



بررسی شرایط دما و فشار تشکیل آمفیبولیت‌های مجموعه‌ی افیولیتی پشت بادام (شمال شرقی یزد)

زهرا مختاری*، قدرت ترابی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان

(دریافت مقاله: ۹۰/۱۲/۱۳، نسخه نهایی: ۹۱/۵/۱۱)

چکیده: آمفیبولیت‌ها یکی از سنگ‌های مهم موجود در افیولیت پشت بادام است و حاصل دگرگونی بازالت‌های این افیولیت‌اند. بررسی‌های سنگ نگاری و شیمی کانی‌ها نشان می‌دهد که دو نوع آمفیبولیت در افیولیت پشت بادام وجود دارند: (۱) آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز حد واسط که شامل پاراژن کانی‌های آمفیبول + پلاژیوکلاز، آمفیبول + پلاژیوکلاز ± کوارتز، پلاژیوکلاز + آمفیبول + اسفن، پلاژیوکلاز + آمفیبول + ایلمنیت، آمفیبول + ایلمنیت + اسفن هستند و (۲) آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز غنی از آنورتیت که از پاراژن کانی‌های آمفیبول + پلاژیوکلاز، آمفیبول + پلاژیوکلاز ± گارنت، آمفیبول + پلاژیوکلاز ± کوارتز، آمفیبول + ایلمنیت، تشکیل شده‌اند. فشارسنجی آمفیبول و دما- فشارسنجی آمفیبول - پلاژیوکلاز در آمفیبولیت‌های نوع اول فشار ۶۱۶ تا ۷۷۹ کیلو بار و دمای ۶۴۹٫۷ تا ۷۳۸٫۳ درجه سانتی گراد (رخساره آمفیبولیت) و در آمفیبولیت‌های نوع دوم فشار ۴۴۷ تا ۹۳۱ کیلو بار و دمای ۹۲۹٫۹ تا ۱۵۶۶ درجه سانتی گراد (رخساره گرانولیت و بالاتر) را نشان می‌دهد. دمای بالا در آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز غنی از آنورتیت (دمای ذوب سنگ) به دلیل پرهنیتی شدن پلاژیوکلازها (M1) قبل از دگرگونی در رخساره‌ی آمفیبولیت (M2) و تشکیل پلاژیوکلازهایی با آنورتیت فراوان است. وجود کانی‌های پرهنیت، کلریت، سریسیت، اپیدوت و لوکوکسن نشان از دگرگونی برگشتی در حد رخساره شیبست سبز (M3) پس از دگرگونی در رخساره‌ی آمفیبولیت دارد. با توجه به سن احتمالی تشکیل این افیولیت در پالئوزویک بالایی آمفیبولیت‌ها حداقل دستخوش سه رویداد دگرگونی M1 (سیمرین پیشین)، M2 (سیمرین میانی) و M3 (سیمرین پسین) را در مزوزویک شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: افیولیت؛ آمفیبولیت؛ دما- فشارسنجی؛ پالئوزویک؛ مزوزویک؛ سیمرین؛ ایران مرکزی؛ پشت بادام.

مقدمه

های پلاژیک تشکیل شده‌اند [۱]. آمفیبولیت‌ها بخشی از سنگ‌های دگرگون قابل مشاهده در افیولیت‌ها را تشکیل می‌دهند. بررسی آمفیبولیت‌های موجود در افیولیت‌ها به آگاهی از ماهیت دایک‌ها، گدازه‌های بالشی و سنگ‌های آذرین اولیه در افیولیت‌ها کمک مهمی می‌کنند [۲-۵]. زمین‌دما- فشارسنجی سنگ‌های دگرگون موجود در افیولیت‌ها وسیله‌ی بسیار مهمی در تعیین دما و فشار اعمال شده بر افیولیت‌های پیش و پس از جای‌گیری روی قاره‌ها به حساب می‌آیند.

افیولیت‌ها مجموعه‌هایی سنگی هستند که به‌عنوان قطعه‌های لیتوسفری اقیانوسی، شاخص بسته شدن اقیانوس‌ها و محل حوضه‌های اقیانوسی ناپدید شده به حساب می‌آیند. به عبارتی دیگر افیولیت‌ها دنباله‌ی عمودی پوسته‌ی (لیتوسفر) اقیانوسی را نشان می‌دهند که در اثر رویدادهای زمین‌ساختی روی سطح زمین رانده شده‌اند. دنباله‌ی افیولیتی از قاعده به سمت بالا از پریدوتیت، گابرو، دیا باز، اسپیلیت، چرت‌های رادیولار و آهک

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۳۲۲۴۲۰۳۶، پست الکترونیکی: Mokhtarizahra89@yahoo.com

این ناحیه ناشی از کوتاه‌شدگی و تغییر زمین ساختی مهم در روند های ساختاری جنوب غربی بلوک ایران مرکزی است. نقشه‌ی زمین‌شناسی ساده شده‌ی از منطقه‌ی مورد بررسی در شکل ۱ آمده است.

بررسی‌های صحرایی

مجموعه سنگ‌های دگرگون پشت بادام از واحدهای چینه-زمین ساختی سنگ‌های افیولیتی، دنباله‌های شیب قاره‌ای، توربدیت های آذرآواری و سنگ‌های کربناتی فلات قاره‌ای تشکیل شده‌اند. افیولیت پشت بادام عبارتند از پریدوتیت‌های دگرگون، آمفیبولیت، متاگابرو، رودینگیت و لیستونیت (شکل ۲ الف). آمفیبولیت‌ها در این افیولیت به صورت تپه‌های کم ارتفاع دیده می‌شوند (شکل ۲ ب)، در نمونه‌ی دستی به رنگ سبز تیره هستند و در بخش‌هایی از منطقه‌ی مورد بررسی در اثر پدیده دگرگونی جدایشی، بخش‌های تیره و روشن از هم جدا شده و دارای لایه‌های تیره و روشن‌اند. منشورهای آمفیبول نیز در نمونه‌ی دستی قابل مشاهده است. لیستونیت‌ها در راستای گسل‌های منطقه با روند عمومی شمالی - جنوبی دیده می‌شوند. سال‌سنجی یک نمونه هورنبلند از آمفیبولیت‌های افیولیت پشت بادام به روش $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ توسط [۱۰] سنی معادل $1,83 \pm 187,6$ میلیون سال یعنی مرز بین ژوراسیک پایینی و ژوراسیک میانی و به‌طور دقیق تر بخش بالایی ژوراسیک پایینی را به‌دست داده است که بیانگر تاثیر فاز کوهزایی سیمین میانی در تشکیل آمفیبولیت‌های افیولیت پشت بادام است. سنگ‌های دنباله‌ی افیولیتی با مرزی رسوبی به وسیله‌ی توربدیت‌های آذرآواری دگرگون شده پشت بادام، متشکل از توفها و لاپیلی توف‌های با میان لایه‌هایی از سنگ ماسه‌های کربناتی تا توفیتی دگرگون شده و مرمهرای متناوب با متاچرت‌های نازک لایه حاوی کنودونت‌های پالئوزئیک فوقانی پوشیده شده‌اند. مجموعه سنگ‌های نواحی شیب قاره‌ای به‌صورت تناوبی از سنگ ماسه‌های گریوکی و آرژیلیت‌های دگرگون شده با میان طبقاتی از مرمهرای نازک لایه روی دنباله‌های یاد شده قرار گرفته‌اند. واحدهای سنگی نواحی فلات قاره‌ای مرمهرایی ضخیم لایه تا توده‌ای را تشکیل می‌دهند که اغلب به‌صورت ورقه‌های رانده مجزا، روی واحدهای سنگی پشت بادام رانده شده یا به‌صورت هورس‌هایی (*horse*) محصور به وسیله‌ی گسل های راستالغز بین واحدهای سنگی دیگر

