

Biotite mineral chemistry of the Bozqush and Kaleybar alkaline igneous intrusions, NW Iran

N. Ashrafi^{1*}, A. Jahangiri¹, A. Ameri¹, N. Hasebe², G. N. Eby³

1- Geology Dept., Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Iran

2- Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University, Japan

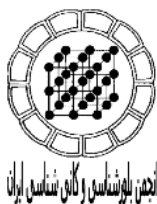
3- Dept. of Environmental, Earth, & Atmospheric Sciences, University of Massachusetts Lowell, USA

(Received: 7/12/2008, in revised form: 10/4/2009)

Abstract: Mineral chemistry of micas from the subduction-related mafic and felsic alkaline rocks of the Kaleybar alkali-gabbro and the Bozqush nepheline syenite was determined. The micas generally occur as large poikilitic grains with Fe-Ti oxides and mafic minerals and give the rocks a spotted texture. Micas in the alkali-gabbro sometimes display a distinct lamination. Based on the International Mineralogical Association (IMA) classification scheme, the mica compositions plot between the siderophyllite and eastonite end members and show high Fe/(Fe + Mg) ratio (>0.33); therefore they are biotites. Chemical composition of the biotites varies from Mg-biotite in the Kaleybar alkali-gabbro through Fe-biotite in the Bozqush nepheline syenite. Based on their FeO, MnO, MgO, TiO₂, and Al^{VI} content, they are primary magmatic biotites. Despite the alkaline affinity of the biotite host rocks, they plot in the calc-alkaline orogenic suite field on FeO*, MgO, and Al₂O₃ geochemical diagrams.

Keywords: biotite, nepheline syenite, alkali-gabbro, Kaleybar, Bozqush.

*Corresponding author, Tel.: +98 (0411) 2300691, Fax: +98 (0443) 6266999, E-mail: nasser.ashrafi@gmail.com



شیمی کانی بیوتیت در توده‌های آذرین قلیایی بزقوش و کلیبر، شمال غرب ایران

ناصر اشرفی^{۱*}، احمد جهانگیری^۱، علی عامری^۱، نوریکو هسب^۲، نلسون اِبی^۳

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲- انستیتو فناوری زیست محیطی و طبیعی، دانشگاه کانازاوا، ژاپن

۳- دپارتمان علوم زیست محیطی، زمین و جو، دانشگاه ماساچوست لول، آمریکا

(دریافت مقاله: ۸۷/۹/۱۷، نسخه نهایی: ۸۸/۱/۲۲)

چکیده: این کار پژوهشی به بررسی شیمی میکاهای سنگ‌های آذرین قلیایی مافیک و فلسیک وابسته به فرورانس می‌پردازد. در این کار میکاهای موجود در گابروی قلیایی کلیبر و نفلین‌سینیت بزقوش بررسی شدند. این میکاها معمولاً به صورت درشت دانه‌هایی با بافت غربالی بوده و همراه با اکسیدهای Fe-Ti و کانی‌های مافیک، بافت لکه‌ای به سنگ می‌دهند. میکاهای گابروهای قلیایی در بعضی موارد بافت ورقه‌ای مشخصی را نشان می‌دهند. بر اساس رده‌بندی شیمیایی میکاها، کانی‌های مورد بررسی در حدفاصل بین دو قطب سیدروفیلیت و استونیت قرار دارند و با توجه به مقدار $Fe/(Fe + Mg) > 0.33$ جزء بیوتیت‌ها محسوب شده و از فلوگوپیت‌ها جدا می‌شوند. ترکیب شیمیایی بیوتیت‌ها در گابروی قلیایی کلیبر و نفلین‌سینیت بزقوش به ترتیب بیوتیت منیزیم‌دار و بیوتیت آهن‌دار بوده و با توجه به مقادیر اکسیدهای MgO ، TiO_2 ، MnO و FeO و نیز مقادیر Al^{VI} جزء انواع ماگمایی اولیه به حساب می‌آیند. بیوتیت‌های مورد بررسی علیرغم سنگ قلیایی میزبان، در نمودارهای دوتایی و سه‌تایی، که بر پایه اکسیدهای MgO ، Al_2O_3 و FeO^* استوارند، در گستره آهکی-قلیایی کوهزایی قرار می‌گیرند.

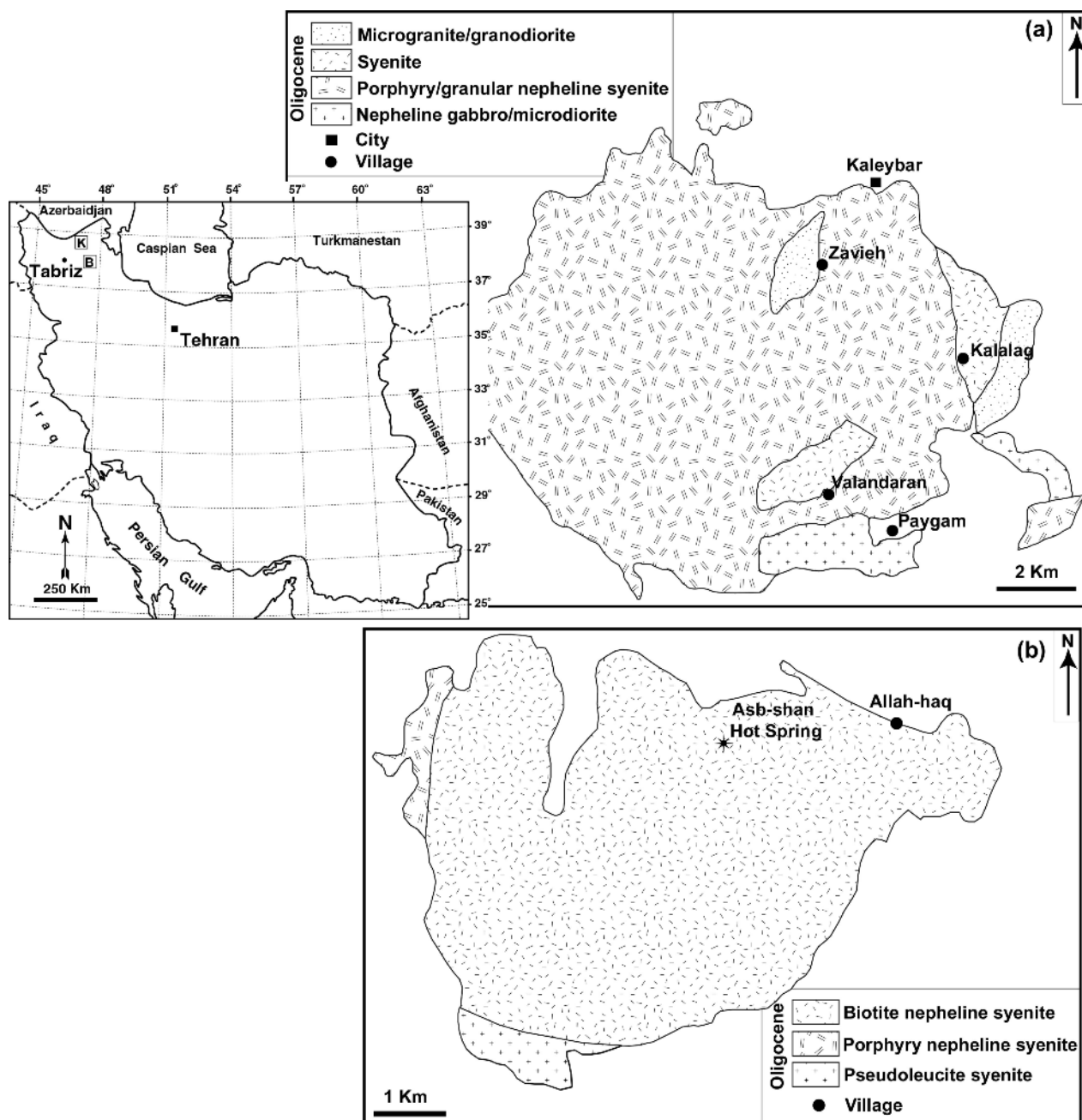
واژه‌های کلیدی: بیوتیت، نفلین‌سینیت، گابروی قلیایی، کلیبر، بزقوش.

مقدمه

می‌سازد. توده‌های آذرین قلیایی ائوسن-الیگوسن بزقوش و کلیبر به ترتیب در جنوب شهرستان سراب و در همسایگی شهرستان کلیبر قرار دارند و بر اساس منطقه‌بندی ساختاری پوسته ایران [۵] هر دو در کمربند ماگمایی البرز-آذربایجان قرار می‌گیرند. این توده‌های آذرین نیمه عمیق تا عمیق، ویژگی‌های قلیایی غنی از پتاسیم داشته و از لحاظ محیط زمین‌ساختی به محیط‌های وابسته به فرورانس مربوط می‌شوند [۶-۸]. این مقاله به ویژگی‌های بافتی، کانی‌شناسی و ترکیب شیمیایی بیوتیت‌ها از دو نوع متفاوت از سنگ‌های قلیایی شامل گابروی قلیایی کلیبر و نفلین‌سینیت بزقوش (شکل ۱) برای بررسی ارتباطشان با یکدیگر می‌پردازد.

