



پترولوژی استوک کوارتز مونزودیوریت پورفیری و دایک‌های ائوسن با ماهیت آداکیتی جنوب غرب جندق (شمال شرق استان اصفهان)؛ شاهدهی بر فرورانش پوسته اقیانوسی اطراف خرد قاره شرق-ایران مرکزی

احمد جمشیدزائی و قدرت ترابی*

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

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۰۶، پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۰۸

چکیده

توده نفوذی نیمه عمیق کوارتز مونزودیوریت پورفیری که توسط دایک‌های تراکی آندزیتی ائوسن قطع شده است، در جنوب غرب جندق (کوه گدارسیاه، شمال غرب خرد قاره شرق-ایران مرکزی) رخمون دارد. بافت اصلی در کوارتز مونزودیوریت‌ها بافت پورفیریتیک بوده و کانی‌های آن شامل پلاژیوکلاز (آلیت)، سانیدین، کوارتز، بیوتیت، مسکویت، کلریت، مگنتیت، کلسیت و آپاتیت است. دایک‌های ائوسن بافت گرانولار، اینترگرانولار و پورفیریتیک دارند و کانی‌های آن پلاژیوکلاز (آندزین و لابرادوریت)، کلینوپیروکسن (دیوپسید و اوژیت)، سانیدین، فلوگوپیت، کوارتز، آمفیبول، مگنتیت، کلسیت و آپاتیت هستند. داده‌های ژئوشیمیایی سنگ کل از توده نفوذی و دایک‌های این منطقه ماهیت متآلمین را برای این سنگ‌ها مشخص می‌کند. آنالیزهای سنگ کل ماهیت کالک‌آلکالین سنگ‌های توده نفوذی و ماهیت کالک‌آلکالین پتاسیم بالا تا شوشونیتی را برای دایک‌ها نشان می‌دهد. الگوهای بهنجار شده با کندریت و نمودار چند عنصری بهنجار شده با گویشته اولیه در کوارتز مونزودیوریت پورفیری و دایک‌های تراکی آندزیتی، غنی‌شدگی از LREE و LILE و تهی‌شدگی از HFSE مانند Ta، Nb و Ti نشان می‌دهند. در این سنگ‌ها آنومالی مثبت یا منفی مشخص عنصر Eu وجود ندارد. این سنگ‌ها احتمالاً در محیط فرورانشی متعلق به کمان آتشفشانی تشکیل شده‌اند. کوارتز مونزودیوریت پورفیری دارای مقادیر بالای $41/89$ – $17/95$ wt.%، $La/Yb = 17/95$ ، $SiO_2 = 64/60$ – $68/80$ wt.%، $Sr/Y = 53/58$ – $168/63$ و $Sr = 1855$ – 434 ppm، $Yb < 0/95$ ppm و $Y < 11$ ppm، $MgO = 0/16$ – $1/10$ wt.% و مقادیر پایین $1/10$ – $0/16$ wt.% هستند و ویژگی‌های آداکیتی از سیلیس را نشان می‌دهند که از ذوب اسلب اقیانوسی فرورونده ایجاد شده‌اند. دایک‌های تراکی آندزیتی دارای مقادیر $53/40$ – $57/60$ wt.%، $La/Yb = 33/45$ – $59/76$ ، $SiO_2 = 53/40$ – $57/60$ wt.%، $Sr/Y = 50/82$ – 125 و $Sr = 2050$ ppm، $MgO = 1/93$ – $4/53$ wt.% و $Yb < 1/14$ ppm و $Y < 13/8$ ppm هستند و ویژگی‌های مرتبط با آداکیت‌های فقیر از سیلیس را نشان داده که در نتیجه ذوب پریدوتیت گوشته‌ای متاسوماتیسم شده، حاصل شده‌اند. با در نظر گرفتن زمان و مکان تشکیل این سنگ‌ها می‌توان نتیجه گرفت که سنگ‌های مورد بررسی مرتبط با فرورانش پوسته اقیانوسی اطراف خرد قاره شرق-ایران مرکزی (مثلاً پوسته‌های اقیانوسی عشین و نائین) هستند.

واژه‌های کلیدی: کوارتز مونزودیوریت، تراکی آندزیت، فرورانش، آداکیت، ائوسن، خرد قاره شرق-ایران مرکزی^۱

1. Central – East Iranian Microcontinent= CEIM

مقدمه

اصطلاح آداکیت ابتدا توسط دفانت و دروموند (Defant and Drummond, 1990)، برای نشان دادن سنگ‌های آذرین کمان سنوزوئیک با ترکیب حدواسط تا اسیدی ($\text{SiO}_2 > 56 \text{ wt.}\%$) به کار برده شد که این سنگ‌ها در نتیجه ذوب پوسته اقیانوسی فرورونده به وجود آمده‌اند. آداکیت‌ها مجموعه‌های سنگی حدواسط تا اسیدی هستند که گستره ترکیبی از آندزیت دارای هورنبلند تا داسیت و ریولیت را شامل می‌شوند و ترکیبات بازیک به مقدار کمتری در آنها وجود دارد. در ماگماهای آداکیتی، فنوکریست‌ها اغلب شامل پلاژیوکلاز، هورنبلند و بیوتیت بوده و فنوکریست‌های ارتوپیروکسن و کلینوپیروکسن تنها در برخی از آندزیت‌های مافیک گزارش شده است (Calmus et al., 2003). کانی‌های فرعی آداکیت‌ها شامل آپاتیت، زیرکن، اسفن و تیتانومگنتیت هستند (Martin et al., 2005). از لحاظ ژئوشیمیایی آداکیت‌ها با $\text{SiO}_2 > 56 \text{ wt.}\%$ ، $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15 \text{ wt.}\%$ ، $\text{MgO} < 3 \text{ wt.}\%$ ، $\text{Sr} > 400 \text{ ppm}$ و غنی‌شدگی از عناصر LILE و LREE و تهی‌شدگی از عناصر Y و HREE ($\text{Yb} < 1/9 \text{ ppm}$ ، $\text{Y} < 18 \text{ ppm}$) و نسبت‌های بالای $\text{Sr/Y} > 40$ و $\text{La/Yb} > 20$ مشخص می‌شوند (Castillo, 2006; Castillo, 2012). با استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی، آداکیت‌ها از نظر ترکیب به دو گروه اصلی آداکیت‌های غنی از سیلیس ($\text{SiO}_2 > 60 \text{ wt.}\%$ ، HSA) و آداکیت‌های فقیر از سیلیس ($\text{SiO}_2 < 60 \text{ wt.}\%$ ، LSA) تقسیم‌بندی شده‌اند (Martin and Moyen, 2002; Martin et al., 2005). آداکیت‌های غنی از سیلیس در نتیجه ذوب بازالت‌های اسلب فرورونده ایجاد شده‌اند که این مذاب‌های حاصل از ذوب اسلب در نتیجه واکنش با پریدوتیت، زمانی که از گوشته به سمت بالا حرکت می‌کنند، امکان تغییر در ترکیب را دارند؛ در حالی که آداکیت‌های فقیر از سیلیس از طریق ذوب پریدوتیت گوه گوشته‌ای که توسط مذاب‌های حاصل از اسلب متاسوماتیسم شده است، ایجاد می‌شوند (Martin and Moyen, 2002).

تاکنون توده‌های نفوذی با بافت پورفیرییک در نقاط مختلفی از جهان مورد بررسی قرار گرفته و گزارش شده‌اند (به‌طور مثال: لان و همکاران (Lan et al., 2012)، ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2015) و تانگ و همکاران (Tang et al., 2017)). این توده‌های نفوذی اغلب در امتداد گسل‌ها و یا زون‌های برشی تشکیل شده‌اند و به‌صورت استوک هستند و از آنجایی که به سرعت متبلور شده‌اند، بافت اغلب آنها به‌صورت پورفیرییک است.

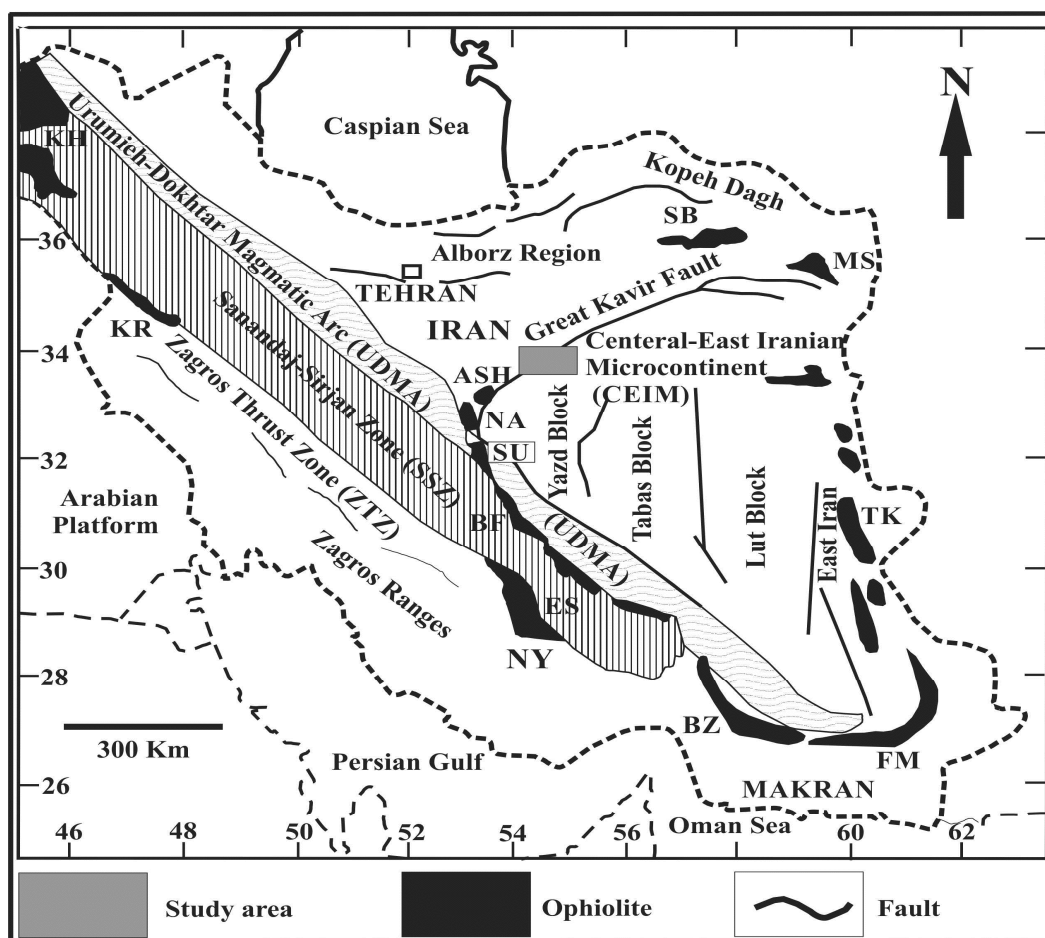
در خرد قاره شرق-ایران مرکزی سنگ‌هایی با ویژگی‌های آداکیتی در چند بخش گزارش شده‌اند. کمپلکس آذرین کالکافی که در بخش غربی خرد قاره شرق-ایران مرکزی (بلوک یزد) قرار گرفته است، از توده‌های نفوذی با ماهیت شوشنیتی تا آداکیتی تشکیل شده است (Ahmadian et al., 2016). همچنین درون ولکانیک‌های منطقه کالکافی استوک و دایک‌هایی نفوذ کرده‌اند که دارای ماهیت لامپروفیری هستند (Nazari and Torabi, 2017). مجموعه دایک‌های فلسیک بیاضه در بخش غربی خرد قاره شرق-ایران مرکزی از نوع آداکیت‌های غنی از سیلیس هستند که از ذوب سنگ منشأ گارنت آمفیبولیتی تشکیل شده‌اند (Nosouhian et al., 2016). همچنین ترونجیت‌های پرمین پسین انارک در نتیجه ذوب یک منشأ گارنت آمفیبولیتی ایجاد شده‌اند (Torabi, 2012). منطقه مورد بررسی (کوه گدارسیاه) در جنوب غرب جندق (شمال شرق استان اصفهان) و در قسمت شمال غربی خرد قاره شرق-ایران مرکزی قرار گرفته است (شکل ۱). در این منطقه توده نفوذی کوارتز مونزودیوریت پورفیری به‌صورت استوک توسط مجموعه دایک‌های ائوسن با ترکیب تراکی آندزیتی قطع شده است. تاکنون هیچ‌گونه مطالعه زمین‌شناسی و پترولوژی در مورد کوارتز مونزودیوریت پورفیری و دایک‌های تراکی آندزیتی در این منطقه صورت نگرفته است و فقط به حضور مونزودیوریت پورفیری و دایک‌های قطع‌کننده آن در پروژه تکنواکسپورت اشاره شده است.

