0.0006	0.0001
Al	1.3772	1.3212	1.3557	1.2604	1.3321	1.322
Fe ₃	0.0017	0.01	0.0038	0.0028	0	0.0031
Fe ₂	0	0	0	0	0.0022	0
Mn	0	0.0004	0.0005	0	0.0003	0
Ca	0.3675	0.3217	0.3402	0.2928	0.3595	0.3639
Na	0.6351	0.6831	0.6579	0.7273	0.6376	0.6619
K.	0.0028	0.003	0.0023	0.0016	0.0037	0.0029
Anorthite	0.366	0.319	0.34	0.287	0.359	0.354
Albite	0.632	0.678	0.658	0.712	0.637	0.643
Orthoclase	0.003	0.003	0.002	0.002	0.004	0.003

جدول ۳: نتایج آنالیزهای معرف EPMA کانی بیوتیت

Sample Number	SB5 C3-8	SB5 C2-3	SB5 C2-2	SB16 C2-1	SB16 C1-17	SB16 C1-16
SiO ₂	37.76	37.97	38.35	38.43	37.92	37.47
TiO ₂	1.17	1.57	1.45	1.4	1.56	1.04
Al ₂ O ₃	18.36	16.95	17.9	17.73	18.2	18.16
FeO	13.59	16.92	14.5	14.11	14.24	14.36
MnO	0.13	0.12	0.1	0.13	0.13	0.11
MgO	14.05	11.95	13.09	13.12	13.57	13.75
CaO	0.06	0.12	0.11	0.13	0.09	0.05
Na ₂ O	0.09	0.09	0.1	0.07	0.08	0.05
Cl	0.08	0.11	0.07	0.07	0.1	0.11
H ₂ O	3.95	3.88	3.93	3.92	3.95	3.92
Total	98.88	98.87	98.89	98.66	99.31	98.75
Si	2.8514	2.9148	2.9098	2.929	2.8607	2.8432
Ti	0.0665	0.0907	0.0828	0.0803	0.0886	0.0592
Al	1.634	1.5335	1.6007	1.5926	1.6182	1.624
Fe ₂	0.8582	1.0862	0.9201	0.8994	0.8984	0.9112
Mn	0.0083	0.0075	0.0064	0.0083	0.0083	0.0072
Mg	1.5814	1.3673	1.4804	1.4904	1.5259	1.5551
Ca	0.0048	0.0098	0.0093	0.0109	0.0075	0.0041
Na	0.0139	0.0131	0.0152	0.0103	0.0115	0.007
K.	0.9277	0.9009	0.8982	0.9285	0.9113	0.9418
Cl	0.0105	0.0149	0.0091	0.0089	0.013	0.0143
H	1.9895	1.9851	1.9909	1.9911	1.987	1.9857
xMg(Fe ^{II+})	0.648	0.557	0.617	0.624	0.629	0.631
xMg(Fetot)	0.648	0.557	0.617	0.624	0.629	0.631
Al(IV)	1.149	1.085	1.09	1.071	1.139	1.157
Al(VI)	0.485	0.448	0.51	0.522	0.479	0.467

جدول ۴: نتایج آنالیزهای معرف EPMA کانی اپیدوت

Sample Number	SB16-C2-12	SB16-C3-4	SB5-c2-2	SB5-c3-5
SiO ₂	40.11	39.7	39.54	39.29
TiO ₂	0.01	0	0.02	0.1
Al ₂ O ₃	32.05	30.4	32.41	29.34
Fe ₂ O ₃	1.63	3.8	2.23	5.9
MnO	0.13	0.14	0.18	0.04
MgO	0.03	0.01	0.02	0.03
CaO	24.22	23.88	24.11	24.14
Na ₂ O	0.01	0	0.02	0
K ₂ O	0	0	0.01	0
Cl	0.03	0.02	0	0
H ₂ O	1.97	1.95	1.98	1.96
Total	100.2	99.91	100.58	100.82
Si	3.04	3.04	2.99	3.01
Al	2.86	2.74	2.89	2.65
Fe ₃	0.093	0.219	0.127	0.340
Mn	0.0075	0.008	0.010	0.002
Ca	1.9671	1.959	1.956	1.981
Cl	0.0043	0.003	0	0
H	0.99	0.997	1	1
Zoisite	0.86	0.744	0.89	0.655
Epidote	0.09	0.219	0.11	0.34
Piemontite	0.007	0.008	0	0.002