شیمی بیوتیت‌ها برای تعیین ویژگی‌ها و شرایط ماگمایی سنگ میزبان با گستردگی مورد بررسی قرار گرفته است [۱-۳]؛ و به نظر می‌رسد که بررسی شیمی و کانی‌شناسی کانی‌های آبدار سنگ‌های آذرین قلیایی، که معمولاً از ماگماهای نسبتاً خشک ریشه می‌گیرند، می‌تواند به روشن‌تر شدن تاریخچه تبلور و سنگ‌شناختی این سنگ‌ها کمک کند. علاوه بر این به نظر می‌رسد رخداد نامعمول کانی‌های بیوتیت در سنگ‌های آذرین قلیایی، که اغلب به صورت انبوهی و گاه به صورت بافت ورقه‌ای آذرین مشاهده می‌شوند [۴]، بررسی‌های هرچه بیشتر این کانی‌ها برای آشکارسازی چگونگی تشکیل‌شان را ضروری

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۶۹۱ (۰۴۱۱) ۹۸+، نمابر: ۰۶۲۶۹۹۹ (۰۴۴۳) ۹۸+، پست الکترونیکی: nasser.ashrafi@gmail.com



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی ساده شده‌ای از توده‌های آذرین قلیایی (a) کلیبر و (b) بزقوش (اقتباس شده از نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ کلیبر، ورزقان، قره چمن و سراب).

روش بررسی

در این بررسی، نخست مقاطع نازکی از نمونه‌های سنگی توده‌های آذرین کلیبر و بزقوش با میکروسکوپ قطبشی مورد بررسی قرار گرفته و پس از مشخص شدن ویژگی‌های کانی‌شناسی و سنگ‌نگاشتی، روی نمونه‌های مناسب تجزیه‌های نقطه‌ای انجام پذیرفت (جدول ۱). تجزیه‌های نقطه‌ای در

دانشگاه کانازاوا (KU) ژاپن (۳۹ نقطه) با یک ریزپردازنده الکترونی JEOL، مدل JXA-8800R با ولتاژ شتابدهنده 20kV و شدت جریان 20nA؛ و در مرکز تحقیقات Cameca پتسدام آلمان (۱۹ نقطه) با ریز پردازنده الکترونی SX100؛ و بالاخره در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران (IMPRC) (۵ نقطه) توسط ریز پردازنده الکترونی

ویژگی‌های کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی سنگ‌میزبان بیوتیت‌ها

مهمترین کانی‌های سنگ‌ساز نفلین سینیت‌های بزقوش، شامل فلدسپار میکروپریتی قلیایی، پلاژیوکلاز، بیوتیت، کلینوپیروکسن، آمفیبول، نفلین، الیوین، آنالسیم، آپاتیت، زیرکن، تیتانیت و اکسید Fe-Ti هستند؛ که بین آن‌ها بیوتیت به عنوان مهمترین کانی آبدار تقریباً در تمام نمونه‌های بررسی شده حضور دارد (جدول ۱). مقدار آن اغلب حدود ۵ درصد یا کمتر است، ولی گاه تا ۱۰ درصد حجمی سنگ را تشکیل می‌دهد. در بیشتر نمونه‌ها بیوتیت بافت لکه‌ای به سنگ‌ها می‌دهد؛ بدین صورت که غالباً کانی‌های مافیک و اکسیدهای Fe-Ti را همراهی کرده (شکل ۲a) و اغلب به طور مشخصی در پیرامون آن‌ها رشد کرده است (شکل ۲b). چند رنگی مشخص بیوتیت‌ها به صورت قهوه‌ای کمرنگ تا قهوه‌ای تیره قابل مشاهده است و به موازات ارتعاش قطبندگی بیشتر جذب نور را نشان می‌دهد (چند رنگی عادی). دگرسانی بیوتیت‌ها، که با بی‌رنگ شدن و کاهش چند رنگی مشخص می‌شود و غالباً با تبلور جدید اکسیدهای Fe-Ti (روتیل، آناتاز، ایلمنیت) همراه است [۳]، در اینجا مشاهده نمی‌شود. با این وجود، در حواشی برخی دانه‌های بیوتیت، کانی آمفیبول به صورت نوار باریکی دیده می‌شود. در جدول (۱) مشخصات جغرافیایی، ترکیب کانیایی و بافتی نمونه‌های سنگ میزبان بیوتیت‌دار مورد بررسی از این توده ارائه شده است. سنگ میزبان بیوتیت‌های مورد بررسی از توده بزقوش طبق شیمی سنگ کل، جزء سری ماگمای قلیایی بوده و بر اساس رده‌بندی‌های شیمیایی [۱۱، ۱۲]، در رده نفلین سینیت قرار می‌گیرند.

Cameca، مدل SX100 (WDS) با ولتاژ شتاب‌دهنده 15kV و شدت جریان 10nA؛ صورت گرفت، و نتایج آنالیزها در نرم افزارهای Minpet 2.02، Mica⁺ [۹] و Excel بررسی شدند.

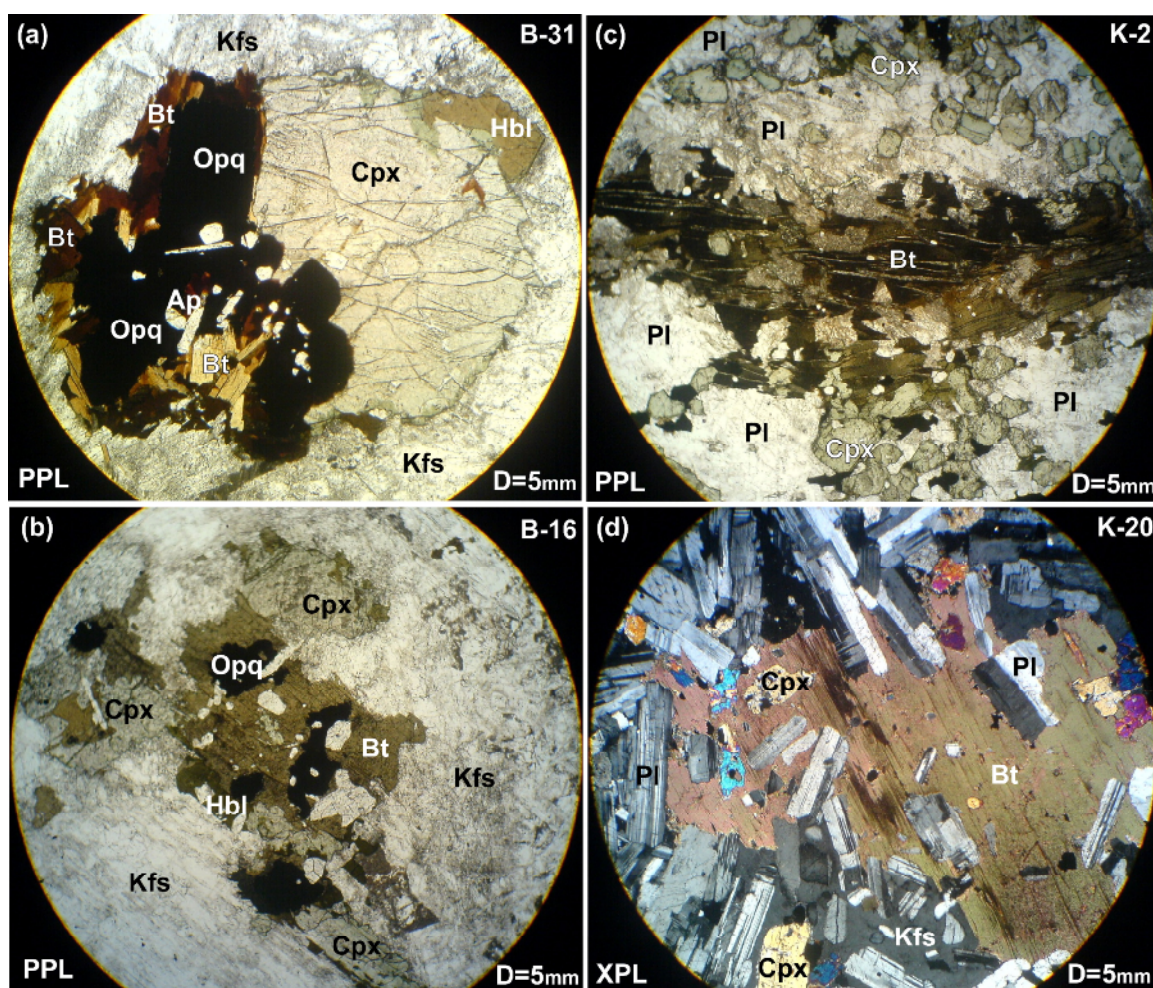
زمین شناسی

ترکیب سنگی توده آذرین بزقوش به ترتیب فراوانی، شامل بیوتیت سینیت‌های نفلین‌دار، سودولوسیت سینیت، دایک‌های میکروگرانیتی و میکروسینیتی کوارتزار و دایک‌های بازالتی و پگماتیت‌های سینیتی فوئیددار بوده؛ بافت آن‌ها از دانه‌دار تا پورفیری در تغییر است. بر اساس شواهد صحرایی، توده نفلین سینیتی بزقوش به درون سنگ‌های چین خورده ائوسن تزریق شده و مرز آن با سازندهای پیرامون در بیشتر بخش‌ها به صورت گسله است. سنگ‌های میزبان این توده آذرین بیشتر از آندزیت درشت پورفیری، تراکی آندزیت درشت پورفیری، تراکیت و توف‌های با سن ائوسن میانی و بالایی تشکیل شده‌اند. دگرگونی مجاورتی بسیار باریکی در خاور و جنوب توده قابل رویت بوده و سنگ‌های میزبان به اپیدوت هورنفلس و یا کلریت هورنفلس دگرگون شده‌اند.

