



ژئوشیمی و پتروژنز مجموعه گرانیتوئیدی کلاه قاضی، جنوب اصفهان

جمشید احمدیان^{۱*}، هاجر غلامیان^۲، علی خان نصر اصفهانی^۲ و مریم هنرمند^۳

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، ایران

(۲) گروه زمین‌شناسی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

(۳) دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، کدپستی ۴۵۱۳۷-۶۶۷۳۱، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۱۳، پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۲۳

چکیده

مجموعه گرانیتوئیدی کلاه قاضی در جنوب اصفهان و در پهنه ساختاری سنندج-سیرجان واقع شده است. بر اساس شواهد زمین‌شناسی سن احتمالی این مجموعه ژوراسیک بالایی بوده و شامل گروه‌های سنگی گرانودیوریت، گرانیت و آلکالی فلدسپار گرانیت است. کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده این مجموعه شامل کوارتز، پلاژیوکلاز و فلدسپار آلکالن بوده و بیوتیت تنها کانی فرومیزین این مجموعه نفوذی است. حضور کانی‌های آندالوزیت، سیلیمانیت و گارنت در این مجموعه گرانیتوئیدی نشان‌دهنده منشأ رسوبی توده‌های مورد بررسی است. بر اساس مطالعات صحرایی، پتروگرافی و ژئوشیمیایی، سنگ‌های مجموعه نفوذی مورد بررسی در گروه گرانیتوئیدهای نوع S قرار می‌گیرند و دارای ماهیت کالک آلکالن پتاسیم بالا و از نوع پرآلمین هستند. از لحاظ ژئوشیمیایی طیف تغییرات SiO_2 در نمونه‌های آنالیزشده از ۶۴/۶ تا ۷۴/۴ متغیر است. الگوی تغییرات عناصر کمیاب بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه و کندریت بیانگر غنی‌شدگی این سنگ‌ها از LILE و LREE و تهی‌شدگی از HFSE و HREE است. نسبت $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.78-0.85$ در نمونه‌های کلاه قاضی نشان‌دهنده حضور اندکی پلاژیوکلاز در باقی‌مانده ذوب در منبع است. بر اساس شواهد زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی مجموعه نفوذی کلاه قاضی در ژوراسیک بالایی و در طی نفوذ مذاب‌های گوشته‌ای به داخل پوسته و ذوب‌بخشی سنگ‌های پوسته‌ای تشکیل شده است.

واژه‌های کلیدی: کالک‌آلکالن، گرانیت نوع S، ژوراسیک، کلاه قاضی، سنندج-سیرجان

مقدمه

گرانیتوئیدهای کلاه قاضی را به‌عنوان بخشی از ماگماتیسیم ایران مرکزی فرض کرده‌اند؛ اما چنانچه مرز بین ایران مرکزی و زون سنندج سیرجان را گودال‌هایی مانند دریاچه ارومیه، تزلوگل و گاوخونی و گودال جازموریان در نظر بگیریم (Tillman et al., 1981)، منطقه مورد بررسی جزئی از پهنه سنندج-سیرجان محسوب می‌شود. گسل‌ها و ساختارهای هورست و گرابنی در زون سنندج-سیرجان که در طی فاز کوه‌زایی سیمیرین پیشین

مجموعه گرانیتوئیدی کلاه قاضی در ۵۰ کیلومتری جنوب و جنوب‌شرق اصفهان، بین طول جغرافیایی $51^{\circ} 04'$ و $50^{\circ} 50'$ و عرض جغرافیایی $32^{\circ} 35'$ و $32^{\circ} 45'$ قرار دارد (شکل ۱). مجموعه نفوذی کلاه قاضی در تقسیمات ساختاری ایران زمین در پهنه سنندج-سیرجان واقع شده است. از سوی دیگر نبوی و درویش‌زاده (Nabavi, 1976; Darvishzadeh, 1991)

خاکی در شرکت ACME کانادا توسط دستگاه ICP-MS مدل Perkin-Elmer ELAN 6100 انجام شدند. آنالیز عناصر اصلی با دقت در حد یک درصد صورت گرفته است. حد آشکارسازی عناصر فرعی در حد ۱ و عناصر نادر خاکی ۰/۱ پی‌پی‌ام است. روش به کار برده شده، روش اضافه کردن چهار مرحله‌ای اسید (شامل اسید نیتریک و اسید فلوریدریک و اسید کلریدریک) بوده است. نتایج آنالیزهای ژئوشیمی در جدول ۱ آمده است.

زمین‌شناسی

مجموعه گرانیتوئیدی کلاه قاضی در داخل شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های ژوراسیک زیرین نفوذ کرده و باعث دگرگونی مجاورتی و پدید آمدن هورنفلس در حاشیه توده‌ها شده‌اند. بزرگ‌ترین رخنمون توده نفوذی (با طول ۳/۵ کیلومتر) واقع در دره سروشجان، در قاعده کنگلومرا، ماسه‌سنگ و آهک‌های کرتاسه پایینی قرار گرفته و از لحاظ دگرگونی مجاورتی، تأثیری در واحدهای چینه‌ای بالا ایجاد نکرده است. شواهد صحرایی یادشده به همراه حضور قطععاتی از سنگ‌های گرانیتوئیدی کلاه قاضی در کنگلومرای قاعده کرتاسه، همگی دلالت بر سن تقریبی ژوراسیک بالایی برای مجموعه نفوذی کلاه قاضی دارند.

رخساره دگرگونی مجاورتی در محدوده مورد بررسی در حاشیه شمال شرقی دره لاگور، در مجاورت بلا فصل توده نفوذی دیده می‌شود. در حالی که در حاشیه جنوبی توده نفوذی دره لاگور و حاشیه شرقی دره گنج فقط آبرفت‌های عهد حاضر قابل مشاهده هستند. در گرانودیوریت‌ها و گرانیت‌ها، درشت‌بلورهای خاکستری و گوشتی رنگ به طول حداکثر ۸ سانتی‌متر و عرض ۱ سانتی‌متر با حاشیه سیاه‌رنگ دیده می‌شود که از انواع آلومینوسیلیکات‌ها (سیلیمانیت (خاکستری) و آندالوزیت (گوشتی) است. دانه‌های بسیار ریز قرمز رنگ گارنت نیز در نمونه دستی دیده می‌شود. گزنولیت‌هایی از جنس ماسه‌سنگ‌ها و شیل‌های میزبان و همچنین آنکلاوهای متعدد تیره‌رنگ از

تکامل یافته است، در این منطقه نیز وجود دارد. در منطقه مورد بررسی گسل‌های یادشده در طول کرتاسه نیز فعال بوده و موجب تغییرات ناگهانی رخساره‌ای در مسافت‌های کوتاه شده است (Tabatabaei-Manesh, 1994). مجموعه گرانیتوئیدی کلاه قاضی شامل توده‌های گرانودیوریتی، گرانیتی، آلکالی فلدسپار گرانیت و به مقدار کمتر تونالیتی است که در چهار بخش منطقه رخنمون یافته‌اند. رخنمون‌های سنگی مربوط به توده‌های یادشده به ترتیب وسعت، در مناطق دره سروشجان، دره لاگور، دره گنج و دره نیزار دیده می‌شود. اولین پژوهش انجام شده در این منطقه مربوط به طباطبایی منش - Tabatabaei (Manesh, 1994) است که در آن به بررسی سنگ‌شناسی و ژئوشیمی گرانیتوئید کلاه قاضی با استفاده از داده‌های آنالیز XRF پرداخته است. در بررسی یادشده مجموعه نفوذی کلاه قاضی گرانیت نوع S و دارای محیط زمین‌ساختی POG (گرانیتوئیدهای پس از کوه‌زایی) معرفی شده است. در پژوهش حاضر سعی شده است با کمک نتایج حاصل از روابط صحرایی حاکم بر بخش‌های مختلف مجموعه گرانیتوئیدی کلاه قاضی، بررسی‌های کانی‌شناسی و روابط بافتی و آنالیزهای ژئوشیمیایی عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی به بررسی ارتباط ژنتیکی بین بخش‌های مختلف توده، منشأ ماگمای سازنده و جایگاه زمین‌ساختی این مجموعه نفوذی پرداخته شود.

روش‌های انجام پژوهش

پس از انجام بررسی‌های دقیق صحرایی، برای مطالعه پتروگرافی سنگ‌های مورد بررسی، بیش از ۶۰ مقطع نازک از بخش‌های مختلف مجموعه گرانیتوئیدی کلاه قاضی (شامل توده‌ها، رگه‌های آپلیتی و آنکلاوها) تهیه شد و از نظر کانی‌شناسی و روابط بافتی مورد بررسی قرار گرفت. از این تعداد در مجموع ۲۲ نمونه از بخش‌های با کمترین میزان دگرسانی برای انجام آنالیزهای ژئوشیمیایی انتخاب شدند. آنالیزهای عناصر اصلی در آزمایشگاه ژئوشیمی دانشگاه ناروتو در کشور ژاپن با استفاده از XRF مدل Rigaku RIX 2000 و عناصر کمیاب و نادر

جنس تونالیت به اندازه چند سانتی‌متر تا چند دسی‌متر در گرانیت‌ها و گرانودیوریت‌ها قابل مشاهده هستند. رگه‌های آپلیتی با ترکیب سینوگرانیت و همچنین رگه‌های متعددی از تورمالین در داخل گرانیت‌ها و گرانودیوریت‌های کلاه‌قازی نفوذ کرده‌اند. رگه‌های تورمالین در مراحل پایانی تحولات ماگمایی و تحت تأثیر محلول‌های حاوی بر تشکیل شده‌اند.

سنگ‌شناسی

برای نام‌گذاری سنگ‌های مجموعه نفوذی مورد بررسی از رده‌بندی مودال اشتریک‌ایزن استفاده شد. طبق این رده‌بندی، سنگ‌های مجموعه گرانیتوئیدی کلاه‌قازی در محدوده تونالیت، گرانودیوریت، گرانیت و آلکالی‌فلدسپار گرانیت قرار می‌گیرند (شکل ۲). عمده‌ترین تفاوت گروه‌های گرانیت، گرانودیوریت و تونالیت در میزان پلاژیوکلاز و فلدسپات آلکالن است. بافت‌های مشاهده‌شده در این سنگ‌ها شامل انواع سیمپلکتیک، اپی‌تکسیال، میرمکت، راپاکی‌وی، پوئی‌کلیتیک (شکل ۳) و پورفیروئید است.