خرد قاره شرق-ایران مرکزی در قسمت شرقی کمربند ماگمایی ارومیه-دختر و بین گسل‌های کویر بزرگ، نائین-دهشیر-بافت، گسل نه‌بندان و مجموعه‌های افیولیتی نائین، عشین، سورک، بافت، شهربابک، چهل کوره و افیولیت سبزوار محصور شده است. این خرد قاره با توجه به فعالیت‌های زمین‌ساختی و عملکرد گسل‌ها به واحدهای کوچک‌تری تقسیم‌بندی شده است که مهم‌ترین واحدهای آن از غرب به شرق عبارتند از: بلوک یزد (نائین)، بلوک طبس (کرمان) و بلوک لوت (شکل ۱).

(Aistov et al., 1984). این پژوهش، نخستین پژوهش از دیدگاه پترولوژی است. در این پژوهش، ویژگی‌های سنگ‌شناسی و شیمیایی کوارتز مونزودیوریت‌ها و دایک‌های تراکی‌آندزیتی و همچنین محیط زمین‌ساختی تشکیل این سنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

زمین‌شناسی منطقه

سرزمین ایران در قسمت میانی کوه‌زاد آلپ-همالیا قرار گرفته و مهم‌ترین زون‌های ساختاری آن شامل زاگرس، سنندج-سیرجان، کمان ماگمایی ارومیه-دختر، خرد قاره شرق-ایران مرکزی، البرز، کپه‌داغ، شرق ایران و مکران است (شکل ۱).

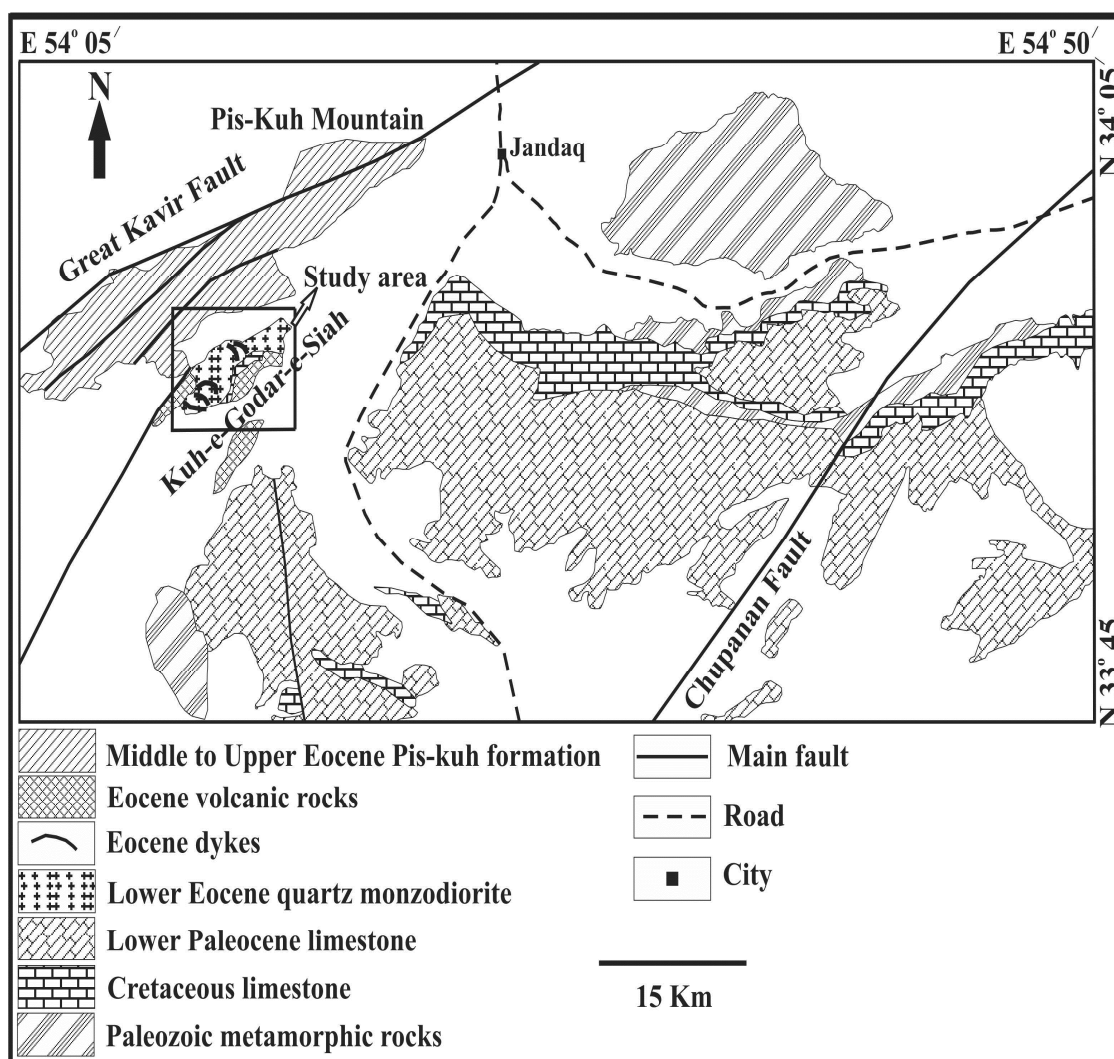


شکل ۱. مهم‌ترین واحدهای ساختاری ایران، برگرفته از ترابی (Torabi, 2010) با تغییرات و موقعیت منطقه جندق (شمال غرب خرد قاره شرق-ایران مرکزی)

Fig. 1. Main structural units of Iran, slightly modified after Torabi (2010), and location of the Jandaq area (northwest of Central-East Iranian Microcontinent).

بالایی (Aistov et al., 1984). منطقه گدارسیاه در شمال غرب خرد قاره شرق-ایران مرکزی، در بلوک یزد و در مجاورت گسل کویر بزرگ در جنوب غرب جندق قرار گرفته است (شکل‌های ۱ و ۲).

در منطقه جندق اصلی‌ترین واحدهای سنگی از قدیم به جدید عبارتند از: سنگ‌های دگرگونی پالئوزوئیک، سنگ آهک‌های کرتاسه، سنگ آهک‌های سازند چوپانان (پالئوسن)، واحدهای ولکانیک ائوسن و سازند فلیشی پیس کوه (ائوسن میانی تا ائوسن



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه جندق در بخش شمال غرب خرد قاره شرق-ایران مرکزی (برگرفته از ترابی (Torabi, 2010) با تغییرات)

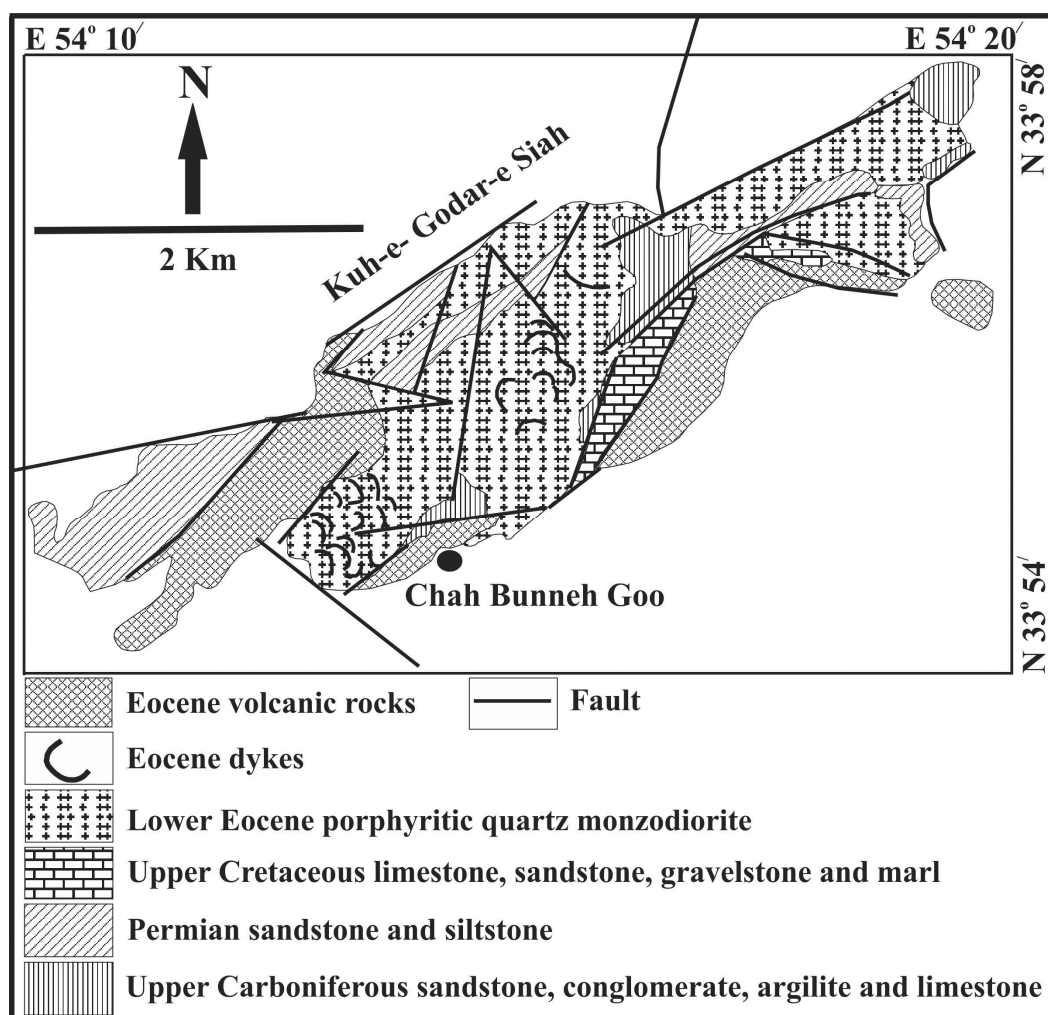
Fig. 2. Simplified geological map of Jandaq area in the northwest of Central-East Iranian Microcontinent (Torabi, 2010; slightly modified).