بر اساس طبقه‌بندی مدی، ترکیب توده آذرین کلیبر شامل سینیت نفلین‌دار، سینیت، دیوریت/گابرو نفلین‌دار، گرانودیوریت و مونزونیت است. بافت سنگ‌های سینیتی، پورفیری تا دانه‌دار و بافت سنگ‌های بازیک، دانه‌دار است. این توده در شمال و غرب با شیست و ماسه سنگ‌های کرتاسه فوقانی و در بخش جنوبی با آتشفشانی‌های کرتاسه بالا همجوار بوده و سنگ‌های مجاور آن دستخوش دگرگونی مجاورتی به کوارتزیت، مرمر و هورنفلسهای بیوتیت-آلبیت‌دار تبدیل شده‌اند [۱۰].

جدول ۱ موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های سنگ‌نگاری نمونه‌های بیوتیت‌دار مورد بررسی از توده‌های آذرین کلیبر (K2, K20) و بزقوش (B16, B31, B44). CG: گرانولار درشت دانه؛ MG: گرانولار میان دانه؛ PFG: پورفیری با زمینه ریزدانه. علائم اختصاری کانی‌ها از [۲۶] هستند.

نمونه	کانی‌ها	بافت	ارتفاع (m)	مختصات جغرافیایی (UTM)
۲K	Pl+Cpx+Kfs+Bt+Hbl+Opq+Ap	MG	۱۷۶۱	۴۲۹۴۷۹۴ ۶۷۷۴۹۸ S ۳۸
۲۰K	Pl+Cpx+Bt+Opq±Ne±Kfs+Ap	MG	۱۷۷۰	۴۲۹۴۶۳۸ ۶۷۷۲۷۹ S ۳۸
۱۶B	Kfs+Pl+Bt+Ne+Cpx+Hbl+Opq+Ap+Spn	CG	۲۱۶۸	۴۱۸۴۵۳۳ ۷۱۶۲۴۰ S ۳۸
۳۱B	Kfs+Pl+Cpx+Ne+Bt+Hbl+Opq+Spn+Ap	PFG	۲۱۳۰	۴۱۸۴۸۰۴ ۷۱۷۹۸۶ S ۳۸
۴۴B	Kfs+Pl+Bt+Cpx+Ne+Opq+Ol+Ap	PFG	۲۱۱۲	۴۱۸۴۳۵۰ ۷۱۸۸۹۴ S ۳۸



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپی از بیوتیت نفیلین سینیت بزقوش (a, b) و بیوتیت گابروی قلیایی کلیبر (c, d) بافت تجمعی که بواسطه حضور کانی‌های مافیک و کدر ایجاد شده است؛ (b) بیوتیت‌ها به طور مشخصی پیرامون کانی‌های کدر (اکسیدهای Fe-Ti) رشد کرده‌اند؛ (c) لامیناسیون (فولیاسیون) آذرین که بواسطه حضور بیوتیت ایجاد شده و (d) بیوتیت با بافت غربالی که دارای ورودی‌های پلاژیوکلاز، پیروکسن و اوپک است.

صورت منشوری و شکل‌دار؛ (۲) کانی‌های همراهی کننده و یا در بر گیرنده سایر کانی‌های دیگر (کانی‌های مافیک و کدر مثل پیروکسن، هورنبلند و منیتیت [ماگنتیت]) که به اینگونه بافت-ها، بافت سینوسی گفته می‌شود و به واکنش‌های نهایی ماگمایی نسبت داده می‌شوند [۴]. بیوتیت‌های کلیبر همانند بیوتیت‌های بزقوش چندرنگی عادی مشخصی نشان می‌دهند (چند رنگی عادی). بافت غربالی (شکل ۲d)، ورقه‌ای (یا برگوارگی) آذرین و کلیواژهای خمیده (شکل ۲c) از ویژگی‌های بیوتیت‌های مورد بررسی توده آذرین کلیبر است. بیوتیت‌ها کاملاً تازه بوده و آن‌هایی که بافت ورقه‌ای دارند به ندرت به کانی‌های ثانویه‌ای چون کلریت و موسکویت دگرسان شده‌اند. در جدول (۱) مشخصات جغرافیایی، ترکیب کانیایی و بافتی نمونه‌های سنگ میزبان بیوتیت‌دار مورد بررسی از این توده

مهمترین کانی‌های سنگ‌ساز از گابروی قلیایی کلیبر شامل پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن، بیوتیت، فلدسپار قلیایی، آمفیبول، نفیلین، اکسید Fe-Ti و آپاتیت تشکیل شده‌اند (جدول ۱). گرچه در سنگ‌های مختلف توده آذرین کلیبر بیوتیت در بیشتر نمونه‌ها مشاهده شده ولی در سنگ‌هایی که فلدسپار قلیایی به عنوان کانی اساسی حضور ندارد (سنگ‌های گابروئی)، به عنوان کانی مهم و فراوان به شمار می‌رود. مقدار بیوتیت در سنگ‌های توده کلیبر معمولاً کمتر از ۱۰ درصد بوده ولی تا ۲۰ درصد در نمونه‌های گابرویی/دیوریتی می‌رسد، به طوری که در برخی بخش‌های این توده (مجاور سنگ‌های گابرویی) که تحت تاثیر گرماب‌ها یا شارهای جوی قرار گرفته، نهشته‌هایی از ورمیکولیت تشکیل شده‌اند. بیوتیت‌های مورد بررسی از این توده به دو صورت یافت می‌شوند: (۱) بلورهای منفرد (مجزا) گاهی به

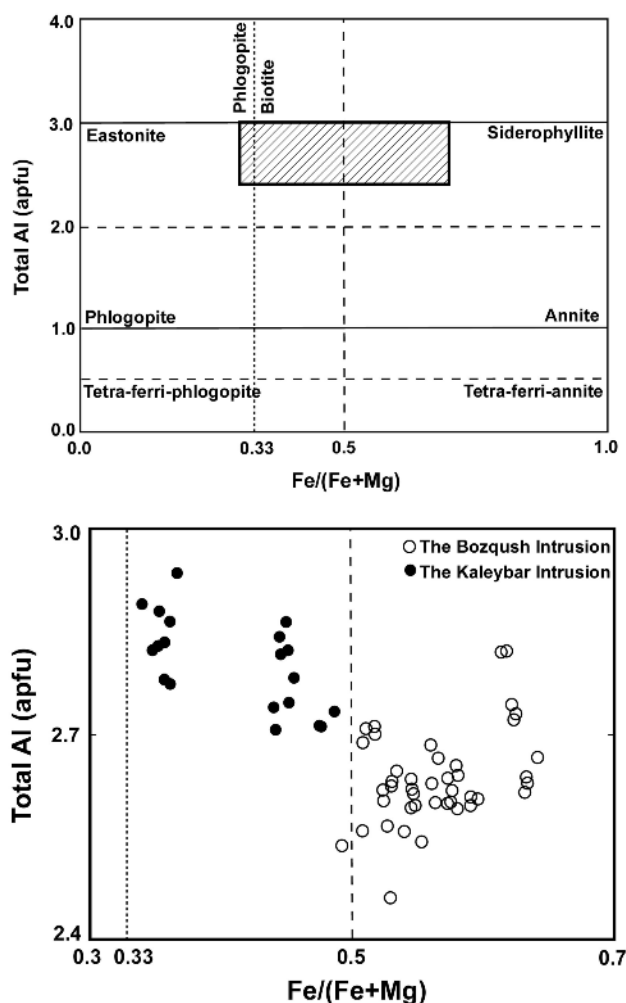
$IV Al$ (جانشینی چرماک) با هم در ارتباطند (شکل ۳). در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ نتایج آنالیزهای معرف از میکاهای توده-های آذرین مورد بررسی ارائه شده است. مقادیر کاتیونی بر اساس ۲۲ اکسیژن محاسبه شده و بنا بر فرمول کلی میکاها ($IM_{2-3} T_{1-0} O_{10} A_2$) فرمول ساختاری آن‌ها مشخص شده و نیز مقادیر Fe^{2+} و Fe^{3+} به روش [۱۴] محاسبه شدند.

ترکیب بیوتیت‌های مورد بررسی چنانکه از شکل (۳) پیداست به سمت دو قطب سیدروفیلیت و استونیت کشیده شده و بر اساس مقدار $Fe/(Fe+Mg)$ (< 0.33) از فلوگوپیت‌ها تفکیک می‌شوند. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که از لحاظ محتوای سیدروفیلیت، بیوتیت‌های بزقوش و از لحاظ محتوای استونیت، بیوتیت‌های کلیبر دارای غنی‌شدگی مشخصی هستند و بدین ترتیب از هم قابل تفکیک‌اند.

ارائه شده است. سنگ میزبان بیوتیت‌های مورد بررسی از توده آذرین کلیبر بر اساس شیمی سنگ کل، ویژگی سری‌های قلیایی را نشان می‌دهند و طبق طبقه‌بندی شیمیایی [۱۱]، [۱۲]، به ترتیب از جمله گابروی قلیایی و گابرو به حساب می‌آیند.