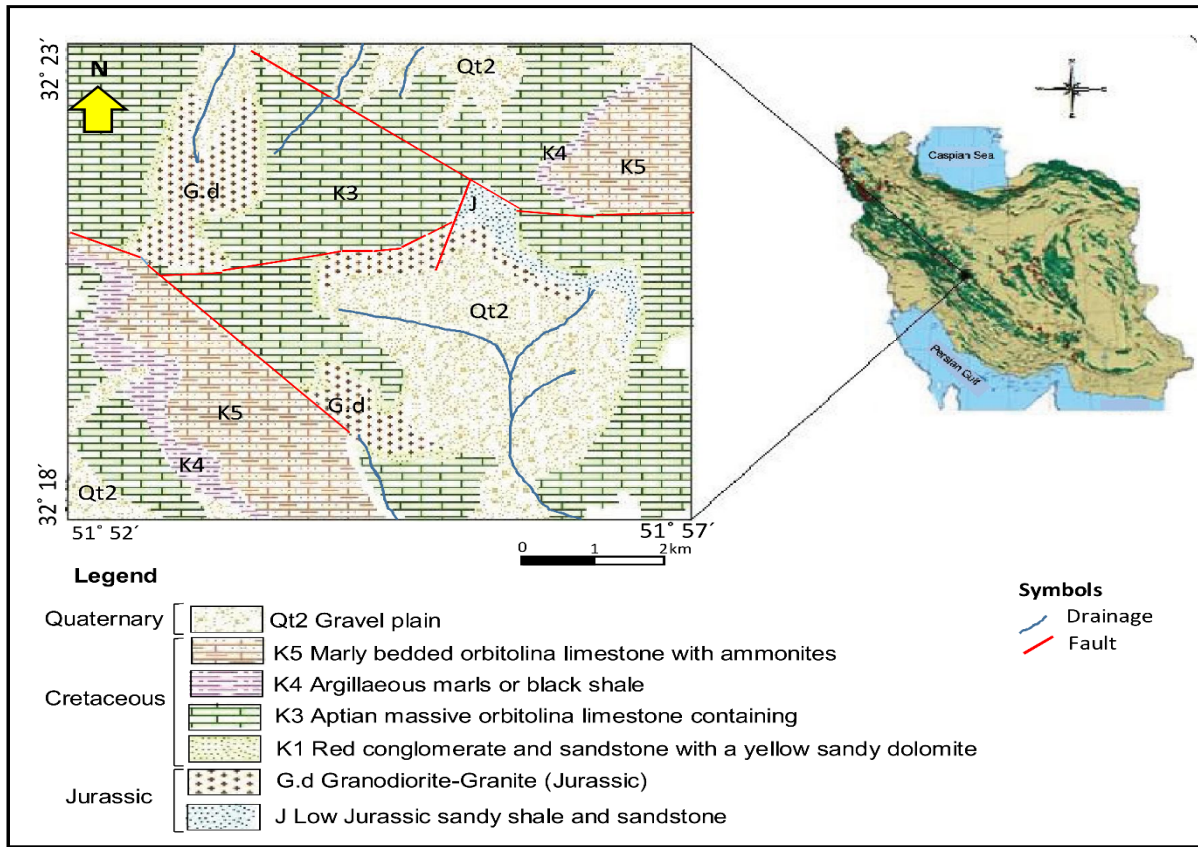
گرانیت

گرانیت‌های منطقه مورد بررسی در نمونه دستی تمام بلورین به رنگ خاکستری روشن بوده و دانه متوسط تا دانه ریز هستند. بافت این سنگ‌ها هیپ‌ایدیومورفیک گرانولار بوده و کانی‌های اصلی آنها شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، ارتوکلاز و بیوتیت است. کوارتز که در حدود ۳۵ درصد حجمی این سنگ‌ها را به خود اختصاص داده حاوی ادخال‌هایی از زیرکن و آپاتیت است. بلورهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار پلاژیوکلاز با ماکل پلی‌سنتیک و در برخی موارد ساختمان منطقه‌ای در حدود ۲۰ درصد حجمی گرانیت‌ها را تشکیل می‌دهند. پلاژیوکلازها در بیشتر موارد تحت تأثیر دگرسانی سرسیتی قرار گرفته‌اند و شدت دگرسانی از مرکز به طرف حاشیه بلور کاهش می‌یابد. بلورهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار ارتوکلاز نیز در حدود ۲۰ درصد حجمی سنگ را تشکیل می‌دهند. بیوتیت که تنها کانی

فرومیزین موجود در توده‌های منطقه است در حدود ۱۵ درصد حجمی گرانیت‌ها را تشکیل می‌دهد. مشاهدات پتروگرافی بیانگر وجود دو نسل بیوتیت در این سنگ‌هاست، نسل اول به صورت بلورهای شکل‌دار دارای پلئوکروئیسیم قهوه‌ای تا قهوه‌ای تیره هستند و نسل دوم بلورهای بی‌شکل با پلئوکروئیسیم سبز کم‌رنگ قابل شناسایی هستند. به نظر می‌رسد بیوتیت‌های نسل دوم در اثر متاسوماتیسم پتاسیک و در مرحله ساب‌سولیدوس به وجود آمده‌اند. در بعضی مقاطع بیوتیت‌ها دارای پیچ و تاب هستند که نشانه دگرشکلی است. در بعضی قسمت‌ها تجمع بیوتیت سبب ایجاد لخته‌های مافیک شده که احتمالاً قطعات مربوط به بخش‌های زودتر سرد شده توده هستند. بیوتیت‌ها حاوی ادخال‌های زیرکن با هاله پلئوکروئیک و آپاتیت هستند. در برخی مقاطع بیوتیت‌ها با حفظ قالب خود (بافت پزودومورف) به کلریت نوع پنین واسفن تبدیل شده‌اند و همچنین در امتداد رخ‌ها به کانی‌های اوپک‌تانویه دگرسان شده‌اند. کانی‌های فرعی شامل زیرکن، آپاتیت، آندالوزیت، سیلیمانیت، دیستن و گارنت هستند. بلورهای زیرکن با شکل‌های گردشده و عموماً به صورت ادخال درون بیوتیت و کوارتز دیده می‌شوند. آندالوزیت به صورت زینو کریست‌های کشیده و مستطیلی شکل در تمامی توده‌های منطقه به خصوص گرانودیوریت‌ها مشاهده می‌شود.

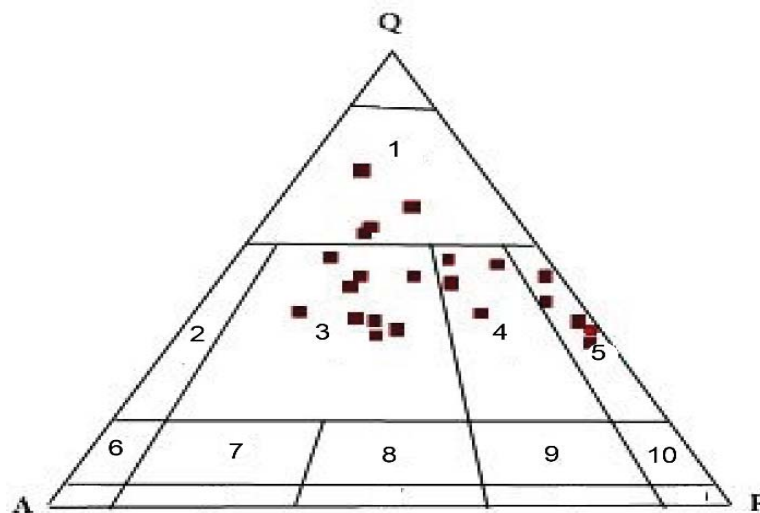
اسپینل‌های سبز کم‌رنگ در اطراف آندالوزیت‌ها به وجود آمده است و در بعضی جاها آندالوزیت به سرسیت‌های درشت تبدیل شده است. این درشت‌بلورها در اطراف حاشیه واکنشی با بافت سیمپلکتیت دارند، فنوبلاست آندالوزیت در اثر فشار و حرارت بالاتر به فیبرولیت‌های سیلیمانیت و یک حاشیه اسپینلی تبدیل می‌شود. سیلیمانیت در بعضی نمونه‌ها به صورت رشته‌ای در کنار آندالوزیت دیده می‌شود که می‌تواند نشانه تبدیل آندالوزیت به سیلیمانیت در طی افزایش حرارت در سنگ منشأ توده‌های مورد بررسی باشد.

کانی‌های ثانویه شامل سرسیت (دگرسانی پلاژیوکلاز)، اسفن، تورمالین، کائولینیت (دگرسانی ارتوکلاز)، کلریت و کانی‌های اوپک است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی در ایران و نقشه زمین‌شناسی منطقه کلاه‌قازی، با تغییرات از زاهدی (Zahedi, 1994)

Fig. 1. Geographical location of studied area in Iran and geological map of the Kolah-Ghazi area (Zahedi, 1994 with modification)



شکل ۲. رده‌بندی مودال سنگ‌های آذرین کلاه قاضی (Streckeisen, 1976) ۱: گرانیتوئید غنی از کوارتز، ۲: گرانیت آکالن، ۳: گرانیت، ۴: گرانودیوریت و ۵: تونالیت

Fig. 2. Modal classification of Kolah-Ghazi plutonic rocks (Streckeisen, 1976). 1: quartz rich granitoid, 2: alkaline granite, 3: granite, 4: granodiorite, and 5: tonalite

گرانودیوریت‌ها

گرانودیوریت‌ها از لحاظ وسعت رخنمون در منطقه، پس از گرانیت‌ها در مرتبه دوم قرار می‌گیرند. به رنگ خاکستری هستند و متحمل فرسایش شدیدی شده‌اند. در بررسی‌های میکروسکوپی بافت این سنگ‌ها هیپ ایدیومورفیک گرانولار بوده و شامل کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز، ارتوکلاز و بیوتیت است. بلورهای ریز تا درشت‌دانه کوارتز به صورت بی‌شکل است و در مواردی خاموشی موجی نشان می‌دهند. شکستگی‌ها و خاموشی موجی در کانی‌های کوارتز معمولاً مربوط به دگرشکلی زمین‌ساختی بعد از تبلور است. در مواردی ادخال‌هایی از کانی‌های پلاژیوکلاز و ارتوکلاز در داخل بیوتیت‌ها (بافت پوئی‌کلیتی) قابل مشاهده است. کانی‌های فرعی موجود در گرانودیوریت‌ها شامل زیرکن، آپاتیت، آندالوزیت و گارنت هستند و کانی‌های ثانویه شامل سرسیت، اسپینل، کائولینیت، کلریت از نوع پنین، اسفن، اپیدوت و کانی‌های اوپیک است. کانی‌تورمالین نیز در مراحل پایانی تحولات ماگمایی و به واسطه عملکرد محلول‌های هیدروترمال در این سنگ‌ها تشکیل شده است.

آلکالی‌فلدسپار گرانیت

این سنگ‌ها حجم بسیار کمی را به خود اختصاص می‌دهند و اغلب در شمال دره سروشجان قابل مشاهده هستند. نمونه‌های آلکالی‌فلدسپار گرانیت غنی از کوارتز و به رنگ روشن هستند. نمونه‌های مورد بررسی از آلکالی‌فلدسپار گرانیت‌ها بدون کانی مافیک و یا به مقدار جزئی حاوی کانی بیوتیت هستند. تعدادی از رگه‌های آپلیتی در منطقه ترکیب گرانیت کوارتزار را دارند. نمونه‌های مربوط به این آپلیت‌ها از نظر کانی‌شناسی نسبت به گرانودیوریت‌ها حاوی کوارتز و ارتوکلاز بیشتر و پلاژیوکلاز و بیوتیت کمتری هستند.