جدول ۵: نتایج آنالیز EPMA اسفن (تیتانیت)

Sample Number	SB5-C4-4	SB5-C5-2	SB5-C9-2	SB5-C12-3	SB16-C7-4	SB16-C6-2	SB16-C5-3
Mineral Type	Titanite	Titanite	Titanite	Titanite	Titanite	Titanite	Titanite
SiO ₂	28.87	29.29	28.55	28.92	31.17	29.98	30.27
CaO	28.42	28.43	28.26	28.27	28.86	27.79	26.72
TiO ₂	37.6	36.32	37.4	38.67	35.13	37.32	38.23
Al ₂ O ₃	1.3641	2.14	1.7124	1.18	2.01	1.27	1.49
V ₂ O ₃	2.57	2.39	2.57	2.64	2.03	2.91	1.98
FeO	0.40	0.64	0.30	0.63	0.27	0.68	0.64
Zr ppm	414	245	528	259	351	234	192
Th PPM	286	0	0	226	864	231	128
U PPM	0	408	310	602	551	41	463
CaTiSiO ₅	0.967	0.921	0.963	0.974	0.886	0.935	0.934
CaAlSiO ₄ (OH)	0.021	0.059	0.028	0.008	0.079	0.049	0.057
CaFeSiO ₄ (OH)	0.011	0.018	0.009	0.018	0.008	0.015	0
Total	99.2903	99.3895	98.8801	100.7962	99.6449	100.2668	99.412
Sample Number	SB5-C6-2	SB5-C9-1	SB5-C12-2	SB5-C13-3	SB16-C3-3	SB16-C4-2	SB16-C6-1
Mineral Type	Rutile	Rutile	Rutile	Rutile	Rutile	Rutile	Rutile
SiO ₂	0.14	0.08	0.1	0.07	0.01	0.01	0.02
CaO	0.56	0.47	0.22	0.23	0.20	0.14	0.18
TiO ₂	98.47	97.97	98.65	99.07	97.83	99.01	98.28
Al ₂ O ₃	0	0	0.03	0.04	0.03	0.05	0.04
V ₂ O ₃	0.42	0.97	0.65	0.74	0.92	0.3	0.68
FeO	0.43	0.25	0.40	0.40	0.35	0.29	0.23
Zr PPM	667	444	118	242	438	417	751
Th PPM	0	7	15	0	273	0	0
U PPM	336	0	96	0	675	153	426
Total	100.13	99.79	100.07	100.57	99.48	99.86	99.56

اغلب با کانی‌های تیتان دار دیگر مانند روتیل و ایلمنیت همزیست می‌باشد. سیستم کانی شناسی اسفن نیز مانند زیرکن در دماهای بالا نزدیک به ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد بسته می‌شود، همچنین

ژئوترموبارومتري: اسفن یا تیتانیت (CaTiSiO₅) یکی از کانی‌های متداول فرعی در سنگ‌های دگرگونی و آذرین با ترکیب سنگ‌شناسی و محیط‌های زمین‌ساختی متفاوت می‌باشد. این کانی

تامکینز و همکاران (۲۰۰۷)، لسلیه و همکاران (۲۰۰۸) و نمودارهای توصیفی استفاده شده است. مطالعات تجربی بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی دارای اسفن، زیرکن و روتیل نشان داده است که مقدار تعادلی زیرکن در کانی اسفن (ZrSphene, ppm) با فشار و دما دارای رابطه لگاریتم خطی است (معادله ۱) (لسلیه و همکاران، ۲۰۰۸).

$$(ZrSphene, ppm) = 10.52(\pm 0.10) - \frac{7708(\pm 101)}{T(K)} - 960(\pm 10) \frac{P(Gpa)}{T(K)}$$

براساس این مطالعات، محتوای زیرکن در اسفن نسبت به محتوای زیرکن در روتیل کمتر تحت تاثیر فشار است (شکل ۷a). برای کالیبراسیون و محاسبات ترمومتری روتیل از معادله ۲، واتسون و همکاران، ۲۰۰۶؛ فری و واتسون، ۲۰۰۷) (شکل ۷b) و برای محاسبات بارومتری آن از معادله ۳، تامکینز و همکاران، ۲۰۰۷) استفاده شده است.

