

بررسی پتروگرافی و شیمی کانی‌ها در سنگ‌های آتشفشانی کوه‌سیاه (شمال باتلاق گاوخونی، جنوب‌شرق اصفهان)

بهاره فاضلی^۱، قدرت ترابی^{۱*} و فریمه آیتی^۲

^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۲ گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران

چکیده

کوه‌سیاه در شمال باتلاق گاوخونی و شرق ورزنه (جنوب‌شرق اصفهان) قرار دارد و جزیی از نوار ماگمایی ارومیه-دختر است. این کوه آتشفشانی از بازالت و آندزیت بازالتی حفره‌دار با سن میوسن بالایی تشکیل شده است. بافت چیره این سنگ‌ها پورفیری، میکرولیتیک پورفیری، هیالوپورفیری و حفره‌دار است. پلاژیوکلاز، الیون و کلینوپروکسن کانی‌های اصلی بازالت‌ها است. ارتوپروکسن و اسپینل کروم‌دار کانی‌های فرعی‌اند. کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده آندزیت‌های بازالتی شامل: پلاژیوکلاز، الیون و ارتوپروکسن است. کلینوپروکسن و اسپینل کروم‌دار کانی‌های فرعی را تشکیل می‌دهند. هم بازالت‌ها و هم آندزیت‌های بازالتی شامل: کلریت، کلسیت و مگنتیت به عنوان کانی‌های ثانویه‌اند. در این سنگ‌ها پلاژیوکلاز از نوع لابرادوریت و بیتونیت، الیون‌ها از نوع کریزولیت (بیشتر تجزیه شده به کلریت)، ارتوپروکسن‌ها از نوع انستاتیت (برخی دارای حاشیه‌ای از پیژونیت)، کلینوپروکسن‌ها از نوع اوژیت و کلریت‌ها از نوع کروندوفیلیت است. محاسبات ترمومتری الیون-اسپینل برای فشار ۱ تا ۱۰ کیلوبار محدوده دمایی ۹۱۴ تا ۱۲۰۱ درجه سانتیگراد را مشخص نموده است. ترمومتری ارتوپروکسن‌ها نیز محدوده دمایی ۱۲۴۸ تا ۱۳۰۴ درجه سانتیگراد را برای فشار ۱ تا ۱۰ کیلوبار ارایه نموده است. داده‌های ژئوشیمیایی نمونه‌های سنگ کل و شیمی کانی‌ها بیانگر کالک‌آلکالن بودن این سنگ‌ها و تعلق آنها به کمان‌های آتشفشانی است.

واژه‌های کلیدی: بازالت، میوسن بالایی، کوه‌سیاه، گاوخونی، ارومیه-دختر

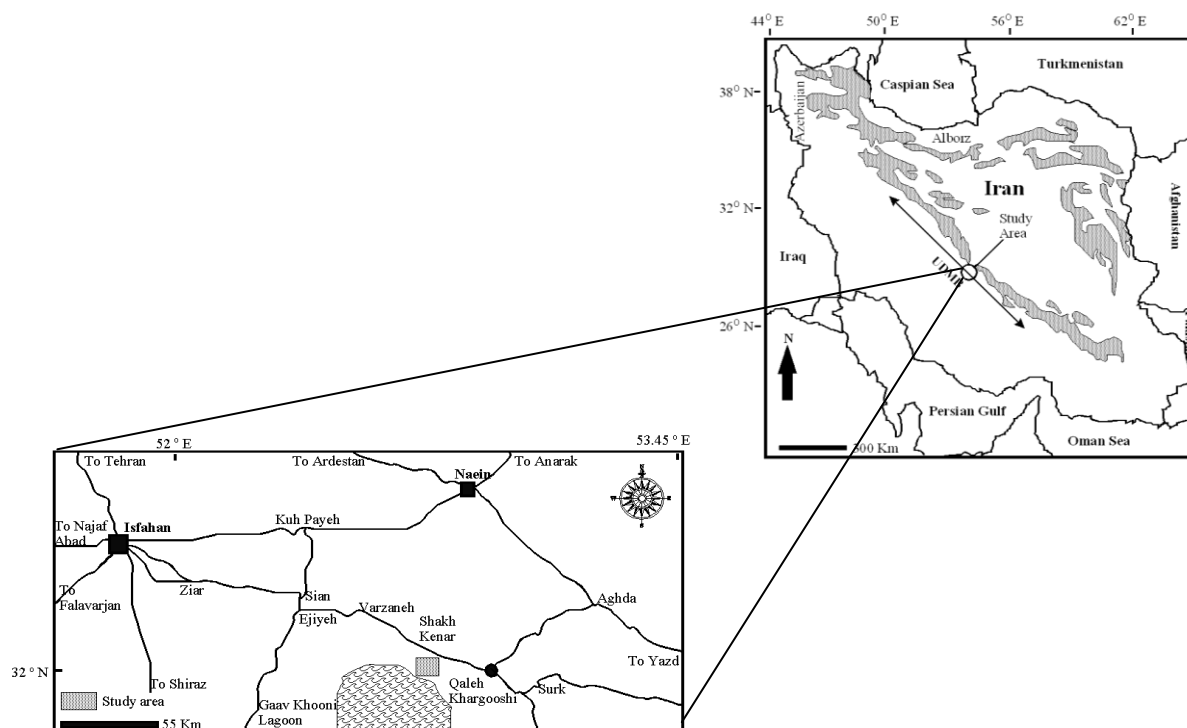
مقدمه

۳۱/۸۹'' ۵۵' ۵۲° شرقی قرار گرفته است. منطقه مزبور در بخش جنوبی نوار آتشفشانی ارومیه-دختر واقع شده و از طریق جاده اصفهان-ورزنه و سپس از طریق یک جاده خاکی قابل دسترسی است (شکل ۱). نوار ماگمایی ارومیه-دختر با روند شمال‌غرب-

منطقه کوه‌سیاه در جنوب‌شرق اصفهان و شمال باتلاق گاوخونی در عرض جغرافیایی ۲۷/۵'' ۱۷' ۳۲° تا ۳۲° ۱۹' ۰۰/۳۲'' شمالی و طول جغرافیایی ۵۴' ۰۴/۹۴'' ۵۲° تا

بررسی‌های پترولولوژی نسبتاً محدود در منطقه کوه‌سیاه (Khoddami, 1998, 2009) ترکیب سنگ‌های مورد بررسی را آندزیت بازالتی در نظر گرفته است. این سنگ‌ها دارای سن میوسن بالایی است (Amidi and Alavi Tehrani, 1978). هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی شیمی کانی‌ها و استفاده از ترکیب شیمیایی کانی‌ها در بررسی‌های پتروژنز سنگ‌ها است.

جنوب‌شرق در ارتباط با فرورانش صفحه اقیانوسی نئوتتیس و متعاقباً صفحه عربی به زیر ایران تشکیل شده است. سنگ‌های تشکیل‌دهنده آن اساساً سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب حدواسط (بیشتر دارای ترکیب آندزیتی) است. از این میان سنگ‌های آتشفشانی میوسن بالایی در منطقه شمال باتلاق گاوخونی (جنوب‌شرق اصفهان) برای بررسی‌های پترولولوژی انتخاب شد.



شکل ۱- موقعیت منطقه کوه‌سیاه و راه‌های دسترسی به آن. فلش دو سر، نمایانگر نوار ماگمایی ارومیه-دختر است.

پتروگرافی و ژئوشیمی شبیه سنگ‌های با سن میوسن بالایی در پهنه ارومیه-دختر است. در بخش‌های شمال کوه‌سیاه (در پهنه ارومیه-دختر) سنگ‌های ولکانیک با سن ائوسن تا میوسن بالایی مشاهده می‌شود (Amidi and Alavi Tehrani, 1978) (شکل ۲).

گسل‌های متعددی در منطقه مشاهده می‌شود. بیشتر گسل‌ها از روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق تبعیت نموده‌اند. نزدیک‌ترین گسل به منطقه مورد بررسی، گسل دهشیر-بافت است که با روند مشابه

زمین‌شناسی منطقه

از دیدگاه واحدهای زمین‌شناسی، گستره بررسی شده متعلق به نوار آتشفشانی ارومیه-دختر است که به صورت نقطه‌ای در بخش جنوبی این نوار و با فاصله از آن قرار گرفته است. چینه‌نگاری رخنمون‌های سنگی منطقه جنوب‌شرق اصفهان بیشتر متعلق به مزوزوئیک و سنوزوئیک است و همگی روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق دارد. سنگ‌های ولکانیک بررسی شده در تماس با هیچ واحد سنگی جدیدتر یا قدیمی‌تر نیست اما از نظر

بررسی‌های صحرایی، پتروگرافی و انجام تجزیه ریزکاو الکترونی برای بررسی شیمی کانی‌ها است. برای تعیین ترکیب و محاسبه فرمول ساختاری، کانی‌ها از دستگاه ریزکاو الکترونی (Cameca SX-100) در دانشگاه لیپنیز هاننور آلمان با ولتاژ شتاب‌دهنده ۲۰ کیلوولت و جریان ۱۵ نانو آمپر و دستگاه ریزکاو الکترونی JEOL مدل JXA-8800(WDS) در دانشگاه کانزواوی ژاپن تجزیه شیمیایی شد. از نرم‌افزار Minpet نسخه ۲/۰۲ برای محاسبه فرمول ساختمانی کانی‌ها و تقسیم‌بندی آنها استفاده شد. عوامل $Mg\#$ ، $Fe\#$ و $Cr\#$ به ترتیب به صورت $Mg/(Fe^{2++}Mg)$ ، $Fe^{2+}/(Fe^{2++}Mg)$ و $Cr/(Cr+Al)$ محاسبه می‌شود.

پتروگرافی

سنگ‌های ولکانیک بررسی شده بیشتر بازالت و آندزیت بازالتی با رنگ تیره است. بافت اصلی سنگ‌ها میکرولیتیک پورفیری، پورفیری، هیالوپورفیری و بادامکی است (شکل ۴-۱). از دیگر بافت‌های مشاهده شده می‌توان از بافت گلومروپورفیری (شکل ۴-۲)، جریان (شکل ۴-۳) و افیتیک نام برد.

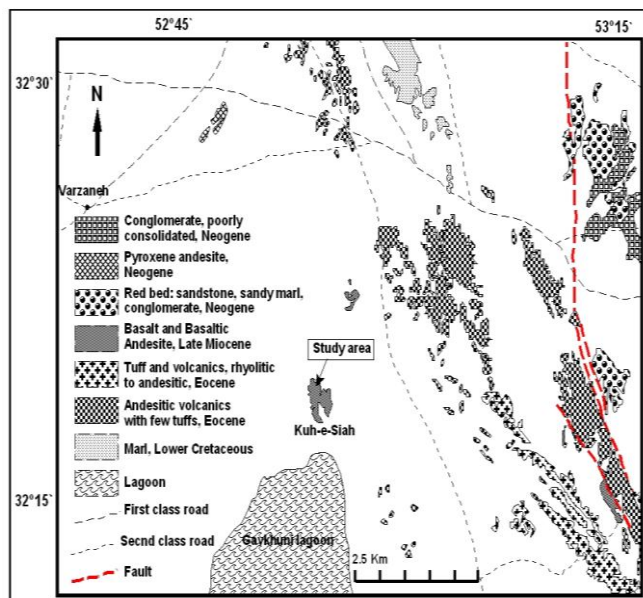
زاگرس از جنوب نایین عبور می‌کند و در شرق-شمال شرق فرورفتگی گاوخونی قرار دارد.

کوه‌سیاه با ارتفاع زیادتر در میان زمین‌های پست اطراف خودنمایی می‌کند (شکل ۳-۱). آندزیت‌های بازالتی و بازالت‌های کوه‌سیاه به صورت جریانی از گدازه دارای ساخت توده‌ای، حفره‌دار و بادامکی بوده، کاملاً از نظر سختی و رنگ از سنگ‌های اطراف قابل تشخیص است. رنگ این سنگ‌ها سیاه و در برخی موارد دارای رنگ قرمز است (شکل ۳-۲). سنگ‌های قرمز از دگرسانی سنگ‌های تیره ایجاد شده‌اند.

نوع فوران در ایجاد این سنگ‌ها از نوع نقطه‌ای است. عوامل تکتونیکی و فرسایش، واریزه‌هایی را در دامنه کوه ایجاد کرده است. حفرات موجود در سنگ‌های مورد بررسی مدور و گاه بیضی شکل است (شکل ۳-۳ و ۳-۴). این حفرات در برخی موارد توسط کانی‌هایی از قبیل کلسیت، زئولیت و سیلیس پر شده و تشکیل ساخت بادامکی را داده‌اند.