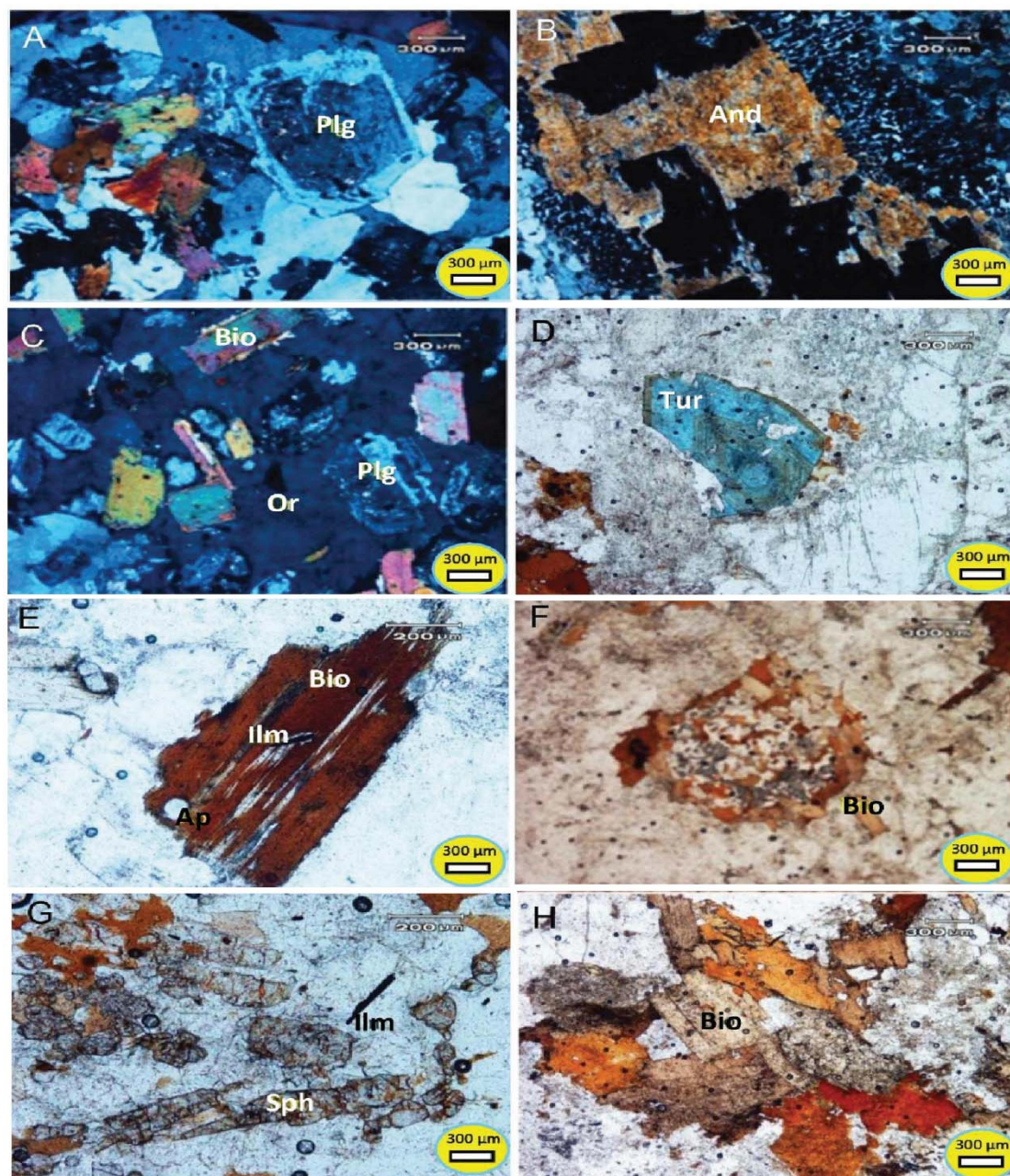
تونالیت

رخنمون این سنگ‌ها حجم بسیار کمی را در ناحیه به خود

اختصاص داده است. این سنگ‌ها به رنگ خاکستری تیره بوده و فراوانی پلاژیوکلاز در آنها در حدود ۴ برابر ارتوکلاز است. چنان‌که قبلاً اشاره شد آنکلاوهای ریزدانه منطقه نیز اغلب ترکیب تونالیتی دارند. کانی‌های کوارتز اغلب بی‌شکل بوده و فضای بین کانی‌های دیگر را پر می‌کنند. کوارتزها همچنین کمتر از ۴۰ درصد مودال سنگ‌ها را تشکیل داده، دارای خاموشی موجی بوده‌اند و معمولاً حاوی ادخال‌هایی از کانی‌های بیوتیت، ارتوکلاز، پلاژیوکلاز و آپاتیت هستند. کانی‌های فرعی این سنگ‌ها شامل آپاتیت، زیرکن، آندالوزیت و گارنت هستند. کانی‌های ثانویه نیز شامل اسفن (حاصل از دگرسانی بیوتیت‌ها)، سرسیت، تورمالین، کانی‌های رسی هستند. علاوه بر این اسپینل نیز در حاشیه واکنشی آلومینوسیلیکات‌ها تشکیل شده است. به این صورت که AI مورد نیاز را از کانی آلومینوسیلیکات و Mg و Fe را از بیوتیت دریافت می‌کند.

آنکلاوها و گزنولیت‌ها

شامل گزنولیت‌ها، آنکلاوهای ریزدانه و آنکلاوهای سورومیکاسه هستند. گزنولیت‌های مشاهده شده در مجموعه نفوذی کلاه قاضی اغلب از شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های ژوراسیک هستند که در حین جایگزینی ماگما توسط آن حمل شده‌اند. آنکلاوهای ریزدانه که به صورت لخته‌های مافیک دیده می‌شوند و دارای ترکیب تونالیتی هستند در منطقه مورد بررسی قابل مشاهده هستند. نوع دیگری از آنکلاوها، انواع سورومیکاسه نیز در سنگ‌های گرانیتهای کلاه قاضی به خصوص در گرانودیوریت‌ها به چشم می‌خورند. این آنکلاوها با رنگ تیره و در اندازه‌های سانتی‌متری دیده می‌شوند و از لحاظ بافتی شبیه به سنگ‌های دگرگونی هستند. کانی بیوتیت در این نوع آنکلاوها به فراوانی قابل مشاهده بوده و جهت‌یافتگی مشخصی را نشان می‌دهند. کلریت از محصولات اصلی تجزیه این بیوتیت‌هاست. این نوع آنکلاوها تقریباً تهی از کانی‌های دمای ذوب پایین مانند کوارتز هستند و از این نظر می‌توان آنها را باقی‌مانده‌های ذوب‌نشده سنگ‌های مادر توده‌های مورد بررسی در نظر گرفت.



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی از مجموعه کانی‌ها و بافت‌های مشاهده شده در واحدهای مختلف گرانیتوئیدهای کلاه‌قازی A: بافت هیپ ایدیومورفیک گرانولار در گرانودیوریت‌ها (XPL)، B: نمایش بافت سیمپلکتیک در حاشیه زینوکریست آندالوزیت موجود در گرانودیوریت‌ها (XPL)، C: نمایش بافت پوئی‌کیلیتی در گرانیت‌ها (XPL)، D: تورمالین در گرانیت‌های منطقه دره نیزار (PPL)، E: ادخال‌های ایلمنیت و آپاتیت در بیوتیت‌های موجود در سنگ‌های گرانیتی منطقه (PPL)، F: بافت اپی‌تاکسیال در گرانیت‌ها (PPL)، G: اسفن و ایلمنیت در تونالیت‌های منطقه (PPL) و H: لخته‌های مافیک متشکل از کانی بیوتیت در گرانیت‌های منطقه (PPL). (Plg: پلاژیوکلاز، And: آندالوزیت، Bio: بیوتیت، Or: ارتوکلاز، Tur: تورمالین، Ilm: ایلمنیت، Sph: اسپن (Kretz, 1983))

Fig. 3. micrographic photos of texture and mineral assemblage of different granitoid units of Kolah-Ghazi; A: Hypidiomorphic granular texture of granodiorite (XPL), B: simplectic texture in the margin of andalusite xenocryst in granodiorite (XPL), C: poikilitic texture in granite (XPL), D: Turmaline in the Dare-Neyzar granite, E: inclusion of ilmenite and apatite in the biotite of granite (PPL), F: Epi-taxial texture in granite, G: sphene and ilmenite in tonalite, and H: biotite rich mafic clots in the granite (PPL). (Plg: plagioclase, And: andalusite, Bio: biotite, Or: Orthoclase, Tur: Tourmaline, Ilm: Ilmenite, Sph: sphene (Kretz, 1983))

ژئوشیمی

نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی عناصر اصلی و کمیاب نمونه‌های سنگ کل واحدهای مختلف مجموعه گرانیتوئیدی کلاه‌قازی در جدول ۱ آمده است. در نمودار طبقه‌بندی ژئوشیمیایی (Middlemost, 1985) نمونه‌های مربوط به توده‌های مختلف مجموعه کلاه‌قازی اغلب در گستره‌های ترکیبی گرانودیوریت و گرانیت واقع شده‌اند (شکل ۴-۱). میانگین شاخص اشباع از آلومینیوم نمونه‌های کلاه‌قازی بیش از ۱/۱ بوده و در نمودار تعیین درجه اشباع از آلومین (Shand, 1951) در گستره پرآلومین قرار می‌گیرند (شکل ۴-۲) که می‌تواند بیانگر حضور مقادیر بالای مواد پوسته‌ای برای تشکیل ماهیت فلسیک این توده‌ها باشد. نمونه‌های مورد بررسی در نمودار تعیین دسته ماگمایی (Peccerillo and Taylor, 1976) در محدوده سنگ‌های کالک‌آلکالین پتاسیم بالا قرار می‌گیرند (شکل ۴-۳). تغییرات فراوانی عناصر اصلی و تعدادی از عناصر کمیاب در برابر SiO_2 به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده‌اند. چنان‌که در شکل ۵ دیده می‌شود اکسید عناصر FeO ، Al_2O_3 ، MgO ، TiO_2 و CaO کاهش تدریجی از تونالیت‌ها به سمت گرانیتوئیدهای غنی از کوارتز نشان می‌دهند و عناصر K_2O و Na_2O همراه با افزایش سیلیس در سنگ‌های منطقه روند افزایشی نشان می‌دهند. در عین حال فراوانی عنصر P_2O_5 در سنگ‌های منطقه تغییرات چندانی نشان نمی‌دهد. عناصر کمیاب Sr ، Cr ، Ni و Ba و Zr روند کاهشی و عنصر Rb روند افزایشی را در برابر افزایش سیلیس نشان می‌دهند (شکل ۶). پراکندگی نمونه‌ها در نمودارهای مربوط به عناصر Sr ، Ba و Rb می‌تواند مربوط به دگرسانی نسبی فلدسپارها در سنگ‌های منطقه باشد. نمودارهای عنکبوتی چند عنصری بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. در نمودارهای یادشده کلیه نمونه‌های مجموعه گرانیتوئید کلاه‌قازی روند مشابهی نشان می‌دهند. غنی‌شدگی از LILE مانند Cs ، Rb ، K ، Th و تهی‌شدگی از HFSE مانند Ti ، Sr ، Nb ، Y در کلیه نمونه‌های مورد بررسی در شکل ۷ کاملاً مشهود است. آنومالی منفی Ba می‌تواند بیانگر وجود

مقداری بیوتیت در باقی‌مانده حاصل از ذوب‌بخشی باشد. آنومالی مثبت Pb نشان‌دهنده حضور مقدار قابل توجهی مواد پوسته‌ای در منشأ توده کلاه‌قازی است. از سوی دیگر آنومالی منفی دیده‌شده در عناصر Ti و Nb مشابه با مذاب‌های حاصل از گوشته متاسوماتیزم شده در مناطق فرورانش هستند که می‌تواند نشانه‌ای از نقش این مذاب‌ها در ذوب‌بخشی منبع پوسته‌ای کلاه‌قازی و اختلاط نسبی با مذاب پوسته‌ای باشند. در نمودار عناصر خاکی نادر بهنجار شده نسبت به کندریت (Nakamura, 1974) نیز روند مشاهده‌شده برای کلیه نمونه‌های مورد بررسی یکسان بوده است و کلیه نمونه‌ها غنی‌شدگی از LREE و تهی‌شدگی از HREE نشان می‌دهند. مقادیر La/Yb محاسبه‌شده برای نمونه‌های کلاه‌قازی از ۵ تا ۵ (به‌استثنای دو نمونه با مقادیر بیشتر از ۷۰) با حضور گارنت در منبع مذاب مادر توده کلاه‌قازی چندان سازگار نیست. در نمودار تغییرات عناصر خاکی کمیاب، آنومالی منفی Eu در تمامی نمونه‌های منطقه دیده می‌شود و میانگین مقادیر (Eu/Eu^*) در این نمونه‌ها برابر با ۰/۶۰ است.