معادله ۲:

$$T (^{\circ}C) \text{ Rutile} = \frac{4470 \pm 120}{(7.36 \pm 0.10) - \log(Zr, ppm)} - 273$$

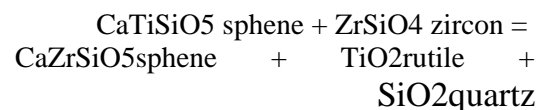
معادله ۳:

$$P (Kbar) = (T (K) * (0.1453 - R \ln \Phi) - 85.7) / 0.473$$

$R = 8.314 \text{ J/K mol}$, $\Phi = Zr, ppm$
 جدول ۶ نتایج محاسبات دماسنجی انجام شده بر روی نمونه‌های اسفن و روتیل و نتایج فشارسنجی کانی روتیل در نمونه‌های SB5 و SB16 را نشان می‌دهد. مطالعه ترموبارومتری این نمونه‌ها نشان می‌دهد که آمفیبولیت‌های مورد مطالعه در محدوده دمایی ۶۰۸ تا ۶۹۱ درجه سانتیگراد براساس ترمومتری اسفن و محدوده ۵۷۲ تا ۷۲۳ درجه سانتیگراد بر اساس ترمومتری روتیل، و فاصله فشاری ۷٫۶ تا ۹ کیلوبار تشکیل شده‌اند (جدول ۶). با انطباق نتایج ترموبارومتری با محدوده

بدلیل پایین بودن سرعت توزیع کاتیونی (22-10 ~) m^2/s at $750^{\circ}C$ در این کانی دماهای بدست آمده از ترمومتری دقت بالاتری نسبت به سایر ترمومترهای رایج دارد، در نتیجه اطلاعات ارزشمندی از فرایندهای دما بالا می‌تواند در اختیار ما قرار دهد (رولاند فراست و همکاران، ۲۰۰۰؛ لسلیه و همکاران، ۲۰۰۸). همچنین با بررسی کانی روتیل نیز بدلیل پایداری زیاد آن در برابر فرایندهای فیزیکی و شیمیایی می‌تواند اطلاعات خوبی در ارتباط با اوج شرایط دگرگونی (زاک و لوویزوتو، ۲۰۰۶؛ میلر و همکاران، ۲۰۰۷؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۰) و یا شرایط تشکیل سنگ مادر (اسپیر و همکاران، ۲۰۰۶؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱) بدست آورد. عناصر تیتان و زیرکن از جمله عناصر کمیاب مهمی هستند که تحت شرایط فشار و دمای معین می‌توانند به مقدار محدود جانشین یکدیگر در ساختمان بلورهای دارای تیتان و زیرکن مانند زیرکن، اسفن و روتیل شوند (واکنش ۱). با بررسی میزان این جانشینی می‌توان اطلاعات مهمی در ارتباط با شرایط ژئو ترموبارومتری و سنگ شناسی پوسته بدست آورد) واتسون و همکاران، ۲۰۰۶؛ تامکینز و همکاران، ۲۰۰۷، لسلیه و همکاران، ۲۰۰۸؛ تراپر، ۲۰۰۸).

واکنش ۱:

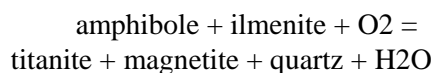


ترموبارومتری آمفیبولیت‌های مورد مطالعه

در این مطالعه محاسبات دما-فشارسنجی براساس محتوای زیرکن در کانی‌های اسفن و روتیل همزیست (شکل ۶) در نمونه‌های SB5 و SB16 انجام شد (جدول ۶). برای محاسبه دما به این روش از کالیبراسیون و معادلات واتسن (۲۰۰۶)، فری و واتسون (۲۰۰۷)،

رخساره آمفیبولیت است. در نمونه‌های مورد مطالعه نیز چنین حاشیه واکنشی در اطراف ایلمنیت‌ها دیده می‌شود (شکل ۶a,b).