در بخش‌های مختلفی از ایران همچون منطقه‌ی پشت بادام (استان یزد)، افیولیت های دگرگون شده را می‌توان مشاهده کرد. نظر به این که تا کنون آمفیبولیت‌های افیولیت پشت بادام از نظر سنگ‌شناسی مورد بررسی قرار نگرفته‌اند، بررسی آن‌ها از لحاظ کانی‌شناسی و شرایط دما و فشار تشکیل، می‌تواند گام موثری در روشن ساختن رخداد‌های زمین‌شناسی در این منطقه باشد. افیولیت پشت بادام در بلوک پشت بادام در شمال شرقی استان یزد و در حدود تقریبی طول جغرافیایی "۲۴° ۲۹' ۵۵° شرقی و عرض جغرافیایی "۲۲' ۵۸' ۳۲° شمالی قرار گرفته است.

زمین‌شناسی عمومی

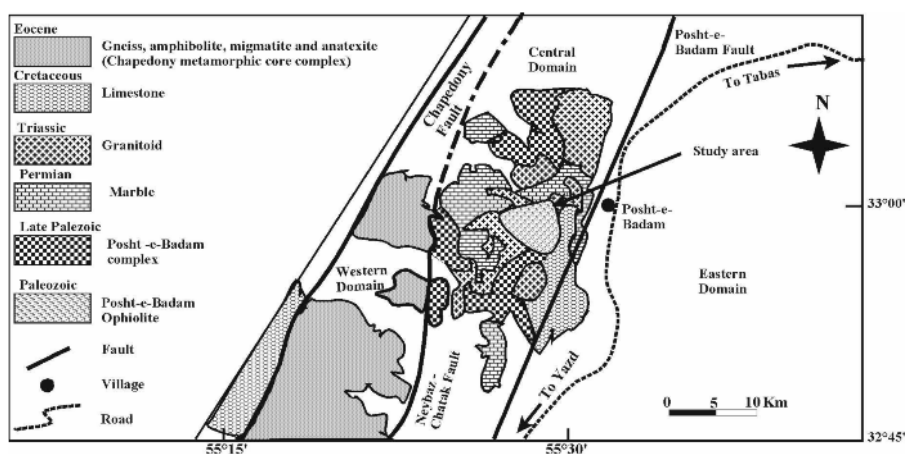
خرد قاره‌ی شرق - ایران مرکزی (CEIM = Central - East Iranian Microcontinent) بخشی از ایران است که با زمین درز افیولیتی سیستان، افیولیت‌های نایین - بافت، گسل درونه و افیولیت های کاشمر - سبزواری احاطه شده و به وسیله‌ی گسل‌های طولی که به سمت غرب خمیدگی دارد و از نوع امتداد لغز راستگردند، قابل تقسیم به بلوک لوت، فرازمین شتری، بلوک طبس، فرازمین کلمرد، بلوک پشت بادام، فرو افتادگی بیاضه - بردسیر و بلوک یزد است [۶].

منطقه‌ی مورد بررسی بخشی از خرد قاره‌ی شرق - ایران مرکزی است. بر اساس [۷] بلوک پشت بادام به سه بخش شرقی، مرکزی و غربی تقسیم شده است. افیولیت پشت بادام، بنابر این رده بندی، در بخش مرکزی واقع شده است. بخش مرکزی با حداکثر پهنا ۱۷ کیلومتر یک زون گسلی پهناور است که از شرق با گسل پشت بادام و از غرب با گسل نی باز - چاتک محصور شده است و میزبان سنگ‌های دگرگون همبافت پشت بادام، افیولیت پشت بادام بعلاوه چندین توده‌ی نفوذی گرانیته تا تونالیتی هستند و که این توده‌های نفوذی بیشتر در بخش‌های شمالی این بخش برونزد دارند. سنگ‌های بخش مرکزی در طول گسل نی باز - چاتک روی سنگ‌های بخش غربی قرار گرفته‌اند. اگرچه اتصال بین گستره‌ی مرکزی و غربی بیشتر در دو نوار غیر ممتد رخنمون یافته است، ولی نشان می‌دهد که یک سیستم گسلی کم زاویه (گسل نی باز - چاتک) دوناحیه‌ی یاد شده را در کنار هم قرار داده است [۸]. به اعتقاد [۹] دگرشکلی شکننده‌ی موجود در منطقه‌ی ساغند و پشت بادام حاصل برخورد بلوک عربی و اوراسیاست و ریخت‌شناسی

