

## ذوب بخشی آمفیبولیت در رخساره سانیدینیت در هاله همبری گابروی آب‌شور، مجموعه

سیخوران، بافت، کرمان

محبوبه عرب زاده بنی‌اسدی<sup>۱</sup>، حبیب‌ا. قاسمی<sup>۲\*</sup>

۱- گروه پژوهشی ماگمازایی و کانی‌زایی در ایران، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود (RGMMI)

۲- دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، گروه پژوهشی ماگمازایی و کانی‌زایی در ایران (RGMMI)، عضو هیأت مدیره و نایب رئیس انجمن زمین‌شناسی ایران.

### چکیده

توده گابروی آب‌شور به سن ژوراسیک پیشین با نفوذ به درون آمفیبولیت‌های پالئوزوئیک-تریاس مجموعه‌های دگرگونی سرگز-آب‌شور سبب بروز دگرگونی همبری در رخساره سانیدینیت، ذوب بخشی آمفیبولیت‌ها و تشکیل میگماتیت‌های کوارتز دیوریتی-تونالیتی با ساخت پگماتوئیدی شده است. ترکیب شیمیایی فلدسپار در گابروها، آمفیبولیت‌های میزبان و پگماتوئیدها به ترتیب در محدوده‌های بیتونیت-آنورتیت، لابرادوریت و آندزین قرار دارد. همچنین، آمفیبول‌ها از نوع کلسیک بوده در گابروها شامل منیزیهورنبلند و چرماکیت، در آمفیبولیت‌های میزبان از نوع چرماکیت و در میگماتیت‌های پگماتوئیدی شامل منیزیهورنبلند و چرماکیت است. شواهد صحرایی، سنگ-نگاری به همراه برآوردهای دما-فشارسنجی نشانگر بروز فرایند ذوب بخشی در آمفیبولیت‌های میزبان توده گابرویی در دماهای ۶۵۰ تا ۹۹۰ درجه سانتی‌گراد منطبق با شرایط دگرگونی رخساره سانیدینیت برای بروز دگرگونی همبری و ذوب بخشی آمفیبولیت‌ها و تشکیل مذاب حدواسط کوارتز دیوریتی سازنده پگماتوئیدهاست.

واژگان کلیدی: آمفیبولیت، دگرگونی همبری، ذوب بخشی، آب‌شور، سیخوران.

## Partial Melting of Amphibolites in Sanidinite Facies in Contact Areole of Abshour Gabbro, Sikhoran Complex, Baft, Kerman

Habibollah Ghasemi<sup>\*1</sup>, Mahboubeh Arabzadeh Baniasadi<sup>2</sup>

3- Research Group of Magmatism and Mineralization in Iran (RGMMI)

4- Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Iran. Research Group of Magmatism and Mineralization in Iran (RGMMI), [h-ghasemi@shahroodut.ac.ir](mailto:h-ghasemi@shahroodut.ac.ir)

### Abstract

The Lower Jurassic Abshour gabbro, intruding into the Paleozoic-Triassic amphibolites of the Sargaz-Abshour metamorphic complexes, has caused contact metamorphism in the sanidinite facies, partial melting of the amphibolites, and generation of quartz dioritic-tonalitic migmatites with a pegmatoid structure. Chemical composition of feldspar and amphibole in the gabbros, host amphibolites, and pegmatoids range from bytonite-anorthite in the gabbros, labradorite in the host amphibolites and andesine in the pegmatoid migmatites. Also, the amphiboles are of calcic-type and include magnesio-hornblende and tschermakite in the gabbros, tschermakite in the host amphibolites, and magnesio-hornblende and tschermakite in the pegmatoid migmatites. Field evidence, petrography, along with thermobarometric estimates indicate the occurrence of partial melting in the host amphibolites of the gabbroic mass at temperatures of 650 to 990 °C consistent with the metamorphic conditions of the sanidinite facies for contact metamorphism and partial melting of amphibolites and generation of intermediate quartz dioritic melt forming the pegmatoids.