بحث و بررسی

روندهای پیوسته و نسبتاً خطی نمونه‌های مورد بررسی در نمودارهای تغییرات عناصر اصلی و کمیاب و همچنین تشابه الگوی عناصر کمیاب و نادر خاکی (شکل ۷) در این نمونه‌ها می‌تواند بیانگر وجود خویشاوندی بین توده‌های گرانیتی، گرانودیوریتی و گرانیتوئید غنی از کوارتز باشد. تفریق پلاژیوکلاز و تبلور کانی‌های آلکالی فلدسپار باعث غنی‌شدگی سنگ‌های گرانیتی از Rb و تهی‌شدگی آنها از Sr نسبت به گرانودیوریت‌ها می‌شود. فراوانی Ba با افزایش محتوای سیلیس سنگ‌ها کاهش نشان می‌دهد که احتمالاً مربوط به فراوانی مودال بیوتیت در سنگ‌های مورد بررسی است (شکل ۶). گرانیت‌های با دمای نسبتاً پایین ابتدا از Zr اشباع می‌شوند؛ بنابراین هم‌زمان با شروع تفریق ماگمایی، جدایش بلورهای زیرین از مذاب آغاز می‌شود و مقدار Zr همراه با پیشرفت تبلوربخشی روند نزولی در برابر افزایش سیلیس طی می‌کند.

جدول ۱. نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی نمونه‌ها مجموعه گرانیتوئیدی کلاه‌قاضی (اکسید عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی و عناصر کمیاب بر حسب ppm). علائم اختصاری عبارتند از: Alf.gr: آلکالی فلدسپار گرانیت؛ Ton: تونالیت؛ Gr: گرانیت؛ Grd: گرانودیوریت؛ X: زنولیت

Table 1. The geochemical results of the Kolah-Ghazi granitoid assemblage (major elements; wt% and trace elements: ppm). The abbreviations are Alf.gr: alkali-feldspar granite; Ton: tonalite; Gr: granite; Grd: granodiorite; X: xenolith

Samples	GS1	GS2	GS3	GS5	GS7	GS10	GS12	GG1	GG2	GG3	GG8
Rock	Alf.gr	Alf.gr	Gr	Ton	Gr	Gr	Alf.gr	Gr	Gr	Grd	Ton
SiO ₂	70.58	74.42	69.55	65.46	66.7	69.96	73.50	73.13	70.03	66.65	68.22
TiO ₂	0.32	0.11	0.39	0.69	0.63	0.38	0.16	0.11	0.33	0.64	0.47
Al ₂ O ₃	14.53	14.52	14.59	15.7	15.62	14.69	13.88	13.99	14.81	15.51	14.68
FeO _t	3.12	0.71	3.74	5.5	4.83	3.15	2.33	1.71	3.17	4.91	4.44
MnO	0.06	0.02	0.07	0.10	0.09	0.06	0.03	0.03	0.07	0.07	0.08
MgO	0.87	0.09	1.06	2.13	1.90	1.02	0.28	0.31	0.98	1.78	1.37
CaO	1.50	0.64	1.59	2.07	1.66	1.95	1.12	1.23	2.01	2.19	2.12
Na ₂ O	2.71	3.57	2.72	2.18	2.06	2.45	2.84	3.24	2.60	2.21	2.67
K ₂ O	4.48	4.63	4.24	3.87	4.27	4.47	4.30	4.68	4.03	3.69	3.29
P ₂ O ₅	0.15	0.36	0.15	0.14	0.14	0.13	0.17	0.13	0.13	3.69	0.14
LOI	1.04	0.81	1.46	2.5	2.21	1.36	1.12	1.25	1.47	2.51	1.7
Ba	363	341	179	457	416	377	548	584	401	367	290
Rb	208.3	215.8	413.1	166.6	181.5	173.8	192.0	185.9	184.5	177.6	156.9
Sr	144.0	137.1	70.4	193.3	220.6	142.3	133.5	134.3	128.1	132.5	143.9
Cs	8.5	15.3	4.9	7.3	8.2	9.5	7.2	6.3	10.3	11.0	5.9
Ga	17.3	17.6	34.8	19.2	18.3	16.6	19.2	18.7	17.1	19.3	18.1
Ta	1.1	1.1	5.1	1.0	1.2	0.8	1.0	1.2	0.9	1.1	1.0
Nb	11.3	11.1	66.9	13.4	12.8	10.2	13.6	12.1	10.3	13.1	11.7
Hf	3.9	3.6	1.7	4.0	4.1	3.3	3.9	2.9	4.6	4.9	3.5
Zr	119.0	120.6	20.1	153.4	151.1	114.5	107.8	79.1	152.1	168.1	123.7
Y	20.9	22.8	4.8	24.5	22.7	27.8	5.0	2.8	30.7	24.2	20.2
Th	14.1	13.7	1.8	13.6	14.3	13.5	16.8	13.7	15.8	16.6	13.4
U	2.0	2.3	1.9	2.3	2.2	1.9	1.5	1.1	3.0	2.3	2.0
Cr	16.7	32.3	*	60.2	67.8	28.5	10.3	22.2	23.5	65.0	25.3
Ni	10.3	9.5	*	20.2	23.2	8.4	3.1	0.9	20.1	22.7	11.2

ادامه جدول ۱. نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی نمونه‌ها مجموعه گرانیتوئیدی کلاه‌قازی (اکسید عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی و عناصر کمیاب بر حسب ppm). علائم اختصاری عبارتند از: Alf.gr: آلکالی فلدسپار گرانیت؛ Ton: تونالیت؛ Gr: گرانیت؛ Grd: گرانودیوریت؛ X: زنولیت

Table 1 (Continued). The geochemical results of the Kolah-Ghazi granitoid assemblage (major elements; wt% and trace elements: ppm). The abbreviations are Alf.gr: alkali-feldspar granite; Ton: tonalite; Gr: granite; Grd: granodiorite; X: xenolith

Samples	GS1	GS2	GS3	GS5	GS7	GS10	GS12	GG1	GG2	GG3	GG8
Rock	Alf.gr	Alf.gr	Gr	Ton	Gr	Gr	Alf.gr	Gr	Gr	Grd	Ton
Co	5.9	7.9	1.0	10.8	12.0	8.3	3.0	2.2	8.4	12.4	8.7
V	51	56	17	112	104	50	*	*	28	87	47
Pb	20.3	20.2	4.5	23.8	19.6	22.4	23.1	17.4	18.4	16.7	16.7
Sn	2	4	9	24	8	4	3	3	2	7	4
W	0.9	1.9	5.4	2.1	2.1	2.6	1.6	4.8	2.0	2.3	1.3
La	29.1	25.9	2.1	31.9	35.0	28.2	39.7	28.7	34.2	32.9	25.6
Ce	61.1	54.5	4.1	67.0	73.7	60.7	87.2	63.5	73.8	70.8	54.7
Pr	6.75	6.22	0.47	7.71	8.19	7.04	9.78	7.27	8.28	8.05	6.18
Nd	25.9	22.3	1.6	30.1	33.0	27.4	36.9	27.5	30.4	31.4	24.1
Sm	5.13	4.76	0.99	5.58	5.82	5.08	7.05	5.63	5.98	5.86	4.60
Eu	0.88	0.83	0.12	1.05	1.02	0.88	1.24	1.14	0.90	1.00	0.92
Gd	4.58	4.38	1.67	4.96	5.18	4.86	4.75	3.29	5.74	5.19	4.15
Tb	0.72	0.71	0.41	0.80	0.79	0.82	0.49	0.28	0.95	0.80	0.67
Dy	3.96	3.98	1.32	4.29	4.01	4.65	1.36	0.76	5.40	4.43	3.69
Ho	0.73	0.79	0.13	0.87	0.78	0.96	0.14	0.07	1.11	0.87	0.71
Er	2.13	2.24	0.23	2.46	2.24	2.96	0.25	0.13	3.03	2.48	2.02
Tm	0.30	0.32	0.03	0.38	0.34	0.42	0.04	0.03	0.44	0.35	0.29
Yb	1.94	2.25	0.17	2.36	2.08	2.73	0.29	0.26	2.98	2.34	1.97
Lu	0.28	0.33	0.03	0.37	0.33	0.43	0.04	0.03	0.43	0.36	0.28
Eu/Eu*	0.55	0.56	0.28	0.61	0.57	0.54	0.65	0.81	0.47	0.55	0.64
(La/Yb) _n	10.6	8.2	8.8	9.6	11.9	7.3	97.0	78.2	8.1	10.0	9.2

ادامه جدول ۱. نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی نمونه‌ها مجموعه گرانیتوئیدی کلاه‌قازی (اکسید عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی و عناصر کمیاب بر حسب ppm). علائم اختصاری عبارتند از: Alf.gr: آلکالی فلدسپار گرانیت؛ Ton: تونالیت؛ Gr: گرانیت؛ Grd: گرانودیوریت؛ X: زنولیت

Table 1 (Continued). The geochemical results of the Kolah-Ghazi granitoid assemblage (major elements; wt% and trace elements: ppm). The abbreviations are Alf.gr: alkali-feldspar granite; Ton: tonalite; Gr: granite; Grd: granodiorite; X: xenolith

Samples	GG11	GG13	GG15	GG16	GG17	GL2	GL3	GL5	GN49	GN55	GN56
Rock	Gr	X	Grd	Gr	Gr	Gr	Grd	Gr	Gr	Gr	Gr
SiO ₂	66.37	55.67	66.67	70.67	69.3	66.85	64.77	67.04	66.79	64.59	66.36
TiO ₂	0.60	0.93	0.55	0.32	0.37	0.57	0.89	0.56	0.616	0.70	0.65
Al ₂ O ₃	15.24	16.87	15.40	15.34	15.19	15.04	15.84	15.04	15.54	15.73	15.53
FeO _t	4.73	8.5	4.53	2.31	3.06	4.54	5.37	4.42	4.61	5.32	4.88
MnO	0.08	0.18	0.08	0.05	0.06	0.09	0.11	0.08	0.09	0.09	0.08
MgO	1.73	5.53	1.70	0.87	1.06	1.65	1.83	1.51	1.70	2.30	1.70
CaO	3.01	5.62	2.47	1.89	2.48	3.04	3.73	3.01	2.38	2.80	2.43
Na ₂ O	2.49	1.46	2.51	5.04	3.21	2.45	2.72	2.38	2.10	2.42	2.15
K ₂ O	3.44	2.42	3.47	1.88	3.53	3.40	2.56	3.61	3.68	3.40	3.91
P ₂ O ₅	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.19	0.13	0.14	0.14	0.15
LOI	1.63	2.68	1.95	2.1	2.06	1.7	1.36	1.7	2.8	1.89	2.58
Ba	336	350	386	234	426	348	274	386	373	403	387
Rb	148.6	145.7	173.0	97.7	152.1	154.9	150.1	158.4	139.4	164.3	177.2
Sr	136.9	150.9	162.2	162.1	162.5	140.4	145.7	138.3	162.9	217.7	156.9
Cs	9.8	8.2	8.7	5.1	6.9	10.6	14.2	8.5	4.9	11.7	5.1
Ga	17.5	17.8	19.1	17.3	18.2	18.1	19.7	18.2	19.0	19.9	19.0
Ta	0.9	0.6	1.0	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.1	1.0
Nb	12.4	6.8	11.5	9.9	10.3	11.3	15.6	11.4	12.1	12.8	12.5
Hf	4.5	2.5	4.5	3.6	5.1	3.6	3.8	4.2	4.8	5.2	4.7
Zr	151.6	96.7	150.9	129.5	172.9	134.4	133.7	160.6	156.6	176.2	158.0
Y	24.6	23.6	29.7	33.4	29.1	25.5	24.9	28.1	24.7	25.3	25.7
Th	14.5	6.5	14.5	15.6	15.9	15.8	7.2	14.7	16.5	15.9	15.6
U	2.4	1.6	2.1	1.6	2.4	1.9	1.6	1.8	2.1	1.9	2.2
Cr	54.8	301.8	40.8	9.7	21.0	45.7	4.2	49.2	61.4	72.3	57.9
Ni	15.5	41.1	15.1	8.3	13.1	13.4	13.1	13.6	20.3	18.4	20.8
Co	11.6	26.3	11.7	5.4	6.9	11.0	13.2	10.9	11.3	13.1	10.5
V	73	214	76	21	31	68	41	68	78	95	80
Pb	18.3	9.9	16.6	11.6	15.5	16.9	16.9	17.5	19.3	13.7	17.6
Sn	5	10	4	4	3	3	5	4	5	4	8
W	1.9	2.2	1.6	1.0	1.9	2.2	2.3	3.8	1.6	2.1	2.2