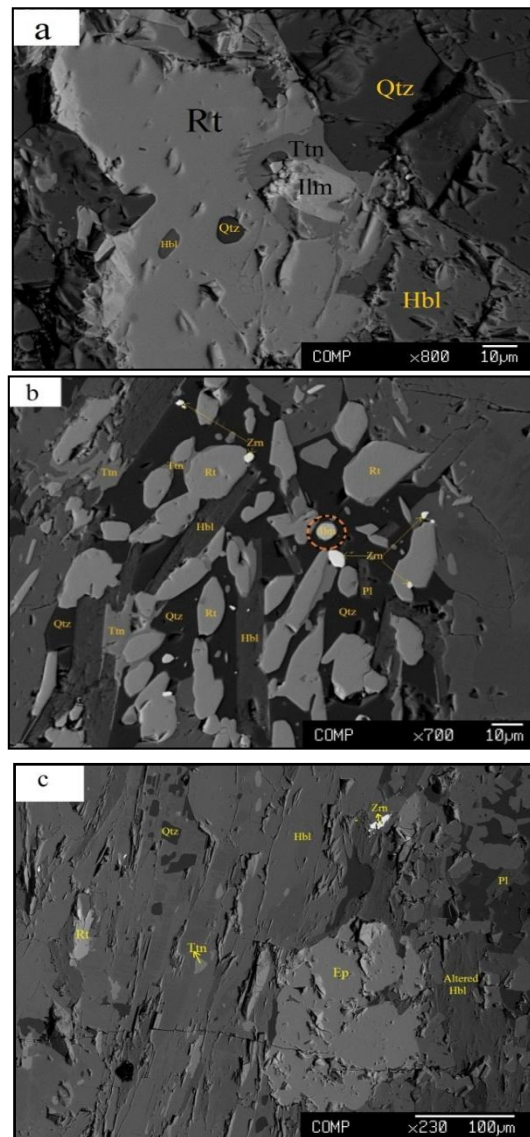
واکنش ۲:



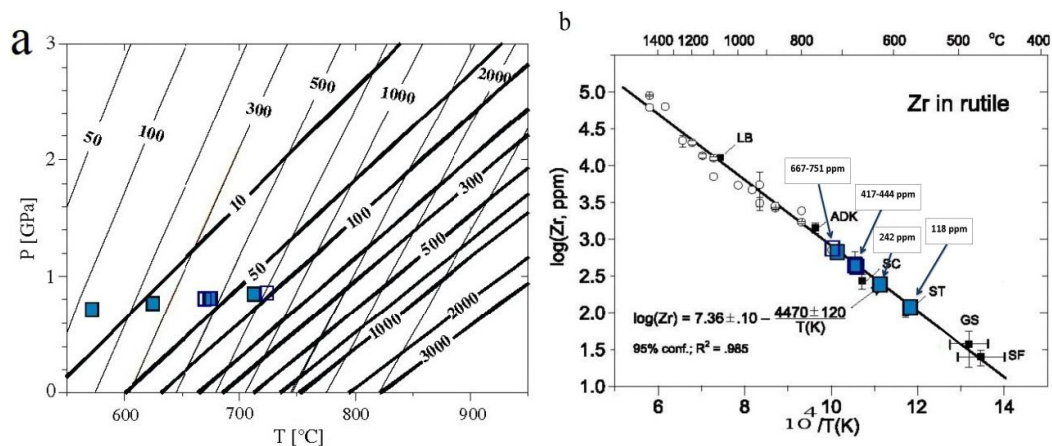
رخساره‌های دگرگونی، این آمفیبولیت‌ها در محدوده رخساره آمفیبولیت درجه بالا قرار می‌گیرند (شکل ۸). همچنین براساس مطالعات هارلو و همکاران (۲۰۰۶)، شواهد بافتی مانند تشکیل اسفن در حاشیه ایلمنیت‌ها بیانگر دگرگونی تحت شرایط

جدول ۶: دما و فشارهای محاسبه شده براساس کالیبراسیون واتسون و فری و فشار محاسبه شده براساس کالیبراسیون تامکینز.