بازالت و بازالت آندزیتی معرفی شده‌اند که در نتیجه فروانش شکل گرفته‌اند.

سنگ‌های ولکانیک ائوسن در کوه گدارسیاه توسط محمودآبادی (Mahmoodabadi, 2009) مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، ترکیب این سنگ‌ها اغلب

رجبی و ترابی (Rajabi and Torabi, 2013) زینولیت‌های موجود در سنگ‌های آتشفشانی گدارسیاه را بررسی و ترکیب این زینولیت‌ها را از نوع گرانیتوئیدهای نوع S معرفی کرده‌اند. ترابی (Torabi, 2010) دایک‌های لامپروفیری به سن الیگوسن که فلیش‌های ائوسن تا الیگوسن زیرین واقع در پیرامون کوه را قطع کرده‌اند، مورد بررسی قرار داده و ترکیب آنها را از نوع بازالت آلکالن با سنگ منشأ گارنت لریولیت معرفی کرده است. در قسمت شرقی شهر جندق سنگ‌های دگرگونی از نوع شیست و مرمر رخمون دارند که شرایط ترمودینامیکی تشکیل این سنگ‌ها توسط طباطبایی منش و همکاران (Tabatabaei et al., 2010) بررسی شده و رخساره دگرگونی این سنگ‌ها را مرز شیست سبز تا آمفیبولیت دانسته‌اند. توده نفوذی و دایک‌های قطع‌کننده آن در کوه گدارسیاه با مختصات طول جغرافیایی شرقی $54^{\circ} 17' - 54^{\circ} 12'$ و عرض جغرافیایی شمالی $33^{\circ} 58' - 33^{\circ} 55'$ دیده می‌شوند (شکل ۳). ترکیب سنگ‌های توده نفوذی از نوع کوارتز مونزودیوریت پورفیری است و سن آن با استفاده از روش K-Ar حدود ۵۴ میلیون سال (ائوسن زیرین) به دست آمده است (Aistov et al., 1984).

رجبی و ترابی (Rajabi and Torabi, 2013) زینولیت‌های موجود در سنگ‌های آتشفشانی گدارسیاه را بررسی و ترکیب این زینولیت‌ها را از نوع گرانیتوئیدهای نوع S معرفی کرده‌اند. ترابی (Torabi, 2010) دایک‌های لامپروفیری به سن الیگوسن که فلیش‌های ائوسن تا الیگوسن زیرین واقع در پیرامون کوه را قطع کرده‌اند، مورد بررسی قرار داده و ترکیب آنها را از نوع بازالت آلکالن با سنگ منشأ گارنت لریولیت معرفی کرده است. در قسمت شرقی شهر جندق سنگ‌های دگرگونی از نوع شیست و مرمر رخمون دارند که شرایط ترمودینامیکی تشکیل این سنگ‌ها توسط طباطبایی منش و همکاران (Tabatabaei et al., 2010) بررسی شده و رخساره دگرگونی این سنگ‌ها را مرز شیست سبز تا آمفیبولیت دانسته‌اند. توده نفوذی و دایک‌های قطع‌کننده آن در کوه گدارسیاه با مختصات طول جغرافیایی شرقی $54^{\circ} 17' - 54^{\circ} 12'$ و عرض جغرافیایی شمالی $33^{\circ} 58' - 33^{\circ} 55'$ دیده می‌شوند (شکل ۳). ترکیب سنگ‌های توده نفوذی از نوع کوارتز مونزودیوریت پورفیری است و سن آن با استفاده از روش K-Ar حدود ۵۴ میلیون سال (ائوسن زیرین) به دست آمده است (Aistov et al., 1984).

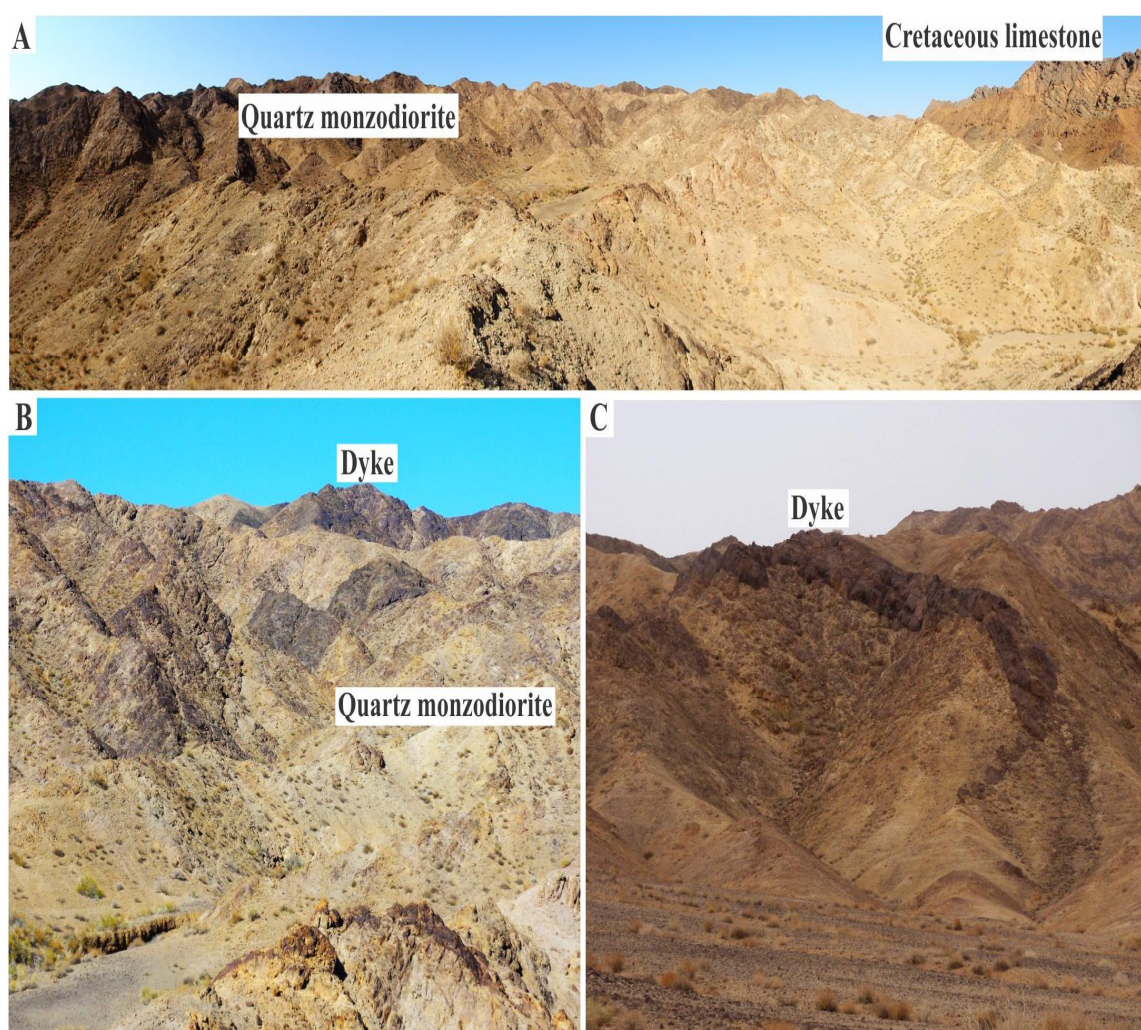


شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده از کوه گدارسیاه (جنوب‌غرب جندق) و موقعیت کوارتز مونزودیوریت پورفیری و دایک‌های قطع‌کننده آن

Fig. 3. Simplified geological map of Kuh-e Godar-e Siah (southwest of Jandaq) and location of the porphyritic quartz monzodiorite and cross-cutting dykes.

توده نفوذی کوارتز مونزودیوریت پورفیری در جنوب غرب جندق با روند کلی شمال شرقی - جنوب غربی و در مجاورت گسل کویر بزرگ قرار گرفته است و توسط دایک‌های تراکی آندزیتی قطع شده است (شکل ۴-۱). در قسمت شرقی این توده نفوذی، رسوبات کربونیفر بالایی، رسوبات پرمین و سنگ‌های آهکی (کرتاسه) حضور دارند (Aistov et al., 1984). دایک‌ها در قسمت‌های مختلف، توده نفوذی را قطع کرده‌اند؛ ولی بیشترین تجمع آنها در قسمت جنوب غربی توده و در اطراف چاه بنی‌گو دیده می‌شود (شکل ۴-۲ و ۴-۳). این دایک‌ها دارای ضخامت‌های متفاوتی هستند؛ به طوری که برخی از این دایک‌ها کمتر از یک متر و برخی از آنها تا حدود ۱۰ متر ضخامت دارند.

توده نفوذی کوارتز مونزودیوریت پورفیری در جنوب غرب جندق با روند کلی شمال شرقی - جنوب غربی و در مجاورت گسل کویر بزرگ قرار گرفته است و توسط دایک‌های تراکی آندزیتی قطع شده است (شکل ۴-۱). در قسمت شرقی این توده نفوذی، رسوبات کربونیفر بالایی، رسوبات پرمین و سنگ‌های آهکی (کرتاسه) حضور دارند (Aistov et al., 1984).



شکل ۴. تصاویر صحرایی از توده کوارتز مونزودیوریت پورفیری و دایک‌های قطع‌کننده آن در کوه گدارسیاه (جنوب غرب جندق). A: نمای کلی از واحدهای کوارتز مونزودیوریت پورفیری و سنگ آهک‌های کرتاسه در کوه گدارسیاه (نگاه به سمت شمال)، B: حضور مجموعه دایک در قسمت‌های مختلف توده کوارتز مونزودیوریتی (نگاه به سمت شمال) و C: وجود یک دایک در درون توده کوارتز مونزودیوریتی (نگاه به سمت شمال)

Fig. 4. Field photographs of the porphyritic quartz monzodiorite intrusion and cross-cutting dykes in the Kuh-e Godar-e Siah (southwest of Jandaq). A: general view of the porphyritic quartz monzodiorite and Cretaceous limestones (view to the north), B: The presence of dyke swarm in different parts of quartz monzodioritic intrusion (view to the north), and C: A dyke within the quartz monzodioritic intrusion (view to the north)

روش مطالعه

پس از بررسی‌های صحرایی، نمونه‌برداری و مطالعات پتروگرافی، آنالیز نقطه‌ای کانی‌ها با دستگاه آنالیز الکترون میکروپروب JEOL مدل (WDS) JXA-8800 دانشگاه کانازاواای ژاپن با ولتاژ شتاب‌دهنده ۲۰ kV و جریان ۲۰ nA انجام شده است. برای محاسبه مقادیر Fe^{2+} و Fe^{3+} برای دستیابی به فرمول ساختاری کانی‌ها از استوکیومتری کانی‌ها استفاده شده است. مقادیر Fe^{2+} و $Mg\#$ به ترتیب به صورت Fe^{2+} $(Fe^{2+}+Mg)$ و $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ محاسبه شده است. نتایج آنالیز شیمیایی کانی‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. برای بررسی ژئوشیمیایی سنگ کل، نمونه‌های سالم انتخاب و با ترکیبی از روش‌های ICP-MS و ICP-AES در شرکت ALS-Mineral کانادا مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفتند. داده‌های ژئوشیمیایی سنگ کل در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. همچنین برای تعیین نوع کانی پتاسیم فلدسپار، آنالیز XRD انجام شده است. آنالیز XRD با استفاده از دستگاه XRD مدل D8 ADVANCE شرکت بروکر در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان صورت گرفته است. برای محاسبه مقادیر FeO و Fe_2O_3 از $Fe_2O_3^*$ از نسبت ارائه شده توسط میدلموست (Middlemost, 1989) استفاده شده است. علایم اختصاری به کار رفته برای نام کانی‌ها برگرفته از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) است.