ترکیب شیمیایی بیوتیت‌ها

بیوتیت به عنوان نام سری‌های محلول جامد بین چهار عضو نهایی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳]. میکاهای Fe-Mg $AlSi_3$ شامل آنیت $KFe_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$ و فلوگوپیت $Fe-Mg-Al$ Al_2Si_2 و $KMg_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$ و میکاهای شامل سیدروفیلیت $KFe_2Al[Al_2Si_2O_{10}](OH)_2$ و استونیت $KMg_2Al[Al_2Si_2O_{10}](OH)_2$ اعضای نهایی مورد نظر هستند. این اعضای نهایی در چار چوب محورهای جانشینی افقی و قائم به ترتیب شامل تبادل Mg-Fe و تبادل $Si=^{VI}Al$ (Mg, Fe) می‌باشد.



شکل ۳ ترکیب بیوتیت‌های مورد بررسی در نمودار Al در مقابل $Fe/(Fe+Mg)$ [۱۳، ۲۵]. تصویر پایینی ناحیه هاشور خورده را نشان می‌دهد.

جدول ۲ نتایج تجزیه ریز پردازشی از بیوتیت نفیلین سینیت بزقوش که در IMPRC آنالیز شده‌اند.

Sample	۴۴-۱B	۴۴-۲B	۴۴-۳B	۴۴-۴B	۴۴-۵B
SiO ₂	۳۴٫۱۶	۳۴٫۲۰	۳۴٫۰۱	۳۴٫۱۷	۳۴٫۳۲
TiO ₂	۵٫۶۲	۶٫۰۹	۵٫۶۹	۵٫۷۱	۵٫۶۴
Al ₂ O ₃	۱۳٫۵۹	۱۳٫۷۴	۱۳٫۷۰	۱۳٫۵۳	۱۳٫۹۷
Cr ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
FeO*	۲۲٫۰۸	۲۰٫۱۷	۲۱٫۰۱	۲۱٫۰۰	۲۰٫۴۱
MnO	۰٫۵۵	۰٫۵۵	۰٫۴۷	۰٫۴۳	۰٫۴۵
MgO	۹٫۹۶	۱۰٫۹۳	۱۰٫۵۵	۱۰٫۰۰	۱۰٫۰۹
BaO	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
CaO	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Na ₂ O	۰٫۳۶	۰٫۴۴	۰٫۳۱	۰٫۴۷	۰٫۴۹
K ₂ O	۱۰٫۶۰	۱۰٫۴۰	۱۰٫۹۰	۱۰٫۹۵	۱۰٫۷۷
F	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Cl	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Total	۹۶٫۹۲	۹۶٫۶۰	۹۶٫۶۵	۹۶٫۲۷	۹۶٫۱۴

T site					
Si	۵٫۴۲۴	۵٫۴۰۴	۵٫۴۰۳	۵٫۴۸۴	۵٫۴۹۱
Al ^{IV}	۲٫۵۴۲	۲٫۵۵۸	۲٫۵۶۴	۲٫۵۱۶	۲٫۵۰۹
Fe ^{3+ IV}	۰٫۰۳۴	۰٫۰۳۸	۰٫۰۳۳	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰

M site					
Al ^{VI}	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۴۲	۰٫۱۲۲
Ti	۰٫۶۷۲	۰٫۷۲۴	۰٫۶۸۰	۰٫۶۸۹	۰٫۶۷۸
Fe ^{3+ VI}	۰٫۸۶۱	۰٫۹۲۳	۰٫۸۳۶	۰٫۶۴۳	۰٫۶۵۷
Fe ²⁺	۱٫۸۶۶	۱٫۵۱۸	۱٫۷۳۲	۱٫۹۹۰	۱٫۹۵۱
Cr	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Mn	۰٫۰۷۳	۰٫۰۷۳	۰٫۰۶۳	۰٫۰۵۸	۰٫۰۶۱
Mg	۲٫۳۵۷	۲٫۵۷۵	۲٫۴۹۹	۲٫۳۹۳	۲٫۴۰۷

I site					
Ca	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Na	۰٫۱۱۱	۰٫۱۳۴	۰٫۰۹۵	۰٫۱۴۷	۰٫۱۵۱
K	۲٫۱۴۶	۲٫۱۱۵	۲٫۲۱۰	۲٫۲۴۲	۲٫۱۹۸
Ba	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰

A site					
OH	۴٫۰۹۲	۴٫۱۰۴	۴٫۰۹۴	۴٫۱۲۵	۴٫۱۲۳
F	۰٫۰۲۸	۰٫۰۱۵	۰٫۰۰۸	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۲
Cl	۰٫۰۱۴	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۱

Cations	۱۶٫۰۸۶	۱۶٫۰۶۱	۱۶٫۱۱۵	۱۶٫۲۰۳	۱۶٫۲۲۵
Al ^{VI} /Al ^{IV}	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۵
Mg#	۰٫۴۵	۰٫۴۹	۰٫۴۷	۰٫۴۶	۰٫۴۷

جدول ۳ نتایج تجزیه ریز پردازشی معرف از بیوتیت گابروی قلیایی کلیر که در GFZ آنالیز شده‌اند.

Sample	۲۰-۱K	۲۰-۲K	۲۰-۳K	۲۰-۴K	۲۰-۵K	۲۰-۶K	۲۰-۷K	۲۰-۸K	۲۰-۹K
SiO ₂	۳۵٫۴۹	۳۶٫۲۹	۳۶٫۶۵	۳۶٫۱۵	۳۵٫۷۶	۳۶٫۵۳	۳۶٫۵۶	۳۶٫۳۷	۳۶٫۴۴
TiO ₂	۳٫۵۸	۴٫۰۲	۴٫۱۸	۴٫۶۴	۵٫۹۷	۵٫۹۴	۵٫۳۶	۵٫۵۶	۵٫۶۴
Al ₂ O ₃	۱۶٫۵۰	۱۶٫۲۳	۱۶٫۰۲	۱۵٫۹۸	۱۶٫۱۴	۱۵٫۹۲	۱۵٫۶۱	۱۵٫۵۵	۱۶٫۰۶
Cr ₂ O ₃	۰٫۰۲	۰٫۰۲	n.d.	۰٫۰۲	n.d.	n.d.	۰٫۰۲	۰٫۰۱	n.d.
FeO*	۱۵٫۳۵	۱۴٫۵۶	۱۴٫۶۳	۱۴٫۶۸	۱۳٫۳۷	۱۳٫۸۲	۱۴٫۶۰	۱۴٫۲۳	۱۴٫۱۹
MnO	۰٫۳۱	۰٫۳۰	۰٫۲۴	۰٫۲۸	۰٫۲۰	۰٫۲۱	۰٫۲۱	۰٫۲۳	۰٫۲۱
MgO	۱۴٫۷۷	۱۴٫۸۴	۱۴٫۹۸	۱۴٫۷۹	۱۴٫۴۶	۱۴٫۴۳	۱۴٫۳۹	۱۴٫۳۰	۱۳٫۹۸
BaO	۰٫۱۰	۰٫۱۱	۰٫۱۱	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۱۹	۰٫۱۷	۰٫۲۲	۰٫۱۸
CaO	۰٫۱۹	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰٫۰۴	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۱	n.d.	n.d.
Na ₂ O	۰٫۱۶	۰٫۱۶	۰٫۰۹	۰٫۴۳	۰٫۱۲	۰٫۲۲	۰٫۰۸	۰٫۱۴	۰٫۱۳
K ₂ O	۸٫۷۲	۹٫۳۸	۹٫۴۹	۹٫۵۹	۹٫۶۴	۹٫۵۴	۹٫۶۵	۹٫۳۵	۹٫۵۷
F	۰٫۰۳	۰٫۰۸	۰٫۱۰	۰٫۰۸	۰٫۱۰	۰٫۲۰	۰٫۱۸	۰٫۱۷	۰٫۱۱
Cl	۰٫۱۰	۰٫۱۰	۰٫۱۲	۰٫۱۰	۰٫۱۱	۰٫۱۴	۰٫۱۰	۰٫۱۱	۰٫۱۰
Total	۹۵٫۳۲	۹۶٫۱۷	۹۶٫۶۹	۹۶٫۹۲	۹۶٫۰۱	۹۷٫۱۷	۹۶٫۹۴	۹۶٫۲۴	۹۶٫۶۱
T site									
Si	۵٫۳۵۷	۵٫۴۶۲	۵٫۴۹۱	۵٫۴۴۰	۵٫۴۳۳	۵٫۴۹۹	۵٫۵۱۴	۵٫۵۱۷	۵٫۵۱۷
Al ^{IV}	۲٫۶۴۳	۲٫۵۳۸	۲٫۵۰۹	۲٫۵۶۰	۲٫۵۶۷	۲٫۵۰۱	۲٫۴۸۶	۲٫۴۸۳	۲٫۴۸۳
Fe ^{3+ IV}	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
M site									
Al ^{VI}	۰٫۲۹۰	۰٫۳۳۹	۰٫۳۱۸	۰٫۲۷۲	۰٫۳۲۱	۰٫۳۲۱	۰٫۲۸۶	۰٫۲۹۵	۰٫۳۸۰
Ti	۰٫۴۰۶	۰٫۴۵۵	۰٫۴۷۱	۰٫۵۲۵	۰٫۶۸۲	۰٫۶۷۳	۰٫۶۰۸	۰٫۶۳۴	۰٫۶۴۲
Fe ^{3+ VI}	۰٫۹۶۹	۰٫۷۹۴	۰٫۸۱۵	۰٫۸۵۲	۱٫۰۶۴	۰٫۹۷۴	۰٫۹۴۱	۰٫۹۸۵	۰٫۸۸۸
Fe ²⁺	۰٫۹۶۹	۱٫۰۳۹	۱٫۰۱۸	۰٫۹۹۵	۰٫۶۳۵	۰٫۷۶۶	۰٫۹۰۰	۰٫۸۲۰	۰٫۹۰۹
Cr	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰
Mn	۰٫۰۴۰	۰٫۰۳۸	۰٫۰۳۰	۰٫۰۳۶	۰٫۰۲۶	۰٫۰۲۷	۰٫۰۲۷	۰٫۰۳۰	۰٫۰۲۷
Mg	۳٫۳۲۴	۳٫۳۳۲	۳٫۳۴۶	۳٫۳۱۸	۳٫۲۷۵	۳٫۲۳۸	۳٫۲۳۵	۳٫۲۳۴	۳٫۱۵۵
I site									
Ca	۰٫۰۳۱	۰٫۰۱۱	۰٫۰۱۳	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Na	۰٫۰۴۷	۰٫۰۴۷	۰٫۰۲۶	۰٫۱۲۵	۰٫۰۳۵	۰٫۰۶۴	۰٫۰۲۳	۰٫۰۴۱	۰٫۰۳۸
K	۱٫۶۷۹	۱٫۸۰۱	۱٫۸۱۴	۱٫۸۴۱	۱٫۸۶۸	۱٫۸۳۲	۱٫۸۵۷	۱٫۸۰۹	۱٫۸۴۸
Ba	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۸	۰٫۰۰۸	۰٫۰۱۱	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۳	۰٫۰۱۱
A site									
OH	۳٫۹۹۱	۳٫۹۹۹	۳٫۹۸۱	۴٫۰۰۸	۴٫۰۲۶	۳٫۹۷۰	۳٫۹۷۷	۳٫۹۸۰	۴٫۰۲۳
F	۰٫۰۱۴	۰٫۰۳۸	۰٫۰۴۷	۰٫۰۳۸	۰٫۰۴۸	۰٫۰۹۵	۰٫۰۸۶	۰٫۰۸۲	۰٫۰۵۳
Cl	۰٫۰۲۶	۰٫۰۲۶	۰٫۰۳۰	۰٫۰۲۶	۰٫۰۲۸	۰٫۰۳۶	۰٫۰۲۶	۰٫۰۲۸	۰٫۰۲۶
Cations	۱۵٫۷۶۳	۱۵٫۸۶۴	۱۵٫۸۵۷	۱۵٫۹۸۰	۱۵٫۹۱۶	۱۵٫۹۱۱	۱۵٫۸۹۱	۱۵٫۸۶۲	۱۵٫۸۹۸
Al ^{VI} /Al ^{IV}	۰٫۱۱	۰٫۱۳	۰٫۱۳	۰٫۱۱	۰٫۱۳	۰٫۱۳	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۱۵
Mg#	۰٫۶۳	۰٫۶۵	۰٫۶۵	۰٫۶۴	۰٫۶۶	۰٫۶۵	۰٫۶۴	۰٫۶۴	۰٫۶۴