**Keywords:** Amphibolite, Contact Metamorphism, Partial Melting, Abshour, Sikhoran.

## مقدمه

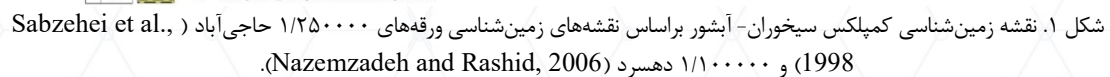
یکی از جالب‌ترین مباحث در سنگ‌شناسی آذرین، منشاء ماگماهای حدواسط-اسیدی (گرانیتوئیدی) است. در حال حاضر، شواهد فزاینده‌ای وجود دارد که نشان می‌دهد بیشتر توده‌های گرانیتوئیدی بزرگ موجود در قاره‌ها، نتیجه‌ی ذوب‌بخشی (Anatexis) پوسته در اثر تزریق ماگمای بازالتی هستند (Pitcher, 1987; Huppert and Sparks, 1988; Schubert et al., 2013). همچنین شواهد گسترده‌ای از نفوذ همزمان ماگماهای بازالتی مشتق‌شده از گوشته و ماگماهای اسیدی مشتق‌شده از پوسته، به‌ویژه در نوارهای کوه‌زایی بالای مناطق فرورانش وجود دارد (Hildreth, 1981; Vernon, 1983; Pitcher, 1987; Huppert and Sparks, 1988). به‌علاوه، برخی از مناطقی که دگرگونی دما بالا-فشار پایین دارند، معمولاً با تزریق همزمان توده‌های گابرو و گرانیت مرتبط هستند. یک توضیح محتمل برای این ارتباط این است که نفوذ ماگمای بازالتی (توده گابرویی) باعث ایجاد شار حرارتی بالا در پوسته شده و ذوب آن برای تولید ماگمای گرانیتوئیدی می‌شود. در واقع، قرارگیری ماگمای بازالتی در زیر پوسته (Basalt underplating) در حال حاضر ایده جذابی برای توضیح ذوب‌شدگی پوسته در مقیاس بزرگ و همچنین ماهیت بسیار لایه لایه پوسته زیرین است. این لایه‌بندی بر اساس ترکیب، چگالی و رفتار مکانیکی است. پوسته بالایی سرد است و رفتار شکننده دارد، در حالی که پوسته زیرین داغ‌تر و چگال‌تر است و رفتار دگرشکلی نوع شکل‌پذیر دارد (Huppert and Sparks, 1988).

نفوذ توده گابرویی ژوراسیک زیرین آب‌شور به درون آمفیبولیت‌های پالئوزوئیک بالایی-تریاس مجموعه‌های دگرگونی سرگز-آب‌شور سبب بروز دگرگونی همبری شدید در رخساره سانیدینیت، بروز ذوب بخشی در آمفیبولیت‌ها، تشکیل مذاب گرانیتوئیدی و ایجاد منظره میگماتیتی و درنهایت تشکیل پگماتوئیدهای با ترکیب کوارتز دیوریتی-توالیتی شده است (Asadi et al., 2023). این فرایند، شواهدی مستند بر امکان تشکیل مذاب گرانیتوئیدی از طریق ذوب بخشی آمفیبولیت در اثر تزریق ماگمای بازالتی است.

## زمین‌شناسی منطقه

مجموعه‌های دگرگونی سرگز-آب‌شور در منطقه اسفندقه در شهرستان بافت استان کرمان، شامل دو مجموعه با لیتولوژی و درجه دگرگونی متفاوت هستند. مجموعه سرگز متشکل از شیست، گنیس و آمفیبولیت به سن کربونیفر پیشین (۳۵۰ میلیون سال پیش) است که تزریق توده اولترامافیک-مافیک سیخوران به سن کربونیفر پسین (۳۲۰ میلیون سال پیش) به درون آن، باعث بروز ذوب بخشی شیست‌ها و گنیس‌ها و تشکیل گرانیت نوع به سن کربونیفر پسین (۳۲۰ میلیون سال پیش) شده است (شکل ۲-۱a). مجموعه آب‌شور از دو بخش زیرین متشکل از مرمر و آمفیبولیت (ارتوآمفیبولیت) با دگرگونی رخساره آمفیبولیت میانی-بالایی (شکل ۲-۱b) و بخش بالایی متشکل از شیست سبز، اسلیت، فیلیت، متاسندستون و متاکربنات با دگرگونی رخساره شیست سبز تشکیل شده است. در این بخش دایک‌های دیابازی فراوانی به سن تریاس پسین-ژوراسیک پیشین تزریق شده است (شکل ۲-۱c). توده گابروی آب‌شور به درون مجموعه دگرگونی آب‌شور (شکل ۲-۱d) و مجموعه اولترامافیک-مافیک سیخوران نفوذ کرده است. در محل تماس توده گابروی آب‌شور با آمفیبولیت‌های مجموعه دگرگونی آب‌شور، دگرگونی همبری شدید رخ داده، آمفیبولیت‌های میزبان متحمل ذوب بخشی شدید گردیده و منظره میگماتیتی پیدا کرده‌اند (شکل ۲-۱e). مذاب گرانیتوئیدی حاصل به دلیل آبدار بودن، آمفیبول‌ها و پلاژیوکلازهای کلسیک درشتی ایجاد کرده و ساخت پگماتوئیدی بی‌سار دانه درشتی ایجاد کرده که در برخی موارد بلورهای آمفیبول و پلاژیوکلاز در مقیاس ده‌ها سانتیمتری و حتی متری ایجاد کرده است (شکل ۲-۱f).