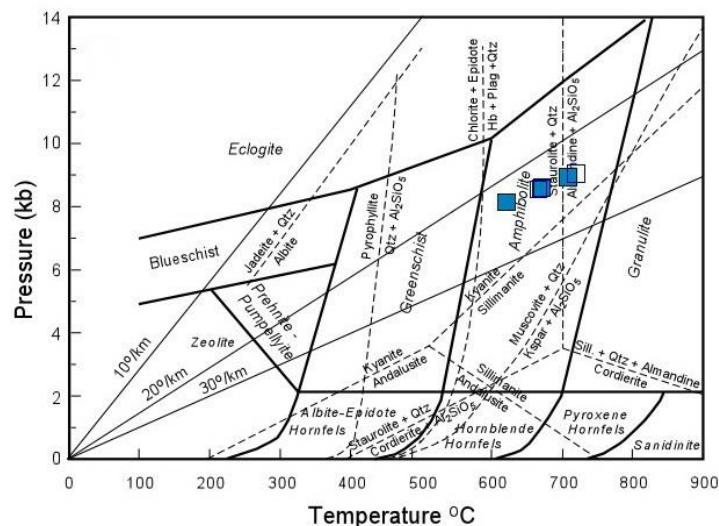
sample	Zr ppm in sphene	Sphene T (°C)	Zr ppm in Rutile	Rutile T (°C)	Rutile P(Kbar)
SB5-C6-2	414	670.1606	667	712.4771	8.89689 1
SB5-C9-1	245	627.4471	444	675.5176	8.55342 2
SB5-C12-2	528	691.3702	118	572.2913	7.59412 8
SB5-C13-3	259	631.7875	242	625.2786	8.08654 5
SB16-C3-3	351	656.2893	438	674.3298	8.54238 3
SB16-C4-2	234	623.8904	417	670.065	8.50275 1
SB16-C6-1	192	608.8894	751	723.7977	9.00209 5



شکل ۶: تصاویر Back Scatter Image (BSI) انتخاب شده نمونه‌های SB5 و SB16. (a) بلور روتیل با ادخال‌های کوارتز و هورنبلند و بلور ایلمنیت با حاشیه‌ای از تیتانیت (SB16). (b) تصویر BSI کانی‌های نمونه SB5، دایره مقطع نارنجی: تبدیل شدگی بلور ایلمنیت در حاشیه به تیتانیت (اسفن). (c) تصویر BSI بلور اپیدوت همزیست با هورنبلند (SB5).



شکل ۷: (a) ارتباط بین محتوای زیرکن در کانی روتیل و اسفن با شرایط فشار و دما و موقعیت نمونه‌های روتیل آنالیز شده بر روی نمودار. خطوط پررنگ نشان دهنده میزان زیرکن در اسفن و خطوط کمرنگ نشان دهنده زیرکن در روتیل است (مقدار زیرکن برحسب ppm). (b) بررسی رابطه بین محتوای زیرکن کانی روتیل و دمای محاسبه شده (دوایر تو خالی: نمونه‌های سنتتیک، مربع‌های توپر مشکی نمونه‌های طبیعی واتسون (۲۰۰۶) و مربع‌های تو پر آبی و مربع‌های تو خالی نمونه‌های روتیل (SB5 و SB16)).



شکل ۸: موقعیت آمفیبوليت‌های مورد مطالعه بر روی نمودار رخساره‌های دگرگونی

تبلور یافته، کوارتز و کانی‌های فرعی اسفن و روتیل و ایلمنیت مشاهده می‌شوند. -براساس محتوای زیرکن و میزان جاننشینی آن با تیتان در ترکیب اسفن و روتیل، این سنگ‌ها در محدوده دمایی ۶۰۸ تا ۶۹۱ درجه سانتیگراد و فشارهای ۷٫۶ تا ۹ کیلوبار تشکیل شده‌اند. - انطباق نتایج ترموبارومتري با نمودارهای تفکیک رخساره‌های دگرگونی و مشاهده حاشیه واکنشی

نتیجه گیری

-مطالعات صحرائی، پتروگرافی، مینرال شیمی و ترموبارومتري کانی‌های اسفن و روتیل، آمفیبوليت‌های سیرجان نشان می‌دهد که: -این سنگ‌ها به دو صورت درشت بلور و ریز بلور با ترکیب کانی شناسی مشابه شامل آمفیبول‌های کلسیک از نوع منیزیم هورنبلند تا چرماکیت، پلاژیوکلاز (An32- An36)، بیوتیت اولیه تجدید

شرایط دگرگونی ناحیه‌ای فشار بالا تا دمای متوسطی را تحمل کرده‌اند.