پتروگرافی

الف) کوارتز مونزودیوریت پورفیری

در نمونه دستی کوارتز مونزودیوریت پورفیری به رنگ روشن دیده می‌شود و بخش‌هایی از نمونه‌های کوارتز مونزودیوریت پورفیری تا حدودی دگرسان شده‌اند. در نمونه‌هایی که به مقدار کمتری دچار دگرسانی شده‌اند، کانی‌ها و بافت اولیه این سنگ‌ها حفظ شده است. بافت اصلی سنگ‌های کوارتز مونزودیوریت به صورت پورفیریتیک است. براساس بررسی‌های کانی‌شناسی و نتایج آنالیز میکروپروب کانی‌های اصلی این سنگ‌ها شامل

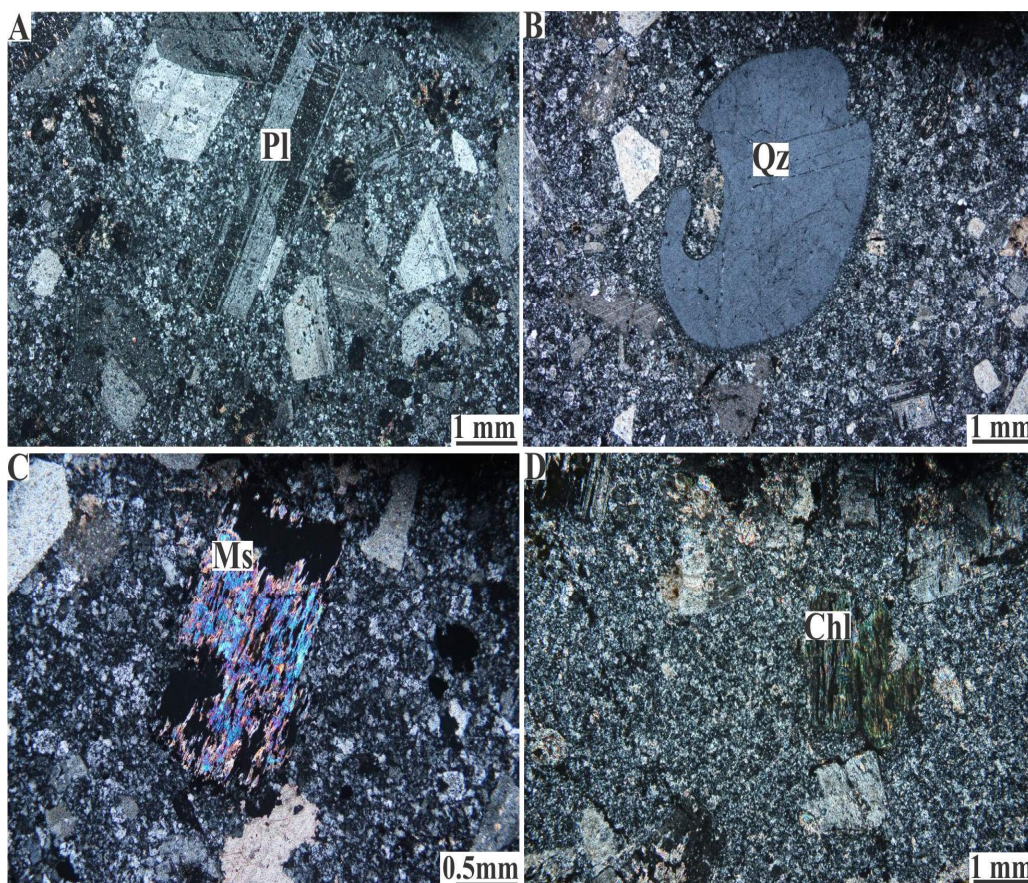
پلاژیوکلاز، سانیدین، کوارتز و بیوتیت است که در زمینه‌ای ریزدانه از همین کانی‌ها قرار گرفته‌اند. فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در این سنگ‌ها نسبت به سایر کانی‌ها درشت‌تر و فراوان‌تر هستند. پلاژیوکلازها دارای زونینگ و ماکل پلی‌ستتیک هستند (شکل ۵-۵A). در نمونه‌هایی که تا حدودی دچار دگرسانی شده‌اند برخی از پلاژیوکلازها به سریست تجزیه شده‌اند. کوارتز با حاشیه خلیجی در این سنگ‌ها وجود دارد (شکل ۵-۵B). وجود زونینگ در فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و همچنین وجود حواشی خلیج خوردگی در اطراف فنوکریست کوارتز می‌تواند به دلیل تغییرات فشار در حین تبلور این کانی‌ها ایجاد شود (Vernon, 2004). بلورهای سانیدین در زمینه سنگ حضور دارند. کانی‌های ثانویه نیز شامل مسکویت، ایلیت، کلریت، مگنتیت و کلسیت هستند (شکل ۵-۵C و D). آپاتیت به صورت یک کانی فرعی حضور داشته و ایلیت در نتیجه دگرسانی پتاسیم فلدسپار شکل گرفته است. بررسی نتایج آنالیز میکروپروب کانی‌ها در سنگ‌های کوارتز مونزودیوریت پورفیری نشان می‌دهد که پلاژیوکلازها از نوع آل بیت هستند ($Ab=93/40-99/20$). پتاسیم فلدسپارها در این سنگ‌ها از نوع سانیدین هستند ($Or=69/40-80/70$).

ب) دایک‌های تراکی آندزیتی

دایک‌های تراکی آندزیتی به مقدار کمی دچار دگرسانی شده‌اند و بافت و ساخت اولیه خود را حفظ کرده‌اند. این سنگ‌ها در نمونه دستی به رنگ سبز تیره دیده می‌شوند. بافت این سنگ‌ها به صورت گرانولار، اینترگرانولار و پورفیریتیک است. بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که دایک‌های با ضخامت کم، سریع‌تر سرد شده و دارای بافت دانه ریزتری هستند؛ در حالی که دایک‌های با ضخامت زیاد، به صورت آهسته و طی مدت زمان بیشتری متبلور شده و دانه درشت‌تر هستند. کانی‌های تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها شامل پلاژیوکلاز، کلینوپروکسن، سانیدین و بیوتیت بوده و کانی‌های ثانویه که حاصل دگرسانی هستند شامل آمفیبول، کلریت و مگنتیت هستند. کانی‌های پروکسن و پلاژیوکلاز به صورت بلورهای

آنورتیت ۴۰/۶۲ درصد هستند و در محدوده آندزین و لابرادوریت قرار می‌گیرند. برای تعیین نوع پتاسیم فلدسپار در دایک‌های مورد بررسی، از این سنگ‌ها آنالیز XRD انجام گرفته و بر اساس نتایج آنالیز نوع پتاسیم فلدسپار در این سنگ‌ها، ساینیدین است. بلورهای ساینیدین موجود در زمینه سنگ به‌طور میانگین دارای آلبيت حدود ۴۲/۵۰ درصد و ارتوکلاز حدود ۵۴/۱۶ درصد هستند. بیوتیت‌ها دارای Mg# حدود ۰/۷۳ بوده و از نوع فلوگوپیت هستند.

درشت‌تر نسبت به سایر کانی‌ها دیده می‌شوند (شکل ۶-A و B). بلورهای پلاژیوکلاز اغلب دارای ماکل پلی‌سنتتیک هستند (شکل ۶-B). بلورهای کلینوپیروکسن در برخی از نمونه‌ها تا حدودی دگرسان شده و به آمفیبول تبدیل شده‌اند (شکل ۶-C). کانی بیوتیت نیز در برخی از نمونه‌ها حضور دارد و در برخی مواقع به کلریت و مگنتیت تجزیه شده است (شکل ۶-D). نتایج آنالیز میکروپروپ از کانی‌های موجود در دایک‌های تراکی‌آندزیتی نشان می‌دهد که کلینوپیروکسن‌ها از نوع دیوپسید و اوژیت هستند. پلاژیوکلازها به‌طور میانگین دارای



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی کوارتز مونزودیوریت پورفیری در جنوب‌غرب جندق. A: فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در زمینه‌ای از فلدسپارها (بافت پورفیریتیک) (XPL: Crossed Polarized Light), B: فنوکریست کوارتز با حاشیه خلیجی شکل (XPL), C و D: مسکوویت و کلریت که به نظر می‌رسد در نتیجه دگرسانی بیوتیت ایجاد شده‌اند. (XPL). Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز، Ms: مسکوویت، Chl: کلریت. علایم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 5. Microphotographs of the porphyritic quartz monzodiorite from southwest of Jandaq. A: Plagioclase phenocrysts in Feldspar groundmass (porphyritic texture) (XPL: Crossed Polarized Light), B: Quartz phenocrysts with corrosion gulf (XPL), C and D: Muscovite and chlorite which formed by biotite alteration (XPL). Pl: Plagioclase, Qz: Quartz, Ms: Muscovite, Chl: Chlorite (Whitney and Evans, 2010)

جدول ۱. نتایج آنالیز میکروپروپ (بر اساس wt.%) و محاسبه فرمول ساختاری کانی‌ها در کوارتز مونزودیوریت پورفیری جنوب غرب جندق

Table 1. Microprobe analyses (wt.%) and calculated structural formula of minerals in the porphyritic quartz monzodiorite from southwest of Jandaq