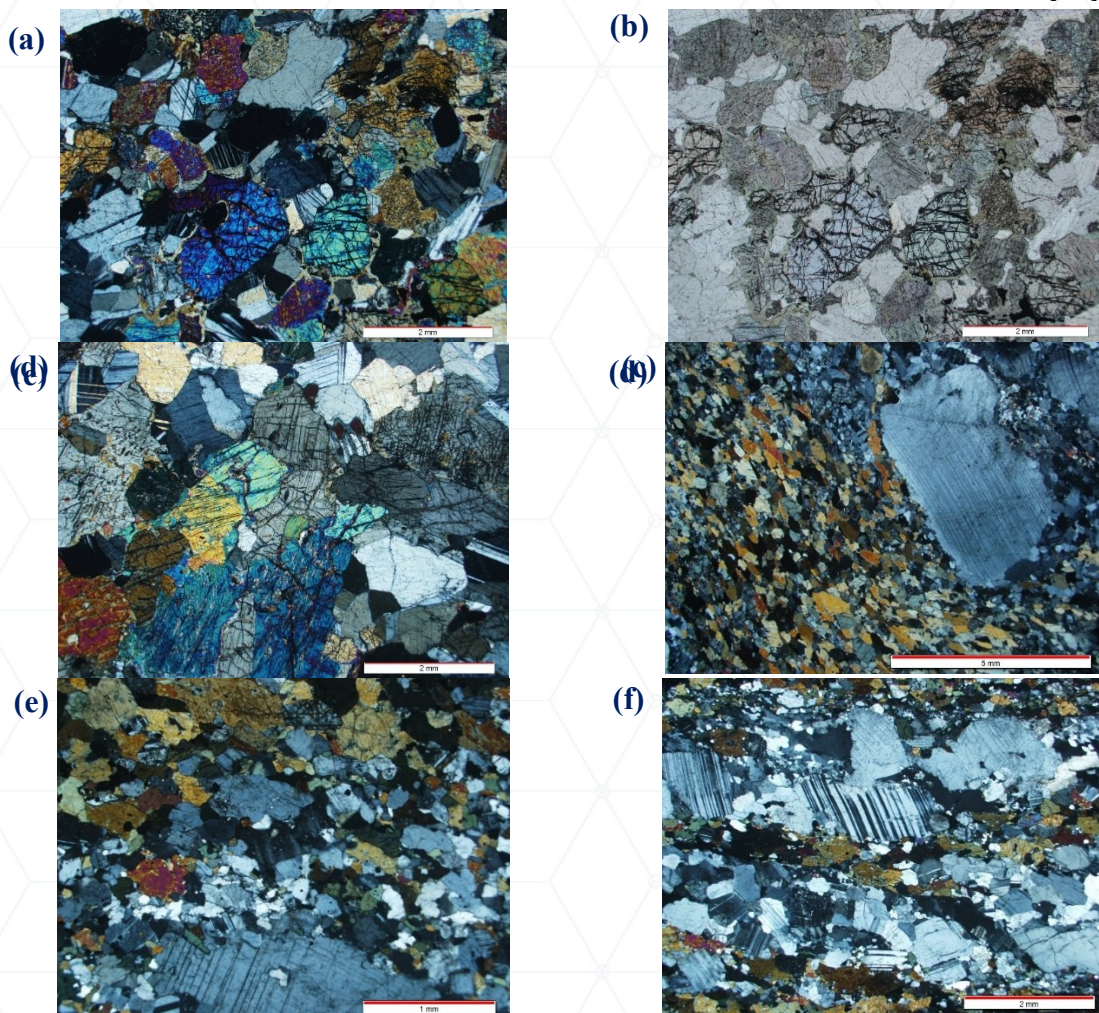




شکل ۲- تصاویر صحرایی از مجموعه‌های دگرگونی سرگز-آب‌شور و توده گابروی آب‌شور. a- نمایی از نفوذ تروکتولیت‌های مجموعه اولترامافیک-مافیک سیخوران به درون گنیس‌های مجموعه دگرگونی سرگز و بروز ذوب بخشی و تشکیل گرانیب نوع S. b- نمایی از توالی مرمر و ارتوآمفیبولیت‌های مجموعه دگرگونی آب‌شور. c- نمایی دور از دگرگونه‌های بخش بالایی مجموعه آب‌شور و دایک دیابازی قطع کننده آن. d- نمایی از توده گابروی آب‌شور در داخل مجموعه دگرگونی آب‌شور. e-f- منظره میگماتیتهی هاله همبری گابروی آب‌شور با آمفیبولیت‌ها.

### سنگ نگاری

گابروها دارای بافت دانه‌ای ناخودشکل تا نیمه خودشکل متشکل از پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن به عنوان کانی‌های اصلی و الیوین، ارتوپیروکسن و آمفیبول، کانی‌های اپک و آپاتیت به عنوان کانی‌های فرعی و عارضه‌ای هستند (شکل ۳-الف، ب، پ). آمفیبولیت‌ها دارای بافت نماتوبلاستی متشکل از آمفیبول و پلاژیوکلاز هستند (شکل ۳-ت). میگماتیت‌های پگماتوئیدی که از ذوب بخشی آمفیبولیت‌ها در رخساره سانیدینیت ایجاد شده اند در بخش تفاله آمفیبولیتی دارای بافت نماتوبلاستی و در بخش لوکوسم دارای بافت دانه‌ای و پگماتیتهی متشکل از پلاژیوکلاز، آمفیبول و مقادیر اندکی کوارتز هستند. بخش‌های هورنفلسی تفاله دیرگداز که از ذوب مصون مانده‌اند دارای بافت گرانوبلاستی متشکل از الیوین، ارتوپیروکسن، کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز هستند.