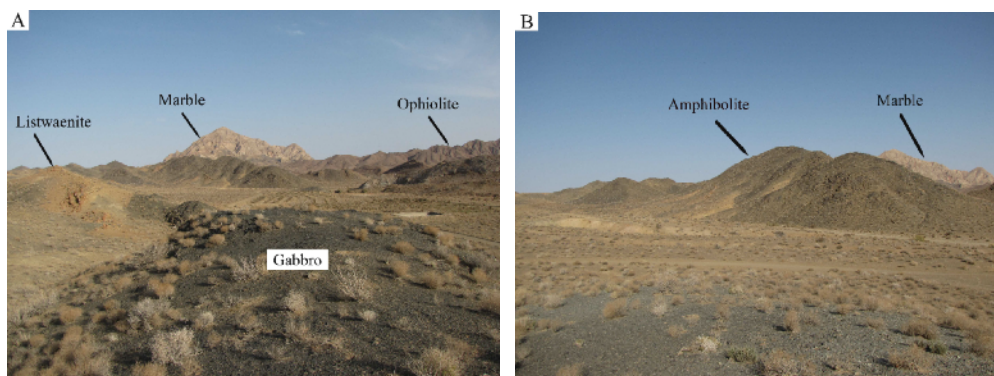
روش بررسی

پس از بررسی‌های صحرایی و نمونه‌برداری از افیولیت پشت بادام و آمفیبولیت‌های موجود در این منطقه به‌منظور بررسی-های سنگ نگاری و کانی‌شناسی، ۵۰ مقطع نازک میکروسکوپی نیز تهیه شدند. از بین مقاطع میکروسکوپی، تعداد ۵ مقطع انتخاب و از آن‌ها برای آنالیز ریز پردازش الکترونی مقطع نازک صیقلی تهیه شد. نمونه‌های مناسب با استفاده از ریز پردازنده‌ی الکترونی JEOL مدل JXA-8800 (WDS) دانشگاه کاناواوی ژاپن با ولتاژ شتاب دهنده‌ی 20 kV و جریان 20 nA آنالیز شدند. در محاسبه‌ی مقدار Fe^{3+} برای دستیابی به فرمول ساختاری کانی‌ها نیز از عنصرسنج کانی‌ها استفاده شد. علامت اختصاری کانی‌ها بر اساس [۱۴] نوشته شده است. نتایج آنالیز داده‌های ریز پردازش و فرمول ساختاری کانی‌های آمفیبولیت-های موجود در افیولیت پشت بادام در جدول‌های (۱ و ۲) آورده شده‌اند. $Mg\#$ آمفیبول نیز به‌صورت $Mg / (Mg + Fe^{2+})$ محاسبه شد.

یافت می‌شوند. نفوذ توده‌های متعدد گرانیتوئیدی در این مجموعه موجب شدند تا این همبافت درجه‌های متفاوت دگرگونی از درجه‌های بالا (آمفیبولیت، میگماتیت و...) تا ضعیف (فیلیت، کربنات متبلور و...) دگرگونی نشان دهد. روی همه این واحدها با آهک‌های کرتاسه پوشانده شده است. داشتن همراهانی از سنگ‌های پالئوزویک سبب شد تا [۱۱] این مجموعه را به سن پرکامبرین - پالئوزویک بداند. [۱۲] نیز زمان تشکیل و دگرگونی این همبافت را پرکامبرین در نظر گرفته است. اما به اعتقاد [۱۳] علاوه بر شواهد فسیل‌شناسی، تکه‌هایی از سنگ‌های دگرگون پشت بادام را در کنگلومرا و ماسه سنگ‌های قاعده‌ای تریاس (کوه سفید دنباله و ساغند) می‌توان یافت که به سمت بالایی دنباله به سنگ آهک و دولومیت‌های دارای آثار کرم و میکرو فسیل‌های تریاس تحتانی- میانی تبدیل می‌شود. بنابراین، سن مجموعه سنگ-های دگرگون پشت بادام را پالئوزویک پایانی-تریاس پیشنهاد کرده است.



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی ساده شده منطقه‌ی مورد بررسی با تغییرات از [۱۱].



شکل ۲ تصاویر صحرایی از افیولیت پشت بادام و واحدهای وابسته (دید رو به شمال).

ادامه جدول ۲

Sample Point	B۱۱۱	B۴۵۰-۱	Sample Point	B۱۰۶-۳	B۱۰۶-۳	Sample Point	B۴۵۰-۱	B۴۵۰-۱	B۴۵۰-۱	Sample Point	B۱۰۶-۳	B۱۰۶-۳
Mineral	PI	PI	Mineral	Ms	Ms	Mineral	Grt	Grt	Grt	Mineral	Ill	Ill
SiO ₂	۴۵٫۹۳	۴۴٫۶۸	SiO ₂	۴۷٫۱۶	۴۷٫۰۵	SiO ₂	۴۱٫۷۵	۳۹٫۱۸	۳۹٫۴۷	SiO ₂	۰٫۰۰	۰٫۰۰
TiO ₂	۰٫۰۰	۰٫۰۰	TiO ₂	۰٫۰۰	۰٫۰۱	TiO ₂	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۳	TiO ₂	۵۵٫۰۰	۵۷٫۳۱
Al ₂ O ₃	۳۴٫۹۹	۳۵٫۴۴	Al ₂ O ₃	۳۶٫۴۱	۳۷٫۴۳	Al ₂ O ₃	۳۳٫۳۳	۳۰٫۵۸	۳۰٫۶۰	Al ₂ O ₃	۰٫۰۲	۰٫۰۲
Cr ₂ O ₃	۰٫۰۰	۰٫۰۰	Cr ₂ O ₃	۰٫۰۰	۰٫۰۰	Cr ₂ O ₃	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	Cr ₂ O ₃	۰٫۰۰	۰٫۰۰
FeO*	۰٫۰۵	۰٫۰۳	FeO*	۰٫۹۶	۰٫۵۶	FeO*	۰٫۰۴	۳٫۷۰	۳٫۵۳	FeO*	۳۹٫۵۹	۳۳٫۳۷
MnO	۰٫۰۰	۰٫۰۰	MnO	۰٫۰۴	۰٫۰۵	MnO	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۰٫۰۷	MnO	۲٫۴۰	۱٫۸۵
MgO	۰٫۰۰	۰٫۰۰	MgO	۰٫۵۰	۰٫۳۵	MgO	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۰۲	MgO	۰٫۲۴	۰٫۲۴
CaO	۱۸٫۳۰	۱۸٫۹۷	CaO	۰٫۱۴	۰٫۱۰	CaO	۲۳٫۴۴	۲۴٫۰۴	۲۴٫۱۷	CaO	۰٫۰۸	۰٫۲۲
Na ₂ O	۱٫۴۷	۰٫۷۷	Na ₂ O	۰٫۲۶	۰٫۱۷	Na ₂ O	۰٫۶۹	۰٫۰۰	۰٫۰۰	Na ₂ O	۰٫۰۴	۰٫۰۱
K ₂ O	۰٫۰۰	۰٫۰۰	K ₂ O	۱۰٫۱۵	۱۰٫۴۷	K ₂ O	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	K ₂ O	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Total	۱۰۰٫۷۵	۹۹٫۸۹	Total	۹۵٫۶۱	۹۶٫۲۰	Total	۹۸٫۵۶	۹۷٫۶۰	۹۷٫۸۸	Total	۹۷٫۳۷	۹۳٫۰۲
Oxygen#	۸	۸	Oxygen#	۲۲	۲۲	Oxygen#	۱۲	۱۲	۱۲	Oxygen#	۳۲	۳۲
Si	۲٫۱۰۲	۲٫۰۶۵	Si	۶٫۲۰۷	۶٫۱۵۱	Si	۲٫۸۰۲	۲٫۷۷۶	۲٫۷۸۵	Si	۰٫۰۰	۰٫۰۰۰
Ti	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	Ti	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	Ti	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	Ti	۴٫۲۹۵	۴٫۷۱۰
Al ^{IV}	۱٫۸۸۶	۱٫۹۲۹	Al ^{IV}	۱٫۷۹۳	۱٫۸۴۹	Al ^{IV}	۰٫۱۹۸	۰٫۲۲۴	۰٫۲۱۵	Al ^{IV}	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۳
Al ^{VI}	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	Al ^{VI}	۳٫۸۵۱	۳٫۹۱۴	Al ^{VI}	۲٫۶۱۵	۲٫۴۵۶	۲٫۴۵۷	Al ^{VI}	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Cr	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	Cr	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	Cr	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	Cr	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Fe ²⁺	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	Fe ²⁺	۰٫۱۰۶	۰٫۰۶۲	Fe ²⁺	۰٫۷۵۵	۰٫۷۸۵	۰٫۷۷۷	Fe ²⁺	۳٫۴۳۷	۳٫۰۴۹
Fe ³⁺	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۱	Fe ³⁺	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	Fe ³⁺	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	Fe ³⁺	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Mn	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	Mn	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۵	Mn	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۴	Mn	۰٫۲۱۱	۰٫۱۷۱
Mg	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	Mg	۰٫۰۹۸	۰٫۰۶۹	Mg	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۲	Mg	۰٫۳۲۷	۰٫۳۳۹
Ca	۰٫۸۹۷	۰٫۹۳۹	Ca	۰٫۰۱۹	۰٫۰۱۴	Ca	۱٫۶۸۶	۱٫۸۲۵	۱٫۸۲۷	Ca	۰٫۰۰۹	۰٫۰۲۶
Na	۰٫۱۳۱	۰٫۰۶۹	Na	۰٫۰۶۶	۰٫۰۴۲	Na	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	Na	۰٫۰۰۸	۰٫۰۰۲
K	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	K	۱٫۷۰۳	۱٫۷۴۷	K	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	K	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Sum	۵٫۰۱۸	۵٫۰۰۳	Sum	۱۳٫۸۴۸	۱۳٫۸۵۴	Sum	۸٫۰۵۶	۸٫۰۷۳	۸٫۰۶۷	sum	۷٫۹۹۹	۸٫۰۰۰
Ab	۱۲٫۷۰۰	۶٫۸۰۰				Almandine	۳۰٫۹۲۰	۲۹٫۹۹۰	۲۹٫۷۶۰			
An	۸۷٫۳۰۰	۹۳٫۲۰۰				Andradite	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰			
Or	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰				Grossular	۶۹٫۰۷۰	۶۹٫۷۷۰	۷۰٫۰۲۰			
Name	Bytownite	Anorthite				Pyrope	۰٫۰۰۰	۰٫۱۳۰	۰٫۰۶۰			
						Spessartine	۰٫۰۰۰	۰٫۱۰۰	۰٫۱۶۰			
						Uvarovite	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰			