Sample	C30	C30	C30	Sample	C8	Sample	C8	C30	C8
Analysis	15	11	16	Analysis	20	Analysis	24	10	29
Mineral	Kfs	Plg	Plg	Mineral	Mica	Mineral	Calcite	Quartz	Magnetite
SiO ₂	66.38	68.43	68.48	SiO ₂	49.68	SiO ₂	0.13	96.70	3.57
TiO ₂	0.00	0.01	0.00	TiO ₂	0.33	TiO ₂	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	18.51	19.50	19.26	Al ₂ O ₃	30.61	Al ₂ O ₃	0.04	1.91	0.09
FeO*	0.08	0.01	0.02	Cr ₂ O ₃	0.02	FeO*	0.16	0.05	72.07
MnO	0.01	0.01	0.00	FeO*	3.03	MnO	0.22	0.01	0.00
MgO	0.00	0.02	0.00	MnO	0.08	MgO	0.15	0.02	1.03
CaO	0.06	0.17	0.15	MgO	1.65	CaO	55.09	0.02	0.14
Na ₂ O	2.74	12.04	12.25	CaO	0.00	Na ₂ O	0.01	0.51	0.00
K ₂ O	12.26	0.09	0.13	Na ₂ O	0.11	K ₂ O	0.00	0.99	0.00
Total	100.04	100.28	100.29	K ₂ O	10.67	Total	55.80	100.21	76.90
Oxygen #	8	8	8	Total	96.18	Oxygen #	1	2	4
Si	3.015	2.986	2.991	Oxygen #	22	Si	0.002	0.977	0.163
Ti	0.000	0.000	0.000	Si	6.585	Ti	0.000	0.000	0.000
Al	0.990	1.002	0.991	Ti	0.033	Al	0.001	0.023	0.005
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	Al ^(IV)	1.415	Fe ³⁺	0.000	0.000	1.669
Fe ²⁺	0.003	0.000	0.001	Al ^(VI)	3.363	Fe ²⁺	0.002	0.000	1.086
Mn	0.000	0.000	0.000	Cr	0.002	Mn	0.003	0.000	0.000
Mg	0.000	0.001	0.000	Fe ³⁺	0.000	Mg	0.004	0.000	0.070
Ca	0.003	0.008	0.007	Fe ²⁺	0.336	Ca	0.985	0.000	0.007
Na	0.241	1.019	1.038	Mn	0.009	Na	0.000	0.010	0.000
K	0.711	0.005	0.007	Mg	0.326	K	0.000	0.013	0.000
Cation	4.963	5.021	5.035	Ca	0.000	Cation	0.997	1.023	3.000
Ab	25.20	98.70	98.70	Na	0.028				
An	0.30	0.80	0.70	K	1.804				
Or	74.50	0.50	0.70	Cation	13.901				
Type	Sanidine	Albite	Albite	Type	Muscovite				

جدول ۲. نتایج آنالیز میکروپروپ (بر اساس wt.%) و محاسبه فرمول ساختاری کانی‌ها در دایک‌های ائوسن جنوب غرب جندق

Table 2. Microprobe analyses (wt.%) and calculated structural formula of minerals in the Eocene dykes from southwest of Jandaq

Sample	J24	J2	Sample	J2	Sample	J2	J2	J2
Analysis	79	59	Analysis	43	Analysis	44	56	54
Mineral	Cpx	Cpx	Mineral	Mica	Mineral	Plg	Plg	Kfs
SiO ₂	50.96	50.24	SiO ₂	38.59	SiO ₂	56.57	55.79	64.91
TiO ₂	0.65	1.02	TiO ₂	6.86	TiO ₂	0.07	0.05	0.16
Al ₂ O ₃	3.55	3.92	Al ₂ O ₃	13.09	Al ₂ O ₃	26.74	27.12	19.68
FeO*	6.49	6.64	Cr ₂ O ₃	0.00	FeO*	0.88	0.74	0.39
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	FeO*	10.49	MnO	0.00	0.01	0.00
MnO	0.17	0.15	MnO	0.15	MgO	0.20	0.07	0.00
MgO	15.58	15.07	MgO	17.35	CaO	8.37	9.41	1.04
CaO	21.87	21.69	CaO	0.00	Na ₂ O	5.84	5.32	5.27
Na ₂ O	0.63	0.74	Na ₂ O	0.80	K ₂ O	1.14	1.20	8.19
K ₂ O	0.01	0.00	K ₂ O	8.86	Total	99.81	99.71	99.64
NiO	0.00	0.00	Total	96.19	Oxygen #	8	8	8
Total	99.91	99.47	Oxygen #	22	Si	2.558	2.531	2.940
Oxygen #	6	6	Si	5.337	Ti	0.002	0.002	0.005
Si	1.868	1.853	Ti	0.714	Al	1.424	1.449	1.050
Ti	0.018	0.028	Al ^(IV)	2.132	Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000
Al ^(IV)	0.132	0.147	Al ^(VI)	0.000	Fe ²⁺	0.033	0.028	0.015
Al ^(VI)	0.022	0.023	Cr	0.000	Mn	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	Fe ³⁺	0.000	Mg	0.013	0.005	0.000
Fe ³⁺	0.119	0.119	Fe ²⁺	1.213	Ca	0.406	0.457	0.050
Fe ²⁺	0.080	0.085	Mn	0.018	Na	0.512	0.468	0.463
Mn	0.005	0.005	Mg	3.577	K	0.066	0.069	0.473
Mg	0.852	0.829	Ca	0.000	Cation	5.014	5.009	4.996
Ca	0.859	0.857	Na	0.215	Ab	52.00	47.10	47.00
Na	0.045	0.053	K	1.563	An	41.30	46.00	5.10
K	0.000	0.000	Cation	14.769	Or	6.70	6.90	48.00
Ni	0.000	0.000	Fe #	0.25	Type	Andesine	Labradorite	Sanidine
Cation	4.000	3.999	Mg #	0.75				
WO	44.86	45.23	Type	Phlogopite				
EN	44.47	43.72						
FS	10.67	11.05						
WEF	95.25	94.38						
JD	0.74	0.92						
AE	4.01	4.70						
Type	Augite	Diopside						

جدول ۳. ترکیب ژئوشیمیایی دایک‌های تراکی آندزیتی ائوسن جنوب غرب جندق (عناصر اصلی بر حسب wt.% و عناصر فرعی بر حسب ppm)

Table 3. Geochemical composition of the trachy andesitic Eocene dykes from southwest of Jandaq (Major elements in wt.% and trace elements in ppm)

Sample	C4	C5	C7	C13	C18	C19	C20	C21	C22	C23
SiO ₂	54.92	56.70	55.84	53.40	53.50	57.60	55.80	55.00	55.10	54.65
TiO ₂	0.57	0.61	0.55	0.60	0.70	0.54	0.55	0.69	0.67	0.76
Al ₂ O ₃	15.13	15.00	15.21	14.90	14.40	15.20	15.50	15.95	14.80	14.72
Fe ₂ O ₃ *	5.03	4.89	5.20	5.26	5.61	5.25	4.92	6.65	5.46	5.83
Fe ₂ O ₃ (Cal)	1.21	1.30	1.38	1.26	1.35	1.40	1.18	1.60	1.31	1.40
FeO(Cal)	3.81	3.58	3.81	3.99	4.25	3.85	3.73	5.04	4.15	4.42
MnO	0.11	0.08	0.14	0.10	0.09	0.15	0.15	0.10	0.15	0.12
MgO	2.29	2.29	3.37	1.93	3.72	4.24	3.10	4.53	3.61	3.82
CaO	5.95	5.68	5.66	5.83	7.59	5.56	7.16	7.43	5.76	7.85
Na ₂ O	4.89	4.64	4.47	4.90	3.36	4.00	3.95	3.88	4.19	3.56
K ₂ O	3.86	3.58	3.80	3.68	4.66	3.45	3.43	2.92	3.69	4.78
P ₂ O ₅	-	0.48	-	0.45	0.59	0.38	0.39	0.47	0.62	-
LOI	7.24	6.52	5.76	8.34	4.09	3.87	6.12	2.87	5.93	3.92
Total	99.99	100.47	100.00	99.39	98.31	100.24	101.07	100.49	99.98	100.01
Cr	94.39	100	78.96	100	190	160	160	160	90	208.64
V	128.24	142	122.01	131	207	139	141	174	139	196.52
Rb	87.56	91.9	79.65	78.3	136	89.6	87.5	67.7	80.3	124.57
Cs	3.44	3.19	1.86	2.04	5.73	2.53	2.99	3.8	0.94	6.07
Ba	939.51	962	1116.23	896	1285	878	808	943	1040	1195.34
Sr	946.26	901	871.77	1015	2050	1575	1585	1680	859	1987.64
Ta	0.43	0.4	0.42	0.5	0.8	0.4	0.4	0.3	0.4	0.84
Nb	-	6.9	-	7.1	13.2	6.5	6.7	6.2	7.6	-
Hf	4.45	4.6	4.92	4.7	7.9	4	4	3.7	5.1	7.31
Zr	182.13	179	197.8	179	321	154	155	143	212	296.29
Th	15.23	12	16.13	12.45	31.5	8.6	8.63	9.13	14.2	27.33
Y	-	13.8	-	14.4	16.4	14.7	14.3	15.7	16.9	-
U	4.05	3.28	4.21	3.26	9.39	2.54	2.66	2.48	3.51	10.41
Ga	23.88	18.9	21.31	17.5	18.3	19	19.4	19.1	18.1	16.33
La	47.46	52.2	61.07	49.7	77.1	45.5	45.5	48.3	67.8	69.47
Ce	90.87	98.1	118.8	94	149	86.8	85.4	91	130.5	139.05
Pr	11.05	11.6	15.44	10.95	17.35	10.15	9.97	10.8	15.45	16.8
Nd	-	45.3	-	42.9	66.6	37.7	37.6	42.5	58.6	-
Sm	7.69	7.72	10.09	7.45	10.5	6.57	6.58	7.74	10.4	9.89
Eu	2.02	2.03	2.49	1.94	2.44	1.66	1.78	2.01	2.53	2.4
Gd	4.98	5.06	7.11	4.93	6.42	4.63	4.5	5.26	7.06	6.35
Tb	0.54	0.57	0.72	0.57	0.69	0.57	0.51	0.63	0.76	0.7
Dy	2.63	2.71	3.57	2.79	3.09	2.75	2.69	2.87	3.7	3.12
Ho	0.5	0.55	0.6	0.54	0.6	0.53	0.5	0.57	0.61	0.62
Er	-	1.37	-	1.38	1.54	1.4	1.56	1.59	1.67	-
Tm	0.22	0.19	0.21	0.2	0.23	0.22	0.22	0.23	0.23	0.24
Yb	1.31	1.28	1.33	1.14	1.29	1.29	1.36	1.41	1.31	1.28
Lu	0.2	0.19	0.18	0.18	0.2	0.2	0.21	0.19	0.19	0.22