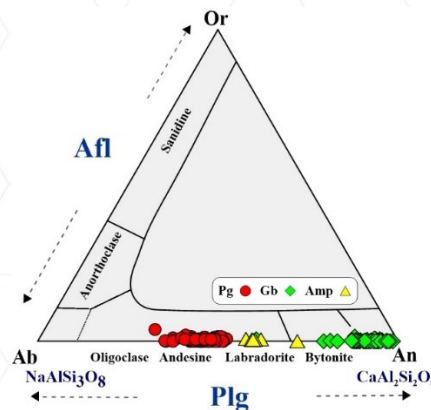
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی از گابرو، آمفیبولیت میزبان و پگماتوئیدها. a- الیوین گابرو با بافت دانه‌ای متشکل از الیوین، کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز در نور و b- همان نمونه در نور (ppl). c- گابرونوریت با بافت دانه‌ای متشکل از کلینوپیروکسن، ارتوپیروکسن و پلاژیوکلاز در نور. d- آمفیبولیت با بافت نماتوپورفیروبلاستی متشکل از آمفیبول و پلاژیوکلاز در نور. e و f- پگماتوئید حاصل از ذوب بخشی آمفیبولیت.

#### بحث

برای بررسی شرایط دگرگونی (دما، فشار، فوگاسیته اکسیژن) در هاله همبری توده گابرویی آب‌شور از ترکیب شیمیایی فلدسپار و آمفیبول استفاده شده است.

#### الف - شیمی فلدسپار

فلدسپار از کانی‌های مهم تشکیل دهنده توده گابروی آب‌شور، آمفیبولیت‌ها و میگماتیت‌های پگماتوئیدی هاله همبری است. ترکیب این کانی در نمودار مثلثی ارتوز-آلبیت-آنورتیت (Deer et al., 1992) در محدوده سری پلاژیوکلاز و در قلمروهای آندزین برای میگماتیت‌های پگماتوئیدی، لابرادوریت برای آمفیبولیت‌ها، بیتونیت و آنورتیت برای گابروها قرار می‌گیرد (شکل ۴).

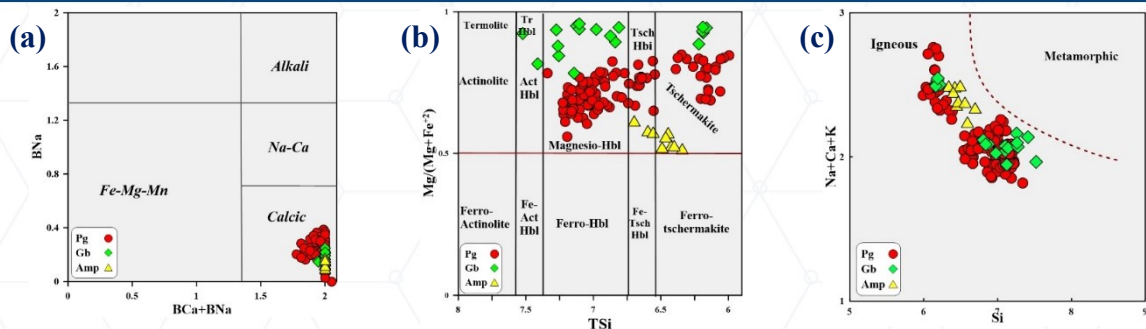


شکل ۴- موقعیت ترکیب فلدسپارهای موجود در آمفیبولیت‌های میزبان، میگماتیت‌های پگماتوئیدی هاله همبری و گابروی آب‌شور در نمودار مثلثی ارتوز-آلبیت-آنورتیت (Deer et al., 1992).