جدول ۴ نتایج تجزیه ریز پردازشی معرف از بیوتیت نفیلین سینیت بزقوش که در KU انجام شده است.

Sample	B44-1	B44-2	B44-3	B44-4	B44-5	B44-6	B44-7	B44-8	B44-9	B44-10
SiO ₂	۳۶٫۴۸	۳۶٫۰۲	۳۵٫۷۷	۳۶٫۱۲	۳۱٫۳۶	۳۶٫۱۲	۳۶٫۱۹	۳۶٫۳۰	۳۵٫۶۲	۳۶٫۱۰
TiO ₂	۵٫۸۱	۵٫۸۹	۵٫۶۶	۵٫۸۲	۵٫۷۴	۵٫۸۰	۵٫۹۰	۶٫۰۳	۵٫۵۸	۵٫۴۲
Al ₂ O ₃	۱۴٫۲۷	۱۴٫۴۰	۱۴٫۶۳	۱۴٫۲۸	۱۴٫۴۹	۱۴٫۵۰	۱۴٫۳۴	۱۴٫۳۱	۱۴٫۳۹	۱۴٫۷۰
Cr ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
FeO*	۲۱٫۲۹	۲۱٫۳۸	۲۲٫۲۲	۲۲٫۱۰	۲۱٫۹۹	۲۱٫۳۸	۲۱٫۳۷	۲۱٫۴۸	۲۲٫۴۰	۲۱٫۷۰
MnO	۰٫۵۱	۰٫۵۶	۰٫۵۵	۰٫۵۱	۰٫۵۷	۰٫۴۷	۰٫۴۶	۰٫۵۲	۰٫۵۸	۰٫۵۵
MgO	۹٫۹۳	۹٫۹۸	۹٫۵۵	۹٫۶۰	۹٫۶۲	۱۰٫۰۰	۹٫۹۱	۹٫۹۱	۹٫۳۹	۹٫۵۵
BaO	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
CaO	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱
Na ₂ O	۰٫۴۳	۰٫۴۱	۰٫۴۲	۰٫۳۸	۰٫۴۶	۰٫۴۰	۰٫۴۳	۰٫۳۷	۰٫۳۸	۰٫۴۲
K ₂ O	۹٫۴۹	۹٫۳۶	۹٫۴۴	۹٫۴۱	۹٫۳۹	۹٫۴۴	۹٫۴۵	۹٫۴۹	۹٫۵۸	۹٫۵۷
F	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Cl	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Total	۹۸٫۲۱	۹۸٫۰۱	۹۸٫۲۴	۹۸٫۲۳	۹۸٫۵۷	۹۸٫۱۱	۹۸٫۰۶	۹۸٫۴۱	۹۷٫۹۴	۹۸٫۰۲
T site										
Si	۵٫۶۳۲	۵٫۵۶۳	۵٫۵۳۱	۵٫۵۸۵	۵٫۵۹۲	۵٫۵۷۳	۵٫۵۹۶	۵٫۵۹۳	۵٫۵۴۱	۵٫۵۹۴
Al ^{IV}	۲٫۳۶۸	۲٫۴۳۷	۲٫۴۶۹	۲٫۴۱۵	۲٫۴۰۸	۲٫۴۲۷	۲٫۴۰۴	۲٫۴۰۷	۲٫۴۵۹	۲٫۴۰۶
Fe ^{3+IV}	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
M site										
Al ^{VI}	۰٫۲۲۶	۰٫۱۸۲	۰٫۱۹۵	۰٫۱۸۵	۰٫۲۲۰	۰٫۲۰۸	۰٫۲۰۷	۰٫۱۸۹	۰٫۱۷۷	۰٫۲۷۷
Ti	۰٫۶۷۵	۰٫۶۸۴	۰٫۶۵۸	۰٫۶۷۷	۰٫۶۶۵	۰٫۶۷۳	۰٫۶۸۶	۰٫۶۹۹	۰٫۶۵۳	۰٫۶۳۲
Fe ^{3+VI}	۰٫۸۸۲	۱٫۰۰۲	۰٫۹۸۵	۰٫۹۶۶	۰٫۹۲۳	۰٫۹۶۸	۰٫۹۴۱	۰٫۹۷۱	۰٫۹۳۷	۰٫۸۰۰
Fe ²⁺	۱٫۸۶۷	۱٫۷۳۸	۱٫۸۸۸	۱٫۸۷۱	۱٫۹۰۹	۱٫۷۹۱	۱٫۸۲۲	۱٫۷۷۶	۱٫۹۵۶	۲٫۰۱۲
Cr	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Mn	۰٫۰۶۷	۰٫۰۷۳	۰٫۰۷۲	۰٫۰۶۷	۰٫۰۷۴	۰٫۰۶۱	۰٫۰۶۰	۰٫۰۶۸	۰٫۰۷۶	۰٫۰۷۲
Mg	۲٫۲۸۵	۲٫۲۹۸	۲٫۲۰۱	۲٫۲۱۳	۲٫۲۰۹	۲٫۳۰۰	۲٫۲۸۴	۲٫۲۷۶	۲٫۱۷۸	۲٫۲۰۶
I site										
Ca	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۲
Na	۰٫۱۲۹	۰٫۱۲۳	۰٫۱۲۶	۰٫۱۱۴	۰٫۱۳۷	۰٫۱۲۰	۰٫۱۲۹	۰٫۱۱۱	۰٫۱۱۵	۰٫۱۲۶
K	۱٫۸۶۹	۱٫۸۴۴	۱٫۸۶۲	۱٫۸۵۶	۱٫۸۴۵	۱٫۸۵۸	۱٫۸۶۴	۱٫۸۶۵	۱٫۹۰۱	۱٫۸۹۲
Ba	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
A site										
OH	۴٫۱۱۲	۴٫۱۰۴	۴٫۰۹۸	۴٫۱۰۹	۴٫۱۰۲	۴٫۱۱۰	۴٫۱۰۸	۴٫۱۱۴	۴٫۱۰۳	۴٫۱۰۷
F	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Cl	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Cations	۱۶٫۰۰۰	۱۵٫۹۴۷	۱۵٫۹۸۷	۱۵٫۹۵۱	۱۵٫۹۸۲	۱۵٫۹۷۹	۱۵٫۹۹۳	۱۵٫۹۵۵	۱۵٫۹۹۷	۱۶٫۰۱۹
Al ^{VI} /Al ^{IV}	۰٫۱۰	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۹	۰٫۰۹	۰٫۰۹	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۱۲
Mg#	۰٫۴۵	۰٫۴۵	۰٫۴۳	۰٫۴۴	۰٫۴۴	۰٫۴۵	۰٫۴۵	۰٫۴۵	۰٫۴۳	۰٫۴۴