تشکر و قدردانی

از پروفسور استفانو پلی که در انجام آنالیزهای میکروپروب در دانشگاه میلان با ما همکاری داشته-اند کمال قدردانی و تشکر را داریم.

تیتانیت در اطراف ایلمنیت‌های موجود در نمونه‌های مورد مطالعه بیانگر تشکیل این سنگ‌ها تحت شرایط رخساره آمفیبولیتی درجه بالا است. -براساس این نتایج می‌توان گفت که احتمالاً در طی فرورانش نئوتتیس به زیر صفحه ایران سنگ‌های این بخش از زون سنندج- سیرجان

منابع

-آقا نباتی، ع. و.، ۱۳۸۳. زمین شناسی ایران، چاپ اول، انتشارات سازمان زمین‌شناسی ایران، تهران، ۶۰۶ ص.

-Asghary, G., Mirnejad, H. and Ghalamghash, J., 2012. Mineralogy and thermo-barometry of amphibolites in Gol- Gohar iron ore deposit Sirjan, Kerman: Journal of New findings in applied geology (In Persian), v.11, P. 94-104.

-Angiolini, L., Gaetani, M., Muttoni, G., Stephenson, M. and Zanchi, A., 2007. Tethyan oceanic currents and climate gradients 300 m.y. ago: Journal of Geology, v.35, p.1071-1074.

-Bayati- Rad, Y., Mirnejad, H. and Ghalamghash, J., 2013. Distribution and Abundance of Rare Earth Elements in Magnetite from Gol-Gohar Iron Ore Deposit, Sirjan, Kerman: Journal of Earth Science (In Persian), v.90, p. 217-224.

-Cosca, M. A., Essene, E. J. and Bowman, J. R., 1991. Complete chemical analyses of metamorphic hornblendes: Implications for normalizations, calculated H₂O activities and Thermobarometry: Contribution to mineralogy and petrology, v. 108, p. 472-484.

-Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J., 1962. Rock- forming

minerals, 3rd Volume: Longman-London, 528 p.

-Ferry, J.M. and Watson, E.B., 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers: Contrib Mineral Petrol, v. 154, p. 429-437.

-Foster, M.D., 1960. Interpretation of the composition of tri octahedral micas: US Geological Survey Prof, v. 354, p. 1-49.

-Frost, R., Chamberlain, k. R. and Schumacher, j. C., 2002. Sphene (Titanite): phase relations and role as a geochronometer: Chemical Geology, v. 172, p. 131-148.

-Harlov, D., Tropper, P., Sefert, W., Nijland, T. and Forster, H. J., 2006. Formation of Al-rich titanite (CaTiSiO₄O-CaAlSiO₄OH) reaction rims on ilmenite in metamorphic rocks as a function of fH₂O and fO₂: Journal of Lithos, v. 88, p.72-84.

-Hawthorne, F.C. and Oberti, R., 2006. On the classification of amphiboles: Can Mineral, v. 44, p. 1-21.

-Laird, J., 1980. Phase equilibria in mafic schist from Vermont: Journal of Petrology, v.21, p. 1-37.