#### شیمی کانی آمفیبول

آمفیبول‌ها به دلیل ترکیب شیمیایی و ساختار کانی‌شناسی متنوع و محدوده پایداری دما-فشاری گسترده از پرکاربردترین کانی‌ها در محاسبات زمین‌دما-فشارسنجی هستند. پارامترهای شدتی فشار، دما، فوگاسیته اکسیژن به همراه ترکیب سنگ کل و فازهای همزیست بر میزان Al موجود در آمفیبول‌ها تأثیر می‌گذارد (Stein and Dietl, 2001). آمفیبول‌های موجود در توده گابروی آب‌شور، آمفیبولیت‌ها و میگماتیت‌های پگماتوئیدی هاله همبری آن در تقسیم‌بندی‌های مختلف (Leake et al., 1997; Hawthorne et al., 2012; Ridolfi et al., 2010; Hawthorne and Oberti, 2007) چرماکیت و منیزیه‌ورنبلند در گابروها، چرماکیت و هورنبلند چرماکیتی در آمفیبولیت‌های میزبان و چرماکیت و هورنبلند چرماکیتی در میگماتیت‌های پگماتوئیدی هستند (شکل ۵-A-B). در نمودار Ca+Na+K در مقابل Si (Sial et al., 1998) که جدا کننده آمفیبول‌های آذرین و دگرگونی است، آمفیبول‌های مورد مطالعه همگی ماهیت آذرین نشان می‌دهند (شکل ۵-C) که در مورد آمفیبولیت‌های میزبان توده گابرویی صحیح نیست و به خاطر تحمل دمای بسیار بالای حاکم بر هاله همبری است. در این مورد لازم است از آمفیبولیت‌های دور از هاله همبری استفاده شود.





شکل ۵. موقعیت ترکیب آمفیبول‌های موجود در آمفیبولیت‌های میزبان، میگماتیت‌های پگماتوئیدی هاله همبری و گابروی آبشور در نمودارهای تقسیم‌بندی آمفیبول‌ها. (A) از لیک و همکاران (Leake et al., 1997). (B) از هاوتورن و همکاران (Hawthorne et al., 2012). (C) از سیال و همکاران (Sial et al., 1998).

### تعیین سری ماگمایی با استفاده از شیمی آمفیبول

به طور کلی، شیمی کانی‌های مختلف موجود در سنگ‌های آذرین، انعکاسی از شرایط حاکم و ترکیب ماگمای سازنده آنهاست. مشارکت Mg، K و Ti در ساختار آمفیبول به ماهیت ماگما وابسته است، به گونه‌ای که آمفیبول‌های سیستم ساب‌آلکالین در مقایسه با سیستم آلکالین دارای مقادیر  $\text{Na}_2\text{O}$ ،  $\text{K}_2\text{O}$ ،  $\text{TiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  کمتری هستند (Molina et al., 2009). تصویر کردن شیمی آمفیبول‌های سنگ‌های گابرویی مورد مطالعه در نمودارهای مختلف بیانگر ماهیت کالکوالکالین برای آنها است (شکل ۶).



شکل ۶. موقعیت ترکیب آمفیبول‌های توده گابروی آبشور در نمودارهای تعیین سری ماگمایی از مولینا و همکاران (Molina et al., 2009).

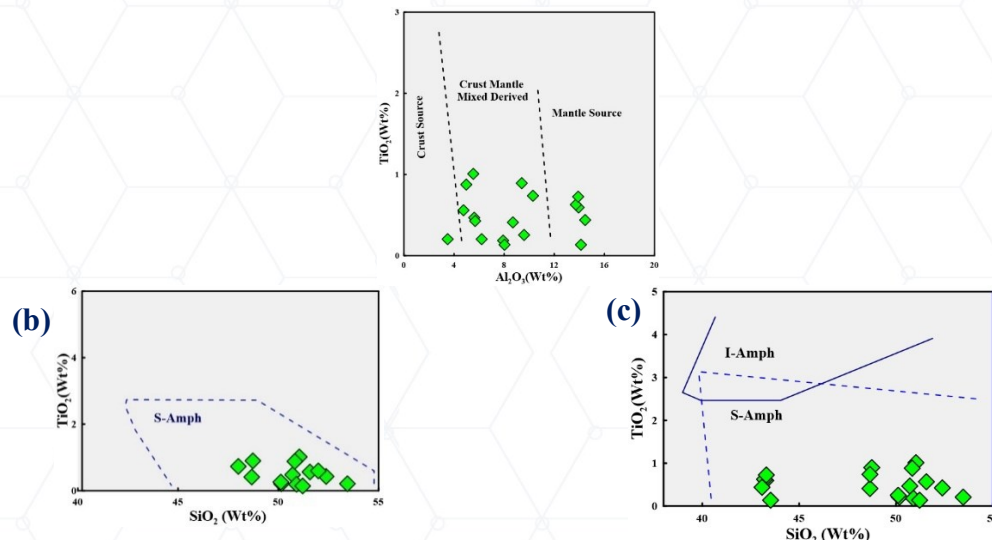
### تعیین منشأ و محیط زمین‌ساختی زایش ماگما با استفاده از شیمی آمفیبول