بیوتیت در سیستم‌های ماگمایی، دگرگونی و دگرنهادی به تغییرات دما، فشار و فعالیت سازنده‌هایی چون O₂, H₂O, F, SiO₂ کاملاً حساسند [۱]. فاکتورهای فیزیکوشیمیایی یاد شده همراه با امکان جانشینی در چهار منظر ساختاری شامل منظرهای چهار وجهی (T)، هشت وجهی (M)، میان لایه (I) و هیدروکسیل (A) تغییرپذیری ترکیبی بیوتیت‌ها را ممکن ساخته است. بیوتیت‌های سنگ‌های آذرین غنی از سیلیس

معمولاً یک روند غنی شدگی از آهن را نسبت به انواع فقیر از سیلیس نشان می‌دهند [۱]. بنا بر نمودار مثلثی Mg-(Al^{VI}+Fe³⁺+Ti)-(Fe²⁺+Mn) [۱۵] (شکل ۴) بیوتیت‌های نفیلین سینیت‌ها غالباً در گستره بیوتیت‌های آهن‌دار و بیوتیت-های قلیایی گابروها غالباً ویژگی بیوتیت‌های منیزیم‌دار را نشان می‌دهند. این ویژگی نیز از روی عدد منیزیم (Mg/(Mg+Fe)) بیوتیت‌های تجزیه شده قابل تایید است (جدول ۲، ۳ و ۴)؛

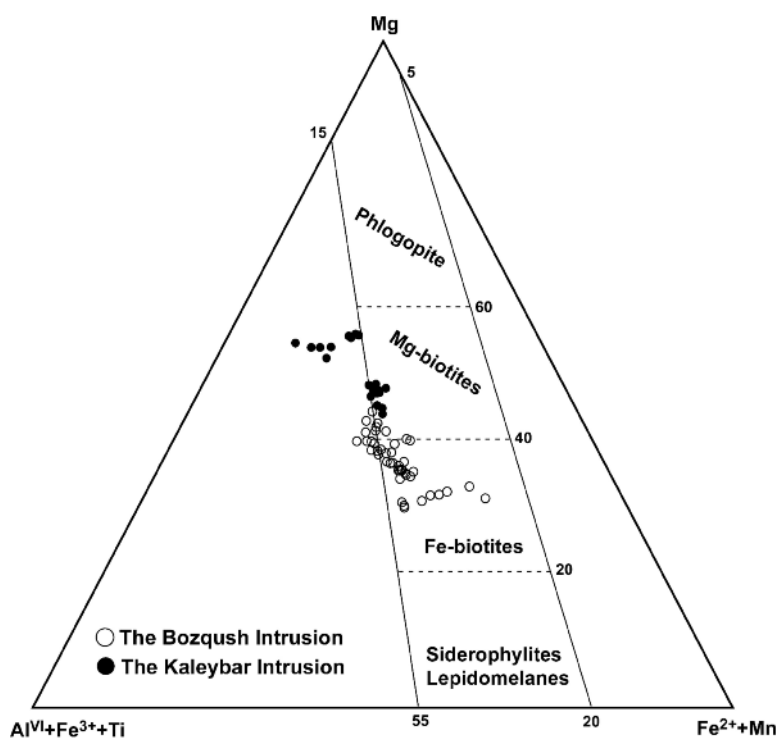
بدین صورت که مقدار منیزیم بیوتیت‌های کلیبر بیشتر از ۰/۵ و بزقوش کمتر از ۰/۵ است. علت این روندها می‌تواند به تاثیر ترکیب کلی گونه‌های سنگی وابسته باشد که منحصراً بیوتیت‌ها آن را بازتاب می‌دهند؛ یا حاصل دمای بالای تبلوری سنگ‌های با سیلیس کمتر است که تنها بیوتیت‌های غنی از Mg در آن شرایط ماگمایی پدیدارند [۱].

از لحاظ محتوای هالوژن‌ها، بیوتیت‌های مورد بررسی از توده کلیبر از مقدار فلوئور بیشتری نسبت به توده بزقوش برخوردارند (شکل ۵) و این بنابر اصل طرد آهن-فلوئور (Fe-F avoidance principle) است [۱۶، ۱۷]. چنان که در شکل (۵) دیده می‌شود بیوتیت‌های غنی از Mg کلیبر نسبت به بیوتیت‌های غنی از آهن بزقوش دارای F و Cl بیشتری هستند. لازم به یادآوری است که میزان جانشینی F و Cl در منظر هیدروکسیل میکاها به فعالیت F و Cl، ترکیب شیمیایی میکا، و دمای ماگما یا شاره‌ها بستگی دارد [۱۶، ۱۷].

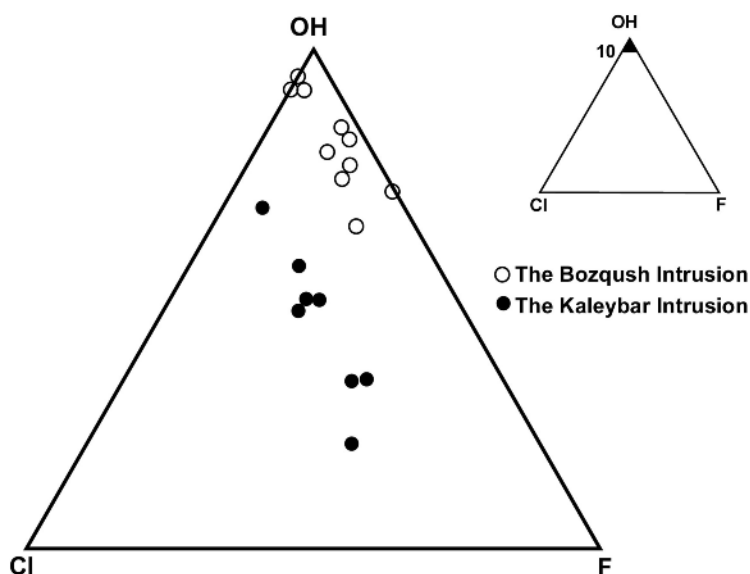
نتایج تجزیه‌های انجام گرفته روی بیوتیت‌های مورد بررسی حاکی از حضور Fe^{3+} در منظر چهار وجهی بیوتیت‌های بزقوش است؛ گرچه در اغلب موارد آهن بیوتیت را کلاً به صورت Fe^{2+}

در نظر گرفته‌اند ولی بر پایه منابع موجود شواهد روشنی مبنی بر رخداد گسترده Fe^{3+} در بیوتیت‌ها وجود دارد [۱۸]. به طوریکه علاوه بر حضور آن در منظر هشت وجهی در مواردی منظر چهار وجهی نیز می‌تواند آن را پذیرا باشد. جانشینی $Al-Fe^{3+}$ چهار وجهی در بیوتیت ممکن است با اندازه کاتیون چهار وجهی کنترل شود [۱۹]. [۲۰] نشان دادند که Fe^{3+} در منظر چهار وجهی بیوتیت‌های با چند رنگی وارون و $\Sigma(Si+Al+Ti) < 4$ حضور دارد بنا بر برداشت آن‌ها Ti^{4+} در منظر چهار وجهی بیوتیت‌هایی که با چندرنگی عادی و $\Sigma(Si+Al) < 4$ مشخص می‌شوند ممکن است وارد شود. لذا، به نظر می‌رسد که احتمال شرکت Ti^{4+} در موقعیت چهار وجهی بیوتیت‌های توده بزقوش وجود دارد.

بر اساس جدول‌های (۲، ۳ و ۴) تقریباً همه یا نسبت مهمی از Al در منظر چهار وجهی بیوتیت‌ها وارد شده است. با توجه به کل تجزیه‌های انجام گرفته، نسبت Al^{VI}/Al^{IV} بین ۰/۰۰ تا ۰/۲۴ برای بیوتیت‌های مورد بررسی در تغییر است. این نسبت معمولاً برای اغلب تجزیه‌های انجام گرفته از بیوتیت بزقوش نسبت به بیوتیت کلیبر پایین‌تر است.



شکل ۴ ترکیب بیوتیت‌های مورد بررسی در نمودار $Mg-(Al^{VI}+Fe^{3+}+Ti)-(Fe^{2+}+Mn)$ [۱۵].



شکل ۵ نمودار مثلثی OH-F-Cl جهت مقایسه تغییرات F و Cl بیوتیت‌های بزقوش و کلیبر.

دهند. با این وجود، برای بیوتیت‌های بزقوش می‌توان این روند را در نظر گرفت.