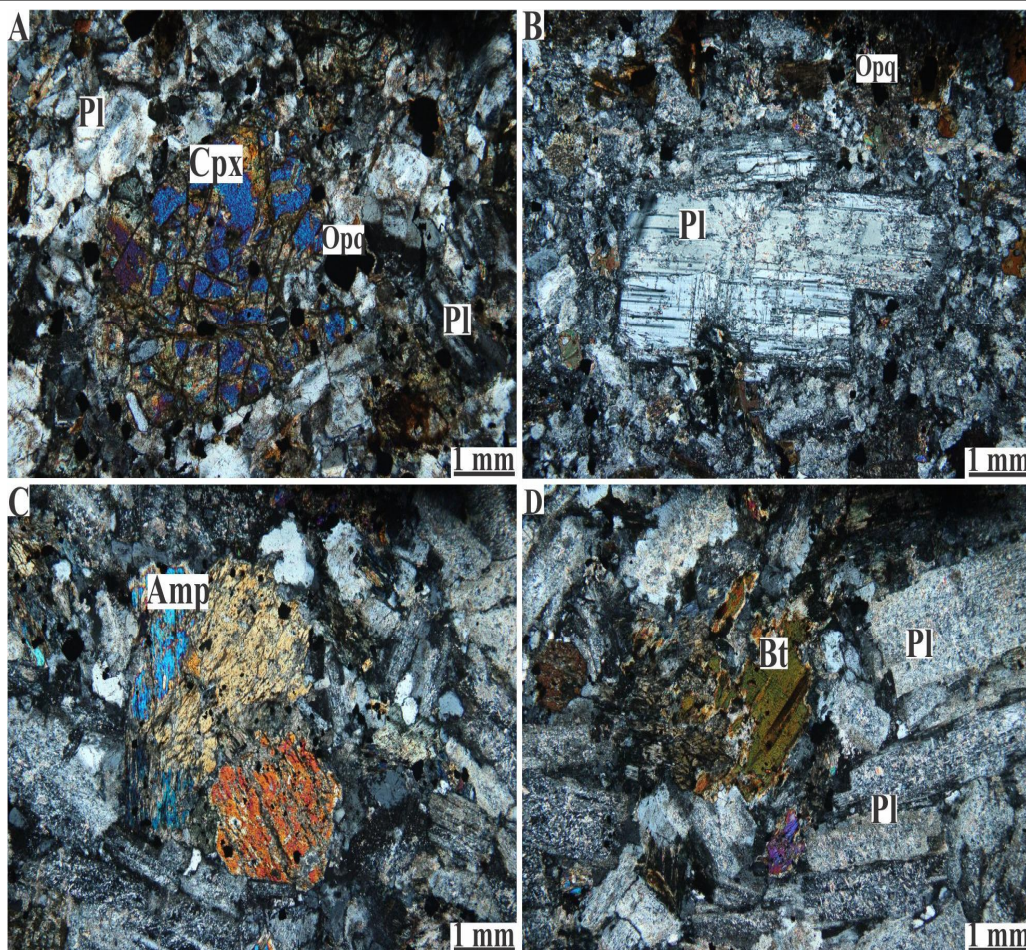
Cal= Calculated

جدول ۴. ترکیب ژئوشیمیایی کوارتز مونزودیوریت پورفیری جنوب‌غرب جندق (عناصر اصلی بر حسب wt.% و عناصر فرعی بر حسب ppm)

Table 4. Geochemical composition of the porphyritic quartz monzodiorite from southwest of Jandaq (Major elements in wt.% and trace elements in ppm)

Sample	C2	C16	C26	C28	C30	C31	C32	C33
SiO ₂	67.50	64.60	68.80	68.00	68.40	66.89	67.30	68.52
TiO ₂	0.29	0.30	0.30	0.31	0.30	0.33	0.29	0.27
Al ₂ O ₃	15.85	14.75	16.00	16.00	16.20	15.77	15.85	16.18
Fe ₂ O ₃ *	2.23	2.89	1.51	1.59	2.09	1.98	2.06	1.70
Fe ₂ O ₃ (Cal)	0.69	0.77	0.47	0.49	0.65	0.61	0.64	0.53
FeO(Cal)	1.53	2.12	1.03	1.09	1.43	1.36	1.41	1.16
MnO	0.03	0.09	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02
MgO	0.73	1.10	0.16	0.24	0.45	0.60	0.64	0.20
CaO	1.84	4.10	2.62	2.75	2.16	2.62	2.54	2.43
Na ₂ O	6.12	3.46	5.72	5.26	5.77	5.13	4.93	5.54
K ₂ O	3.31	4.17	3.48	3.73	3.71	3.86	3.78	3.58
P ₂ O ₅	0.07	0.20	0.07	0.07	0.07	-	0.08	-
LOI	2.21	5.27	2.98	3.25	2.55	2.80	3.32	1.57
Total	100.18	100.93	101.66	101.22	101.73	100.00	100.82	100.01
Cr	40	40	40	30	40	45.39	40	27.64
V	42	67	41	40	44	45.73	42	37.05
Rb	83.8	118.5	81.6	88.3	88.5	100.42	92.5	86.19
Cs	1.51	3.73	1.75	2.75	2.82	3.27	3.11	2.48
Ba	808	1165	891	945	791	928.32	905	924.13
Sr	883	1855	474	434	658	795.51	581	597.66
Ta	0.4	0.7	0.4	0.4	0.4	0.42	0.4	0.38
Nb	7	8.8	7	7.4	7	-	6.9	-
Hf	4.1	3.8	3.9	3.5	3.6	4.31	3.9	4.05
Zr	160	132	150	133	141	171.42	151	182.31
Th	4.91	13	4.94	4.94	5	4.39	4.84	5.33
Y	8.1	11	7.7	8.1	7.9	-	7.7	-
U	2.02	4.16	1.51	1.68	1.98	3.06	1.69	1.87
Ga	21.4	18.7	20.4	20.5	21.2	24.33	21.5	16.74
La	17.3	39.8	17	15.8	16.2	14.76	16.7	16.97
Ce	32.8	69.5	33.1	30.8	31.7	27.8	31.3	32.51
Pr	3.68	7.78	3.62	3.44	3.58	3.36	3.43	3.5
Nd	14	28.5	14	13.4	13.7	-	12.8	-
Sm	2.36	4.9	2.64	2.56	2.58	2.41	2.52	2.61
Eu	0.68	1.22	0.65	0.62	0.66	0.59	0.63	0.64
Gd	1.94	3.37	1.85	1.83	1.92	1.75	1.69	1.88
Tb	0.25	0.41	0.27	0.25	0.26	0.24	0.22	0.26
Dy	1.32	1.97	1.22	1.29	1.29	1.24	1.2	1.28
Ho	0.31	0.39	0.28	0.29	0.29	0.27	0.29	0.31
Er	0.82	1	0.79	0.83	0.88	-	0.79	-
Tm	0.11	0.15	0.12	0.11	0.13	0.12	0.14	0.12
Yb	0.87	0.95	0.7	0.88	0.78	0.81	0.86	0.84
Lu	0.13	0.13	0.12	0.13	0.12	0.14	0.14	0.12

Cal= Calculated



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی دایک‌های تراکی آندزیتی جنوب غرب جندق. A: بلورهای کلینوپیروکسن در زمینه‌ای از کوارتز و فلدسپار (XPL)، B: پلاژیوکلاز با ماکل پلی‌سینتتیک (XPL)، C: آمفیبول که در نتیجه دگرسان شدن پیروکسن‌ها ایجاد شده است (XPL) و D: بلورهای بیوتیت به همراه پلاژیوکلاز (XPL). Pl: پلاژیوکلاز، Cpx: کلینوپیروکسن، Opq: کانی اوپک، Amp: آمفیبول، Bt: بیوتیت. علایم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 6. Microphotographs of the trachy andesitic dykes from southwest of Jandaq. A: Clinopyroxene crystals in quartz and feldspar groundmass (XPL), B: Plagioclase with polysynthetic twinning (XPL), C: Amphibole which formed by clinopyroxene alteration (XPL), and D: Biotite crystals with plagioclase (XPL). Pl: Plagioclase, Cpx: Clinopyroxene, Opq: Opaque mineral, Amp: Amphibole, Bt: Biotite (Whitney and Evans, 2010)

شیمی سنگ کل

اسیدی بودن توده نفوذی و حدواسط بودن دایک‌هاست. محتوی LOI در کوارتز مونزودیوریت پورفیری به‌طور میانگین در حدود ۲/۹۹ درصد وزنی و در سنگ‌های تراکی آندزیتی در حدود ۵/۴۶ درصد وزنی است که نشان‌دهنده حضور کانی‌های آبدار همچون مسکویت، بیوتیت، کلریت و سریسیت در کوارتز مونزودیوریت پورفیری و بیوتیت، کلریت و آمفیبول در دایک‌های تراکی آندزیتی است. همچنین محتوی LOI بالاتر در برخی از نمونه‌ها نشان‌دهنده تأثیر فرایندهایی مثل

بر اساس نتایج آنالیز، مقدار SiO_2 در کوارتز مونزودیوریت پورفیری از ۶۴/۶۰ تا ۶۸/۸۰ درصد وزنی و در دایک‌های تراکی آندزیتی این مقدار از ۵۳/۴۰ تا ۵۷/۶۰ درصد وزنی است. محتوی عناصر فرومنیزین ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2$) در کوارتز مونزودیوریت پورفیری برابر با ۱/۹۹ تا ۴/۳۸ درصد وزنی و در سنگ‌های تراکی آندزیتی برابر با ۷/۸۷ تا ۱۱/۹۷ درصد وزنی است (جدول‌های ۳ و ۴). این مقادیر نشان‌دهنده

کائولینیتی شدن، سریسیتی شدن و کلریتی شدن است.

موقعیت کوارتز مونزودیوریت پورفیری در نمودار نورماتو- $Q-A-P$ نشان می‌دهد که این سنگ‌ها در محدوده سنگ‌های کوارتز مونزودیوریت قرار می‌گیرند (شکل ۷- A). بر اساس نمودار TAS (مجموع آلکالی در برابر سیلیس)، دایک‌های این منطقه در محدوده تراکی آندزیت تا تراکی آندزیت بازالتی قرار می‌گیرند (شکل ۷- B). کوارتز مونزودیوریت‌های جنوب غرب جندق ماهیت سدیک داشته (میانگین $Na_2O/K_2O = 1/42$) و دایک‌های تراکی آندزیتی این منطقه دارای ماهیت سدیک تا پتاسیک هستند (میانگین $Na_2O/K_2O = 1/26$). تعیین گروه ماگمایی مذاب ایجادکننده کوارتز مونزودیوریت پورفیری و دایک‌های تراکی آندزیتی جنوب غرب جندق نیز نشان می‌دهد که کوارتز مونزودیوریت‌ها ماهیت ماگماهای کالک آلکالن و دایک‌های تراکی آندزیتی ماهیت کالک آلکالن پتاسیم بالا تا شوشونیتی دارند (شکل ۷- C). بر اساس مقادیر مولی $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ در برابر $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ کوارتز مونزودیوریت‌ها و دایک‌های تراکی آندزیتی ماهیت متآلومین دارند (شکل ۷- D).

کوارتز مونزودیوریت پورفیری و دایک‌های جنوب غرب جندق در نمودارهای بهنجارسازی نسبت به کندریت، غنی شدگی در LREE نسبت به HREE نشان می‌دهند (شکل ۸- A و C). در این سنگ‌ها آنومالی مثبت و یا منفی Eu وجود ندارد. سدیک بودن ترکیب پلاژیوکلاز در کوارتز مونزودیوریت پورفیری و حضور پلاژیوکلاز همراه با کلینوپروکسن در دایک‌های تراکی آندزیتی، موجب شده است تا آنومالی مثبت و یا منفی Eu در این سنگ‌ها وجود نداشته باشد. در نمودار بهنجارسازی نسبت به گوشته اولیه غنی شدگی در LILE نسبت به HFSE و HREE وجود دارد (شکل ۸- B و D). در تمامی نمونه‌ها، آنومالی مثبت Sr و آنومالی منفی Nb، Ta و Ti وجود دارد. یکی از نمونه‌های مربوط به سنگ‌های کوارتز مونزودیوریت پورفیری (C16) نسبت به سایر نمونه‌ها در نمودار بهنجارسازی نسبت به کندریت غنی شدگی بیشتری در میزان

LREE و در نمودار بهنجارسازی گوشته اولیه آنومالی مثبت شدیدتری در میزان Sr از خود نشان می‌دهد که شاید دلیل آن مقادیر بیشتر پلاژیوکلاز است.