روش انجام پژوهش

بررسی‌های زمین‌شناسی منطقه کوه‌سیاه شامل:



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی بخش‌های شمالی باتلاق گاوخونی اقتباس از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ نایین (Amidi and Alavi Tehrani, 1978)



A



B

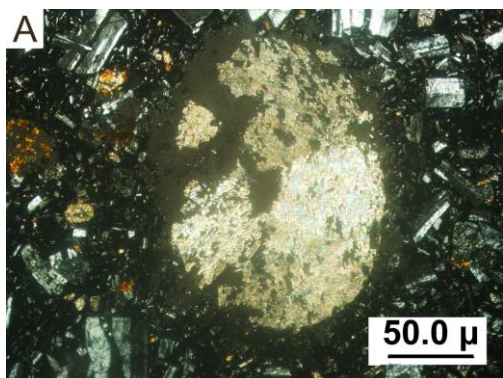


C

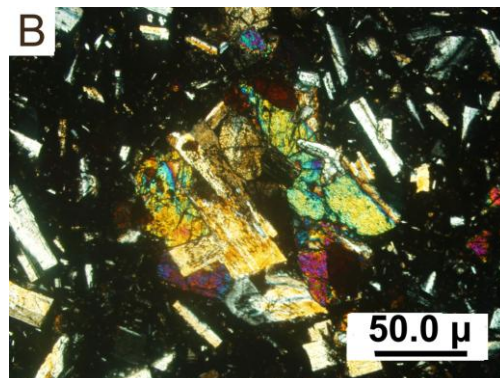


D

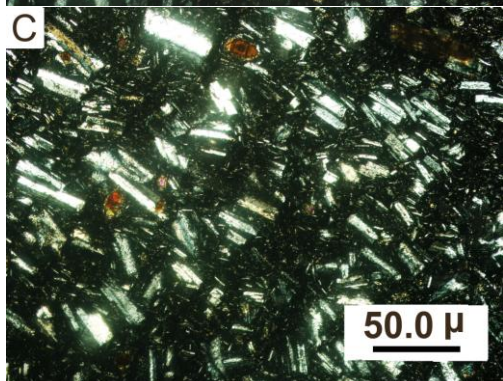
شکل ۳- تصاویر صحرایی منطقه بررسی شده. (A) کوه‌سیاه که به صورت برآمدگی در دشت دیده می‌شود، (B) سنگ‌های تیره و قرمز رنگ موجود در منطقه، (C) و (D) ساخت حفره‌ای در گدازه‌های منطقه



A



B



C

شکل ۴- بافت‌های موجود در سنگ‌های منطقه (XPL). (A) بافت بادامکی حاصل از پر شدن حفره توسط کلسیت، (B) بافت گلومروپورفیری در بازالت با کانی‌های پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن (زمینه شیشه)، (C) بافت میکروولیتی جریان

شکل‌دار تا شکل‌دار با حاشیه واکنشی ریز دانه در اطراف (کلینوپیروکسن) و بلورهای با آثار خوردگی خلیجی مشاهده می‌شود (شکل ۵-۸). رخداد خوردگی خلیجی در برخی الیوین‌ها می‌تواند ناشی از هضم و تحلیل رفتن بلور در مذاب اطراف در اثر تغییر شرایط پایدار به نیمه پایدار باشد. همچنین، خوردگی می‌تواند ناشی از رشد نیمه پایدار اولیه باشد. به طور کلی، تغییراتی که می‌تواند بر روی بلور الیوین تأثیر گذاشته و باعث ذوب و خوردگی در آن شود یا ناشی از کاهش فشار و یا افزایش حرارت حاصل از مذاب جدید است (Pichler and Schmitt-Riegraf, 1997). عدم وجود شواهد آلیش و هضم در مورد سنگ‌های بررسی شده نشان می‌دهد که خوردگی خلیجی در ارتباط با کاهش فشار است. بنابراین، همان مکانیسمی که باعث تحلیل رفتن حاشیه برخی از پلاژیوکلازها شده بر روی بلور الیوین نیز تأثیر گذاشته است.

الیوین در نمونه‌های بازالتی حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد سنگ را به خود اختصاص می‌دهد.

کلینوپیروکسن‌های موجود در بازالت‌ها به صورت درشت‌بلور و ریز بلور و به چند صورت دیده می‌شود:

- ۱- به صورت گلومرول و همراه با الیوین و پلاژیوکلاز (شکل ۵-۸)، ۲- به صورت تک بلور،
- ۳- به صورت حاشیه واکنشی در اطراف الیوین و
- ۴- به صورت تیغه‌هایی در زمینه و پرکننده فضای بین درشت‌بلورها. مقدار کلینوپیروکسن در بازالت‌ها زیاد و حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد است.

درشت‌بلور و ریزبلورهای ارتوپیروکسن به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار در بازالت‌ها مشاهده می‌شود. در برخی موارد مقدار آنها اندک است یا به ندرت مشاهده می‌شود و حدود ۲ تا ۱۰ درصد نمونه‌های بازالتی را به خود اختصاص می‌دهد. ارتوپیروکسن‌ها گاه به صورت گلومرول

وجود ساخت حفره‌دار نشان از میزان در خور توجه سیال موجود در ماگما است. کاهش فشار در حین صعود و گرانیروی پایین ماگما باعث پیوستن سیالات به یکدیگر در بالای ستون ماگمایی، ایجاد فوران و در نهایت تولید سنگ‌های حفره‌دار می‌شود (Barker, 1983).

بافت گلومروپورفیری نمایانگر بالا آمدن سریع ماگما است که در این حین، فنوکریست‌ها به یکدیگر چسبیده‌اند. پلاژیوکلازها گاه حاشیه‌های فرورفته دارد. گردشگری و تحلیل رفتن حاشیه پلاژیوکلاز نشان‌دهنده عدم تعادل این کانی با مذاب در فشارهای پایین است. شاید این فنوکریست‌ها جزو اولین کانی‌هایی بوده‌اند که قبل از بیرون‌ریزی و در اعماق کم و بیش زیاد تشکیل شده‌اند و پس از رسیدن به ترازهای سطحی و کاهش فشار، دچار ذوب در حاشیه خود شده‌اند.

پتروگرافی بازالت‌ها

فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و کانی‌های مافیک درشت‌بلورهای اصلی بازالت‌ها است. کانی‌های مافیک آنها شامل: الیوین‌های کلریتی شده، کلینوپیروکسن و به ندرت ارتوپیروکسن است. اسپینل کروم‌دار کانی فرعی بازالت‌ها بوده، کلریت، کلسیت و مگنتیت از کانی‌های ثانویه به شمار می‌رود.

پلاژیوکلازهای بازیگ فراوان‌ترین کانی بازالت‌ها و به صورت بلورهای ساده بدون ماکل، بلورهای دارای ماکل پلی‌سنتتیک، بلورهای دارای زونینگ، بلورهای با حواشی فرو رفته و بلورهای دارای بافت غربالی دیده می‌شود.

الیوین‌ها بیشتر به صورت درشت‌بلور و به ندرت ریزبلور دیده می‌شود. این کانی به صورت تک بلور، بلورهای نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار بیشتر کلریتی شده و به ندرت با حاشیه کلریتی، بلورهای نیمه

می‌شود. از سوی دیگر، تعدادی از پلاژیوکلازها دارای حاشیه تحلیل رفته و گرد شده است و برخی نیز دارای زونینگ است (شکل ۶-۱A).

الیون در آندزیت‌های بازالتی دارای همان مشخصات مشاهده شده در بازالت‌ها است با این تفاوت که از مقدار آن کاسته می‌شود و حدود ۲ تا ۱۰ درصد سنگ را تشکیل می‌دهد. همچنین، الیون‌های آندزیت‌های بازالتی نسبت به الیون بازالت‌ها دارای بخش‌های سالم بیشتری است و کمتر به طور کامل کلریتی شده‌اند. (شکل ۶-۱B).

کلینوپیروکسن در این سنگ‌ها به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار دیده می‌شود. این کانی به صورت درشت‌بلور و ریزبلور و گاه به صورت حاشیه واکنشی اطراف الیون‌ها دیده می‌شود. مقدار کلینوپیروکسن در این سنگ‌ها متفاوت است و معمولاً بین ۲ تا ۱۰ درصد حجم سنگ را شامل می‌شود. این کانی به صورت تک بلور و گلمرول چند کانیایی همراه با الیون و پلاژیوکلاز دیده می‌شود. ادخال اسپینل کروم‌دار نیز در بعضی از آنها به چشم می‌خورد.

ارتوپیروکسن‌ها شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار بوده، هم به صورت درشت‌بلور و هم ریزبلور دیده می‌شود. در برخی مقاطع به صورت درشت‌بلورهای ضربدری شکل دیده می‌شود (شکل ۶-۱C). همچنین، در برخی موارد، ارتوپیروکسن‌ها یک حاشیه پیژونیتی دارد (شکل ۶-۱D). مقدار آن به طور میانگین بین ۲۰ تا ۳۰ درصد است. در مواردی اسپینل‌های کروم‌دار را نیز در بر می‌گیرد. همچنین، برخی از ارتوپیروکسن‌ها در هم‌رشدی با پلاژیوکلاز دیده می‌شود.

اسپینل‌های کروم‌دار به صورت شکل‌دار و به صورت ادخال‌های کوچکی درون الیون، کلینوپیروکسن، ارتوپیروکسن و در زمینه سنگ دیده می‌شود و مانند اسپینل‌های کروم‌دار موجود

چند کانیایی با پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن مشاهده می‌شود.

کانی‌های اپاک موجود در بازالت‌ها بیشتر شامل اکسیدهای آهن و تیتان است و بیشتر از اسپینل کروم‌دار به عنوان ادخال و یک کانی فرعی در الیون، ارتوپیروکسن، کلینوپیروکسن و زمینه سنگ دیده می‌شود و در تعادل کامل با الیون و سایر کانی‌ها است.

کلریت‌ها در بازالت‌های بررسی شده حاصل دگرسانی الیون‌ها است که این دگرسانی در بیشتر مواقع به صورت کامل انجام شده است و تمام الیون به رنگ نارنجی متمایل به قرمز مشاهده می‌شود.

کلسیت‌ها در اثر دگرسانی کانی‌هایی مانند: پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن در بازالت‌ها ایجاد شده‌اند. کلسیت‌ها به عنوان کانی ثانویه در متن سنگ (درون حفرات) و یا در درز و شکاف‌ها دیده می‌شود.

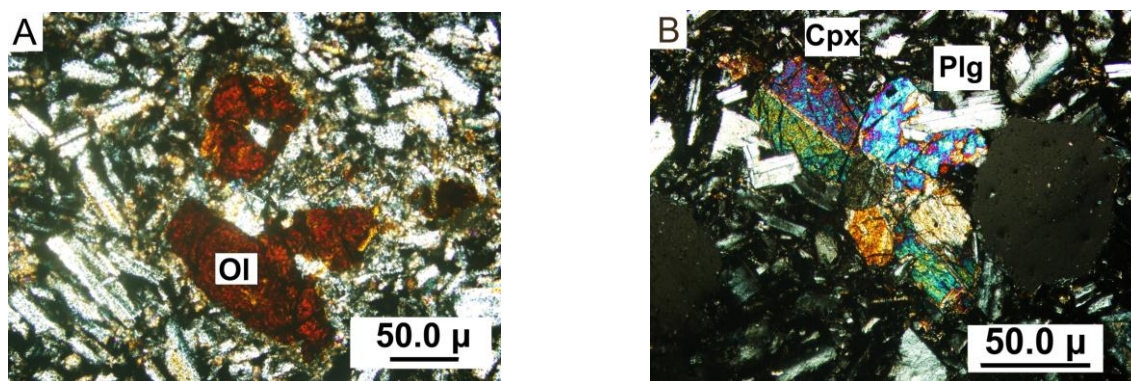
پتروگرافی آندزیت‌های بازالتی

آندزیت‌های بازالتی شامل: درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، الیون، ارتوپیروکسن و به ندرت کلینوپیروکسن است. آندزیت‌های بازالتی از نظر بافت و کانی‌شناسی تقریباً مشابه با بازالت‌ها است. با این تفاوت که با پیشرفت تفریق در این گروه سنگی از مقدار الیون و کلینوپیروکسن کاسته شده و بر مقدار ارتوپیروکسن افزوده می‌شود.