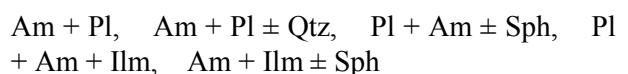
سنگ نگاری کانی‌ها

گارنت ۵٪، اسفن، ایلمنیت، پرهنیت، کلریت و لوکوکسن ۱۰٪ بودند. آمفیبول‌ها در این سنگ‌ها نیز هم به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار و هم به صورت سوزن‌های ریز دیده شدند. پلاژیوکلازها اغلب بی‌شکل و پرکننده‌ی فضای بین آمفیبول‌ها و برخی از آن‌ها نیز دارای ادخال‌هایی از سوزن‌های آمفیبول بودند. کلریت در اثر دگرگونی برگشتی آمفیبول‌ها به وجود آمده و لوکوکسن که مجموعه‌ای از کانی‌های تیتان‌دار است حاصل دگرسانی کانی‌هایی مانند اسفن و ایلمنیت می‌باشد. پرهنیت‌ها نیز از پلاژیوکلازهای کلسیک تشکیل شده‌اند. پارازنز کانی‌های زیر



نیز در این آمفیبولیت‌ها مشاهده شدند

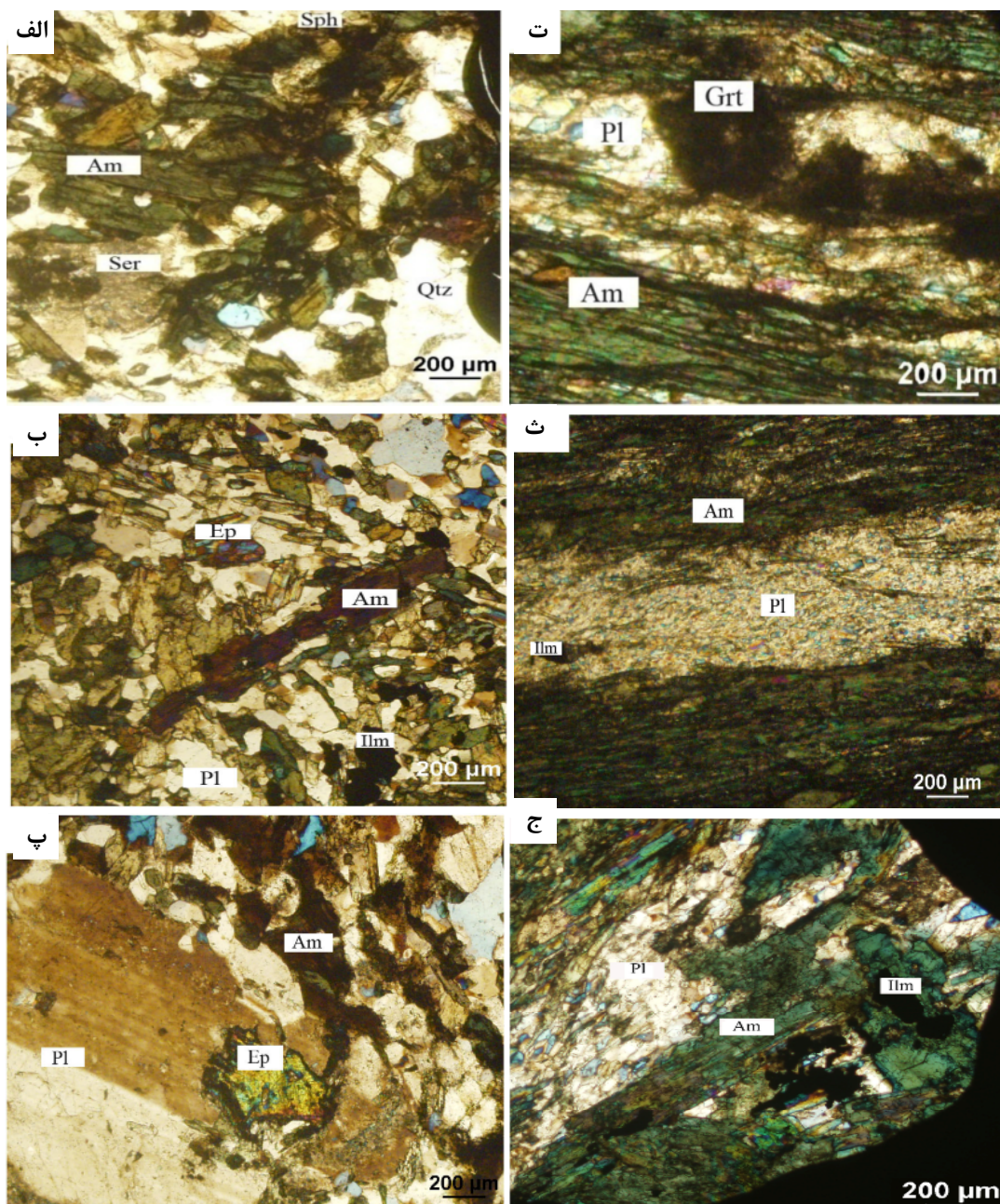
(۱) آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز حدواسط دارای کانی‌های اصلی آمفیبول ۴۰٪، پلاژیوکلاز ۳۰٪ و کانی‌های فرعی کوارتز ۱۰٪، اسفن ۱۰٪، ایلمنیت ۵٪، آپاتیت، سربسیت و اپیدوت ۵٪ بوده‌اند. در این سنگ‌ها آمفیبول‌ها به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار در مقاطع طولی و عرضی با چند رنگی سبز دیده می‌شوند. پلاژیوکلازهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار با ماکل پلی سنتتیک بودند. کوارتزها نیز دارای ادخال‌های سوزنی آپاتیت هستند. پارازنز کانی-های زیر در این آمفیبولیت‌ها قابل مشاهده است:



(۲) آمفیبولیت‌های غنی از آنورتیت دارای کانی‌های اصلی آمفیبول ۴۰٪، پلاژیوکلاز ۲۵٪ و کانی‌های فرعی کوارتز ۲۰٪،

مشاهده در هر دو آمفیبولیت بافت‌های نماتوبلاستیک و پویکیلوبلاستیک هستند. هر دو آمفیبولیت فاقد کلینوپیروکسن‌اند که علت آن تشکیل این آمفیبولیت‌ها در گستره‌ی پیش از رخساره‌ی گرانولیت است [۱۵]. تصاویر میکروسکوپی از کانی‌های تشکیل دهنده‌ی آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلازهای حد واسط و آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز غنی از آنورتیت در شکل ۳ آورده شده‌اند.

آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلازهای حد واسط فاقد گارنت و مسکویت و آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز غنی از آنورتیت فاقد اپیدوت، آپاتیت و سربیسیت هستند. در بررسی مقاطع میکروسکوپی نیز جدایش بخش‌های تیره و روشن به خوبی قابل مشاهده است و بخش‌های تیره شامل کانی‌های آمفیبول، اسفن، ایلمنیت و گارنت و بخش‌های روشن شامل کانی‌های پلاژیوکلاز، مسکویت و کوارتز از هم جدا شده. بافت‌های قابل



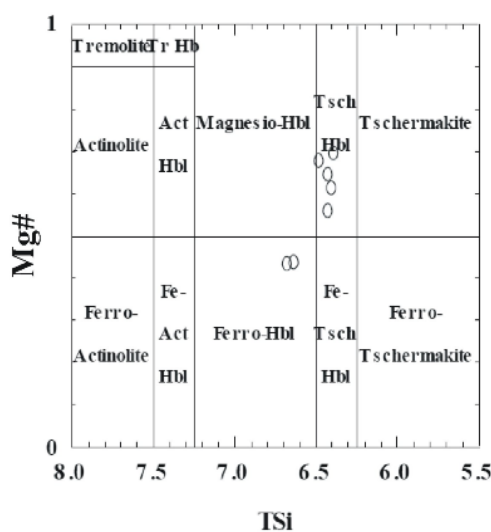
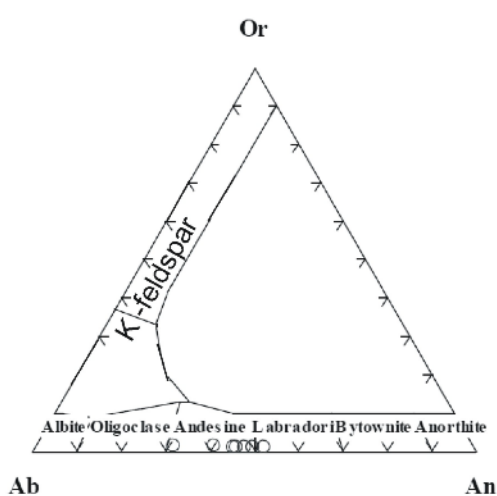
شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از کانی‌های تشکیل دهنده‌ی آمفیبولیت‌های پشت بادام، الف تا پ آمفیبولیت‌های نوع اول (آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز حد واسط)، ت تا ج آمفیبولیت‌های نوع دوم (آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلازهای آنورتیتی) (همه تصاویر در حالت XPL).