بحث

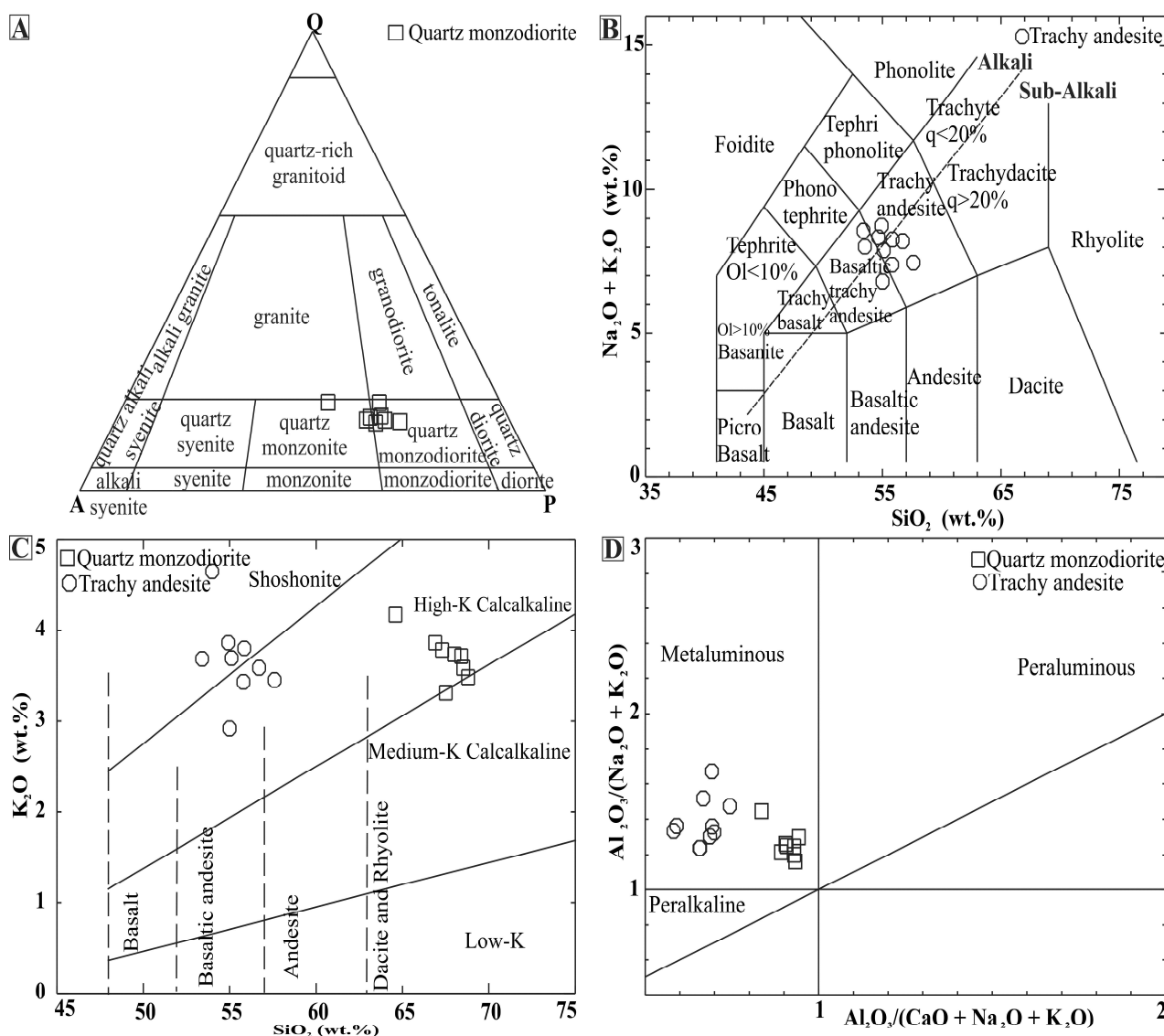
ماهیت ماگما

کوارتز مونزودیوریت پورفیری در جنوب غرب جندق دارای $SiO_2 = 64/60 - 68/80$ wt. %، مقادیر پایین $0/54 - 1/20$ $K_2O/Na_2O =$ مقادیر بالای $Sr = 434 - 1855$ ppm، مقادیر پایین $Yb < 0/95$ ppm و $Y < 11$ ppm هستند. بر اساس نمودار مقادیر Y در برابر Sr/Y و همچنین نمودار مقادیر بهنجار شده Yb_N در برابر $(La/Yb)_N$ نمونه‌های مورد بررسی در محدوده آداکیت قرار می‌گیرند (شکل ۹- A و B). دایک‌های تراکی آندزیتی جنوب غرب جندق نیز دارای مقادیر بالایی از $Yb < 1/41$ و $Y < 16/90$ ppm و $Sr = 859 - 2050$ ppm هستند و در نمودارهای Y در برابر Sr/Y و نمودار مقادیر بهنجار شده Yb_N در برابر $(La/Yb)_N$ در محدوده آداکیت قرار می‌گیرند (شکل ۹- A و B).

آداکیت‌ها به چهار دسته آداکیت‌های غنی از سیلیس (HSA)، آداکیت‌های فقیر از سیلیس (LSA)، آداکیت‌های قاره‌ای یا پتاسیک و آداکیت‌های آرکشن تقسیم می‌شوند (Moyen, 2009). گروهی از آندزیت‌ها نیز ویژگی‌های آداکیت‌ها را نشان می‌دهند که شبه آداکیت نامیده می‌شوند (Moyen, 2009). آداکیت‌های غنی از سیلیس دارای $SiO_2 > 60$ wt. %، $MgO < 3$ wt. %، میزان پایین $Y < 18$ ppm و $Yb < 400$ ppm مقدار $Sr/Y > 40$ هستند (Reich et al., 2003). آداکیت‌های فقیر از سیلیس دارای $SiO_2 = 50 - 60$ wt. % و از نسبت Sr/Y و La/Yb بیشتری نسبت به آداکیت‌های پر سیلیس برخوردارند (Moyen, 2009). از لحاظ کانی‌شناسی آداکیت‌های فقیر از سیلیس ممکن است حاوی فنوکریست‌های پیروکسن باشند (Martin et al., 2005). در آداکیت‌های فقیر از سیلیس مقدار LREE بیشتر و

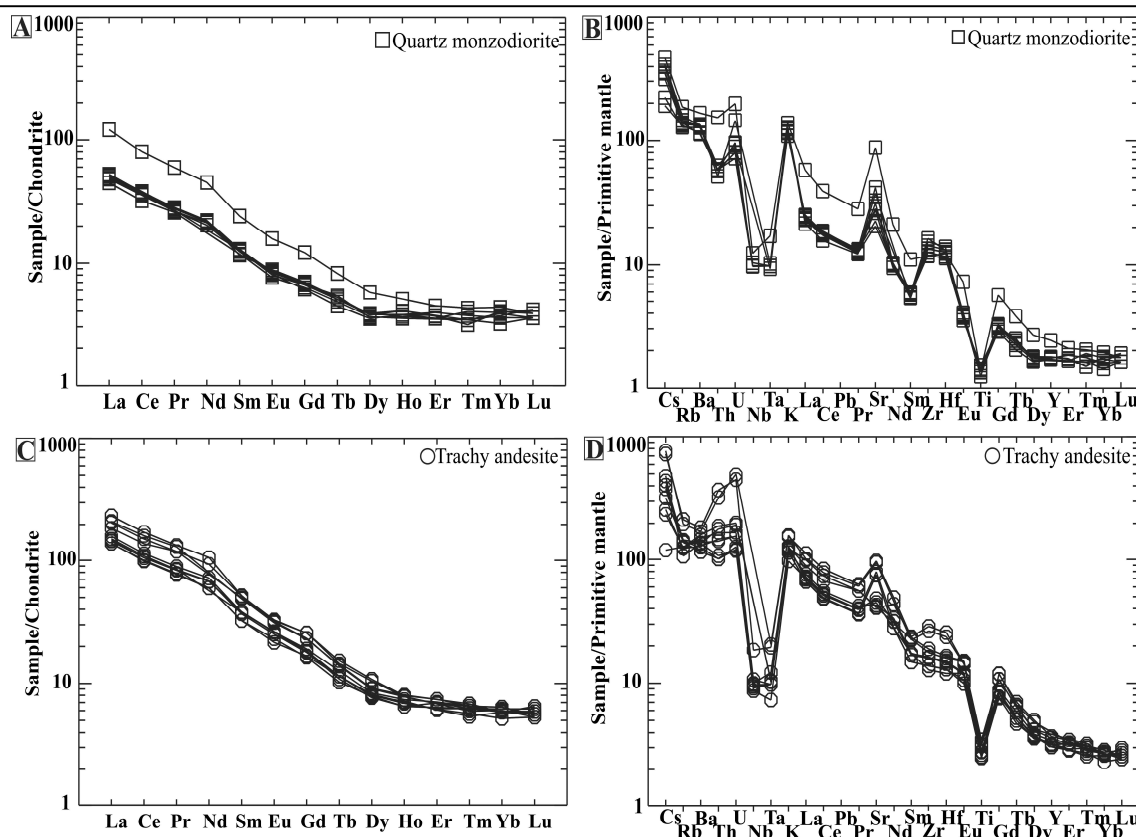
تفکیک آدایت‌های غنی از سیلیس و آدایت‌های فقیر از سیلیس سنگ‌های کوارتز مونزودیوریت پورفیری در محدوده آدایت‌های غنی از سیلیس و دایک‌های تراکی آندزیتی در محدوده آدایت‌های فقیر از سیلیس قرار می‌گیرند (شکل ۱۰- A و B و جدول ۵).