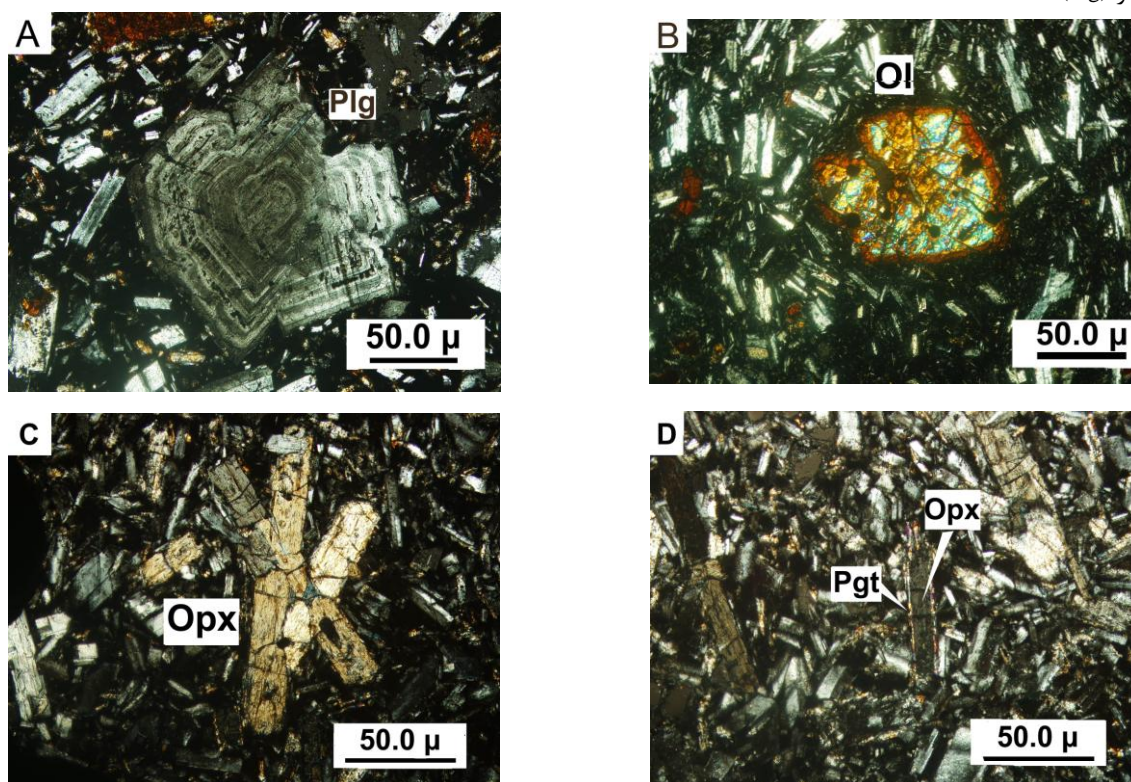
پلاژیوکلاز که جایگاه منحصر به فردی در بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی دارد، فراوان‌ترین کانی آندزیت‌های بازالتی منطقه است و ۴۰ تا ۶۰ درصد سنگ را شامل می‌شود. درشت‌بلور و میکرولیت‌های پلاژیوکلاز به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار است. پلاژیوکلازها با سطوح بلوری سالم و گاه بافت غربالی مشاهده

دارای فراوانی کمتری است. کلسیت نیز در آندزیت‌های بازالتی مانند بازالت‌ها به صورت کانی ثانویه مشاهده می‌شود. در صورتی که کلسیت حفرات موجود در سنگ را پر کرده باشد بافت بادامکی را ایجاد می‌کند.

در بازالت‌ها با الیوین و کانی‌های دیگر در تعادل است. در برخی موارد کروم اسپینل‌ها به صورت بخشی دگرگون شده‌اند. کلریت‌ها کانی ثانویه تشکیل‌دهنده آندزیت‌های بازالتی بوده، در مقایسه با بازالت‌ها



شکل ۵- تصاویر پتروگرافی بازالت‌های کوه‌سیاه (XPL). (A) بلورهای الیوین (Ol) کاملاً کلریتی شده، (B) هم‌رشدی کلینوپیروکسن (Cpx) و پلاژیوکلاز (Plg)



شکل ۶- تصاویر پتروگرافی آندزیت‌های بازالتی کوه‌سیاه (XPL). (A) زونینگ و حاشیه فرورفته در بلور پلاژیوکلاز (Plg)، (B) بلور الیوین (Ol) که در حاشیه به کلریت تبدیل شده و در مرکز سالم است همراه با ادخال‌های اسپینل کروم‌دار، (C) فنوکریست ضربدری شکل ارتوپیروکسن (Opx)، (D) ارتوپیروکسن (Opx) با حاشیه‌ای از پیژونیت (Pgt)

شیمی کانی‌ها

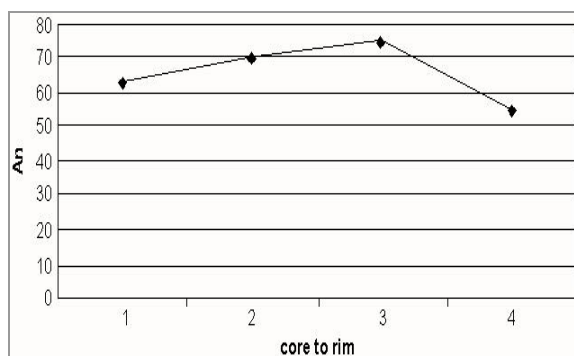
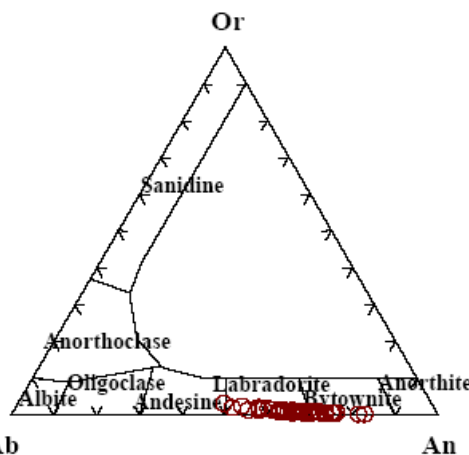
ترکیب فنوکریستال‌ها و زونینگ ترکیبی آنها در سنگ‌های ولکانیکی، فرآیندهای ماگمایی را قبل و بعد از فوران نشان می‌دهد. برای پی بردن به تغییرات ترکیب کانی‌ها و شرایط تبلور ماگما کانی‌هایی مانند: فلدسپار، کلینوپیروکسن، ارتوپیروکسن و کلریت سنگ‌های آذرین منطقه تجزیه ریزکاو الکترونی شد.

شیمی فلدسپارها

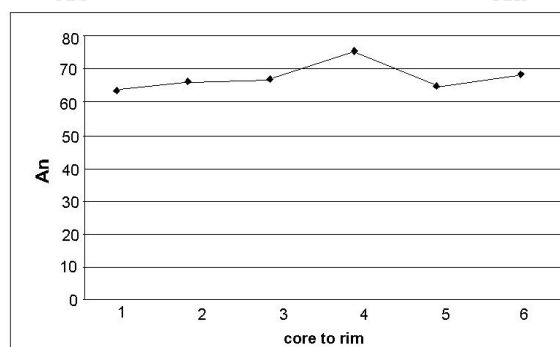
فرمول ساختاری فلدسپارها بر اساس ۸ اکسیژن محاسبه می‌شود. نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی تعدادی از پلاژیوکلازها به همراه محاسبه فرمول ساختاری آنها در پیوست ۱ (الف و ب)

آورده شده است. ترکیب پلاژیوکلازها از لابرادوریت تا بیتونیت (شکل ۷) و میزان An آنها از ۴۸ تا ۸۲ درصد متغیر است. بررسی زونینگ و تجزیه نقطه‌ای نمونه‌های B145 و F29 از مرکز به حاشیه در پلاژیوکلازهای موجود در بازالت‌ها نشان می‌دهد که بر خلاف انتظار از یک تبلور معمولی مقدار آنورتیت پلاژیوکلازها ابتدا افزایش و در حاشیه کاهش می‌یابد (شکل ۸-A و B). این پدیده را می‌توان چنین توجیه نمود که قبل و در حین تبلور پلاژیوکلازها، در اثر تبلور کانی‌هایی مانند: ارتوپیروکسن، الیوین و اسپینل، مقدار نسبی CaO در مذاب باقی‌مانده افزایش یافته و سپس با شروع تبلور همزمان کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز، مقدار CaO رو به کاهش رفته است.

شکل ۷- نمودار تقسیم‌بندی فلدسپارها (Deer et al., 1992)



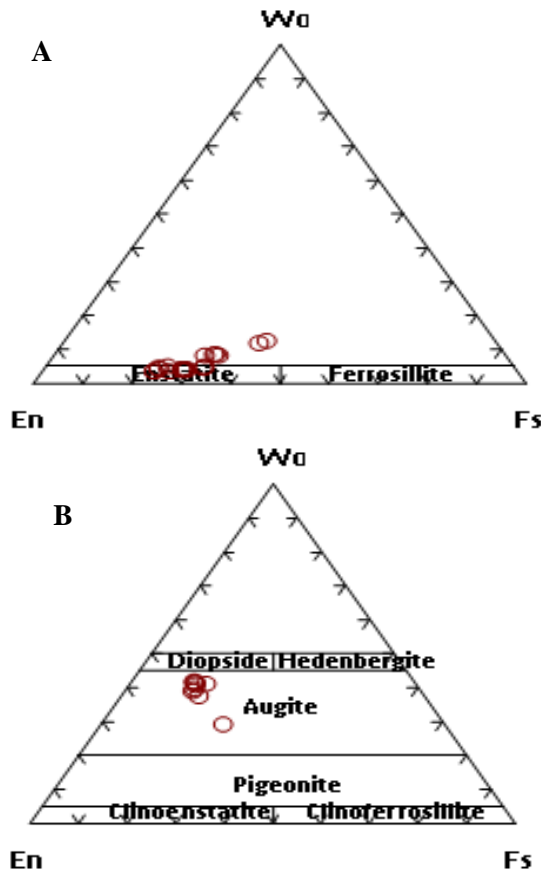
A



B

شکل ۸- A) نمودار نشان‌دهنده زونینگ پلاژیوکلاز نمونه B145 (از بررسی چهار نقطه)؛ B) نمودار نشان‌دهنده زونینگ پلاژیوکلاز نمونه F29 (از بررسی شش نقطه)

شده‌اند. همان طور که در بررسی‌های پتروگرافی مشاهده شد وجود یک حاشیه پیژونیتی در اطراف ارتوپروکسن‌های انستاتیت به خوبی مشخص است (شکل ۶-D) و داده‌های ژئوشیمیایی نیز آن را تأیید می‌کند.



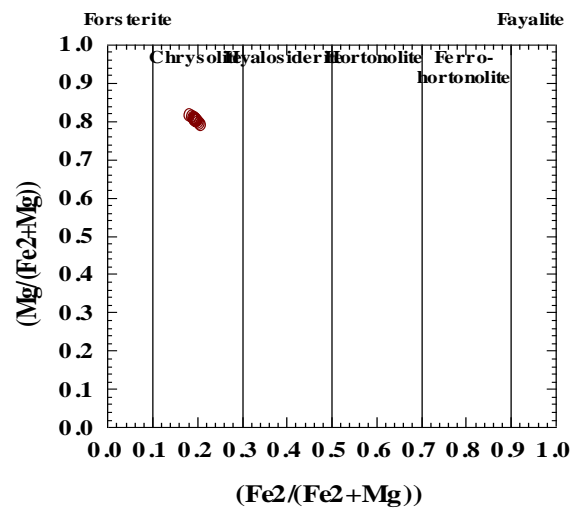
شکل ۱۰- A) ترکیب کلینوپروکسن‌های سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده در نمودار En-Wo-Fs (Morimoto, 1989)؛ B) ترکیب ارتوپروکسن‌ها در نمودار نامگذاری ارتوپروکسن‌ها. نقاطی که خارج از محدوده انستاتیت و در محدوده پیژونیت قرار گرفته‌اند مربوط به حاشیه انستاتیت‌ها است (Morimoto, 1989).

استفاده از شیمی پروکسن

برای مطالعه دقیق‌تر سنگ‌های آتشفشانی کوه‌سیاه از شیمی پروکسن در تعیین سری ماگمایی و تعیین محیط تکتونیکی آن استفاده شد. برای تعیین سری ماگمایی از نمودار Al_2O_3 در

شیمی الیوین

الیوین‌های بررسی شده با توجه به نتایج حاصل از تجزیه ریزکاو الکترونی (پیوست ۲) از نوع کریزولیت است (شکل ۹). $Mg\#$ الیوین‌های بررسی شده ۷۸ تا ۸۱ درصد و $Fe\#$ آنها ۱۹ تا ۲۲ درصد است. میزان CaO درشت‌بلورهای الیوین بیش از ۱۰ درصد است و این موضوع نشان از منشأ این درشت‌بلورها به عنوان فنوکریست به جای زنوکریست است (Simkin and Smith, 1970).



شکل ۹- تعیین ترکیب الیوین‌ها (Morimoto, 1989)

شیمی پروکسن

نتیجه تجزیه ریزکاو الکترونی کلینوپروکسن‌ها و فرمول ساختاری آنها در پیوست ۳-الف آورده شده است. نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی ارتوپروکسن‌ها و محاسبه فرمول ساختاری آنها در پیوست ۳-ب آورده شده است.

ترکیب کلینوپروکسن‌های بررسی شده اوزیت است که در شکل ۱۰-A نشان داده شده است. با توجه به مطالعه ریزکاو الکترونی، ارتوپروکسن‌ها دارای ترکیب انستاتیت بوده، اما حاشیه برخی از آنها ترکیب پیژونیت دارد (شکل ۱۰-B). نمونه ۶۹ و ۷۰ (پیژونیت) از حاشیه نمونه ۶۸ (ارتوپروکسن) تجزیه

از کاربردهای دیگر کانی کلینوپیروکسن می‌توان به تعیین میزان آب موجود در ماگمای به وجود آورنده آن با استفاده از Al^{VI} و Al^{IV} موجود در فرمول ساختاری اشاره نمود. ترکیب کلینوپیروکسن‌ها نشان می‌دهد که ماگمای سازنده آنها دارای مقدار آب قابل ملاحظه‌ای (حدود ۱۰ درصد) بوده است. همچنین، این کلینوپیروکسن‌های تجزیه شده در طیف گسترده‌ای از فشار کم متبلور شده‌اند که نمایانگر تشکیل آنها در حین صعود و پیش از فوران است (نه در یک اتاق ماگمایی و فشار ثابت) یعنی زمانی که فشار رو به کاهش است (شکل ۱۱-C).