شیمی کانی‌ها

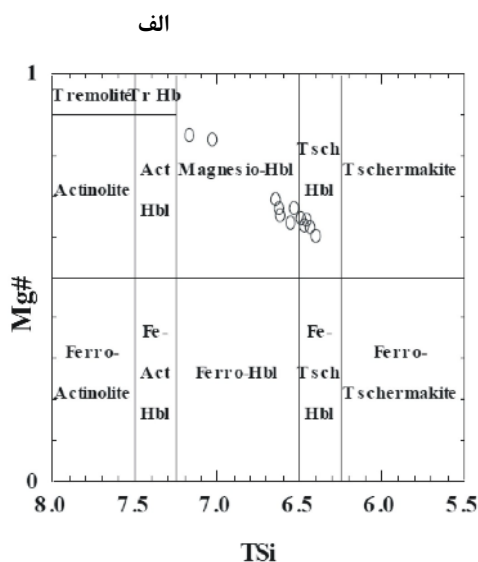
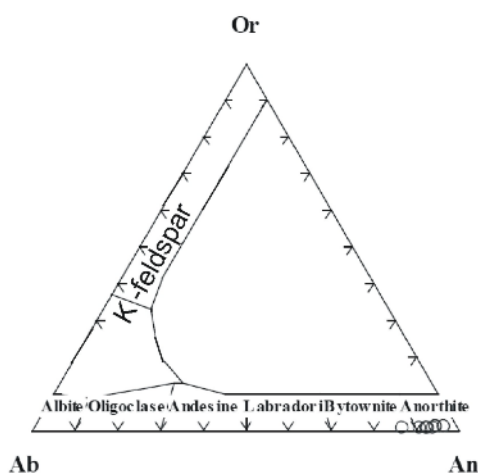
آمفیبول: آمفیبول‌ها در هر دو آمفیبولیت از نوع آمفیبول‌های کلسیک، و آمفیبول‌ها در آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز حدواسط دارای ترکیب هورنبلند چرماکیتی (Tschermakitic hornblende) با $Mg\# = 0.68$ تا 0.54 و هورنبلند آهن‌دار (Ferro - hornblende) با $Mg\# = 0.42$ بودند. در آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز غنی از آنورتیت آمفیبول‌های درشت از نوع هورنبلند چرماکیتی (Tschermakitic hornblende) با $Mg\# = 0.63$ تا 0.59 و آمفیبول‌های ریز

سوزنی از نوع هورنبلند منیزیم‌دار (Magnesio - hornblende) با $Mg\# = 0.84$ تا 0.62 بوده‌اند (شکل ۴ الف و پ).

پلاژیوکلاز: پلاژیوکلازها در آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز حدواسط از نوع آندزین تا لابرادوریت (۳۲ تا ۵۲ درصد آنورتیت) و در آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز غنی از آنورتیت از نوع بیتونیت تا آنورتیت (۸۷ تا ۹۷ درصد آنورتیت) بودند (شکل ۴ ب و ت).



ب



ت

پ

شکل ۴ نمودارهای ترکیب آمفیبول و پلاژیوکلاز از [۱۶]، الف تا ب ترکیب آمفیبول‌ها و پلاژیوکلازهای آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز حد واسط، پ تا ت ترکیب آمفیبول‌ها و پلاژیوکلازهای آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلازهای غنی از آنورتیت.

Hollister [۱۸]: $P(\pm 1 \text{ Kbar}) = -4.76 + 5.64 \text{ Al}(\text{total})$
et al.

Johnson and [۱۹]: $P(\pm 0.5) = -3.46 + 4.23 \text{ Al}(\text{total})$

Rutherford

[۲۰]: $P(\pm 0.6 \text{ Kbar}) = -3.01 + 4.76 \text{ Al}(\text{total})$

Schmidt

بررسی معادلات بالا نشان می‌دهد که تمامی روش‌های فشارسنجی هورنبلند بر اساس مقدار Al موجود در ساختار آن ارائه شده‌اند. فشار محاسبه شده با فرمول‌های فوق در آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز غنی از آنورتیت برای هورنبلند منیزیم‌دار ۴/۹۳ تا ۸/۱۳ کیلو بار و برای هورنبلند چرماکیتی ۶/۰۱ تا ۹/۸۱ کیلو بار، و نیز در آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز حدواسط برای هورنبلند چرماکیتی ۴/۸۷ تا ۸/۲۶ کیلو بار و برای هورنبلند آهن‌دار ۴/۶۹ تا ۶/۳۸ کیلو بار برآورد کرده است. برای دماسنجی آمفیبولیت‌های منطقه‌ی مورد نظر نیز از دماسنجی با آمفیبول - پلاژیوکلاز استفاده شد. شرط لازم برای استفاده از این زوج کانی به عنوان دماسنج این است که در بررسی‌های سنگ نگاری، آمفیبول و پلاژیوکلاز با هم در تعادل باشند. این زمین دماسنجی تبادلی بوده و بر مبنای واکنش‌های زیر صورت می‌گیرد [۲۱، ۲۲]:

A) edenite + 4 quartz = tremolite + albite

B) edenite + albite = richterite + anorthite

واکنش اول به شرایطی وابسته است که کوارتز در سنگ حضور دارد، ولی واکنش دوم در شرایطی است که کوارتز در سنگ وجود ندارد [۲۱، ۲۲]. با توجه به حضور کوارتز در نمونه‌های مورد بررسی از واکنش اول استفاده می‌شود.

دما- فشارسنجی با آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز حدواسط، دما و فشار ۴۴۹/۷ تا ۷۳۸/۳ درجه‌ی سانتی‌گراد و ۶/۱۶ تا ۷/۷۹ کیلو بار (رخساره آمفیبولیت) و دما- فشارسنجی آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلازهای غنی از آنورتیت، دما و فشار ۹۲۹/۹ تا ۱۵۶۶ درجه‌ی سانتی‌گراد و ۴/۴۷ تا ۹/۳۱ کیلو بار (رخساره گرانولیت و بالاتر) را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن گستره‌ی $An \leq 0.92$ برای پلاژیوکلازها بر اساس [۲۱، ۲۲] و حذف پلاژیوکلازهایی که این شرط را ندارند گستره‌ی دما و فشار به ترتیب ۹۷۲/۹ تا ۱۰۷۶/۴ درجه‌ی سانتی‌گراد و ۶/۱۶ تا ۷/۶۹ کیلو بار برای آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلازهای دارای آنورتیت فراوان به دست می‌آید.

گارنت: گارنت‌های موجود در آمفیبولیت‌های غنی از آنورتیت از ترکیب زیرند

$Grs_{69.07}Alm_{30.92}Prp_{0.00}Sps_{0.00}Adr_{0.00}Uv_{0.00}$

$Grs_{69.77}Alm_{29.99}Prp_{0.13}Sps_{0.10}Adr_{0.00}Uv_{0.00}$

$Grs_{70.02}Alm_{29.76}Sps_{0.16}Prp_{0.06}Adr_{0.00}Uv_{0.00}$

چنانکه ملاحظه می‌شود سه مولفه‌ی مهم در ترکیب گارنت‌های مورد بررسی عبارتند از گروسولار، آلماندین و پیروپ. اگر کلریت و اپیدوت مصرف شوند در عوض گارنت‌هایی تولید می‌شوند که هم دارای گروسولار و هم دارای آهن و منیزیم (آلماندین - پیروپ) هستند، در نتیجه گارنت‌های سه متشکله - ی کلسیم - آهن - منیزیم دار تشکیل می‌شوند [۱۵]. فراوانی کم گارنت‌ها در آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز غنی از آنورتیت بیانگر شروع تشکیل آن‌ها در اثر فشار است [۱۵].