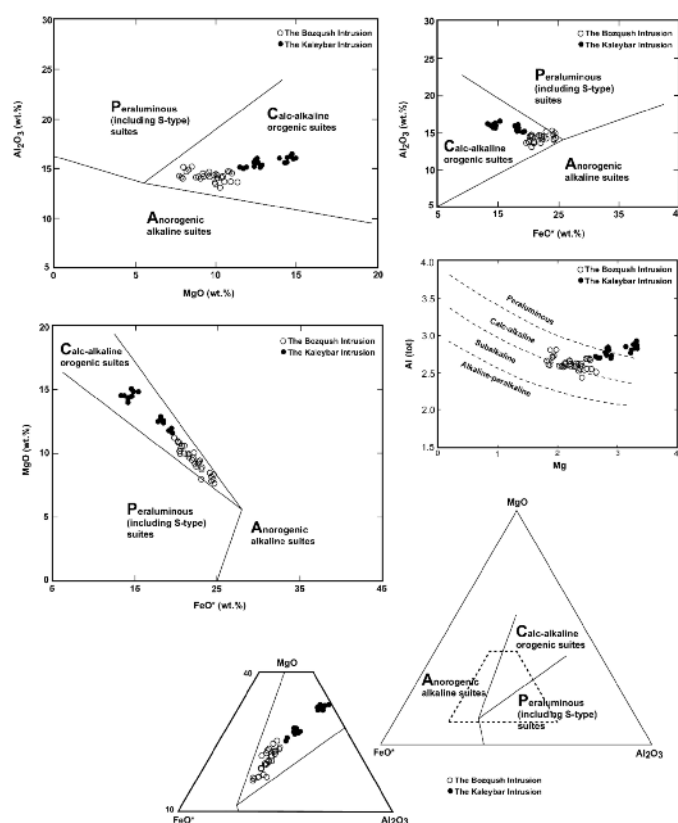
روند مشخص (همبستگی منفی) در نمودار FeO^* نسبت به MgO (شکل ۷) حاکی از اهمیت جانشینی $\text{Fe}=\text{Mg}$ برای بیوتیت‌های مورد بررسی است. همچنین بنا بر این نمودار و نمودار مثلثی $\text{MgO}-\text{FeO}^*-\text{Al}_2\text{O}_3$ (شکل ۶) می‌توان روند غنی‌شدگی از آهن برای بیوتیت‌های بزقوش را در نظر گرفت.

بحث و بررسی

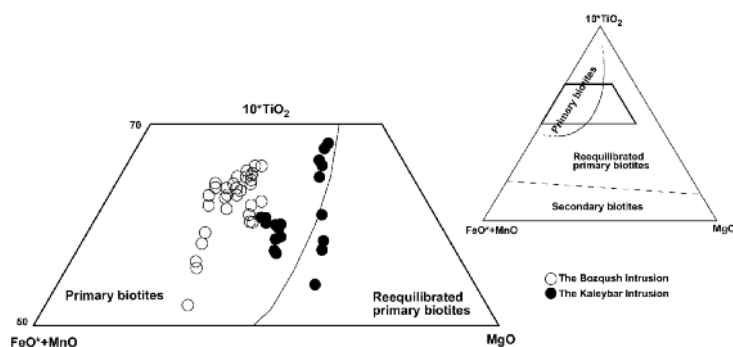
برخی شواهد سنگ‌نگاری همچون بافت لکه‌ای، به نقش فرایندهای نهایی ماگمایی در تشکیل بیوتیت‌های مورد بررسی اشاره دارد؛ سنگ‌های قلیایی از قبیل سینیت‌ها از آبگون‌های آغازین خشکی که تنها در مراحل آخر جدایش به علت تبلور کانی‌های بی‌آب از قبیل پیروکسن و فلدسپارهای پرتیتی به حالت اشباع از آب می‌رسند، تشکیل می‌شوند. طبیعت هیپرسولوس فلدسپارها (به صورت میکرو پرتیت) غالباً در مورد سنگ‌های قلیایی بزقوش بیانگر خشک بودن آبگون‌های قلیایی نخستین در مراحل آغازین شکل‌گیری ماگما را منعکس می‌کند. در این حالت کمیابی یا عدم وجود H_2O ، که بر قابلیت در دسترس بودن اکسیژن آزاد موثر است، به تاخیر در تبلور اکسیدهای آهن و اکسیدهای آهن-تیتانیوم منجر می‌شود، بنابراین روندهای غنی‌شدگی از آهن تولید می‌کند، و کانی‌های بیوتیتی که از چنین آبگون‌هایی متبلور می‌شوند غنی از آهن هستند [۲].

جانشینی‌های عناصر در ارتباط با پیدایش بیوتیت‌ها

در نمودار FeO^* نسبت به Al_2O_3 (شکل ۶) بیوتیت‌های مورد بررسی از کلیبر و بزقوش در گستره سری‌های کوهزایی آهکی-قلیایی (C) قرار گرفته و در آن عناصر یاد شده همبستگی قابل توجهی (همخوانی منفی یا مثبت کاملاً مشخص) نشان نمی‌دهند؛ گرچه این همبستگی برای بیوتیت‌های کلیبر نسبتاً بهتر است. همبستگی منفی این دو اکسید به جانشینی $2\text{Al}=3\text{Fe}^{2+}$ در منظر چهار وجهی نسبت داده شده است. به عقیده [۲] جانشینی $2\text{Al}=3\text{Fe}^{2+}$ در سیستم‌های ماگمایی آهکی قلیایی (C) یا پرآلومینوس (P) در طول تبلور بیوتیت ممکن است اهمیت چندانی نداشته باشد بر خلاف Fe، مقدار Mg با تغییر مقدار Al در سیستم‌های آهکی-قلیایی و پرآلومینوس تغییر می‌کند؛ به عبارتی بر اساس داده‌های [۲] جانشینی Mg-Al نسبت به جانشینی $2\text{Al}=3\text{Fe}^{2+}$ در سیستم‌های قلیایی (A) از اهمیت کمی برخوردار است. این تغییرات یعنی افزایش تدریجی MgO با کاهش Al_2O_3 در مورد بیوتیت‌های مورد بررسی صدق نمی‌کند (شکل ۶)؛ در واقع بنابر این نمودار، گرچه بیوتیت‌های مورد بررسی در گستره سری‌های آهکی-قلیایی قرار می‌گیرند، ولی روند مورد نظر [۲] یعنی تطابق منفی دو اکسید یاد شده را، که بیانگر جانشینی بین Mg و Al $(3\text{Mg}=2\text{Al})$ در منظرهای هشت‌وجهی بیوتیت‌های سیستم‌های ماگمایی آهکی-قلیایی و پرآلومینوس است، نشان نمی‌



شکل ۶ ترسیم اکسیدهای FeO^* , MgO و Al_2O_3 بیوتیت‌های مورد بررسی در نمودارهای [۲] و $\text{Al}^{(\text{tot})}$ - Mg [۲۱].



شکل ۷ ترکیب بیوتیت‌های مورد بررسی در نمودار $(\text{FeO}^*+\text{MnO})$ - 10^*TiO_2 - MgO [۳].

گرچه چند نقطه از بیوتیت کلیبر در گستره بیوتیت‌های اولیه تعادل دوباره یافته قرار می‌گیرند. مقادیر Ti بیوتیت‌های قلیایی گابروها و نفلین سینیت‌ها تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای نشان نمی‌دهد، ولی معمولاً مقادیر بیشتر آن به نفلین سینیت‌ها مربوط می‌شود. بنابر [۳]، مقدار Ti بیوتیت‌ها وابسته به دما بوده و با $X_{\text{FeO}^*} = [(\text{FeO}^*+\text{MnO}) / (\text{FeO}^*+\text{MnO}+\text{MgO})]$ سنگ میزبان تغییر می‌کند. مقدار X_{FeO^*} قلیایی گابروها و نفلین سینیت‌های مورد بررسی به ترتیب حدود ۰/۷۷ و ۰/۶۷ بوده و بیوتیت‌های سنگ‌های اخیر به طور مشخص‌تری با

به نظر می‌رسد که بیوتیت‌های مورد بررسی، در مواردی از فرایندهای زمین ساختمانی حاکم بی تاثیر نمانده باشند. بافت ورقه‌ای (برگوارگی) آذرین موجود در برخی از نمونه‌های گابروی قلیایی، که به طور مشخص بیوتیت‌ها آن را نمایان ساخته و اغلب با کلیواژهای خمیده مشاهده می‌شوند، احتمالاً برگوارگی ثانویه‌ای است که تحت تنش‌های زمین ساختمانی همزمان و یا پس از جایگیری توده آذرین کلیبر به وجود آمده است.

بررسی بیوتیت‌ها در نمودار $(\text{FeO}^*+\text{MnO})$ - 10^*TiO_2 - MgO [۳] ویژگی اولیه بودن آن‌ها را نشان می‌دهد (شکل ۷)؛

ماگمایی آهکی-قلیایی به قلیایی و برعکس در نظر گرفته‌اند؛ که احتمالاً ممکن است با تغییر شرایط زمین‌ساختی (کوهزایی به غیر کوهزایی) همراه باشد. با این همه، احتمال عملکرد رژیم‌های کششی به صورت موضعی در تشکیل ماگماهای سنگ ساز قلیایی منطقه مورد بررسی را نمی‌توان رد کرد.

برداشت

میکاهای مورد بررسی از توده‌های قلیایی کلبیر (قلیایی گابرو) و بزقوش (نفلین سینیت) بر اساس شیمی آن‌ها به ترتیب بیوتیت منیزیم‌دار و بیوتیت آهن‌دار بوده و جزء بیوتیت‌های ماگمایی اولیه به شمار می‌روند. بررسی‌های بالا بیانگر اهمیت جانیشینی-های $3Mg=2Al$ و $2Al=3Fe^{2+}$ به ترتیب برای بیوتیت‌های قلیایی گابروی کلبیر و نفلین سینیت بزقوش و جانیشینی $Fe=Mg$ برای هر دو آن‌هاست. بیوتیت‌های مورد بررسی، با وجود اینکه دارای سنگ میزبان قلیایی (بر اساس سنگ‌نگاری و شیمی سنگ کل) هستند، روند‌های کوهزایی آهکی-قلیایی را به نمایش می‌گذارند که احتمالاً بیانگر عدم تشکیل سنگ میزبان آن‌ها در یک محیط کاملاً غیرکوهزایی (کششی) است.