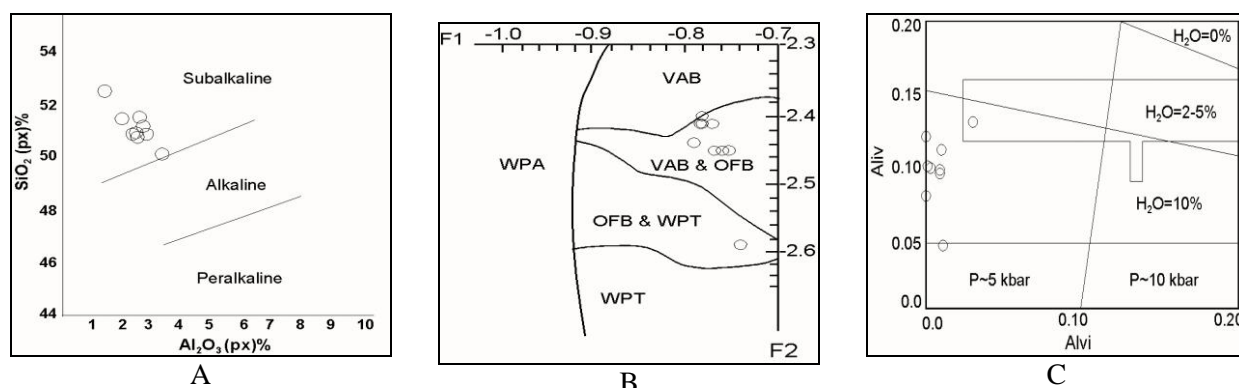
مقابل SiO_2 استفاده و نمونه‌ها در این نمودار در محدوده ساب‌آلکالن واقع می‌شود (شکل ۱۱-A). نمودار F1-F2 برای تعیین محیط تکتونیکی به کار برده شد. دیاگرام یاد شده محیط ژئوتکتونیکی تشکیل این سنگ‌ها را کمان آتشفشانی پیشنهاد می‌نماید (شکل ۱۱-B). مقدار عوامل F1 و F2 از رابطه‌های ۱ و ۲ تعیین می‌شود:

رابطه ۱:

$$F1 = - (0.012 \times SiO_2) - (0.0807 \times TiO_2) + (0.0026 \times Al_2O_3) - (0.0012 \times FeOt) - (0.0026 \times MnO) + (0.0087 \times MgO) - (0.0128 \times CaO) - (0.0419 \times Na_2O)$$

رابطه ۲:

$$F2 = - (0.0469 \times SiO_2) - (0.0818 \times TiO_2) + (0.0212 \times Al_2O_3) - (0.0041 \times FeOt) - (0.1435 \times MnO) + (0.0029 \times MgO) - (0.0085 \times CaO) - (0.016 \times Na_2O)$$



شکل ۱۱ - A) نمودار SiO_2 در برابر Al_2O_3 کلینوپیروکسن‌ها (Le Bas, 1962). نمونه‌ها در قسمت ساب‌آلکالن قرار دارد؛ B) کلینوپیروکسن‌ها در محدوده کمان آتشفشانی واقع است (Nisbet and Pearce, 1977)؛ C) شرایط تبلور برای پیروکسن‌های منطقه (Helz, 1973).

شیمی کلریت

حاصل دگرسانی هیدروترمال کانی‌های آذرین اولیه است. نوع کلریت‌های حاصل از دگرسانی الیون‌ها متأثر از ترکیب الیون‌ها و ماهیت سیال دگرسان کننده است. مقدار Fe در خور توجه کلریت‌ها نیز می‌تواند بیانگر کریزولیت بودن الیون‌ها باشد.

شیمی اسپینل‌های کروم‌دار

نتایج تجزیه اسپینل‌های کروم‌دار بررسی شده

ترکیب کلریت‌ها در پیوست ۴ (الف و ب) گزارش شده و توزیع کاتیون‌ها و فرمول کاتیون‌ها بر اساس ۲۸ اکسیژن محاسبه شده است. کلریت‌های منطقه بررسی شده بر اساس Hey (۱۹۵۴) از نوع کروندوفیلیت است (شکل ۱۲). $Mg\#$ کلریت‌های بررسی شده ۳۲ تا ۶۰ درصد و $Fe\#$ آنها ۴۰ تا ۶۸ درصد است. این کلریت‌ها

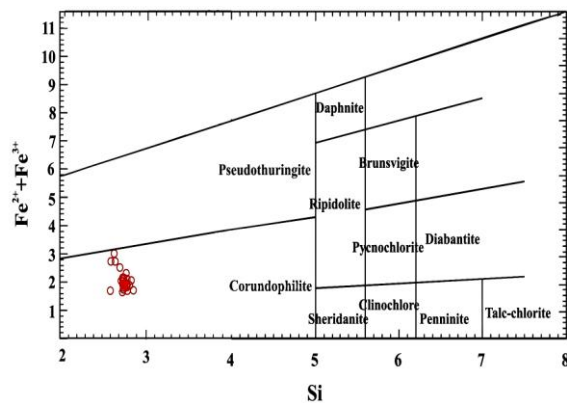
تحولات ماگمایی

تشکیل ارتوپیروکسن در سنگ‌های کالک‌آلکان امری رایج است که نشانه واکنش الیوین با سیلیس است. سیلیسی‌تر شدن زمینه می‌تواند ناشی از پیشرفت فرآیند تبلور باشد (Vernon, 2004). در حقیقت، حضور ارتوپیروکسن در ماگماهای قوسی به دلیل فعالیت بالای سیلیس در این ماگماها نسبت به ماگماهای آلکان و توله‌ایتی است. در ماگماهایی با میزان پایین SiO_2 اصولاً بیشتر الیوین متبلور می‌شود و در ماگماهای بازیک غنی از سیلیس (حدود ۵۰ تا ۵۵ درصد وزنی SiO_2) هم الیوین و هم ارتوپیروکسن می‌تواند متبلور شود.

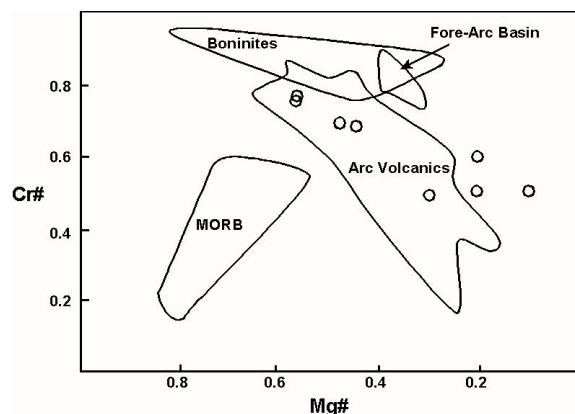
در مورد حضور پیژونیت دو احتمال وجود دارد: پیژونیت ممکن است در حرارت‌های بالا به طور مستقیم از ماگما متبلور شود و یا به صورت اکسولوشن در پیروکسن‌های غنی از کلسیم ایجاد شود (Kuno and Hess, 1953). پیژونیت در مراحل سرد شدن آرام (مانند شرایط سنگ‌های پلوتونیک) نمی‌تواند پایدار باقی بماند و به همین علت بیشتر در گدازه‌ها متبلور می‌شود. بنابراین، تنها دلیل تشکیل پیژونیت در اطراف ارتوپیروکسن‌های موجود در لاوهای کوه‌سیاه را می‌توان به این صورت بیان نمود که پیژونیت در طول تبلور ماگما و در اطراف ارتوپیروکسنی که از قبل موجود بوده، متبلور شده است. در حقیقت، این حاشیه در حین پیشرفت تبلور رخ می‌دهد به شرط آن که آثار ذوب و هضم در هسته ارتوپیروکسنی دیده نشود. زیرا در این صورت احتمال واکنش با مذاب جدید ورود قوت می‌یابد (Vernon, 2004).

با توجه به بررسی‌های انجام شده در خصوص حضور ارتوپیروکسن و تشکیل سنگ‌های آتشفشانی

در پیوست ۵ آورده شده است. ترکیب اسپینل‌های کروم‌دار موجود نشان‌دهنده محیط ژئوتکتونیک قوس ماگمایی است (شکل ۱۳). محدوده Cr# اسپینل‌های کروم‌دار ۴۸/۵۰ تا ۷۸/۶۹ درصد است. اطلاعات حاصل از بررسی‌های صحرایی، پتروگرافی و شیمی کانی‌ها در توافق کامل با داده‌های ژئوشیمیایی از نمونه‌های سنگ کل است. داده‌های ژئوشیمیایی بیانگر بازالت و آندزیت بازالتی بودن سنگ‌های بررسی شده، کالک‌آلکان بودن ماگما تشکیل‌دهنده آنها و تعلق آنها به کمان‌های ماگمایی است (Fazeli, 2009; Khoddami, 1998).



شکل ۱۲- نمودار تقسیم‌بندی کلریت‌ها. ترکیب کلریت‌های بررسی شده کروندوفیلیت است (Hey, 1954).



شکل ۱۳- نمودار Mg#-Cr# اسپینل‌های کروم‌دار نشان‌دهنده قرارگیری نمونه‌ها در محدوده ولکانیک‌های موجود در قوس ماگمایی است (Kepezhinskas et al., 1993).

کوه‌سیاه می‌توان چنین بیان نمود که واکنش سیال-سنگ به صورت گسترده در گوشته زیر پوسته قاره‌ای سرد رخ داده و متاسوماتیسم آبدار پیامد آن باعث رشد ارتوپروکسن و غنی‌شدگی سیلیس شده است. Egglar و Schneider (۱۹۸۶) مشخص نمودند که سیالات آبدار در تعادل با پریدوتیت دارای میزان بالای Si/Mg است. آنها اشاره نمودند که واکنش‌های آب-سنگ در گوشته می‌تواند به غنی‌شدگی ارتوپروکسن منجر شود. مذاب‌های سیلیکاته معمولاً به عنوان عوامل متاسوماتیسم‌کننده برای غنی‌شدگی ارتوپروکسن در پریدوتیت‌ها پیشنهاد می‌شود (Kelemen *et al.*, 1992; Ertan and Leeman, 1996). اما بررسی‌ها در مناطق مختلف نشان داده که سیالات آبدار نیز می‌تواند باعث غنی‌شدگی ارتوپروکسن شود. این سیالات، سیلیس را به درون گوشته زیر پوسته قاره‌ای وارد می‌کند. به نظر می‌رسد ذوب بخشی پریدوتیت گوه گوشته‌ای که تحت تأثیر سیالات و مواد فرار از پوسته اقیانوسی قرار گرفته است، نقش مهمی در منشأ گدازه‌های آندزیت بازالتی منطقه کوه‌سیاه داشته است.