یک نمونه اپیدوت موجود در آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز حدواسط دارای درصد پستاشیت ۱۹/۵ می‌باشد.

پره‌نیت‌ها طی واکنش زیر می‌توانند از پلاژیوکلازهای کلسیک حاصل شوند:

$CaAl_2Si_2O_8 + CaCO_3 + SiO_2 + H_2O \Rightarrow$

$Ca_2Al_2Si_3O_{10}(OH)_2 + CO_2$

Anorthite + $CaCO_3 + SiO_2 + H_2O \Rightarrow$ Prehnite + CO

بحث

بررسی‌های صحرائی مانند پوشیده شدن آمفیبولیت‌ها با متاچرت‌ها و سنگ‌نگاری حضور کانی‌های شاخص آمفیبول و پلاژیوکلاز که بخش مهم این سنگ‌ها را تشکیل می‌دهد، نشان می‌دهد که آمفیبولیت‌ها از دگرگونی بازالت‌های افیولیت پشت بادام به وجود آمده‌اند و در شرایط رخساره‌ی آمفیبولیت دگرگون شده‌اند. برای تعیین دقیق شرایط دما و فشار حاکم بر دگرگونی از روش‌های مختلف زمین دما- فشارسنجی استفاده می‌شود. با توجه به کانی‌های موجود در آمفیبولیت‌های منطقه بهتر است از فشارسنجی آمفیبول‌ها و دماسنجی آمفیبول - پلاژیوکلاز استفاده شود. در مورد استفاده از آمفیبول‌ها برای فشارسنجی روش‌های مختلفی ارائه شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان از [۱۷-۲۰] نام برد.

[۱۷]: $P(\pm 3 \text{ Kbar}) = -3.92 + 5.03 \text{ Al}(\text{total})$

Hammarstrom and Zen

متاثر از فاز کوهزایی سیمین پیشین است، مرحله‌ی M2 با توجه به سن به‌دست آمده از بررسی‌های $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ توسط [۱۰] که سنی معادل 187.6 ± 1.83 را تعیین کرده‌اند و حضور کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز که شاخص رخساره و سنگ آمفیبولیت است، تایید می‌شود که با فاز کوهزایی سیمین میانی همخوانی دارد، مرحله M3 را می‌توان با حضور کانی‌های حاصل از دگرگونی برگشتی در حد رخساره‌ی شیبست سبز مانند کلریت، پره‌نیت و لوکوکسن تشخیص داد، همچنین در پریدوتیت‌های دگرگون (متالزولیت) نیز کانی‌های الیوین سرپانتینی و کلریت تاثیر این دگرگونی بر سنگ‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد، که این مرحله نیز به سیمین پسین نسبت داده می‌شود. آمفیبولیت‌ها علاوه بر افیولیت پشت بادام در افیولیت‌های پالتوزویک دیگر ایران مرکزی از جمله افیولیت جندق نیز برونزد دارند. بررسی‌های انجام گرفته توسط ترابی [۲۳] نشان می‌دهد آمفیبولیت‌های افیولیت جندق نیز حداقل دو مرحله دگرگونی که با دو مرحله‌ی دگرگونی یاد شده را که با آمفیبولیت‌های افیولیت پشت بادام همخوانی دارند، پشت سر گذاشته‌اند. جدول ۳، مقایسه‌ی ترکیب کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز نیز دما و فشار محاسبه شده در آمفیبولیت‌های افیولیت مناطق مجاور جندق با آمفیبولیت‌های پشت بادام را نشان می‌دهد.

دما و فشارهای بدست آمده نشان می‌دهد که اعداد مربوط به دما در آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز دارای آنورتیت فراوان، غیر منطقی هستند و با بررسی‌های سنگ‌نگاری همخوانی ندارند. دلیل آن بر می‌گردد به پره‌نیتی شدن برخی از پلاژیوکلازها (M1) قبل از رخداد دگرگونی در رخساره‌ی آمفیبولیت (M2) و تشکیل پلاژیوکلاز با آنورتیت فراوان از دگرگونی پره‌نیت‌ها. با این حال برخی از پلاژیوکلازها نیز دگرسان نشده و دست نخورده باقی مانده‌اند. کانی‌های ثانویه پره‌نیت، کلریت، سریسیت، اپیدوت و لوکوکسن قابل مشاهده در آمفیبولیت‌ها نیز نشان دهنده‌ی رویداد دگرگونی برگشتی در حد رخساره‌ی شیبست سبز (M3) پس از دگرگونی آن‌ها در رخساره‌ی آمفیبولیت است.

دما و فشار حقیقی دگرگونی (M2) برای آمفیبولیت‌های افیولیت پشت بادام، بنابر محاسبات بالا، دمای 649.7 تا 738.3 درجه‌ی سانتی‌گراد و فشار 6.56 تا 7.79 کیلوبار است که بیانگر رخساره‌ی آمفیبولیت است.

چنین به نظر می‌رسد که حداقل سه حادثه‌ی دگرگونی در این منطقه تاثیر گذار بوده‌اند. از شواهد M1 پدیده پره‌نیتی شدن پلاژیوکلازها در آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز غنی از آنورتیت است که موجب شده از دگرگونی این پره‌نیت‌ها در مرحله‌ی M2 پلاژیوکلازهای غنی از آنورتیت حاصل شوند. با توجه به سن تشکیل این افیولیت در پالتوزویک، مرحله‌ی M1

جدول ۳ مقایسه ترکیب کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز و همچنین دما و فشار دو آمفیبولیت پشت بادام با آمفیبولیت‌های افیولیت جندق، (۱) آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز حدواسط، (۲) آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز غنی از آنورتیت، (۳) آمفیبولیت‌های افیولیت جندق، (۴) آمفیبولیت‌های موجود در دنباله‌های دگرگونی جندق.