قدردانی

این مقاله برگرفته از نتایج طرح پژوهشی رساله دکترای نویسنده اول است که از سوی معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه تبریز حمایت مالی شده است؛ لذا نویسندگان بدینوسیله نهایت سپاس و قدردانی خود را از معاونت‌های مذکور ابراز می‌دارند. همچنین نویسندگان از داوران محترم مجله، بخاطر نظرات سازنده‌شان؛ از آقای دکتر مؤذن، بخاطر انجام بخشی از آنالیزهای نقطه‌ای این مطالعه در GFZ آلمان، و از F. Yavuz، بخاطر فراهم کردن برنامه $Mica^+$ ، سپاس‌گزارند.

مراجع

- [1] Wones D.R., Eugster H.P., "Stability of biotite: experiment, theory, and application", American Mineralogist 50 (1965) 1228–1272.
- [2] Abdel-Rahman A.M., "Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas", Journal of Petrology 35 (2) (1994) 525–541.
- [3] Nachit H., Ibhi A., Abia E.H., Ohoud M.B., "Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites and neoformed biotites", Geomaterials (Mineralogy), Copmtes Rendus, Geoscience 337 (2005) 1415–1420.

فازهای اکسیدی Fe-Ti همزیست‌اند که احتمالاً این ویژگی توانسته تا حدودی مقدار Ti آن‌ها را افزایش دهد. معمولاً مقدار Ti در بیوتیت‌های همزیست با فازهای اکسیدی اشباع از Ti افزایش نشان می‌دهد [۱۴].

مقدار Al^{VI} در بیوتیت‌ها به عنوان یکی از معیارهای مهم برای بررسی ویژگی‌های آن‌ها به کار گرفته شده است. در مورد تجزیه‌هایی که Al^{VI} به دست می‌دهند بجای جانیشینی $(Mg, Fe)^{VI} Si^{IV} = Al^{VI} Al^{IV}$ ، جانیشینی $3(Mg, Fe)^{VI} = 2Al^{VI}$ فضای هشت وجهی را فراهم می‌کند [۱۵]. همچنین Al^{VI} پایین تا صفر ($Al^{VI} < 1$) بر اساس ۲۲ اکسیژن از ویژگی-های بیوتیت‌های ماگمایی است [۳] که در مورد بیوتیت‌های مورد بررسی صدق می‌کند.

علی‌رغم سنگ میزبان قلیایی بیوتیت‌های مورد بررسی، روند‌های آهکی-قلیایی کوهزایی طبق نمودارهای [۲] (شکل ۶)، برای آن‌ها قابل اثبات است؛ این ویژگی با نمودار $Al^{tot}-Mg$ (شکل ۶) نیز قابل تأیید است. بنابر این نمودار اغلب نقاط تجزیه شده از بیوتیت‌ها در گستره آهکی-قلیایی ترسیم می‌شوند؛ با این وجود، برخی نقاط از بیوتیت کلبیر در گستره پرآلومینوس قرار می‌گیرند. لازم به یادآوری است که در نمودارهای ژئوشیمیایی [۲] گستره بیوتیت‌های سنگ‌های قلیایی دیگر (مثل قلیایی وابسته به فروران) مشخص نشده و برخی پژوهشگران ایرادهایی به برخی از آن‌ها وارد کرده‌اند به عنوان مثال [۲۲] معتقدند که مرز بین گستره P و C در نمودار Al_2O_3-MgO در واقع مرز تقریبی بین بیوتیت ماگماهای پرآلومینوس و متالومینوس است نه مرز بین بیوتیت ماگماهای پرآلومینوس و آهکی-قلیایی. در هر حال، با توجه به ترکیب شیمیایی بیوتیت‌های مورد بررسی می‌توان گفت که سنگ میزبان آن‌ها در یک محیط زمین‌ساختی مشابه توده‌های کوهزایی آهکی-قلیایی تشکیل شده است. در منطقه مورد بررسی همانند برخی نقاط زون ماگمایی ارومیه-دختر، سری-های ماگمایی آهکی-قلیایی و قلیایی از نظر زمانی و مکانی تقریباً یکسان تشکیل شده‌اند. این سری‌ها احتمالاً در یک رژیم فشارشی وابسته به فروران، چنان که [۲۳] برای ماگماتیسیم قلیایی و آهکی-قلیایی ترشیری تگزاس و مکزیکو در نظر می‌گیرد، تشکیل شده‌اند و تفاوت‌های ترکیبی آن‌ها احتمالاً نتیجه تفاوت در سنگ‌های خاستگاه و شرایط ذوب بوده است. لازم به یادآوری است که برخی از پژوهشگران همچون [۲۴]، تغییرات در محتوای آب ماگماهای سنگ‌ساز را از عوامل تغییر سری‌های

- [15] Foster M.D., "Interpretation of the composition of trioctahedral micas", United States Geological Survey Professional Paper 354-B (1960) 11-49.
- [16] Monuz J.L., Ludington S.D., "Fluoride-hydroxyl exchange in biotite", American Journal of Science 274 (1974) 396-413.
- [17] Monuz J.L., "F-OH and Cl-OH exchange in mica with application to hydrothermal ore deposits", Reviews in Mineralogy 13 (1984) 469-493.
- [18] Guidotti C.V., Dyar M.D., "Ferric iron in metamorphic biotite and its petrologic and crystallochemical implications", American Mineralogist 76 (1991) 161-175.
- [19] Dyar M.D., "A review of Mössbauer data on trioctahedral micas: Evidence for tetrahedral Fe^{3+} and cation ordering", American Mineralogist 72 (1987) 102-112.
- [20] Farmer G.L., Boettcher A.L., "Petrologic and crystal-chemical significance of some deep-seated phlogopites", American Mineralogist 66 (1981) 1154-1163.
- [21] Nachit H., Razafimahefa N., Stussi J.M., Carron J.P., "Composition chimique des biotites et typologie magmatique des granitoides", Comptes Rendus Hebdomadaires de l' Académie des Sciences 301 (11) (1985) 813-818.
- [22] Stussi J.M., Cuney M., "Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline and peraluminous magmas by Abdel-Fattah M. Abdel-Rahman: a comment", Journal of Petrology 37 (1996) 1025-1029.
- [23] Baker D.S., "Tertiary alkaline magmatism in Trans-Pecos", In Alkaline Igneous Rocks (editors: J.G. Fitton and B.G.J. Upton) Geological Society Special Publications (1987).
- [24] Bonin B., "From orogenic to anorogenic settings: evolution of granitoid suites after a major orogenesis", Geological Journal 25 (1990) 261-270.
- [25] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., "An Introduction to the Rock Forming Minerals", Second Longman Editions. Longman, London (1992) 696 pp.
- [26] Kretz R., "Symbols for rock-forming minerals", American Mineralogist 68 (1983) 277-279.
- [4] Sorensen H., "The alkaline rocks", John Wiley and Sons (1979) 622pp.
- [5] Alavi M., "Tectonic Map of the Middle East, 1:5000000", Geological Survey of Iran (1991).
- ۶- اشرفی ن.، "بررسی‌های پترولوژیکی و ژئوشیمیایی توده نفوذی رزگاه (سراب - آذربایجان شرقی)، شمالغرب ایران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز (۱۳۸۳) ۹۷ص.
- ۷- شهریار و.، "بررسی‌های پترولوژی و پتروگرافی توده نفوذی بزقوش، جنوب سراب"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز (۱۳۸۴) ۱۰۷ص.
- ۸- عبادی ل.، "پترولوژی و ژئوشیمی توده‌های آذرین فلدسپاتوئیددار غرب بزقوش (عباس آباد-باشکند)، جنوبغرب سراب"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز (۱۳۸۶) ۱۰۸ص.
- [9] Yavuz F., "Evaluating micas in petrologic and metallogenic aspect: I-definitions and structure of the computer program MICA+", Computers & Geosciences 29 (2003) 1203-1213.
- ۱۰- باباخانی ع.، امینی آذر ر.، گزارش عملیات اکتشافی بر روی توده نفیلین سینیتی کلیر به عنوان ماده اولیه تولید آلومینا، شیشه، سرامیک و سنگ‌های تزئینی و نما"، سازمان زمین‌شناسی کشور، شرکت توسعه علوم زمین (۱۳۷۳).
- [11] De la Roche H., Leterrier J., Grande Claude P., Marchal M., "A classification of Volcanic and plutonic rocks using R1- R2 diagrams and major element analyses- its relationships and current nomenclature", Chemical Geology 29 (1980) 183-210.
- [12] Cox K.G., Bell J.D., Pankhurst R.J., "The interpretation of igneous rocks", London, Allen and uniwin, (1979) 450pp.
- [13] Rieder M., Cavazzini G., Yakonov Y.D., Frank-Kanetskii V.A., Gottardi G., Guggenheim S., Koval P.V., Müller, G., Neiva A.M.R., Radoslovich E.W., Robert J.L., Sassi F.P., Takeda H., Weiss Z., Wones D.R., "Nomenclature of the micas", Canadian Mineralogist 36 (3) (1998) 905-912.
- [14] Dymek R.F., "Titanium, aluminum and interlayer cation substitutions in biotite from high-grade gneisses, west Greenland", American Mineralogist 68 (9-10) (1983) 880-899.