در این خصوص می‌توان چنین عنوان نمود که فرآیند ذوب زمانی شروع به رخ دادن نموده است که آب از پوسته اقیانوسی فرورانده شده توسط آبدایی کانی‌های آبدار و یا آناتکسی‌های اشباع از بخار آزاد شده است (شکل ۱۴-I). این ترکیبات غنی از آب به سمت بالا و بنابراین، به سمت گوشته در رو قرار گرفته، صعود نموده و با گوشته پریدوتیتی واکنش شیمیایی می‌دهد (شکل ۱۴-II) (Zhang and Frantz, 2000) و در نهایت، ذوب گوشته اشباع از بخار در نزدیک قاعده گوه گوشته‌ای رخ می‌دهد (شکل ۱۴-III). این مذاب

اشباع از بخار، از باقی‌مانده خود جدا شده، به قسمت‌های کم عمق‌تر گوشته که در آن درجه حرارت گوشته افزایش می‌یابد، صعود می‌نماید. این مذاب که به گوشته کم عمق‌تر و داغ‌تر وارد می‌شود، با محیط اطرافش (پریدوتیت) در تعادل نبوده و بنابراین، برای رسیدن به تعادل با این محیط، درجه حرارت آن افزایش می‌یابد، بنابراین، کانی‌های سیلیکاته مانند پیروکسن‌ها را در خود حل می‌کند. این حالت زمانی که فشار تعادلی کاهش می‌یابد باعث کاهش میزان آب مذاب می‌شود. این فرآیند تا عمق‌های کم گوشته که در آن مذاب آبدار جدا شده است، ادامه می‌یابد (شکل ۱۴-IV). این مدل (Gaetani and Grove, 2003) باعث رقیق‌شدگی و کاهش در میزان عناصر کمیاب و میزان سیال شرکت‌کننده در قطعه فرورانده طی درصد ذوب بالای گوشته (بیش از ۲۰ درصد وزنی) می‌شود. با گذشت زمان که مذاب در طول مسیر خود با قسمت بالای گوه گوشته‌ای واکنش می‌دهد، از حالت اشباع از بخار دور می‌شود. این مذاب گوشته‌ای تحت اشباع از آب به سمت پوسته راه پیدا می‌کند و در نهایت، در مخازن ماگمایی کم عمق دچار تفریق کریستالی و دیگر فرآیندهای واکنش پوسته‌ای می‌شود (شکل ۱۴-V). محاسبه بارومتری کلینوپروکسن در سنگ‌های مورد بررسی محدوده فشار ۱۳ تا ۲۴ کیلو بار را ارایه نموده است (Nimis and Taylor, 2000). مجموعه کانیایی مشاهده شده در سری ماگمای کالک‌آلکالن کوه‌سیاه با نشأت گرفتن و تفریق آن از یک ماگمای والد بازالتی سازگاری دارد. میزان پایین کروم و نیکل در الیوین (به ترتیب: ۰ تا ۰/۰۹ درصد و ۰ تا ۰/۱۷ درصد) و میزان بسیار پایین کروم در کلینوپروکسن (صفر

تبلور ارتوپروکسن بر مبنای این روش با کالیبراسیون Brey و Köhler (۱۹۹۰) و با استفاده از رابطه ۳ به دست می‌آید:
رابطه ۳:

$$T Ca_{opx} (K) = 6425 + 26.4P/(-\ln Ca_{opx} + 1.843)$$

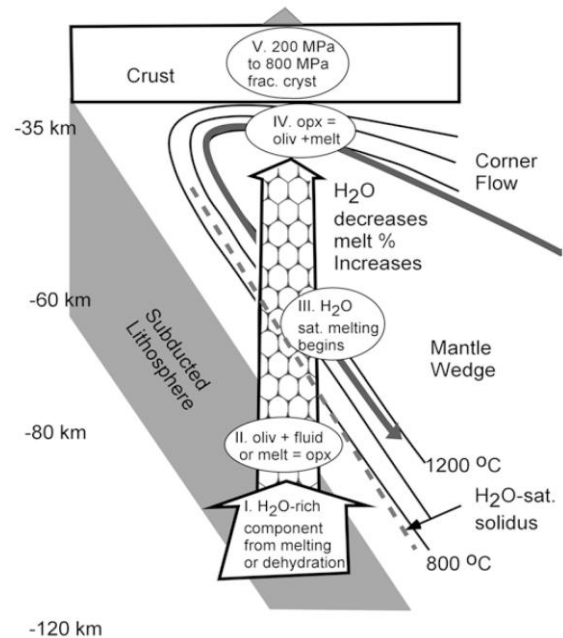
درجه حرارت بر حسب درجه کلون و فشار بر حسب کیلوبار است.

با توجه به نتایج به دست آمده، درجه حرارت تبلور این کانی در سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده در فشار ۱ تا ۱۰ کیلوبار، بین ۱۲۴۸ تا ۱۳۰۴ درجه سانتیگراد است (پیوست ۶). این دماها مربوط به تجزیه شماره ۶۸ است که پیژونیت موجود در حاشیه آن (تجزیه‌های شماره ۶۹ و ۷۰) نیز تجزیه و ترمومتری شده است. بر اساس ترمومتری انجام شده می‌توان گفت پیژونیت نسبت به انستاتیت در دمای بیشتری تشکیل شده است و تشکیل آن ممکن است با کاهش فشار ناگهانی در هنگام فوران مرتبط باشد.

ترمومتری با استفاده از جفت کانی الیون-اسپینل

ترمومتری الیون-اسپینل در سنگ‌های مافیک و اولترامافیکی که حاوی اسپینل است، تحت تأثیر ضریب جدایش آهن و منیزیم بین الیون و اسپینل است. این ضریب جدایش به شدت به تغییرات ترکیبی در دمای ساب‌سالیدوس وابسته است (McCallum, 2000). بنابراین، دمای به دست آمده از این ترمومتری وابسته به تغییرات ترکیبی است که در دمای ساب‌سالیدوس صورت می‌گیرد. دمای حاصل از این ترمومتری، تنها بیانگر دمای آخرین تعادل مجدد انجام شده در سنگ است و نمی‌توان آن را دمای مذاب یا دمای تبلور در نظر گرفت. دماهای محاسبه شده توسط این ترمومتری کمتر از دماهایی است که از سایر روش‌های رایج نظیر

درصد) گویای این است که ماگمای والد، اولیه نبوده و کم و بیش دچار تفریق شده است (Grove et al., 2002)



شکل ۱۴- مدل تولید مذاب و تغییرات پیامد آن در ماگماهای آبدار تولید شده در گوه گوشته‌ای (Gaetani and Grove, 2003)

ترمومتری

با استفاده از ترکیب شیمیایی کانی‌ها با تجزیه ریزکاو الکترونی می‌توان دمای تبلور کانی‌ها را محاسبه کرد که این موضوع می‌تواند به شناخت شرایط فیزیکی و دیگر رخدادها حاکم بر تبلور کمک نماید.

ترمومتری با استفاده از مقدار کلسیم در ارتوپروکسن

این روش، از روش‌های دماسنجی تک پروکسنی است که با توجه به مقدار کلسیم، هم در ارتوپروکسن و هم کلینوپروکسن به کار می‌رود. محتوای کلسیم پروکسن‌های پر کلسیم با افزایش حرارت کاهش یافته و در پروکسن‌های کم کلسیم افزایش می‌یابد. محاسبه درجه حرارت

موجود در آنها شامل: کلریت، کلسیت و مگنتیت است.

پیژونیت طی تبلور ماگما به صورت حاشیه‌ای در اطراف ارتوپیروکسن از قبل موجود، متبلور شده است. ترمومتری ارتوپیروکسن در فشار ۱ تا ۱۰ کیلو بار نیز محدوده دمایی ۱۲۴۸ تا ۱۳۰۴ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. بر اساس ترمومتری انجام شده مشخص شد که تشکیل حاشیه پیژونیت در اطراف انستاتیت در دمای بالاتری نسبت به انستاتیت انجام شده است. تشکیل پیژونیت ممکن است در ارتباط با کاهش فشار ناگهانی در حین فوران باشد. ترمومتری الیوین-اسپینل در فشار ۱ تا ۱۰ کیلو بار بیانگر محدوده دمایی ۹۱۴ تا ۱۲۰۱ است که این دما، دمای تعادل بین این دو کانی در دمای ساب‌سالیدوس است.

داده‌های شیمی کانی‌ها و شیمی سنگ کل نشان می‌دهد که ماگمای سازنده سنگ‌های بررسی شده به سری ماگمایی کالک‌آلکان متعلق بوده، محیط تکتونیکی تشکیل آنها، قوس ماگمایی است که ویژگی یک ماگماتیسیم مرتبط با فرورانش است.

ماهیت سنگ‌های بررسی شده که از نوع کالک‌آلکان بوده، اغلب در مناطق فرورانش مشاهده می‌شود، تعلق این سنگ‌ها به کمان‌های آتشفشانی را برای ماگماتیسیم این ناحیه با اطمینان بیشتری ثابت می‌کند ضمن این که احتمالاً با فرورانش نفوتتیس به زیر ایران مرکزی مرتبط باشد.

سیاسگزاری

نگارندگان مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه اصفهان به دلیل حمایت‌های مالی تشکر می‌نمایند.

ترمومتری پیروکسن‌های هم‌زیست به دست می‌آید.

برای سنگ‌های بررسی شده از معادله ترمومتری الیوین-اسپینل (Fabriès, 1979) در رابطه ۴ استفاده شده است.

$$T_c = \frac{A + [16150 \cdot X_{Sp1}^{Cr} + (25150 \cdot (X_{Sp1}^{Fe^{+2}} + X_{Sp1}^{Ti}))]}{R \cdot \ln K_{D1} + 4.705} - 273.15$$

متغیر A از رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$A = 6350 + 280 \cdot P_{GPa} + ((7000 + 108 \cdot P_{GPa}) \cdot (1 - 2 \cdot X_{O1}^{Fe^{+2}})) - (1960 \cdot (X_{Sp1}^{Mg} - X_{Sp1}^{Fe^{+2}}))$$

استفاده از ترمومتری الیوین-اسپینل ارایه شده در فشار ۱ تا ۱۰ کیلو بار محدوده دمایی ۹۱۴ تا ۱۲۰۱ درجه سانتیگراد را ارایه نموده است. دلیل گسترده بودن این محدوده دمایی همان طور که ذکر شد این است که الیوین و اسپینل پس از تبلور و در دمای ساب‌سالیدوس با یکدیگر واکنش انجام داده و دمای به دست آمده از ترمومتری فوق دمای تعادل بین الیوین و اسپینل است.

نتیجه‌گیری

بررسی سنگ‌های ولکانیک کوه‌سیاه نشان می‌دهد که از نظر پتروگرافی بازالت و آندزیت بازالتی است. بازالت‌ها از پلاژیوکلاز، الیوین، کلینوپیروکسن و به مقدار کمتر ارتوپیروکسن تشکیل شده‌اند. ادخال‌های اسپینل کروم‌دار درون درشت‌بلورها و زمینه سنگ وجود دارد. کلریت، کلسیت و مگنتیت کانی‌های ثانویه را تشکیل می‌دهد.

آندزیت‌های بازالتی شامل: پلاژیوکلاز و ارتوپیروکسن و مقدار الیوین آنها کمتر از بازالت‌ها است. کلینوپیروکسن و اسپینل کروم‌دار کانی‌های فرعی سنگ را تشکیل می‌دهد. کانی‌های ثانویه

منابع

- Amidi, M. and Alavi Tehrani, N. (1978) Geological map of Naein (1:250,000). Geological Survey of Iran, Tehran.
- Barker, D. S. (1983) *Igneous rocks*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Brey, G. T. and Köhler, T. (1990) Geothermobarometry in four phase lherzolites, part II: new thermobarometers and practical assessment of existing thermobarometers. *Journal of Petrology* 31(6): 1353-1378.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J. (1992) *An introduction to the rock-forming minerals*. 2nd edition, Longman, London.
- Ertan, I. E. and Leeman, W. P. (1996) Metasomatism of cascades subarc mantle: evidence from a rare phlogopite orthopyroxenite xenolith. *Geology* 24: 451-454.
- Fabriès, J. (1979) Spinel-olivine geothermometry in peridotites from ultramafic complexes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 69: 329-336.
- Fazeli, B. (2010) Petrology of volcanic rocks of Kuh-e-Siah (north of Gavkhuni lagoon, southeast of Isfahan). MSc thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran (in Persian).
- Gaetani, G. A. and Grove, T. L. (2003) Experimental constraints on melt generation in the mantle wedge. In: *The subduction factory* (Eds. Eiler, J. and Abers, G.) 138: 107-134. American Geophysical Union, Washington, D.C.
- Grove, T. L., Parman, S. W., Bowring, S. A., Price, R. C. and Baker, M. B. (2002) The role of an H₂O-rich fluid component in the generation of primitive basaltic andesites and andesites from the Mt. Shasta region, N California. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 142 (4): 375-396.
- Helz, R. T. (1973) Phase relations of basalts in their melting range at P_{H₂O}=5kb as a function of oxygen fugacity. *Journal of Petrology* 14: 249-302.
- Hey, M. H. (1954) A new review of the chlorites. *Mineralogical Magazine* 30: 277-292.
- Kelemen, P. B., Dick, H. J. B. and Quick, J. E. (1992) Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction in the upper mantle. *Nature* 358: 635-641.
- Kepezhinskas, P. K., Taylor, R. N. and Tanaka, H. (1993) Geochemistry of plutonic spinels from the north Kamchatka Arc: comparisons with spinels from other tectonic settings. *Mineralogical Magazine* 57: 575-589.
- Khoddami, M. (1998) Petrological study of volcanic rocks in north of Gavkhuni lagoon. MSc thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran (in Persian).
- Khoddami, M. (2009) Petrology of Plio-Quaternary volcanic rocks in southeast and northwest of Isfahan. PhD thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran (in Persian).
- Kuno, H. and Hess, H. H. (1953) Unitcell dimensions of clinoenstatite and pigeonite in relation to other common clinopyroxenes. *American Journal of Science* 251: 741-752.
- Le Bas, N. J. (1962) The role of aluminium in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *American Journal of Science* 260: 267-288.
- McCallum, I. S. (2000) How magnesian are mg-suite troctolites? 31th Annual Lunar and Planetary Science Conference. Abstract no. 1477, Houston, USA.
- Morimoto, N. (1989) Nomenclature of pyroxenes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 27(1): 143-156.