از شیمی آمفیبول به ویژه عدد منیزیم ( $\text{Mg\#}$ ) آن می‌توان برای تعیین منشأ ماگما استفاده کرد. مقادیر بالای این عدد ( $>0.7$ ) نشانگر منشأهای گوشته‌ای و مقادیر پایین آن ( $<0.5$ ) نشانگر منشأهای پوسته‌ای و مقادیر بین ۰/۵ و ۰/۷ به اختلاط منابع پوسته‌ای و گوشته‌ای نسبت داده شده است (Martin, 2007). آمفیبول‌های موجود در نمونه‌های سنگی توده گابروی آبشور دارای مقادیر  $\text{Mg\#}$  بین ۰/۶۵ تا ۰/۹۳ هستند که نشانگر اختلاط مذاب‌های پوسته‌ای و گوشته‌ای و همچنین منبع گوشته‌ای برای تشکیل آنهاست (شکل A-۷). علاوه، این آمفیبول‌ها در نمودار  $\text{Na}_2\text{O}$  در مقابل  $\text{SiO}_2$  در محدوده آمفیبول نوع S یعنی محیط فرورانش واقع شده‌اند (شکل B-C-۷). با توجه به اینکه توده گابروی ژوراسیک زیرین آبشور محصول شروع رخداد فرورانش ورقه اقیانوسی نئوتتیس زاگرس به زیر ایران مرکزی است (Asadi et al., 2023; Arabzadeh Baniasadi et al., 2026) پس به درستی در این قلمرو قرار می‌گیرد.

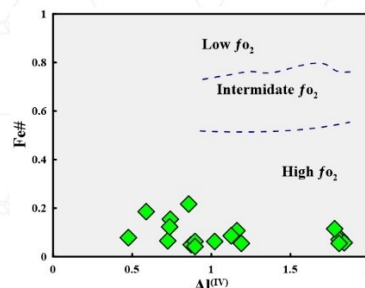
### تعیین فوگاسیته اکسیژن

مقدار فوگاسیته اکسیژن ماگما به ماهیت محل منبع و جایگاه زمین‌ساختی تشکیل آن مرتبط است. ماگماهای با درجه فوگاسیته بالا (اکسیدان) اغلب با مرزهای ورقه‌ای همگرا (محیط فرورانشی) و ماگماهای با فوگاسیته پایین (احیایی) با محل منبع‌های گوشته‌ای مناطق کافتی درون ورقه‌ای همراهند. با توجه به نمودار عدد آهن ( $\text{Fe}^{2+}$ ) در برابر  $\text{Al}^{IV}$  از آندرسون

و اسمیت (Anderson and Smith, 1995)، آمفیبول‌های توده گابرویی آب‌شور در محدوده‌ی فوگاسیته بالا قرار گرفته‌اند (شکل ۸).



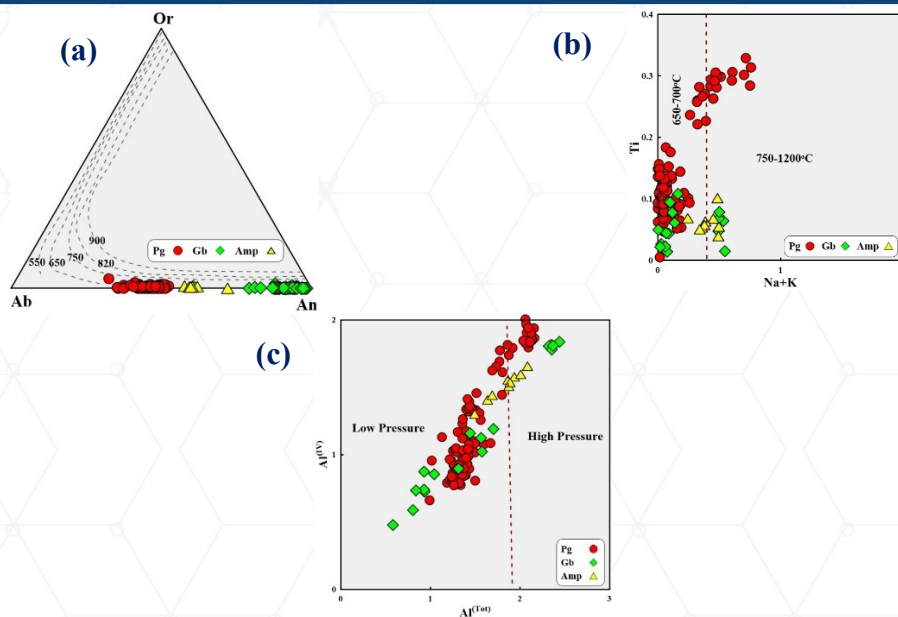
شکل ۷. موقعیت ترکیب آمفیبول‌های توده گابروی آب‌شور در نمودارهای مختلف برای تشخیص منشأ و محیط زمین‌ساختی تشکیل آمفیبول. (A) نمودار  $TiO_2$  در مقابل  $Al_2O_3$  برای تشخیص منشأ آمفیبول (Jiang et al., 1984). (B) نمودار  $TiO_2$  در مقابل  $SiO_2$  و (C) نمودار  $TiO_2$  در مقابل  $Na_2O$  از کولتورتی و همکاران (Coltorti et al., 2007).