- Leake, B.E., 1978. Nomenclature of amphiboles: *Can Mineral*, v. 16, p. 501-520.
- Leake, B.E., Woollwy, A. R. and Arps, C. E., 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names: *Can Mineral*, v. 35, p. 219-246.
- Leake, B., Woollwy, A. R. and Arps, C. E., 2003. Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the International Mineralogical Association's amphibole nomenclature: *Can Mineral*, v.41, p. 1355-1370.
- Leslie, H., Hayden, E., Watson, B. and Wark, D. A., 2008. A thermobarometer for sphene (Titanite): *Contrib Mineral Petrol*, v. 155, p. 529-540.
- Miller, C., Zanetti, A. and Thöni, M., 2007. Eclogitisation of gabbroic rocks: redistribution of trace elements and Zr in rutile thermometry in an Eo-Alpine subduction zone (Eastern Alps): *Chemical Geology*, v. 239, p. 96-123.
- Mogessie, A., Tessadri, R. and Veltman, C.B., 1990. EMPAMPH a hyper card program to determine the name of an amphibole from electron microprobe analysis according to the International Mineralogical Association scheme: *Computers & Geosciences*, v.16 (3), p. 309-330.
- Moazzen, M., 2004. Chlorite-Chloritoid- Garnet equilibria and geothermometry in the Sanadaj-Sirjan metamorphic belt, southern Iran: *Iranian Journal of Science & Technology, Trans. A*, v. 28 (A1), p. 65-78.
- Nachit, H., 1986. Contribution à l'étude analytique et expérimentale des biotites des granitoïdes, Applications typologiques: Tese de Doutorado, Université de Bretagne Occidentale, Brest, 238 p.
- Nachite, H., Ibhi, A., Abia, E.H. and Ben Ohoud, M., 2005. Discrimination between Primary magmatic biotites, re-equilibrated biotites and neoformed biotites: *C. R. Geoscience*, v. 337, p. 1415-1420.
- Orang, K. and Mohajjel, M., 2013. Poly-deformation and fabrics in the Shurow metamorphic complex, west of Sirjan: *Iranian Journal of Geology (In Persian)*, v. 7(27), p. 41-53.
- Poli, S. and Ulmer, p., 2001. Norm13: Geology software.
- Peighambari, S., Moradian, A. and Ahmadipour, H., 2003. A new model for the formation of actinolite rich layers in Khaju complex in the south-east of Sirjan (Kerman): The 22th Symposium on the Geoscience, Tehran, Iran.
- Rock, N.M.S. and Leake, B.E., 1984. The International Mineralogical Association amphibole nomenclature scheme: computerization and its consequences: *Mineralogical Magazine*, v. 48, p. 211-277.
- Sabzehei, M., Rowshan Ravan, J., Eshraghi, S.A. and Navazi, M., 1993. Geological map of Gole Gohar, Neyriz, Sirjan and Khabr 1:100000. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Schmid, R., Fettes, D., Harte, B., Davis, E. and Desmons, J., 2007. A systematic nomenclature for metamorphic rocks, 1. How to name a metamorphic rock: SCMR website, 12 p.
- Spear, F.S., Wark, D.A., Cheney, J.T., Schumacher, J.C. and Watson, E.B., 2006. Zr-in-rutile thermometry in blueschists from Sifnos, Greece: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 152, p. 375-385.
- Thompson, J., Larid, J. and Thompson, A.B., 1982. Reaction in amphibolites, greenschist and blueschist: *Journal of Petrology*, v. 23, p. 1-27.
- Tomkins, H.S., Powell, R. and Ellis, D.J., 2007. The pressure dependence of the zirconium-in-rutile thermometer: *Journal of Metamorphic Geology*, v. 25, p. 703-713.

- Troppe, P. and Manning, C., 2008. The current status of titanite–rutile thermobarometry in ultrahigh-pressure metamorphic rocks: The influence of titanite activity models on phase equilibrium calculations: *Chemical Geology*, v. 254, p. 123-132.
- Watson, E.B., Wark, D. A. and Thomas, J. B., 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile: *Contrib Mineral Petrol*, v. 151, p. 413–433.
- Zack, T. and Manning, C., 2004. Temperature dependence of Zr in rutile: empirical calibration of a rutile thermometer *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 148, p. 471–48.
- Zack, T. and Luvizottow, G.L., 2006. Application of rutile thermometry to eclogites, *Mineral: Petrol*, v. 88, p. 69–85.
- Zhang, G.B., David, J.E., Andrew, G.C., Zhang, L.F. and Song, S.G., 2010. Zr-in-rutile thermometry in HP/UHP eclogites from Western China: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 160, p. 427–439.
- Zheng, Y.F., Zhang, L.F., Du, J.X. and Lu, Z., 2011. Zr-in-rutile thermometry of eclogite in the Dabie orogen: constraints on rutile growth during continental subduction-zone metamorphism: *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 40, p. 427–451.