- Nimis, P., and Taylor, W. R. (2000) Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotite. Part 1. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 139: 541-554.
- Nisbet, E. G. and Pearce, J. A. (1977) Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 63: 149-160.
- Pichler, H. and Schmitt-Riegraf, C. (1997) *Rock-forming minerals in thin section*. Chapman and Hall, London.
- Schneider, M. E. and Eggler, D. H. (1986) Fluids in equilibrium with peridotite minerals: implications for mantle metasomatism. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 50: 711-724.
- Simkin, T. and Smith, J. V. (1970) Minor-element distribution in olivine. *Journal of Geology* 78: 304-325.
- Vernon, R. H. (2004) *A practical guide to rock microstructure*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Zhang, Y-G. and Frantz, J. D. (2000) Enstatite-forsterite water equilibria at elevated temperatures and pressures. *American Mineralogist* 85: 918-925.

پیوست ۱- الف) نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی پلاژیوکلازها در سنگ‌های آتشفشانی کوه‌سیاه (نمونه‌های B148 و B151 آندزیت بازالتی هستند. C و R به ترتیب بیانگر مرکز و حاشیه بلور است. هر تجزیه مربوط به بلور جداگانه‌ای از پلاژیوکلازها است به جز دو مورد که زونینگ آنها بررسی شده است).

Sample	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B151	B151	B151	B151	B151	B151	
Analysis	9-1C	10-1C	11-1C	12-1C	13-1C	14-1R	15-1R	16-1R	16-2C	16-3C	16-4C	16-5C	17-1C	17-2C	17-3C	17-4C	17-5C	46-1C	46-2C	46-3C	46-4C	46-5C	47-1R	
SiO ₂	51.67	51.45	49.18	50.50	55.03	53.03	53.27	49.14	51.92	49.67	51.77	50.48	50.48	49.99	50.44	49.33	51.77	51.94	51.12	52.59	49.68	51.42	55.77	
TiO ₂	0.06	0.06	0.03	0.04	0.08	0.07	0.06	0.02	0.02	0.01	0.05	0.06	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.04	0.05	0.03	0.06	0.16	
Al ₂ O ₃	29.07	28.84	30.91	30.32	26.57	28.10	27.74	31.29	29.57	30.68	29.15	30.19	30.41	30.42	30.16	30.47	29.01	29.16	29.61	28.63	30.40	29.31	22.51	
FeO*	0.74	0.75	0.62	0.75	0.90	0.80	0.83	0.76	0.77	0.64	0.76	0.88	0.53	0.73	0.61	0.89	0.74	0.86	0.86	0.90	0.92	0.99	2.80	
MnO	0.00	0.05	0.00	0.04	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.08	0.04	0.03	0.01	0.06	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	0.04	
MgO	0.14	0.17	0.10	0.14	0.14	0.12	0.15	0.13	0.16	0.11	0.17	0.15	0.13	0.14	0.13	0.08	0.14	0.12	0.14	0.13	0.09	0.12	1.97	
CaO	12.90	12.71	15.17	13.85	10.52	11.80	11.79	15.20	13.30	15.01	13.09	14.18	14.11	14.26	13.84	14.61	12.55	12.95	13.71	12.53	14.40	13.53	9.29	
Na ₂ O	4.18	4.10	2.98	3.55	5.45	4.70	4.69	2.81	3.79	2.99	3.92	3.35	3.45	3.30	3.51	3.14	4.09	4.02	3.76	4.36	3.11	3.83	5.17	
K ₂ O	0.18	0.15	0.09	0.13	0.34	0.28	0.25	0.11	0.14	0.10	0.15	0.12	0.16	0.13	0.11	0.15	0.18	0.20	0.18	0.25	0.15	0.22	0.50	
NiO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Total	98.94	98.28	99.08	99.32	99.09	98.90	98.78	99.46	99.67	99.25	99.10	99.49	99.33	99.02	98.83	98.74	98.51	99.27	99.45	99.44	98.78	99.50	98.21	
Structural formula based on the 8 Oxygens																								
Si	2.380	2.385	2.275	2.323	2.516	2.437	2.450	2.265	2.373	2.292	2.380	2.321	2.321	2.309	2.329	2.291	2.391	2.384	2.350	2.409	2.303	2.362	2.591	
Ti	0.002	0.002	0.001	0.001	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.000	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002	0.002	
Al	1.577	1.574	1.684	1.643	1.431	1.521	1.503	1.699	1.591	1.667	1.578	1.635	1.647	1.655	1.640	1.666	1.578	1.576	1.603	1.545	1.659	1.586	1.232	
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Fe ²⁺	0.029	0.029	0.024	0.029	0.034	0.031	0.032	0.029	0.029	0.025	0.029	0.034	0.020	0.028	0.024	0.035	0.029	0.033	0.033	0.034	0.036	0.038	0.109	
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Mn	0.000	0.002	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.003	0.002	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	
Mg	0.010	0.012	0.007	0.010	0.010	0.008	0.010	0.009	0.011	0.008	0.012	0.010	0.009	0.010	0.009	0.006	0.010	0.008	0.010	0.009	0.006	0.008	0.136	
Ca	0.637	0.631	0.752	0.683	0.515	0.581	0.581	0.751	0.651	0.742	0.645	0.699	0.695	0.706	0.685	0.727	0.621	0.637	0.675	0.615	0.715	0.666	0.462	
Na	0.373	0.368	0.267	0.317	0.483	0.419	0.418	0.251	0.336	0.268	0.349	0.299	0.308	0.296	0.314	0.283	0.366	0.358	0.335	0.387	0.280	0.341	0.466	
K	0.011	0.009	0.005	0.008	0.020	0.016	0.015	0.006	0.008	0.006	0.009	0.007	0.009	0.008	0.006	0.009	0.011	0.012	0.011	0.015	0.009	0.013	0.030	
Ni	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Cations	5.019	5.012	5.015	5.016	5.014	5.015	5.011	5.011	5.000	5.010	5.006	5.010	5.012	5.014	5.008	5.019	5.007	5.009	5.019	5.016	5.009	5.017	5.034	
Ab	36.50	36.50	26.10	31.40	47.40	41.20	41.20	24.90	33.80	26.40	34.80	29.80	30.40	29.30	31.20	27.80	36.70	35.60	32.80	38.10	27.90	33.40	48.60	
An	62.40	62.60	73.40	67.80	50.60	57.20	57.30	74.50	65.40	73.00	64.30	69.60	68.70	69.90	68.20	71.30	62.20	63.30	66.10	60.50	71.20	65.30	48.20	
Or	1.10	0.90	0.50	0.80	2.00	1.60	1.50	0.60	0.80	0.60	0.90	0.70	0.90	0.80	0.60	0.90	1.10	1.20	1.10	1.50	0.90	1.30	3.10	
Name	Lab	Lab	byt	Lab	Lab	Lab	Lab	byt	Lab	byt	Lab	byt	Lab	byt	Lab	byt	Lab	Lab	Lab	Lab	byt	Lab	Lab	

پیوست ۱- ب) نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی پلاژیوکلازها در سنگ‌های آتشفشانی کوه‌سیاه (نمونه‌های B145 و F29 بازالت است. تجزیه‌های 54, 55, 56 و 57 و تجزیه‌های 62, 63, 64, 65, 66 و 67 مربوط به زونینگ دو پلاژیوکلاز از مرکز به حاشیه است).

Sample	B151	B151	B151	B151	B145	B145	B145	B145	B145	F29	F29	F29	F29	F29	F29	F29	F29	F29	F29	F29	F29
Analysis	52-1R	53-1R	54-1R	55-1R	54	55	56	57	59C	61	61	62	63	64	65	66	67	73	74		
SiO ₂	54.49	52.23	52.33	51.39	52.57	50.50	49.10	54.18	50.95	51.40	51.40	51.85	51.15	50.51	48.12	50.79	50.11	46.43	46.56		
TiO ₂	0.06	0.04	0.07	0.02	0.01	0.05	0.00	0.06	0.01	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01	0.00	0.03		
Al ₂ O ₃	26.58	29.10	28.78	29.65	29.03	30.20	30.95	27.60	30.36	29.22	29.22	29.41	29.93	30.11	31.81	29.63	30.08	32.63	32.34		
FeO*	0.91	0.86	0.71	0.73	0.66	0.71	0.69	0.88	0.79	0.69	0.69	0.70	0.73	0.65	0.65	0.69	0.72	0.73	0.77		
MnO	0.04	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02		
MgO	0.14	0.12	0.10	0.12	0.13	0.13	0.09	0.09	0.12	0.13	0.13	0.13	0.14	0.12	0.12	0.14	0.10	0.08	0.11		
CaO	10.98	12.71	12.88	13.60	13.12	14.29	15.52	11.74	14.46	13.17	13.17	13.20	13.79	14.11	15.86	13.59	14.00	17.25	16.75		
Na ₂ O	5.14	4.11	4.19	4.14	3.29	2.74	5.15	3.36	4.09	4.09	4.14	3.85	3.70	2.70	3.93	3.51	1.98	2.14			
K ₂ O	0.40	0.22	0.18	0.17	0.18	0.12	0.09	0.24	0.15	0.17	0.17	0.19	0.16	0.15	0.10	0.17	0.19	0.07	0.06		
NiO	-	-	-	-	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.02	0.00		
Total	98.74	99.40	99.28	99.38	99.84	99.31	99.17	99.95	100.19	98.92	98.92	99.65	99.78	99.40	99.35	98.95	98.70	99.16	98.79		
Structural formula based on the 8 Oxygens																					
Si	2.504	2.393	2.400	2.359	2.398	2.324	2.271	2.465	2.326	2.370	2.370	2.373	2.342	2.324	2.227	2.345	2.321	2.163	2.175		
Ti	0.002	0.001	0.002	0.001	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001		
Al	1.439	1.570	1.555	1.603	1.559	1.637	1.686	1.479	1.632	1.587	1.587	1.585	1.614	1.632	1.733	1.611	1.641	1.790	1.779		
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
Fe ²⁺	0.035	0.033	0.027	0.028	0.025	0.027	0.026	0.033	0.030	0.027	0.027	0.027	0.028	0.025	0.025	0.027	0.028	0.028	0.030		
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
Mn	0.002	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000			

پیوست ۲- نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی یوین‌ها در سنگ‌های آتشفشانی کوه‌سیاه (نمونه B148 آندزیت بازالتی است. C بیانگر مرکز بلور است. هر تجزیه مربوط به بلور جداگانه‌ای از یوین‌ها است). نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی یوین‌ها در سنگ‌های آتشفشانی کوه‌سیاه (نمونه‌های B148 و B145 به ترتیب آندزیت بازالتی و بازالت است).

Sample	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B145	B145	B145	
Analysis	18-1C	18-2C	18-3C	18-4C	18-5C	18-6C	18-7C	18-8C	18-9C	18-10C	23-1C	23-2C	23-3C	23-4C	23-5C	23-6C	23-7C	23-8C	23-9C	23-10C	58C	61C	62C	
SiO ₂	39.03	38.77	38.76	38.76	39.20	39.10	39.16	38.92	39.04	39.20	38.81	38.80	43.69	38.81	39.36	38.76	38.82	38.95	38.90	38.82	37.78	39.47	39.51	
TiO ₂	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.01	0.00	
Al ₂ O ₃	0.04	0.02	0.02	0.04	0.04	0.01	0.04	0.00	0.01	0.01	0.00	0.04	0.11	0.00	0.02	0.02	0.04	0.03	0.01	0.03	0.01	0.02	0.04	
Cr ₂ O ₃	0.02	0.01	0.00	0.04	0.00	0.02	0.02	0.08	0.00	0.04	0.05	0.03	0.04	0.00	0.09	0.00	0.02	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
FeO*	19.41	19.53	19.35	19.17	19.90	18.88	19.42	19.52	19.51	18.99	19.05	19.29	19.41	18.87	19.40	19.23	19.44	19.51	19.52	19.85	28.47	18.96	18.37	
MnO	0.24	0.35	0.28	0.27	0.26	0.35	0.33	0.34	0.38	0.39	0.31	0.40	0.25	0.29	0.38	0.35	0.30	0.31	0.30	0.44	0.49	0.23	0.32	
MgO	41.81	41.73	41.97	41.66	39.93	41.50	42.57	41.81	42.05	42.03	41.92	41.94	39.92	41.94	41.88	41.87	41.87	41.50	41.35	41.59	34.86	43.26	43.19	
CaO	0.10	0.11	0.14	0.17	0.16	0.13	0.15	0.20	0.17	0.15	0.13	0.23	0.15	0.18	0.19	0.11	0.13	0.18	0.16	0.13	0.19	0.15	0.14	
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.05	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.17	0.16	
Total	100.65	100.52	100.52	100.07	99.54	99.99	101.70	100.80	101.21	100.77	100.23	100.71	103.55	100.10	101.26	100.39	100.62	100.50	100.25	100.91	101.89	102.27	101.72	
Structural formula based on the 4 Oxygens																								
Si	0.994	0.991	0.989	0.993	1.011	1.000	0.988	0.992	0.991	0.996	0.992	0.989	1.068	0.993	0.997	0.990	0.990	0.995	0.996	0.990	0.994	0.988	0.992	
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	
Al	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Fe ²⁺	0.413	0.417	0.413	0.411	0.429	0.404	0.410	0.416	0.414	0.403	0.407	0.411	0.397	0.404	0.411	0.411	0.415	0.417	0.418	0.423	0.626	0.397	0.385	
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Mn	0.005	0.008	0.006	0.006	0.006	0.008	0.007	0.007	0.008	0.008	0.007	0.009	0.005	0.006	0.008	0.008	0.006	0.007	0.007	0.010	0.011	0.005	0.007	
Mg	1.588	1.590	1.597	1.591	1.535	1.583	1.601	1.588	1.591	1.592	1.598	1.594	1.454	1.599	1.581	1.595	1.592	1.580	1.578	1.581	1.367	1.614	1.616	
Ca	0.003	0.003	0.004	0.005	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.004	0.004	0.006	0.004	0.005	0.003	0.003	0.004	0.005	0.004	0.004	0.005	0.004	0.004	
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.003	
Cations	3.004	3.010	3.010	3.007	2.987	2.999	3.012	3.008	3.011	3.003	3.008	3.010	2.931	3.007	3.004	3.010	3.008	3.006	3.003	3.010	3.005	3.012	3.008	
Fe#	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.20	0.20	0.21	0.21	0.20	0.20	0.20	0.21	0.20	0.21	0.20	0.21	0.21	0.21	0.21	0.31	0.20	0.19	
Mg#	0.79	0.79	0.79	0.79	0.78	0.80	0.80	0.79	0.79	0.80	0.80	0.80	0.79	0.80	0.79	0.80	0.79	0.79	0.79	0.79	0.69	0.80	0.81	

پیوست ۳-الف) نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی کلینوپیروکسن‌ها در بازالت‌های کوه‌سیاه (هر تجزیه مربوط به بلور جداگانه‌ای از کلینوپیروکسن است).