ادامه جدول ۱. نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی نمونه‌ها مجموعه گرانیتوئیدی کلاه‌قازی (اکسید عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی و عناصر کمیاب بر حسب ppm). علائم اختصاری عبارتند از: Alf.gr: آلکالی فلدسپار گرانیت؛ Ton: تونالیت؛ Gr: گرانیت؛ Grd: گرانودیوریت؛ X: زنولیت

Table 1 (Continued). The geochemical results of the Kolah-Ghazi granitoid assemblage (major elements; wt% and trace elements: ppm). The abbreviations are Alf.gr: alkali-feldspar granite; Ton: tonalite; Gr: granite; Grd: granodiorite; X: xenolith

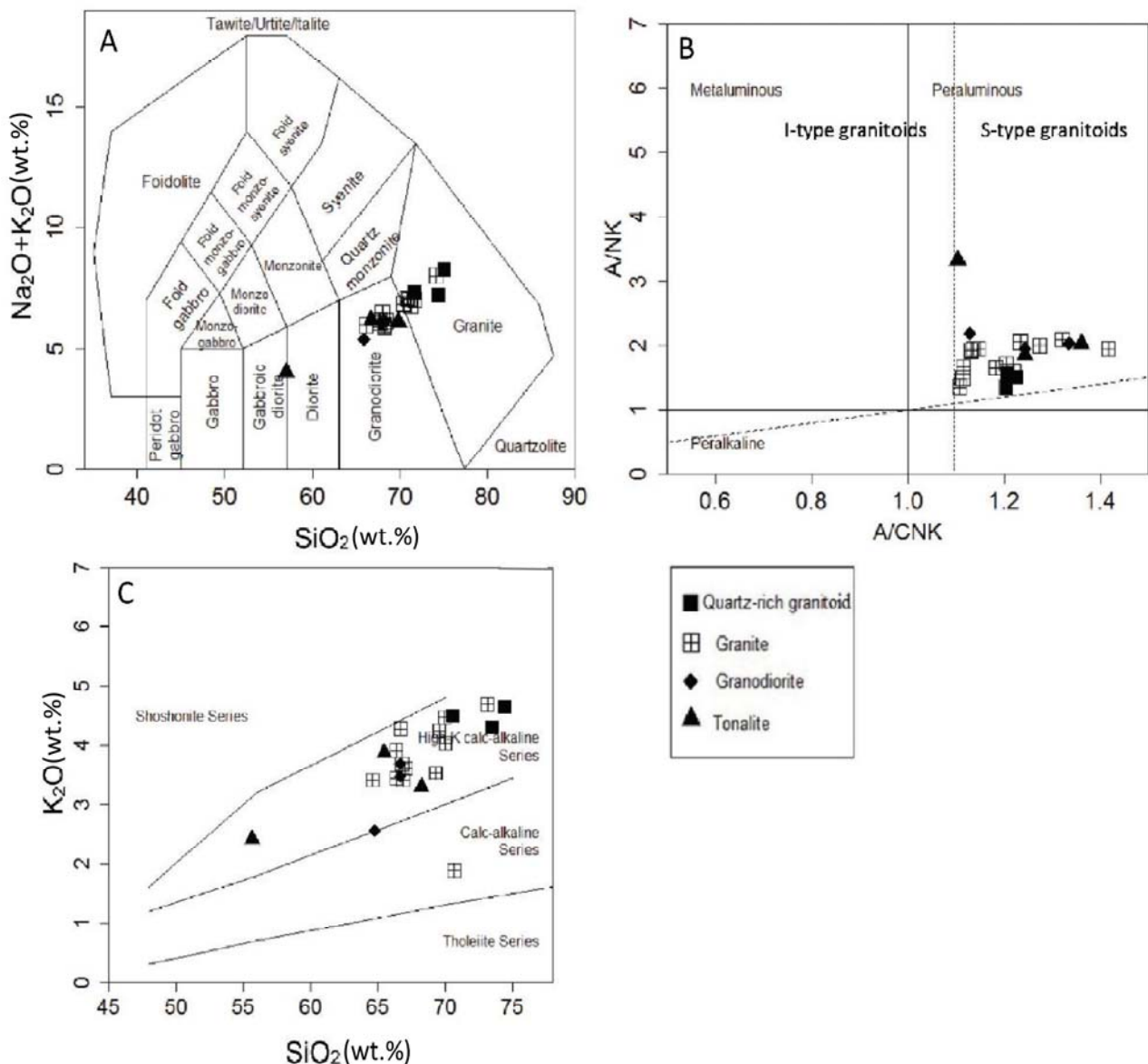
Samples	GG11	GG13	GG15	GG16	GG17	GL2	GL3	GL5	GN49	GN55	GN56
Rock	Gr	X	Grd	Gr	Gr	Gr	Grd	Gr	Gr	Gr	Gr
La	33.1	17.3	34.1	27.8	37.0	31.8	19.4	31.7	34.2	35.3	32.8
Ce	70.1	36.2	73.0	61.6	80.3	68.7	43.0	68.3	73.6	75.6	71.7
Pr	8.06	4.26	8.16	7.20	8.66	7.65	4.98	7.33	8.05	8.28	7.90
Nd	30.9	17.4	31.4	29.2	34.1	29.1	20.4	29.7	31.5	32.7	31.1
Sm	5.89	3.85	5.83	5.92	6.21	5.66	4.69	5.46	5.70	5.92	5.78
Eu	1.02	1.09	1.03	0.95	1.02	1.00	1.06	1.04	1.01	1.08	0.96
Gd	5.18	3.95	5.46	5.71	5.86	5.02	4.74	5.09	5.03	5.44	5.23
Tb	0.82	0.69	0.92	1.00	0.92	0.80	0.85	0.84	0.81	0.85	0.83
Dy	4.67	4.43	5.29	5.97	5.40	4.79	4.97	5.06	4.65	4.69	4.93
Ho	0.90	0.88	1.08	1.24	1.04	0.97	0.96	1.01	0.91	0.91	0.93
Er	2.40	2.49	2.99	3.69	3.03	2.64	2.58	2.86	2.52	2.56	2.74
Tm	0.35	0.36	0.42	0.55	0.44	0.38	0.36	0.43	0.38	0.37	0.41
Yb	2.25	2.65	2.76	3.51	2.87	2.67	2.23	2.76	2.47	2.45	2.71
Lu	0.34	0.39	0.39	0.52	0.42	0.39	0.34	0.40	0.37	0.38	0.40
Eu/Eu*	0.56	0.85	0.56	0.50	0.52	0.57	0.69	0.60	0.58	0.58	0.53
(La/Yb) _n	10.11	4.6	8.8	5.6	9.1	8.4	6.2	8.1	9.8	10.2	8.6

حضور ایلمنیت، آپاتیت، اسفن و بیوتیت در تفاله حاصل از ذوب سنگ منشأ است. وجود آنکلاوهای غنی از بیوتیت در توده‌های منطقه می‌تواند تأییدی بر حضور این کانی در تفاله باشد. آنومالی منفی Eu همانند Sr با تبلور تفریقی کانی‌های فلدسپار و یا حضور پلاژیوکلاز در باقی‌مانده ذوب همخوانی

آنومالی منفی Sr در نمودار عنکبوتی که در تمامی نمونه‌های منطقه از گرانودیوریت تا گرانیت دیده می‌شود، می‌تواند مربوط به تفریق پلاژیوکلاز کلسیم‌دار در طی تحولات ماگمای مادر توده نفوذی کلاه‌قازی و یا حضور پلاژیوکلاز در منبع ذوب و در تعادل با مذاب باشد. آنومالی منفی Ti نیز نشانه‌ای احتمالی از

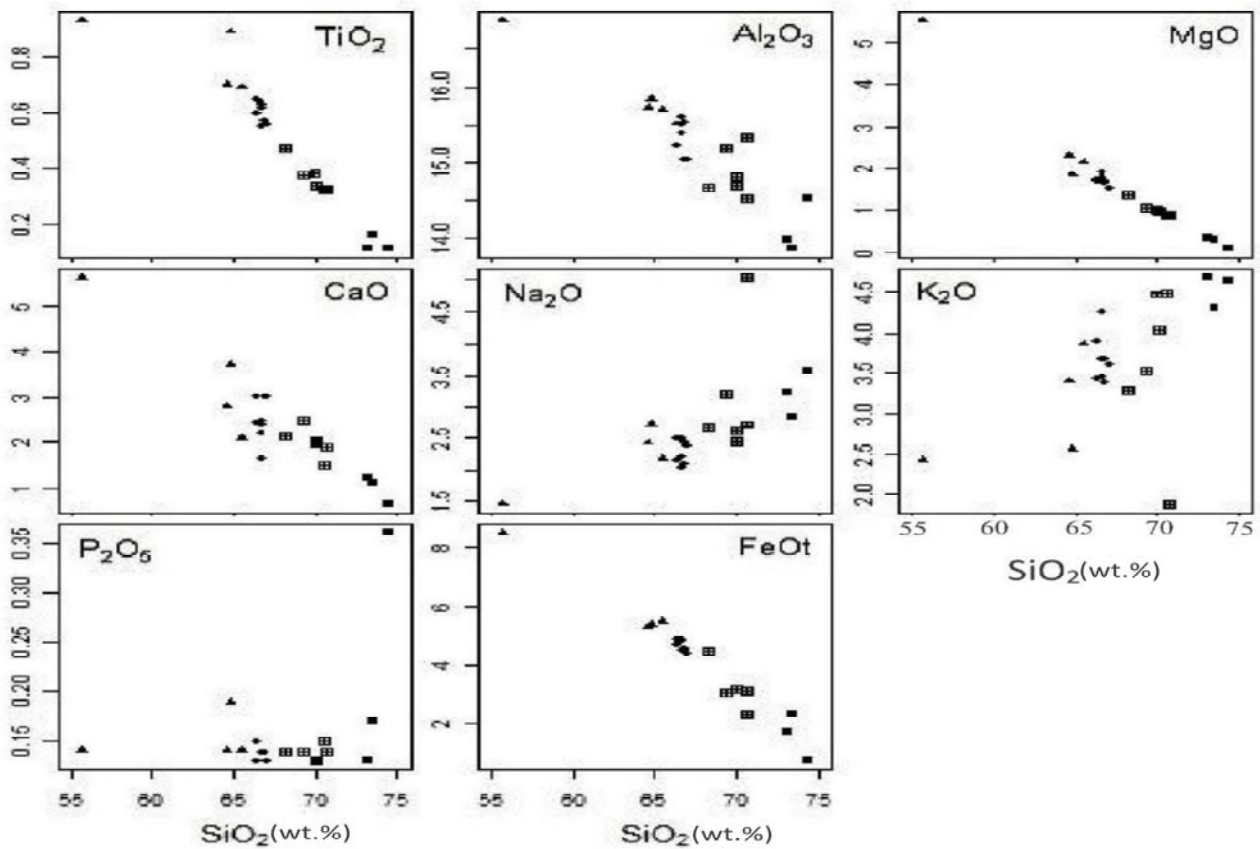
HFSE و HREE بیانگر ماگماتیسم مرتبط با فرورانش است. در عین حال برخی از محققان (Rollinson, 1993; Kuster and Harms, 1998) الگوی یادشده برای عناصر کمیاب و نادر خاکی را ویژگی سنگ‌های پوسته قاره‌ای و شرکت پوسته در فرآیندهای ماگمایی می‌دانند.