شکل ۸. موقعیت ترکیب آمفیبول‌های توده گابروی آب‌شور در نمودار  $(Fe\#)$  در برابر  $Al^{IV}$  از آندرسون و اسمیت (Anderson and Smith, 1995).

### ج-دما-فشارسنجی

شکل ۹ و جدول ۱ نتایج حاصل از بکارگیری زمین دما-فشارسنجی‌های مختلف فلدسپار و آمفیبول را برای نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود پلاژیوکلازها بر روی ایزوترم‌های ۶۵۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد (شکل ۹-۱) و آمفیبول‌ها در محدوده دماهای ۶۵۰ تا بالای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد (شکل ۹-۲) قرار می‌گیرند. در نمودار شکل ۹-۳ نیز آمفیبول‌ها عمدتاً در محدوده کم‌فشار و تعدادی در محدوده پرفشار قرار گرفته‌اند. قرارگیری برخی نمونه‌ها در محدوده پرفشار احتمالاً به دلیل تشکیل آمفیبولیت‌های میزبان توده در سری رخساره‌ای باروین فشار بالا و به ارث رسیدن این ماهیت به میگماتیت‌های پگماتوئیدی است. در مورد گابروها نیز با توجه به ماهیت گوشته‌ای ماگمای والد امکان تشکیل آمفیبول‌ها در آشیانه‌های ماگمایی انبارش ماگما در سطوح میانی پوسته وجود دارد. در جدول ۱ نیز داده‌های دما-فشارسنجی طیف منطقی منطبق بر تشکیل آمفیبول در آمفیبولیت‌ها، توده گابرویی و میگماتیت‌های رخساره سانیدینیت را نشان می‌دهند.



شکل ۹- موقعیت ترکیب فلدسپارها و آمفیبول‌های موجود در آمفیبولیت‌های میزبان، میگماتیت‌های پگماتوئیدی هاله همبری و گابروی آبشور در A- نمودار سیستم Or-Ab-An (Anderson, 1997) جهت تعیین دماهای تعادل فلدسپارها. (B) نمودار Ti در مقابل Na+K موجود در آمفیبول (Scaillet and Evans, 1999). C- نمودار تغییرات مقدار آلومینیم چهاروجهی ( $Al^{IV}$ ) در برابر آلومینیم کل موجود در آمفیبول (Jiang et al., 1984).

جدول ۱- نتایج حاصل از بکارگیری دما-فشارسنج‌های مختلف براساس ترکیب شیمیایی آمفیبول برای آمفیبولیت‌های میزبان، میگماتیت‌های پگماتوئیدی هاله همبری و گابروی آبشور.

Sikhoran-AbShour			
T°C	Gb	Pg	Amp
F'em'énias et al., 2006	565-1001	676-904	766-992
Humphreys et al., 2006	617-925	651-992	789-991
Putirka, 2016	527-625	759-880	834-863
P(Kb)	Gb	Pg	Amp
Hammarstrom & Zen 1986	0.74-6.75	2.91-670	1.17-6.55
Hollister et al. 1987	0.45-5.65	2.54-6.95	1.17-6.47
Johnson & Rutherford 1989	0.36-6.98	2.7-6.71	1.74-6.45

## برداشت

مشاهدات صحرایی و سنگ‌نگاری به همراه استفاده از داده‌های شیمیایی ترکیب پلاژیوکلاز و آمفیبول بیانگر بروز دگرگونی همبری و ذوب بخشی در رخساره سانیدینیت در هاله همبری توده گابروی ژوراسیک زیرین آبشور با آمفیبولیت‌های میزبان است که به تشکیل مذاب کوارتز دیوریتی-توالتیتی برای تشکیل پگماتوئیدها منجر شده است.

## منابع

- Anderson, J.L., and Smith, D.R. (1995) The effect of temperature and oxygen fugacity on Al-in-hornblende barometry. *American Mineralogist*, 80(5-6), 549-559.
- Anderson, J.L. (1997) Status of thermobarometry in granitic batholiths. *Earth and Environmental Science, Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 87, 125-138. [http://journals.cambridge.org/abstract\\_S0263593300006544](http://journals.cambridge.org/abstract_S0263593300006544)
- Asadi, S.A.A., Ghasemi, H., Sepidbar, F., Mobasheri, M., Shi, Y., and Palin, R. M. (2023) A polygenetic origin for the Sikhoran ultramafic-mafic complex in South Iran. *LITHOS* 456-457 (2023) 107336. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107336>
- Coltorti, M., Bonadiman, C., Faccini, B., Grégoire, M., O'Reilly, S.Y., and Powell, W. (2007) Amphiboles from mantle. *Lithos*, 99(1-2), 68-84. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.05.009> suprasubduction and intraplate lithospheric
- Deer, W.A., Howie, R.A., and Sussman, J. (1992) An introduction to the rock forming minerals. Longman Ltd. 528p.