Sample	B145	F29	F29	F29	F29	F29	F29	F29	F29
Analysis	60	58	59	60	69	70	71	72	75
SiO ₂	52.49	51.50	49.73	50.96	50.81	51.68	50.71	50.82	51.33
TiO ₂	0.57	0.44	0.67	0.48	0.48	0.36	0.47	0.42	0.44
Al ₂ O ₃	1.31	2.44	3.76	2.41	2.75	1.96	2.58	2.30	2.60
Cr ₂ O ₃	0.00	0.32	0.14	0.24	0.23	0.11	0.33	0.25	0.24
FeO*	15.33	8.20	9.52	9.75	8.11	8.67	7.88	8.34	8.46
MnO	0.50	0.26	0.28	0.32	0.26	0.28	0.25	0.28	0.30
MgO	16.10	16.09	14.81	16.35	16.12	16.89	15.83	15.92	16.39
CaO	14.28	20.55	19.65	18.39	20.67	19.44	20.38	19.98	19.59
Na ₂ O	0.32	0.26	0.32	0.24	0.26	0.24	0.29	0.22	0.28
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NiO	0.00	0.02	0.01	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.01
Total	100.90	100.08	98.89	99.15	99.70	99.61	98.75	98.53	99.64
Structural formula based on the 6 Oxygens									
Si	1.951	1.898	1.864	1.899	1.877	1.909	1.892	1.903	1.897
Ti	0.016	0.012	0.019	0.014	0.013	0.010	0.013	0.012	0.012
Al ^{IV}	0.049	0.102	0.136	0.101	0.119	0.085	0.108	0.097	0.103
Al ^{VI}	0.008	0.003	0.030	0.005	0.000	0.000	0.006	0.005	0.011
Cr	0.000	0.009	0.004	0.007	0.007	0.003	0.010	0.007	0.007
Fe ²⁺	0.445	0.169	0.211	0.226	0.138	0.177	0.159	0.185	0.181
Fe ³⁺	0.032	0.083	0.088	0.078	0.113	0.091	0.087	0.076	0.081
Mn	0.016	0.008	0.009	0.010	0.008	0.009	0.008	0.009	0.010
Mg	0.892	0.884	0.827	0.909	0.888	0.930	0.881	0.889	0.893
Ca	0.569	0.811	0.789	0.734	0.818	0.769	0.815	0.802	0.776
Na	0.023	0.018	0.024	0.017	0.019	0.017	0.021	0.016	0.020
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000
Cations	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
WO	29.12	41.49	41.02	37.52	41.64	38.93	41.80	40.90	39.79
EN	45.69	45.18	43.02	46.42	45.19	47.08	45.18	45.34	46.31
FS	25.20	13.33	15.96	16.06	13.17	13.99	13.02	13.76	13.90

پیوست ۳-ب) نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی ارتوپروکسن‌ها در سنگ‌های آتشفشانی کوه‌سیاه (نمونه‌های B148, B151 و B146 آندزیت بازالتی است. C و R به ترتیب بیانگر مرکز و حاشیه بلور است. هر تجزیه مربوط به بلور جداگانه‌ای از ارتوپروکسن‌ها است).

Sample	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B151	B151	B151	B151	B151	B151	B151	B146	B146	B146	B146	B146	B146
Analysis	1-1C	2-1C	3-1C	4-1C	5-1C	6-1C	7-1C	8-1C	39-1C	40-1C	41-1C	42-1C	43-1C	44-1C	45-1C	65	67	68C	69R	70R	71
SiO ₂	53.01	52.63	53.23	53.22	52.82	52.50	52.80	53.11	51.89	52.13	52.07	52.07	52.59	52.60	52.59	53.54	54.54	54.29	51.01	50.08	52.62
TiO ₂	0.27	0.33	0.24	0.26	0.25	0.32	0.31	0.27	0.33	0.31	0.30	0.30	0.33	0.34	0.29	0.25	0.24	0.24	0.44	0.41	0.29
Al ₂ O ₃	0.85	1.14	0.68	0.73	0.88	1.05	1.44	1.36	0.71	0.58	0.73	0.73	0.76	0.75	0.70	1.81	1.71	1.74	1.06	1.02	1.56
Cr ₂ O ₃	0.06	0.02	0.07	0.01	0.00	0.13	0.14	0.03	0.00	0.00	0.05	0.02	0.03	0.03	0.08	0.13	0.18	0.15	0.00	0.00	0.07
FeO*	18.66	18.63	18.21	17.85	18.12	17.86	15.74	16.32	20.43	19.71	20.20	19.70	19.98	19.77	20.10	14.73	14.59	14.96	24.00	24.44	15.02
MnO	0.53	0.47	0.54	0.59	0.64	0.46	0.51	0.50	0.65	0.68	0.69	0.62	0.62	0.62	0.67	0.35	0.36	0.40	0.77	0.68	0.41
MgO	24.77	24.69	25.33	24.87	24.92	24.37	25.83	25.91	20.63	20.74	20.98	22.54	22.42	22.41	22.73	27.31	27.44	27.02	16.82	16.04	26.99
CaO	2.19	2.00	2.09	2.18	2.15	2.15	2.46	1.85	4.07	4.14	4.21	4.27	2.51	2.23	2.24	1.82	1.90	2.39	5.65	5.99	2.12
Na ₂ O	0.00	0.04	0.04	0.05	0.00	0.06	0.05	0.02	0.06	0.08	0.10	0.15	0.05	0.05	0.06	0.02	0.03	0.00	0.14	0.16	0.04
K ₂ O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.03	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.03	0.02
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.03
Total	100.28	99.94	100.36	99.75	99.78	98.78	99.14	99.35	98.78	98.37	99.30	100.41	99.29	98.79	99.38	99.83	100.82	101.08	99.95	98.84	99.09
Structural formula based on the 6 Oxygens																					
Si	1.936	1.927	1.936	1.949	1.935	1.943	1.928	1.938	1.961	1.974	1.953	1.917	1.962	1.972	1.958	1.926	1.944	1.935	1.947	1.940	1.910
Ti	0.007	0.009	0.007	0.007	0.007	0.009	0.009	0.007	0.009	0.009	0.008	0.008	0.009	0.010	0.008	0.007	0.006	0.007	0.013	0.012	0.008
Al ^{IV}	0.037	0.049	0.029	0.031	0.038	0.046	0.062	0.058	0.032	0.026	0.032	0.032	0.033	0.028	0.031	0.074	0.056	0.065	0.048	0.047	0.067
Al ^{VI}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.003	0.015	0.008	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.493	0.489	0.466	0.488	0.477	0.498	0.411	0.444	0.613	0.611	0.581	0.476	0.594	0.611	0.586	0.384	0.405	0.402	0.719	0.729	0.354
Fe ³⁺	0.077	0.082	0.089	0.059	0.078	0.055	0.069	0.053	0.033	0.014	0.053	0.231	0.029	0.009	0.041	0.059	0.030	0.044	0.046	0.063	0.102
Mn	0.016	0.015	0.017	0.018	0.020	0.014	0.016	0.015	0.021	0.022	0.022	0.019	0.020	0.020	0.021	0.011	0.011	0.012	0.025	0.022	0.012
Mg	1.348	1.348	1.374	1.358	1.361	1.345	1.406	1.409	1.162	1.171	1.173	1.237	1.247	1.253	1.262	1.464	1.458	1.436	0.957	0.926	1.461
Ca	0.086	0.078	0.081	0.086	0.084	0.085	0.096	0.072	0.165	0.168	0.169	0.168	0.100	0.090	0.089	0.070	0.073	0.091	0.231	0.249	0.082
Na	0.000	0.003	0.003	0.004	0.000	0.004	0.004	0.001	0.004	0.006	0.007	0.011	0.004	0.004	0.004	0.002	0.002	0.000	0.011	0.012	0.003
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.001	0.001
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001
Sum-cat	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	3.999	3.999	3.999	3.999	4.000	4.000	4.000	4.000	3.997	3.999	3.999
WO	4.24	3.90	4.02	4.26	4.18	4.27	4.82	3.63	8.27	8.46	8.47	8.29	5.04	4.52	4.47	3.52	3.67	4.61	11.68	12.50	4.10
EN	66.74	67.01	67.81	67.61	67.36	67.33	70.35	70.64	58.30	58.99	58.72	60.90	62.65	63.21	63.15	73.65	73.78	72.31	48.36	46.56	72.62
FS	29.02	29.09	28.17	28.13	28.46	28.40	24.84	25.74	33.43	32.55	32.81	30.81	32.31	32.27	32.38	22.83	22.55	23.08	39.96	40.94	23.28
Name	En	En	En	En	En	En	En	En	Pgt	Pgt	Pgt	Pgt	En	En	En	En	En	En	Pgt	Pgt	En

پیوست ۴-الف) نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی کلریت‌ها در سنگ‌های آتشفشانی کوه‌سیاه (نمونه‌های B148 و B151 آندزیت بازالتی است. C و R به ترتیب بیانگر مرکز و حاشیه بلور است. هر تجزیه مربوط به بلور جداگانه‌ای از کلریت‌ها است).

Sample	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B148	B151	B151	B151	B151	B151	B151	B151	B151	B151	B151
Analysis	19-1R	20-1R	21-1R	22-1R	24-1R	25-1R	26-1R	27-1C	27-2C	27-3C	27-4C	27-5C	27-6C	27-7C	27-8C	27-9C	
SiO ₂	39.22	37.93	40.44	36.66	38.57	37.43	38.36	37.59	36.85	37.86	37.39	36.98	36.87	36.70	36.84	37.37	
TiO ₂	0.00	0.03	0.00	0.03	0.01	0.03	0.00	0.01	0.14	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.06	
Al ₂ O ₃	0.51	0.37	0.64	0.13	0.44	0.44	0.54	0.81	1.03	0.98	0.98	0.98	0.83	0.88	0.89	1.05	
Cr ₂ O ₃	0.00	0.04	0.01	0.00	0.01	0.00	0.06	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.02	0.06	0.12	0.04	
FeO*	28.37	29.43	29.25	28.78	27.43	31.38	28.69	29.81	30.16	29.21	29.89	30.61	30.34	30.53	29.93	30.07	
MnO	0.32	0.33	0.26	0.35	0.32	0.22	0.23	0.23	0.26	0.35	0.30	0.19	0.36	0.34	0.31	0.25	
MgO	24.19	23.10	21.81	28.12	24.94	21.09	23.22	21.77	20.83	20.97	20.22	19.22	20.79	20.28	21.03	19.06	
CaO	0.81	0.83	0.81	0.57	0.88	0.90	0.81	0.86	0.77	0.82	0.86	0.93	0.85	0.82	0.86	0.92	
Na ₂ O	0.05	0.08	0.16	0.02	0.03	0.04	0.05	0.02	0.09	0.04	0.02	0.02	0.00	0.03	0.03	0.07	
K ₂ O	0.31	0.22	0.59	0.03	0.17	0.29	0.29	0.19	0.28	0.19	0.22	0.29	0.20	0.24	0.27	0.39	
Total	93.78	92.36	93.97	94.69	92.80	91.82	92.25	91.29	90.41	90.45	89.89	89.25	90.27	89.88	90.28	89.28	
Structural formula based on the 28 Oxygens																	
Si	2.791	2.768	2.876	2.609	2.767	2.778	2.787	2.779	2.764	2.815	2.811	2.815	2.773	2.777	2.767	2.835	
Ti	0.000	0.002	0.000	0.002	0.001	0.002	0.000	0.001	0.008	0.001	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.003	
Al ^{IV}	0.043	0.032	0.054	0.011	0.037	0.038	0.046	0.071	0.091	0.086	0.087	0.088	0.074	0.078	0.079	0.094	
Al ^{VI}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Cr	0.000	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000	0.003	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.004	0.007	0.002	
Fe ²⁺	1.688	1.796	1.740	1.713	1.645	1.948	1.743	1.843	1.892	1.816	1.879	1.949	1.908	1.932	1.880	1.908	
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Mn	0.019	0.020	0.016	0.021	0.019	0.014	0.014	0.014	0.017	0.022	0.019	0.012	0.023	0.022	0.020	0.016	
Mg	2.566	2.513	2.312	2.983	2.667	2.333	2.515	2.399	2.329	2.324	2.266	2.181	2.331	2.288	2.354	2.156	
Ca	0.062	0.065	0.062	0.043	0.068	0.072	0.063	0.068	0.062								

پیوست ۴- ب) نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی کلریت‌ها در سنگ‌های آتشفشانی کوه‌سیاه (نمونه‌های B151 و F29 به ترتیب آندزیت بازالتی و بازالت است).