دارد. غنی‌شدگی نسبی در LILE و LREE و تهی‌شدگی نسبی در HFSE و HREE ($(La/Yb)_N = 5-11$) بیانگر نبود گارنت و یا مقدار ناچیز این کانی در باقی‌مانده ذوب است. در بسیاری از منابع (Pearce et al., 1984; Saunders et al., 1980) غنی‌شدگی از LILE و LREE و تهی‌شدگی از



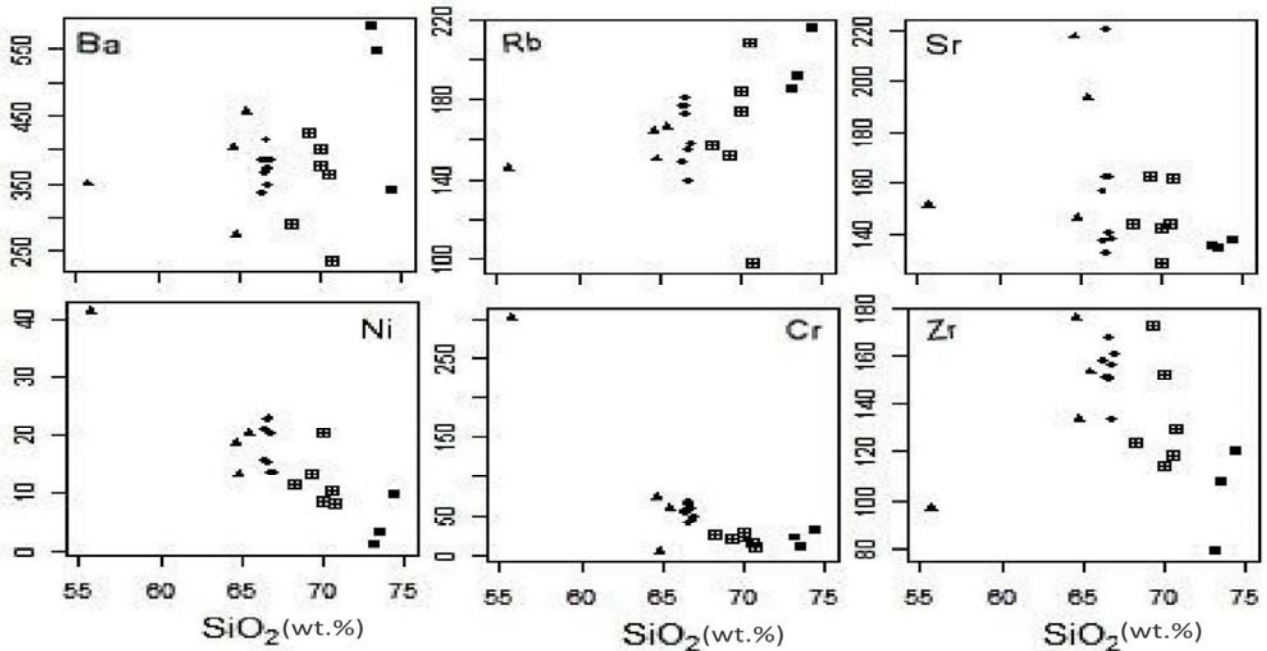
شکل ۴. A: نمودار رده‌بندی ژئوشیمیایی نمونه‌های کلاه‌قازی (Middlemost, 1985). B: نمودار تعیین شاخص اشباع آلومین (Shand, 1951). C: نمودار تعیین دسته ماگمایی (Peccerillo and Taylor, 1976) با استفاده از مقادیر اکسیدهای عناصر اصلی

Fig. 4. A: Geochemical classification diagram for the Kolah-Ghazi samples (Middlemost, 1985), B: Aluminium index diagram (Shand, 1951), and C: magmatic series diagram (Peccerillo and Taylor, 1976). Major oxide values used in all diagrams



شکل ۵. نمودارهای هارکر عناصر اصلی از نمونه‌های گرانیتوئیدهای کلاه‌قازی. علایم مشابه شکل ۴ هستند.

Fig. 5. Major elements Harker diagrams of the Kolah-Ghazi granitoid samples. Symbols are similar to Fig. 4.

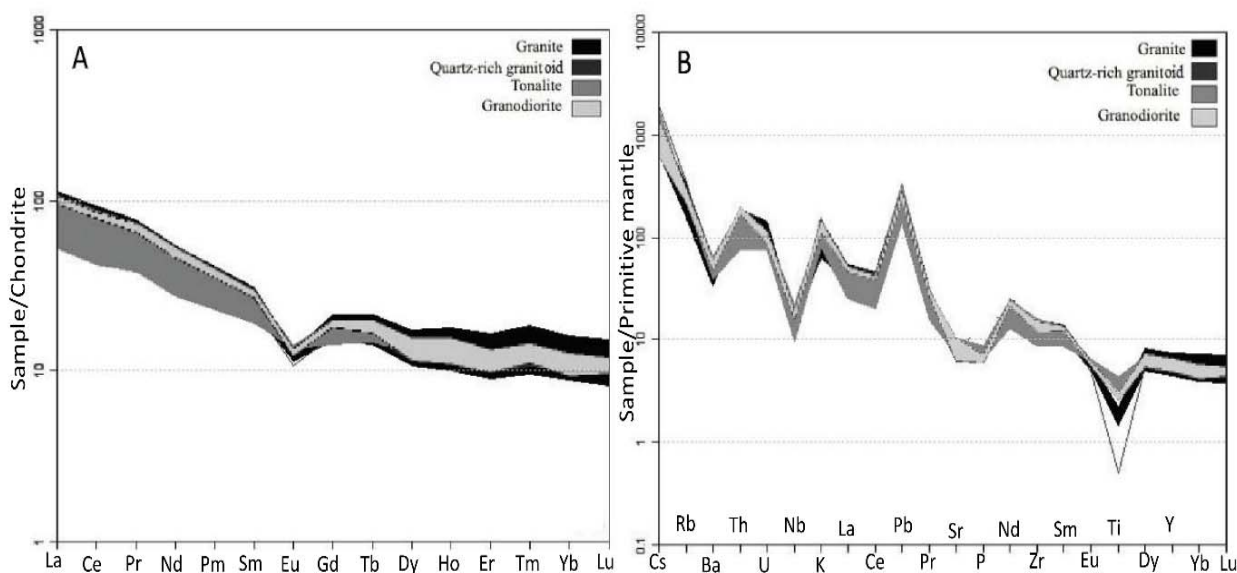


شکل ۶. نمودارهای هارکر عناصر کمیاب (برحسب ppm) در برابر سیلیس در نمونه‌های منطقه کلاه‌قازی. علایم مشابه شکل ۴ هستند.

Fig. 6. Trace elements (ppm) Harker diagrams vs. silica in the Kolah-Ghazi samples. Symbols are similar to Fig. 4.

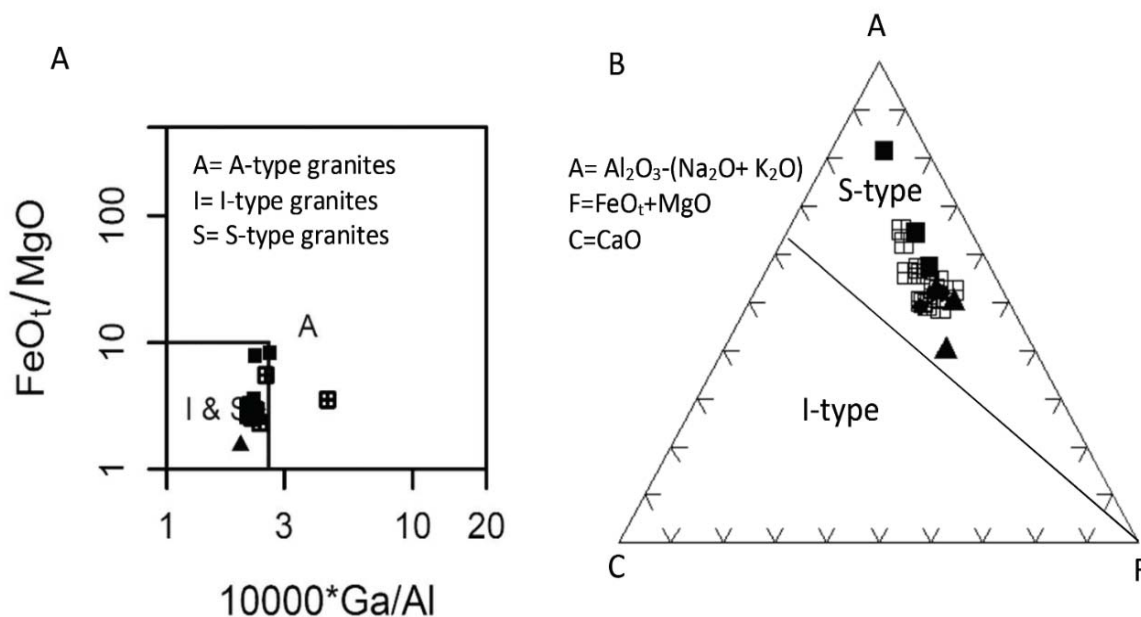
توده‌ها پیشنهاد می‌کند. غنی‌شدگی از عناصر ناسازگار (مانند La, K, و Rb) و آنومالی منفی عناصر Sr, Nb, Ti, و Ba نیز شاهدی دیگر بر مذاب‌های حاصل از منشأ پوسته‌ای است (Chappell and White, 1992) برخی پژوهشگران (Sylvester, 1998) نشان داده‌اند که نسبت‌های CaO/Na_2O در گرانیتوئیدهای پرآلومین نوع S توسط مقدار پلاژیوکلاز در سنگ منشأ کنترل می‌شود. بنابراین مذاب‌های پرآلومین تولیدشده از منابع غنی از رس (فقیر از پلاژیوکلاز) نسبت‌های CaO/Na_2O کمتری (< 0.3) از مذاب‌های مشتق‌شده از منابع فقیر از رس (غنی از پلاژیوکلاز) (> 0.3) دارند. نسبت 0.9 همراه با نمودار توصیفی تعیین منشأ مذاب (Sylvester, 1998)، یک منشأ فقیر از رس همانند متاگریوک را برای گرانیت کلاه‌قازی پیشنهاد می‌کند (شکل ۹). به‌علاوه گرانیت مزبور منشأ مشابهی با گرانیتوئیدهای نوع S به شدت پرآلومین نوار چین‌خورده لاخلان نشان می‌دهند. سنگ منشأ غنی از گریوک برای این گرانیت‌ها می‌تواند آناتکسی یک ورقه قاره‌ای نابالغ را پیشنهاد کند.