- F'ém'énias, O., Mercier, J.C.C., Nkono, C., Diot, H., Berza, T., Tatu, M., and Demaiffe, D. (2006) Calcic amphibole growth and compositions in calc-alkaline magmas: Evidence from the Motru dike swarm (southern Carpathians, Romania). *American Mineralogist*, 91, 73–81. DOI: 10.2138/am.2006.1869
- Hammarstrom, J.M., and Zen, E.-a. (1986) Aluminum in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist*, 71(11-12), 1297-1313.
- Hawthorne, F.C., and Oberti, R. (2007) Classification of the Amphiboles. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 67, 55-88. DOI: 10.2138/rmg.2007.67.2
- Hawthorne, F.C., Oberti, R., Harlow, G.E., Maresch, W.V., Martin, R.F., Schumacher, J.C., and Welch, M.D. (2012) Nomenclature of the amphibole super group, *American Mineralogist*, 97(11-12), 2031-2048. <http://dx.doi.org/10.2138/am.2012.4276>
- Hollister, L.S., Grissom, G., Peters, E., Stowell, H., and Sisson, V. (1987) Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American Mineralogist*, 72(3-4), 231-239
- Humphreys, M.C.S., Blundy, J.D. and Sparks, R.S.J. (2006) Magma evolution and open-system processes at Shiveluch volcano: Insights from phenocryst zoning. *Journal of Petrology*, 47, 2303–2334. doi:10.1093/petrology/egl045
- Huppert, H. E., and Sparks, R. S. J., (1988) The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust, *J. Petrol.*, 29(3), 599–624.
- Jiang, C., and An, S. (1984) On the chemical characteristics of calcific amphiboles from igneous rocks and their petrogenesis significance. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 3(1), 1-9.
- Johnson, M.C., and Rutherford, M.J. (1989) Experimental calibration of an aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks. *Geology*, 17(9), 837-841.
- Leake, B.E., Woolley, A.R., Arps, C.E., Birch, W.D., Gilbert, M.C., Grice, J.D., Hawthorne, F.C., Kato, A., Kisch, H.J., and Krivovichev, V.G. (1997) Nomenclature of amphiboles; report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on new minerals and mineral names, *Mineralogical magazine*, 61, (405), 295-310.
- Martin, R.F. (2007) Amphiboles in the igneous environment. *Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 67, 323–358. doi:10.2138/rmg.2007.67.9
- Molina, J.F., Scarrow, J.H., Montero, P.G., and Bea, F. (2009) High-Ti amphibole as a petrogenetic indicator of magma chemistry: Evidence for mildly alkali hybrid melts during evolution of Variscan basic-ultrabasic magmatism of Central Iberia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158, 69-98. DOI 10.1007/s00410-008-0371-4
- Nazemzadeh, M., Rashid, A. (2006) Geological map of the Dehsard (Bezar), Scale 1/100,000. Geological Survey of Iran. Sheet No. 7347.
- Pitcher, W. SM., (1987) Granites and yet more granites forty years on. *Geol. Rundschau* 76, 51-79.
- Putirka, K.D. (2016) Amphibole thermometers and barometers for igneous systems and some implications for eruption mechanisms of felsic magmas at arc volcanoes. *American Mineralogist*, 101(4), 841-858. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5506>
- Ridolfi, F., Renzulli, A., and Puerini, M. (2010) Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: An overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 160(1), 45–66. DOI 10.1007/s00410-009-0465-7
- Sabzehei, M., Houshmandzadeh, A., Berberian, M., Nowgole Sadat, M.A.A., Alavi Tehrani, N., Majidi, B., Nazemzadeh, M., Azizan, H., and Roshan Ravan, J. (1998) Geological map of Hadji Abad, Scale 1:250000. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Scaillet, B., and Evans, B.W., (1999) The 15 June 1991 eruption of Mount Pinatubo. I. Phase equilibria and pre-eruption P–T–f O<sub>2</sub>–f H<sub>2</sub>O conditions of the dacite magma. *Journal of Petrology*, 40(3), 381-411. DOI: 10.1093/etroj/40.3.381
- Schubert, M., T. Driesner, T. V. Gerya, and Ulmer, P., (2013) Mafic injection as a trigger for felsic magmatism: A numerical study. *Goechemistry, Geophysics, Geosystems*, 14, 1910–1928, doi:10.1002/ggge.20124
- Sial, A., Ferreira, V., Fallick, A., and Cruz, M.J.M. (1998) Amphibole-rich clots in calc-alkali granitoids in the Borborema province, northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 11(5), 457-471.
- Stein, E., and Dietl, C. (2001) Hornblende thermobarometry of granitoids from the Central Odenwald (Germany) and their implications for the geotectonic development of the Odenwald. *Mineralogy and petrology*, 72 (1), 207-285. <https://www.researchgate.net/publication/225775322>
- Vernon, R. H., (1983) Restite, xenoliths and microgranitoid enclaves in granites. *J. Proc. R. Soc. NSW* 116, 77-103.
- Vernon, R.H. (2004) A practical guide to rock microstructures. Cambridge University Press. 594p.