Amphibolite Type	Plagioclase Type	P (Kbar)	T (°C)
1) Posht-e-Badam Amphibolite (1)	Ferro-hornblend and Tschermakitic hornblend	6.16- 7.79	649.7- 738.3
2) Posht-e-Badam Amphibolite (2)	Tschermakitic hornblende and Magnesio-hornblende	4.47- 9.31	929.9- 1566
3) Jandaq ophiolite amphibolite	Ferroan-pargasitic-hornblende, Ferrian-tschermakitic hornblende and Tschermakitic hornblende	7.98- 9.01	714- 738
4) Amphibolite in Jandaq metamorphic rocks	Ferroan-pargasitic hornblend, Alumino-ferroan pargasitic hornblende, Alumino-tschermakitic hornblende and Magnesio-hornblende	8.58- 10.87	619- 668

برداشت

بررسی آمفیبولیت‌های افیولیت پشت بادام نشان از دگرگون شدن آن‌ها در رخساره‌ی آمفیبولیت دارد. دما و فشار محاسبه شده برای آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز حدواسط، به ترتیب ۶۴۹٫۷ تا ۷۳۸٫۳ درجه‌ی سانتی‌گراد و ۶٫۱۶ تا ۷٫۷۹ کیلوبار (رخساره آمفیبولیت) و برای آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز غنی از آنورتیت ۹۲۹٫۹ تا ۱۵۶۶ درجه‌ی سانتی‌گراد و ۴٫۴۷ تا ۹٫۳۱ کیلوبار (رخساره‌ی گرانولیت و بالاتر) گزارش می‌شود. در آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز دارای آنورتیت فراوان، پرهنیتی شدن پلاژیوکلازها (M1) قبل از دگرگونی در رخساره آمفیبولیت (M2) و تشکیل پلاژیوکلازهای غنی از آنورتیت آن-ها پس از دگرگونی، دلیل دمای غیر واقعی در حد رخساره‌ی گرانولیت و بالاتر است. حضور کانی‌های پرهنیت، کلریت، سربیسیت، اپیدوت و لوکوکسن نشان می‌دهد که این سنگ‌ها پس از دگرگونی در رخساره‌ی آمفیبولیت دستخوش یک دگرگونی برگشتی در حد رخساره‌ی شیبست سبز (M3) شده‌اند. می‌توان چنین نتیجه گرفت که حداقل سه مرحله‌ی دگرگونی M1، M2 و M3 که به ترتیب با فازهای دگرگونی سیمین پیشین، میانی و پسین همخوانی دارد، روی این سنگ‌ها اثر گذار بوده‌اند. این بررسی صورت گرفته با بررسی آمفیبولیت‌های افیولیت جندق همخوان است.

قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از دانشگاه اصفهان به جهت حمایت‌های مالی از این پژوهش ابراز می‌نمایند.

مراجع

- [1] Dewey J.F., Bird J.M., "Origin and emplacement of the ophiolite suite: Appalachian ophiolites in Newfoundland", *Journal of Geophysical Research* 66 (1971) 3179-3206.
- [2] Gartzos E., Dietrich V.J., Migiros G., Serelis K., Lympelopoulou Th., "The origin of amphibolites from metamorphic soles beneath the ultramafic ophiolites in Evia and Lesvos (Greece) and their geotectonic implication", *Lithos* 108 (2009) 224-242.

[3] Silantyev S., Sokolov S., Bondarenko G., Morozov O., Bazylev B., Palandzhyan S., Ganelin A., "Geodynamic setting of the high-grade amphibolites and associated igneous rocks from accretionary complex of Povorotny Cape, taiganos peninsula, northeastern Russia", *Tectonophysics* 325(2000) 107-132.

[4] Wang W.-L., Aitchison J.C., Lo C.-H., Zeng Q.-G., "Geochemistry and geochronology of the amphibolite blocks in ophiolitic mélanges along Bangong-Nujiang suture, central Tibet", *Journal of Asian Earth Sciences* 33 (2008) 122-138.

[۵] فرید آزاد م.، موید م.، مجتهدی م.، موذن م.، "سنگ‌شناسی و سنگ‌زایی آمفیبولیت‌های موجود در مجموعه افیولیتی خوی-شمال غربی ایران"، *مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران*، شماره ۲ (۱۳۸۹)، ص ۲۳۳-۲۴۶.

[۶] آقانباتی ع.، "زمین‌شناسی ایران"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۸۵) ۵۸۶ صفحه.

[7] Ramezani J., Tucker R., "The Saghand region, Central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics", *American Journal of Science* 303 (2003) 622-665.

[8] Kargaranbafghi F., Neubauer F., Genser J., "Cenozoic kinematic evolution of southwestern Central Iran: Strain partitioning and accommodation of Arabia-Eurasia convergence", *Tectonophysics* 502 (2010) 221-243.

[9] Verdel Ch., Wernicke B.P., Ramezani J., Hassanzadeh J., Renne P.R., Spell T.L., "Geology and thermochronology of Tertiary cordilleran-style metamorphic core complexes in the Saghand region of Central Iran", *Geological Society of America Bulletin* 119 (2007) 961-977.

[10] Bagheri S., Stampfli G.M., "The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in Central Iran: New geological data, relationships and tectonic implications", *Tectonophysics* 451 (2008) 123-155.

[11] Haghypour A., "Etude géologique de la région de Biabanak - Bafq (Iran Central) ptrologio et tectonique du socle Percambrien et de sa

- [19] Johnson M.C., Rutherford M.J., "Experimental calibration of an aluminum-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks", *Geology* 17 (1989) 837-841.
- [20] 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.
- [21] Blundy J.D., Holland T.J.B., "Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 104 (1990) 208 – 224.
- [22] Holland T., Blundy J., "Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on Amphibole - plagioclase thermometry", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 116 (1994) 433-447.
- [۲۳] ترابی ق، "تعیین شرایط فشار و دمای تشکیل آمفیبولیت های افیولیت جندق (شمال شرق استان اصفهان) با استفاده از دماسنجی و فشارسنجی کانی های آمفیبول و پلاژیوکلاز"، *مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران*، شماره ۱ (۱۳۸۶) ص ۱۱۷-۱۳۴.
- couverture*، Université scientifique et medicale de Grenoble, France (1974) 403p.
- [12] Nadimi A., "Evolution of the Central Iranian basement", *Gondwana Research* 12 (2007) 324-333.
- [۱۳] شاه پسندزاده م، نوگل سادات ع.ا، آفتابی ع، "تحلیل ساختاری مجموعه سنگ های دگرگونی پشت بادام در باختر ایران مرکزی"، بیست و یکمین گردهمایی علوم زمین (۱۳۸۴).
- [14] Kretz R., "Symbols rock – forming minerals", *American Mineralogist* 68 (1983) 277-279.
- [۱۵] بوخر ک، فری م، "پتروژنز سنگ های دگرگونی ترجمه ولی زاده م.و، صادقیان م، انتشارات دانشگاه تهران، (۱۳۷۹) ۳۸۶ صفحه.
- [16] Deer W.A, Owie R.A.H., Zussman J., "An introduction to the rock forming minerals", Longman, London (1992) 696p.
- [17] Hammarstrom J.M., Zen E., "Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer", *American Mineralogist* 71 (1986) 1297-1313.
- [18] Hollister L.S., Grissom G.C., Pters E.K., Stowell H.H., Sisson V.B., "Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons", *American Mineralogist* 72 (1987) 231-239.