Sample	B151	B151	B151	B151	B151	B151	B151	B151	B151	B151	B151	B151	B151	B151	B151	B151	F29
Analysis	27-10C	28-1R	29-1R	30-1C	30-2C	30-3C	30-4C	30-5C	30-6C	30-7C	30-8C	30-9C	30-10C	31-1R	32-1R	33-1R	68
SiO ₂	37.49	35.70	28.24	36.54	35.92	35.90	36.15	36.27	35.14	37.78	36.14	36.50	36.58	30.30	32.09	31.62	34.26
TiO ₂	0.05	0.00	0.23	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.05	0.04	0.03	0.00
Al ₂ O ₃	1.18	0.86	0.99	0.91	0.87	1.05	0.96	1.02	1.07	1.12	0.82	0.80	0.72	0.71	0.66	0.69	0.84
Cr ₂ O ₃	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.06	0.00
FeO*	30.56	32.74	31.82	32.09	32.51	32.66	33.69	33.66	34.63	32.12	31.45	32.17	31.49	41.76	39.62	40.33	35.51
MnO	0.35	0.32	0.31	0.32	0.31	0.30	0.37	0.26	0.24	0.26	0.28	0.34	0.31	0.22	0.29	0.33	0.27
MgO	19.22	19.16	11.42	19.68	18.51	16.96	18.40	18.33	15.48	17.98	19.96	20.52	20.85	11.01	13.72	14.67	16.38
CaO	0.81	0.86	0.91	0.86	0.82	0.85	0.88	0.88	0.96	0.88	0.87	0.84	0.73	1.04	0.95	0.89	1.11
Na ₂ O	0.11	0.00	0.16	0.05	0.02	0.03	0.05	0.06	0.04	0.06	0.07	0.05	0.02	0.03	0.01	0.03	0.10
K ₂ O	0.41	0.22	0.23	0.16	0.19	0.28	0.22	0.26	0.27	0.33	0.16	0.15	0.16	0.11	0.09	0.09	0.21
Total	90.18	89.90	74.31	90.62	89.16	88.07	90.73	90.80	87.84	90.54	89.76	91.43	90.87	85.23	87.47	88.74	88.68
Structural formula based on the 28 Oxygens																	
Si	2.821	2.741	2.722	2.764	2.775	2.812	2.758	2.763	2.796	2.848	2.756	2.738	2.750	2.642	2.667	2.603	1.634
Ti	0.003	0.000	0.017	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.003	0.003	0.002	0.000
Al ^{IV}	0.105	0.078	0.112	0.081	0.079	0.097	0.086	0.091	0.100	0.099	0.074	0.071	0.064	0.073	0.065	0.067	0.047
Al ^{VI}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.004	0.000
Fe ²⁺	1.923	2.102	2.565	2.030	2.100	2.139	2.150	2.144	2.305	2.025	2.006	2.018	1.980	3.046	2.754	2.776	1.417
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.022	0.021	0.025	0.020	0.020	0.020	0.024	0.017	0.016	0.017	0.018	0.022	0.020	0.016	0.020	0.023	0.011
Mg	2.156	2.193	1.641	2.219	2.132	1.980	2.093	2.081	1.836	2.021	2.269	2.295	2.337	1.431	1.700	1.800	1.165
Ca	0.065	0.071	0.094	0.070	0.068	0.071	0.072	0.072	0.082	0.071	0.071	0.068	0.059	0.097	0.085	0.078	0.057
Na	0.016	0.000	0.030	0.007	0.003	0.005	0.007	0.009	0.006	0.009	0.010	0.007	0.003	0.005	0.002	0.005	0.009
K	0.039	0.022	0.028	0.015	0.019	0.028	0.021	0.025	0.027	0.032	0.016	0.014	0.015	0.012	0.010	0.009	0.013
Cations	7.150	7.230	7.234	7.207	7.197	7.155	7.212	7.206	7.169	7.123	7.221	7.236	7.229	7.325	7.306	7.367	4.353
Fe#	0.47	0.49	0.61	0.48	0.50	0.52	0.51	0.51	0.56	0.50	0.47	0.47	0.46	0.68	0.62	0.61	0.55
Mg#	0.53	0.51	0.39	0.52	0.50	0.48	0.49	0.49	0.44	0.50	0.53	0.53	0.54	0.32	0.38	0.39	0.45

پیوست ۵- نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی اسپینل‌های کروم‌دار در سنگ‌های آتشفشانی کوه‌سیاه (نمونه B145 و F29 بازالت و نمونه‌های B146، B151 و B148 آندزیت بازالتی‌اند. C و Ox به ترتیب بیانگر مرکز بلور و اکسید است. هر تجزیه مربوط به بلور جداگانه‌ای از اسپینل‌های کروم‌دار است).

Sample	B145	B145	B146	B151	B151	B151	B151	B151	B148	B148	B148	F29	F29	F29	F29	F29
Analysis	63	64	66	34-10Ox	35-10Ox	36-10Ox	37-10Ox	38-10Ox	56-1C	57-1C	58-1C	76	77	78	79	80
SiO ₂	0.02	0.06	0.10	0.48	1.18	0.13	0.08	0.05	0.01	0.00	0.00	0.13	0.01	0.13	0.16	0.00
TiO ₂	2.59	2.28	4.05	9.60	8.39	8.81	7.33	7.65	2.25	2.17	2.28	10.31	6.61	8.76	9.23	6.61
Al ₂ O ₃	14.34	18.21	7.90	4.59	5.07	5.10	5.77	5.40	15.54	15.72	15.50	3.08	3.43	3.27	3.08	3.33
Cr ₂ O ₃	25.91	25.57	21.75	9.40	10.27	9.85	10.45	10.98	25.89	25.34	25.55	6.83	18.41	11.40	10.52	18.33
FeO*	45.77	42.99	57.13	63.42	64.47	64.42	64.87	64.47	46.95	46.15	47.38	68.64	64.02	65.61	66.40	64.47
MnO	0.32	0.36	0.38	0.16	0.25	0.13	0.09	0.08	0.00	0.00	0.00	0.42	0.38	0.42	0.35	0.43
MgO	8.36	9.28	5.14	2.97	2.84	3.10	3.29	3.24	6.21	6.36	5.96	1.34	1.48	1.26	1.21	1.48
CaO	0.00	0.00	0.03	0.02	0.05	0.02	0.04	0.03	0.03	0.00	0.01	0.07	0.07	0.07	0.10	0.08
Na ₂ O	0.03	0.04	0.05	0.00	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03	0.00	0.04	0.03	0.00	0.00
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.03	0.07	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01
NiO	0.14	0.13	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
Total	97.42	98.83	96.43	90.14	91.29	91.41	91.80	91.82	96.84	95.74	96.67	90.63	94.33	90.71	90.78	94.65
Formula units based on 32 Oxygens and Fe ²⁺ /Fe ³⁺ assuming full site occupancy																
Si	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti	0.516	0.441	0.856	2.232	1.923	2.013	1.659	1.735	0.457	0.444	0.464	2.432	1.499	2.067	2.179	1.494
Al	4.490	5.509	2.621	1.673	1.822	1.827	2.047	1.920	4.945	5.044	4.949	1.137	1.219	1.209	1.139	1.180
Cr	5.440	5.188	4.838	2.297	2.475	2.366	2.485	2.618	5.525	5.452	5.471	1.694	4.389	2.826	2.611	4.357
Fe ²⁺	5.892	5.395	7.995	10.515	10.390	10.363	10.115	10.141	6.624	6.530	6.733	11.715	10.363	11.179	11.361	10.385
Fe ³⁺	4.640	4.116	6.099	6.671	6.892	6.836	7.113	6.994	4.284	4.283	4.313	7.227	6.539	6.872	6.919	6.601
Mn	0.049	0.057	0.070	0.032	0.054	0.023	0.012	0.009	0.000	0.000	0.000	0.105	0.078	0.099	0.081	0.091
Mg	3.308	3.551	2.155	1.368	1.290	1.404	1.475	1.456	2.498	2.580	2.406	0.628	0.663	0.588	0.564	0.662
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	0.029	0.027	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000
Total	24.365	24.284	24.651	24.789	24.846	24.831	24.906	24.873	24.309	24.309	24.313	24.938	24.755	24.841	24.853	24.771
100Mg/(Mg+Fe ²⁺)	31.86	32.56	20.30	11.23	10.57	11.51	12.13	12.07	21.59	22.29	20.59	4.88	5.73	4.74	4.51	5.73
100Cr/(Cr+Al)	54.78	48.50	64.86	57.86	57.60	56.43	54.84	57.69	52.77	51.94	52.50	59.83	78.27	70.04	69.63	78.69
100Fe ³⁺ /(Cr+Al+Fe ³⁺)	31.85	27.79	44.98	62.69	61.60	61.98	61.08	60.65	29.03	28.98	29.27	71.85	53.83	63.01	64.85	54.39

پیوست ۶- محاسبه درجه حرارت تبلور ارتوپیروکسن بر مبنای محتوای Ca در ارتوپیروکسن (Brey and Köhler, 1990).

Sample	Analysis	P (1 Kbar)	P (5 Kbar)	P (10 Kbar)
B148	1-1	1228.43	1253.01	1283.73
B148	2-1	1195.06	1219.1	1249.14
B148	3-1	1207.78	1232.02	1262.33
B148	4-1	1228.43	1253.01	1283.73
B148	5-1	1220.25	1244.7	1275.25
B148	6-1	1224.35	1248.87	1279.51
B148	7-1	1267.89	1293.11	1324.64
B148	8-1	1168.8	1192.4	1221.9
B151	39-1	1496.87	1525.85	1562.06
B151	40-1	1505.67	1534.78	1571.18
B151	41-1	1508.58	1537.75	1574.2
B151	42-1	1505.67	1534.78	1571.18
B151	43-1	1283.06	1308.53	1340.37
B151	44-1	1244.49	1269.33	1300.38
B151	45-1	1240.51	1265.29	1296.26
B146	65	1159.77	1183.23	1212.55
B146	67	1173.26	1196.93	1226.53
B146	68	1248.44	1273.35	1304.48
B146	69	1676.89	1708.81	1748.71
B146	70	1722.15	1754.81	1795.63
B146	71	1211.97	1236.28	1266.66

Petrography and mineral chemistry of volcanic rocks in Kuh-e-Siah (North of Gavkhuni lagoon, SE of Isfahan)

Bahareh Fazeli ¹, Ghodrat Torabi ^{1*} and Farimah Ayati ²

¹ Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

² Department of Geology, Payame Noor University, 19395-3697 Tehran, I. R. of Iran

Abstract

Kuh-e-Siah is located in the north of Gavkhuni lagoon and east of the Varzaneh (SE of Isfahan) and is a part of Urumieh-Dokhtar magmatic arc (UDMA). The volcanic rocks of this area are vesicular basalt and basaltic andesite with Late Miocene age. The most common textures of these rocks are porphyry, microlitic porphyritic, hyaloporphyric and vesicular. Plagioclase, olivine and clinopyroxene are the main rocks forming minerals of basalts. Orthopyroxene and Cr-spinel are the accessory phases. The major minerals of the basaltic andesites are plagioclase, olivine and orthopyroxene. Clinopyroxene and Cr-spinel are present as accessory minerals. The secondary minerals of all studied rocks are chlorite, calcite and magnetite. In these rocks plagioclases are labradorite and bytownite, olivines are chrysolite (mainly changed into chlorite), orthopyroxenes are enstatite (some of them have a rim of pigeonite), clinopyroxenes are augite and chlorites are corundophilite in composition. Olivine-spinel geothermometry yielded 1 to 10 Kbar, and the temperature varies from 914 to 1201 °C. Also, orthopyroxene thermometry presents temperature of 1248 to 1304 °C for pressures of 1 to 10 Kbar. The whole rocks geochemical data and the chemistry of minerals indicate that the studied rocks are calc-alkaline in composition and geotectonically belong to the volcanic arc setting.

Key words: Basalt, Late Miocene, Kuh-e-Siah, Gavkhuni, Urumieh-Dokhtar