به‌طور کلی ویژگی‌های صحرایی، سنگ‌شناسی و ژئوشیمیایی مجموعه گرانیتوئیدی کلاه‌قازی از جمله وجود رگه‌های پگماتی در توده‌های منطقه، مشاهده آنکلاوهای غنی از میکا (بیوتیت) و نبود آنکلاوهای بازیک، نبود هورنبلند و کانی اولیه اسفن، حضور کانی‌های دگرگونی نظیر گروه آلومینوسیلیکات‌ها (آندالوزیت و سیلمانیت) و همچنین گارنت، فراوانی بیشتر ایلمینیت نسبت به مگنتیت، مقادیر A/CNK بالاتر از $1/1$ (شکل ۴) و فراوانی بیش از 3% کروندوم در نورم نمونه‌های مورد بررسی، همگی دلالت بر منشأ آناتکسی گرانیتوئیدهای یادشده دارند. برای بررسی نوع گرانیتوئیدهای کلاه‌قازی از نمودارهای انواع گرانیتوئیدها (Chappell and White, 1992; Whalen et al., 1987) استفاده شد (شکل ۸). چنان‌که در این نمودارها دیده می‌شود، شواهد ژئوشیمیایی نمونه‌های منطقه با گرانیتوئیدهای S-type همخوانی دارد که خود تأییدی بر مشاهدات صحرایی، پتروگرافی و سایر شواهد ژئوشیمیایی است. از سوی دیگر ویژگی پرآلومین توده‌های کلاه‌قازی، حضور مقادیر بالای متشکله پوسته‌ای را در منشأ این



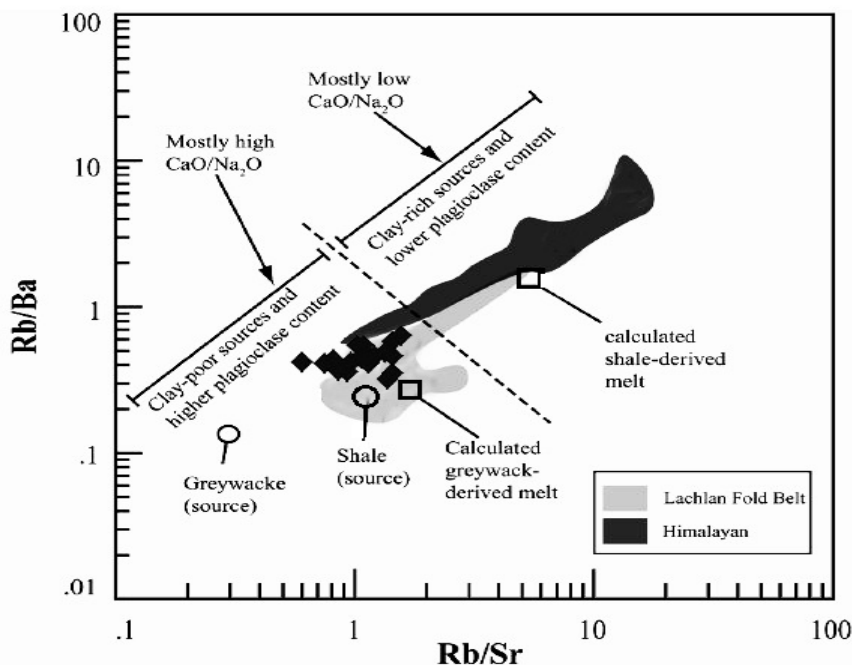
شکل ۷. A: الگوی پراکندگی عناصر نادر خاکی برای نمونه‌های مختلف گرانیتوئیدهای کلاه‌قازی بهنجارشده نسبت به مقادیر کندریت (Nakamura, 1974) و B: الگوی پراکندگی عناصر کمیاب برای نمونه‌های گرانیتوئیدهای کلاه‌قازی بهنجارشده نسبت به مقادیر گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7. A: Rare earth elements pattern of the Kolah-ghazi samples normalized to Chondrite (Nakamura, 1974), and B: Spider diagrams for the Kolah-Ghazi granitoids normalized to primitive mantle (Sun and McDonough, 1989)



شکل ۸. موقعیت نمونه‌های کلاه‌قازی در نمودارهای تفکیک‌کننده انواع گرانیتوئیدها A: نمودار ولن و همکاران (Whalen et al., 1987) و B: نمودار چاپل و وایت (Chappell and White, 1992). علائم مشابه شکل ۴ هستند.

Fig. 8. The situation of the Kolah-Ghazi samples in discrimination diagrams after A: (Whalen et al., 1987) and B: (Chappell and White, 1992). Symbols are similar to Fig. 4.

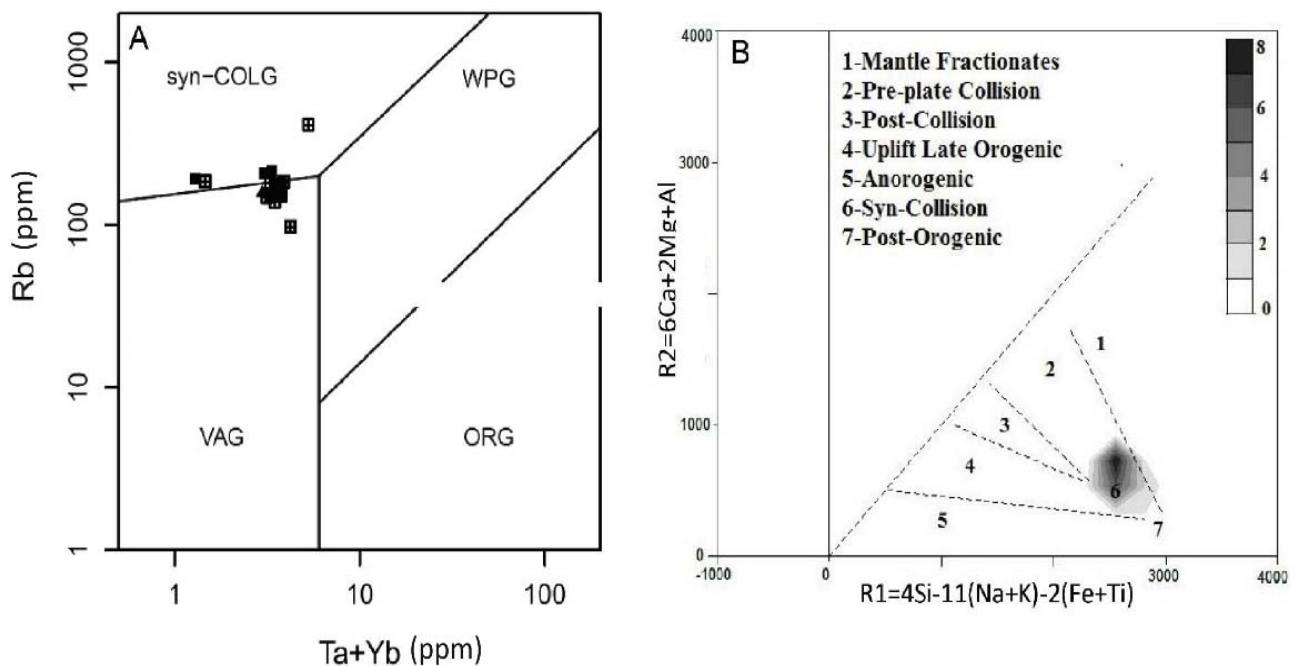


شکل ۹. نمودار Rb/Sr در مقابل Rb/Ba برای تعیین منشأ گرانیتوئیدهای به‌شدت پرآلومین. قلمرو گرانیت‌های هیمالیا و نوار چین خورده لاخلان، خط ناپیوسته و مذاب‌های محاسبه‌شده از سیلوستر (Sylvester, 1998) اقتباس شده است. گرانیت کلاه‌قازی با علامت \blacklozenge نشان داده شده است.

Fig. 9. Rb/Sr vs. Rb/Ba diagram for determination of origin of peraluminous granitoid. Himalaya granite, Lachlan folded belt, dashed line and calculated melts are after Sylvester (1998). The Kolah-Ghazi samples shown by \blacklozenge

۱۰-A دیده می‌شود، نمونه‌های مورد بررسی در مرز بین محدوده‌های گرانیتوئیدهای مرتبط با کمان آتشفشانی و هم‌زمان با برخورد قرار می‌گیرند. در نمودار R1-R2 (Batchelor and Bowden, 1985) نیز نمونه‌های مورد بررسی با میزان بالایی از Na، Si و K در محدوده هم‌زمان با برخورد قرار می‌گیرند (شکل ۱۰-B).

برای تعیین جایگاه زمین‌ساختی توده‌های گرانیتوئیدی نمودارهای مختلفی پیشنهاد شده است که کاربردی‌ترین آنها نمودارهایی هستند که بر اساس فراوانی عناصر کمیاب کم تحرک در برابر فرآیندهای دگرسانی و هوازگی طراحی شده است. بر اساس رده‌بندی پیرس و همکاران (Pearce et al., 1984) محیط زمین‌ساختی گرانیتوئیدها بر اساس فراوانی عناصر کمیاب، به چهار گروه اصلی تقسیم می‌شوند. چنان‌که در شکل



شکل ۱۰. A: نمودار Rb-(Y+Nb) برای تعیین موقعیت زمین‌ساختی مجموعه گرانیتوئیدی کلاه‌قازی (Pearce et al., 1984) قلمرو گرانیت‌های پس از برخورد و ترکیب پوسته قاره بالایی UCC از پیرس و همکاران (Pearce et al., 1984)، (UCC: continent- continent collision) و B: نمودار R1-R2 (Batchelor and Bowden, 1985). علامت‌ها مشابه شکل ۴ و مقادیر کلیه عناصر استفاده‌شده بر حسب ppm هستند. غلایم اختصاری عبارتند از: syn-COLG: گرانیت‌های هم‌زمان با برخورد، WPG: گرانیت‌های درون صفحه‌ای، VAG: گرانیت‌های کمان آتشفشانی، ORG: گرانیت‌های پشته میان اقیانوسی

Fig. 10. A: Rb vs. Y+Nb discrimination diagram (Pearce et al., 1984) for the Kolah-ghazi samples, post collisional granites field and upper continental crust composition are after Pearce et al (1984), and B: R1-R2 diagram (Batchelor and Bowden, 1985). Symbols are similar to Fig. 4. All elements values are based on ppm. Abbreviations are: Syn-COLG: syn-collisional granites, WPG: Within plate granites, VAG: Volcanic arc granites, ORG: Mid-ocean ridge granites

دیگر شواهد صحرایی، پتروگرافی و ژئوشیمیایی نشان‌دهنده منشأ آتاتکسی و نوع S برای توده‌های مورد بررسی است. باید توجه داشت که گرانیت‌های S-type تنها به محیط‌های

همان‌طور که در بخش زمین‌شناسی نیز گفته شد، شواهد صحرایی در منطقه مورد بررسی بیانگر سن تقریبی ژوراسیک بالایی برای مجموعه گرانیتوئیدی کلاه‌قازی است. از سوی

ساختاری سندج- سیرجان واقع شده است. بر اساس شواهد زمین‌شناسی، سن احتمالی این مجموعه ژوراسیک بالایی بوده و شامل چهار گروه سنگی گرانودیوریت، گرانیت، گرانیتوئید غنی از کوارتز و به مقدار کمتر تونالیت است. کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده این مجموعه شامل کوارتز، پلاژیوکلاز و فلدسپار آلکالن بوده و بیوتیت تنها کانی فرومیزین این مجموعه نفوذی است. حضور کانی‌های آندالوزیت، سیلیمانیت و گارنت در این مجموعه گرانیتوئیدی نشان‌دهنده منشأ رسوبی توده‌های مورد بررسی است. به‌طور کلی بر اساس مطالعات صحرایی، پتروگرافی و ژئوشیمیایی، سنگ‌های مجموعه نفوذی مورد بررسی در گروه گرانیتوئیدهای نوع S قرار می‌گیرند و دارای ماهیت کالک‌آلکالن و از نوع پرآلومین هستند. در نمودارهای تغییرات الگوی عناصر کمیاب و نادر خاکی، نمونه‌های کلاه قاضی غنی‌شدگی از عناصر LILE و LREE و تهی‌شدگی از عناصر HFSE و HREE نشان می‌دهند. بر اساس شواهد زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی، مجموعه نفوذی کلاه قاضی در طی تزریق مذاب‌های مافیک حاصل از فرورانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتیس به زیر صقحه ایران و ذوب‌بخشی سنگ‌های پوسته‌ای ایجاد شده است.

برخوردی قاره- قاره اختصاص نداشته و حتی در برخی از منابع به تشکیل این نوع از گرانیت‌ها در محیط کشش پس از برخورد در محیط کمان ماگمایی (Collins and Richards, 2008) اشاره شده است. با توجه به این که فاز کوهزایی سیمین پسین که حاصل برخورد صفحه ایران با توران بوده عمدتاً در بخش‌های شمالی ایران تأثیر گذاشته و از سوی دیگر نمونه‌های کلاه قاضی دارای ویژگی‌های ژئوشیمیایی حدواسط بین توده‌های حاصل از ذوب پوسته قاره‌ای و توده‌های ایجادشده در محیط‌های فرورانش هستند به نظر می‌رسد که مهمترین عامل در ایجاد توده کلاه قاضی تزریق مذاب‌های گوشته‌ای به داخل پوسته قاره‌ای و ذوب‌بخشی سنگ‌های پوسته‌ای می‌باشد. سیالات و حرارت حاصل از این مذاب‌ها باعث ذوب‌بخشی پوسته و ایجاد مذاب گرانیتوئیدی شده‌اند. در چنین شرایطی اختلاط بین مذاب حاصل از گوشته متاسوماتیزم شده (حاصل از فرورانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتیس به زیر صقحه ایران) و مذاب حاصل از ذوب‌بخشی پوسته می‌تواند باعث ایجاد ویژگی‌های ژئوشیمیایی مشابه ماگماهای محیط فرورانش در گرانیتوئید S-type کلاه قاضی شود.

نتیجه‌گیری

مجموعه گرانیتوئیدی کلاه قاضی در جنوب اصفهان و در پهنه

References

- Batchelor, R.A. and Bowden, P., 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*, 48(1): 43–55.
- Chappell, B.W. and White, A.J.R., 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, 83: 1–2.
- Collins, W.J. and Richards, S.W., 2008. Geodynamic significance of S-type granites in circum-Pacific orogens. *Geology*, 36(7): 559–562.
- Darvishzadeh, A., 1991. *Geology of Iran*. Neda publication, Tehran, 901 pp.
- Kretz, R., 1983. Symbols for rock forming minerals. *American Mineralogist*, 68(1–2): 277–279
- Kuster, D. and Harms, U., 1998. Post-collisional potassic granitoids from the southern and northwestern parts of the Late Neoproterozoic East African Orogen: a review. *Lithos*, 45(1–4): 177–195.
- Middlemost, E.A.K., 1985. *Magma and magmatic rocks: An Introduction to igneous petrology*. Longmans, London, 266 pp.
- Nabavi, M.H., 1976. *Introduction to geology of Iran*. Geological survey of Iran publication, Tehran, 135 pp.

- Nakamura, N., 1974. Determination of REE, Ba, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochemica Cosmochimica Acta*, 38(5): 757–775.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983.
- Peccerillo, A. and Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kasta monon area, Northern Turkey. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 58: 63–81.
- Rollinson, H.R., 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Scientific and Technical, New York, 352 pp.
- Saunders, A.D., Tarney, J. and Weaver S.D., 1980. Transverse geochemical variations across the Antarctic Peninsula: implications for the genesis of calc-alkaline magmas. *Earth and Planetary Science Letters*, 46(4): 344–360.
- Shand, S.J., 1951. *The study of rocks*. Cambridge university press, London, 236 pp.
- Streckeisen, A., 1976. To each plutonic rocks its proper name. *Earth-Science Review*, 12(1): 1–33.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A.D. Saunders and M.J. Norry (Editors), *magmatism in ocean basins*. Geological Society of London, London, Special Publication, 42: pp 313–345.
- Sylvester, P.J., 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45(1-4): 29–44.
- Tabatabaei-Manesh, S.M., 1994. Investigation of geology and petrology of Kolah-Ghazi intrusion (south, southeast of Esfahan), M.Sc. thesis, university of Esfahan, Esfahan, Iran, 175 pp.
- Tillman, J.E., Poosti, A., Rossello, S. and Eckert, A., 1981. Structural evolution of Sanandaj-Sirjan ranges near Esfahan, Iran. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 65(4): 674–68.
- Whalen, J.B., Currie, K.L. and Chappell, B.W., 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419.
- Zahedi, M., 1994. Geological map of Shahrkord (Scale: 1/250000). Geological survey of Iran. (1 sheet)



Geochemistry and petrogenesis of the Kolah-Ghazi granitoid assemblage, south of Esfahan

Jamshid Ahmadian^{1*}, Hajar Gholamian², Ali Khan Nasr Esfahani² and Maryam Honarmand³

1) Department of Geology, Payame Noor University, Iran

2) Department of Geology, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

3) Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, 45137-66731, Iran

Submitted: May 2, 2016

Accepted: Feb. 11, 2017

Keywords: *Calc-alkaline, S-type granite, Jurassic, Kolah-Ghazi, Sanandaj-Sirjan*

Introduction

The Kolah-Ghazi granitoid assemblage is located in the south of Esfahan and in the Sanandaj-Sirjan magmatic-metamorphic zone. The Sanandaj-Sirjan zone is extended for 1500 km from Sirjan in the southeast to Sanandaj in the northwest of Iran and is situated in the west of Central Iranian terrane.

The Sanandaj-Sirjan zone represents the metamorphic belt of the Zagros orogeny which is part of the Alpine- Himalayan orogenic belt. The Kolah-Ghazi granitoid assemblage consists of granodiorite, granites, quartz-rich granitoid and minor tonalite. The aim of this paper is to represent the mineralogy, geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of this plutonic assemblage.

Materials and methods

More than 60 samples representing all of the rock units in the study area were chosen for microscopic studies. Then, 22 samples were selected for geochemical studies. The major elements were determined with XRF in the Naruto University, Japan. The trace and rare earth elements were analyzed by ICP-MS in the Acmelab, Canada. The geochemical results are presented in Table 1.

Results and Discussion

The Kolah-Ghazi granitoid assemblage intruded

into the Jurassic sedimentary units and overlaid by lower Cretaceous sandstone and conglomerate which suggest Upper Jurassic as the possible age of the Kolah-Ghazi intrusion. Based on the modal studies, this granitoid assemblage is comprised of granite, granodiorite, quartz-rock granitoid and tonalite with different igneous textures including symplectic, myrmekitic, rapakivi, poikilitic and porphyroid. There are some xenoliths, microgranular enclaves and sur micaceous enclaves in the Kolah-Ghazi granitoid assemblage. Xenoliths are mostly derived from Jurassic shale and sandstones which have been trapped in the magma. The sur micaceous enclaves have tonalite composition. The sur micaceous enclaves are biotite-rich rock fragments which display metamorphic texture. The sur micaceous enclaves are classified as restite since they are poor in quartz. The essential minerals in this magmatic assemblage are quartz, plagioclase, alkali-feldspar and biotite as the only ferromagnesian mineral. There was no hornblende in the studied samples. The presence of andalusite, sillimanite and garnet in these rocks point to the sedimentary source of these granitoid melts. Zircon, apatite and opaque minerals occurred as accessory minerals. The secondary minerals included sphene, tourmaline, clay minerals, chlorite and opaque minerals. The Kolah-Ghazi rock samples plot on the granite and granodiorite fields on the geochemical classification diagrams. The geochemistry of these

*Corresponding authors Email: jamshidahmadian@yahoo.com

plutonic rocks show peraluminous, high K-calc alkaline features. On the Harker variation diagrams, it can be observed that the Al_2O_3 , FeO, MgO, TiO_2 and CaO contents decrease with the increase in SiO_2 , whereas K_2O and Na_2O show an ascending trend with increasing SiO_2 . Moreover, the fractionation of plagioclase and the crystallization of alkali-feldspar caused the observed trends of Rb and Sr in the Harker diagrams. Ba contents decrease with increasing SiO_2 which is relevant to the biotite fractionation. All of the analyzed samples show similar patterns in the chondrite-normalized trace elements and the REE diagrams. All samples show LILE and LREE enrichment and HFSE and HREE depletion. The negative anomaly of Sr may be related to the lack of calcic-plagioclase in these samples or suggest the plagioclase rich restite during partial melting of the parental rock. The latter is in agreement with the Eu anomaly that appeared in the REE diagram. All of the Kolah-Ghazi samples show linear trends in the major and trace elements versus SiO_2 diagrams and display similar REE patterns suggesting close relationship in the source and magmatic history.

The field, petrography and geochemical evidences such as pegmatite veins in the pluton, biotite rich enclaves, lack of hornblende and titanite, occurrence of metamorphic minerals (e.g., garnet, andalusite and sillimanite), the predominance of ilmenite, A/CNK values ($\text{A/CNK} > 1$), and crandom contents (more than 3% in norm) suggest that the Kolah-Ghazi plutonic assemblage can be classified as S-type granitoids. Moreover, all of the Kolah-Ghazi samples plot on the S-type field of the granite classification diagrams (Whalen et al., 1987; Chappell and White, 1992)

which is in good agreement with mineralogical evidences.

The sedimentary source, mostly shale and greywacke, can be suggested for Kolah-Ghazi melts according to the Rb/Sr vs. Rb/Ba diagram (Sylvester, 1998). Several discrimination diagrams such as Rb vs. Ta+Yb (Pearce et al., 1984) and R1-R2 (Batchelor and Bowden, 1985) were used to determine the tectonic setting of the Kolah-Ghazi granitoids. The Kolah-Ghazi samples lied between the fields of magmatic arc and syn-collisional granitoids in the discrimination diagrams.

The geochemistry of the studied samples suggest a syntectonic environment for the Kolah-Ghazi granitoids which may be related to the late Cimmerian orogenic phase.

References

- Batchelor, R.A. and Bowden, P., 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*, 48(1): 43–55.
- Chappell, B.W. and White, A.J.R., 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, 83: 1–2.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983.
- Sylvester, P.J., 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45(1-4): 29–44.
- Whalen, J.B., Currie, K.L. and Chappell, B.W., 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419.