آنومالی مثبت شدیدتر Sr نسبت به آدایت‌های غنی از سیلیس وجود دارد. مقدار ارائه شده برای آدایت‌های غنی از سیلیس $Sr < 1100$ و برای آدایت‌های فقیر از سیلیس $Sr > 1100$ است (Martin et al., 2005). بر اساس میانگین ارائه شده برای آدایت‌های غنی از سیلیس و فقیر از سیلیس و نمودارهای



شکل ۷. نمودارهای ژئوشیمیایی کوارتز مونزودیوریت پورفیری و دایک‌های تراکی آندزیتی جنوب غرب جندق در A: نمودار تقسیم‌بندی کوارتز مونزودیوریت‌ها بر اساس ترکیب نورماتیو کوارتز-آلکالی-فلدسپار-پلاژیوکلاز (Le Maitre, 1989)، B: نمودار TAS (Total Alkalies-SiO₂) (Le Maitre, 2002)، C: نمودار SiO₂-K₂O (Le Maitre, 1989)، و D: نمودار A/NK-A/CNK (Irvine and Baragar, 1971)

Fig. 7. Geochemical diagrams of the porphyritic quartz monzodiorite and trachy andesitic dykes from southwest of Jandaq on the; A: Classification diagram of the quartz monzodiorites based on the Quartz-Alkali Feldspar-Plagioclase (QAP) normative composition (Le Maitre, 1989), B: Total Alkalies versus Silica (TAS) diagram (Le Maitre, 2002), C: SiO₂ versus K₂O diagram (Le Maitre, 1989), and D: A/NK versus A/CNK diagram (Irvine and Baragar, 1971)



شکل ۸. نمودارهای بهنجارسازی کوارتز مونزودیوریت پورفیری و دایک‌های تراکی‌آندزیتی جنوب غرب جندق در؛ A: الگوی بهنجارسازی عناصر نادر خاکی کوارتز مونزودیوریت‌ها نسبت به ترکیب کندریت، B: نمودار چند عنصری بهنجارشده کوارتز مونزودیوریت‌ها نسبت به ترکیب گوشته اولیه، C: الگوی بهنجارسازی عناصر نادر خاکی دایک‌های تراکی‌آندزیتی نسبت به ترکیب کندریت و D: نمودار چند عنصری بهنجارشده دایک‌های تراکی‌آندزیتی نسبت به ترکیب گوشته اولیه. (داده‌های کندریت برگرفته از مک‌دوناف و سان (McDonough and Sun, 1995) و داده‌های گوشته اولیه برگرفته از سان و مک‌دوناف (Sun and McDonough, 1989))

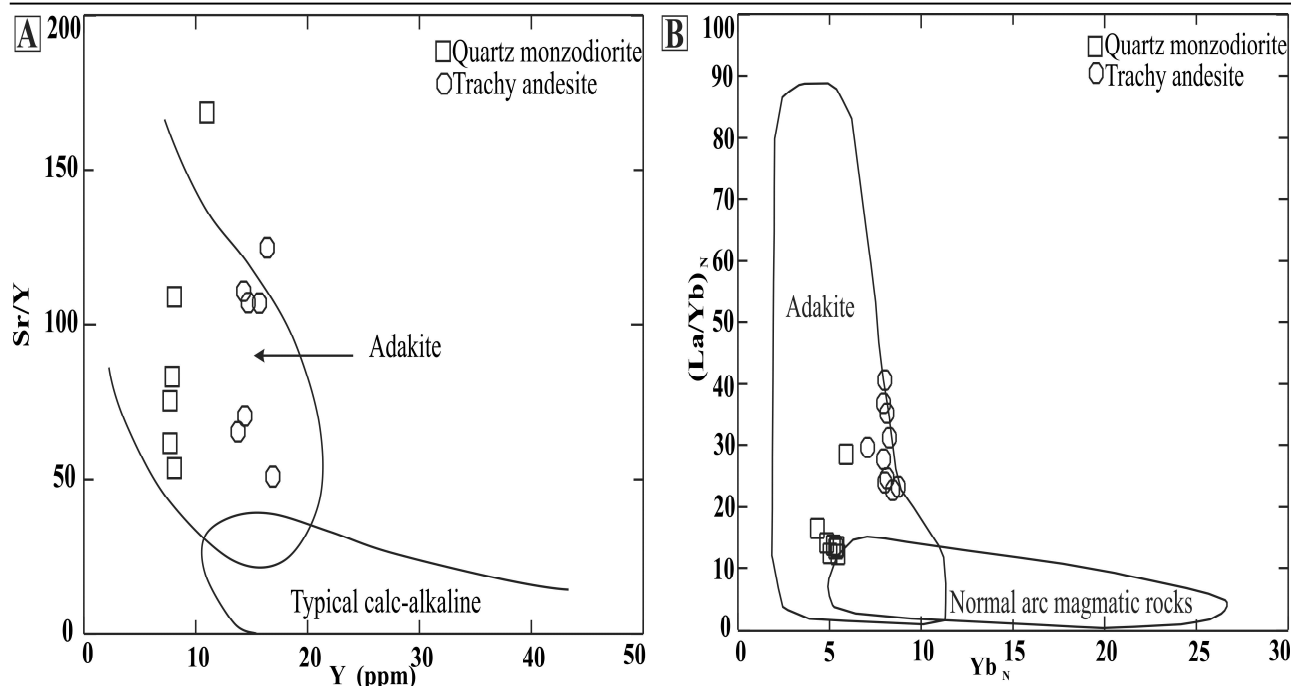
Fig. 8. Normalization diagrams of the porphyritic quartz monzodiorite and trachy andesitic dykes from southwest of Jandaq on the; A: Chondrite-normalized REE patterns of the quartz monzodiorites, B: Primitive mantle-normalized multi-element spider diagram of the quartz monzodiorites, C: Chondrite-normalized REE patterns of the trachy andesitic dykes, and D: Primitive mantle-normalized multi-element spider diagram of the trachy andesitic dykes. (REE contents of chondrite are taken from McDonough and Sun, 1995; and Trace and REE contents of primitive mantle are taken from Sun and McDonough, 1989)

سنگ منشأ

الف) کوارتز مونزودیوریت پورفیری

در مورد منشأ ماگماهای آداکیتی و نحوه تشکیل این ماگماها تاکنون نظرات مختلفی ارائه شده است که مهم‌ترین آنها عبارتند از: ۱- تولید ماگماهای آداکیتی در نتیجه ذوب پوسته اقیانوسی فرورونده که در حد رخساره گارنت آمفیولیت و یا اکلوژیت Defant and Drummond, 1990; (Martin et al., 2005). ۲- تولید ماگمای آداکیتی در نتیجه

ذوب گوشته که توسط مذاب حاصل از ذوب اسلب اقیانوسی فرورونده دچار متاسوماتیسم شده است (Martin et al., 2005; Grove et al., 2005). ۳- ایجاد ماگمای آداکیتی در نتیجه ذوب بخشی پوسته زیرین ضخیم و دگرگون شده در رخساره گارنت آمفیولیت یا اکلوژیت در فشار حداقل ۱۵ کیلو بار و دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی گراد (محدوده پایداری گارنت) (Zhu et al., 2009).



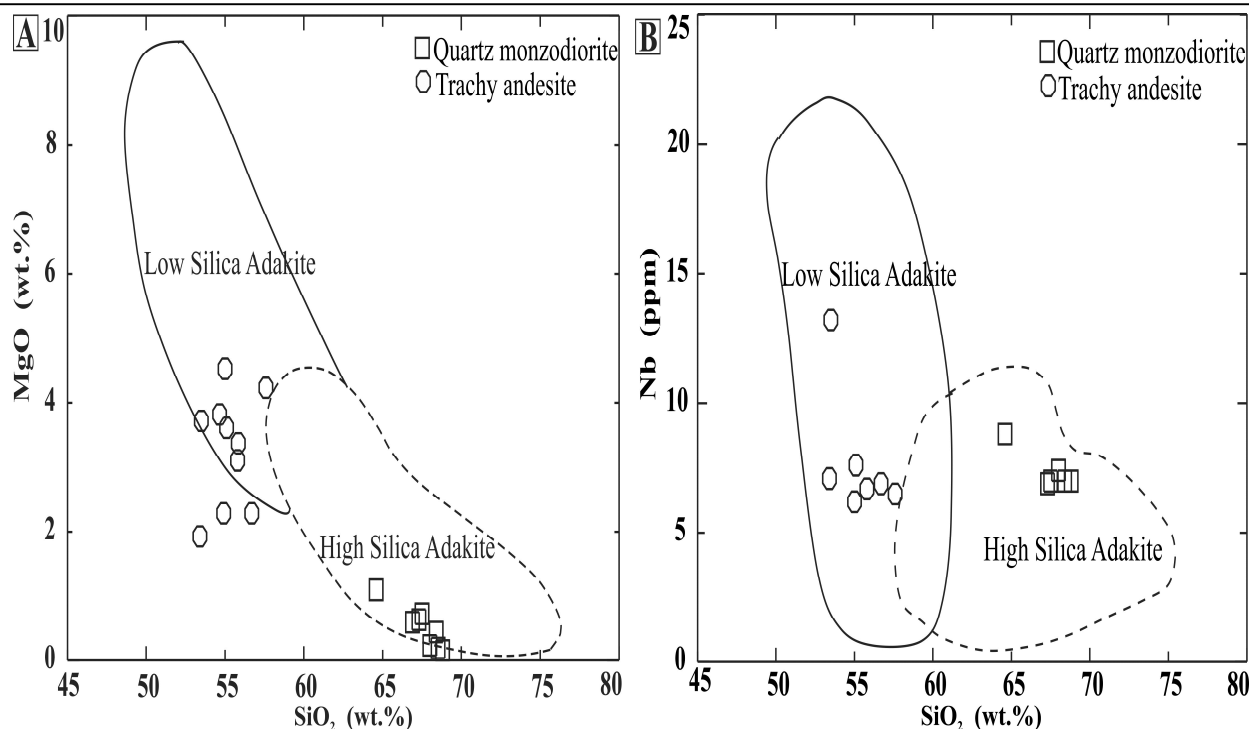
شکل ۹. نمودارهای ژئوشیمیایی تفکیک مذاب‌های حاصل از اسلب فرورونده از ماگماهای کالک‌آلکالن و موقعیت کوارتز مونزودیوریت پورفیری و دایک‌های تراکی‌آندزیت جنوب‌غرب جندق در؛ A: نمودار Y-Sr/Y (Defant and Drummond, 1990) و B: نمودار مقادیر بهنجارشده Yb_N - $(La/Yb)_N$ (Martin, 1999)

Fig. 9. Geochemical Diagrams for discrimination of adakites and normal calc-alkaline magmas; and position of porphyritic quartz monzodiorites and trachy andesitic dykes from southwest of Jandaq on the; A: Y versus Sr/Y diagram (Defant and Drummond, 1990), and B: Yb_N versus $(La/Yb)_N$ normalized diagram (Martin, 1999)

جدول ۵. ویژگی‌های ژئوشیمیایی برای تفکیک آداکیت‌های پر سیلیس و آداکیت‌های کم سیلیس (Martin et al., 2005) و داده‌های کوارتز مونزودیوریت پورفیری و دایک‌های تراکی‌آندزیتی جنوب‌غرب جندق

Table 5. Geochemical characteristics for discrimination of low-silica adakites and high-silica adakites (Martin et al., 2005), and data of porphyritic quartz monzodiorite and trachy andesitic dykes from southwest of Jandaq

	HSA	LSA	Average values in Quartz monzodiorite	Average values in Trachy andesite
SiO ₂	>60 wt.%	<60 wt.%	67.50 wt.%	54.92 wt.%
MgO	0.5-4 wt.%	4-9 wt.%	0.52 wt.%	3.29 wt.%
CaO+Na ₂ O	<11 wt.%	>10 wt.%	7.87 wt.%	10.63 wt.%
Sr	<1100 ppm	>1000 ppm	784.77 ppm	1347.06 ppm
pyroxene phenocryst	-	✓	-	✓
LREE	low LREE concentrations than LSA	High LREE concentrations than HSA	low LREE concentrations than LSA	High LREE concentrations than HSA

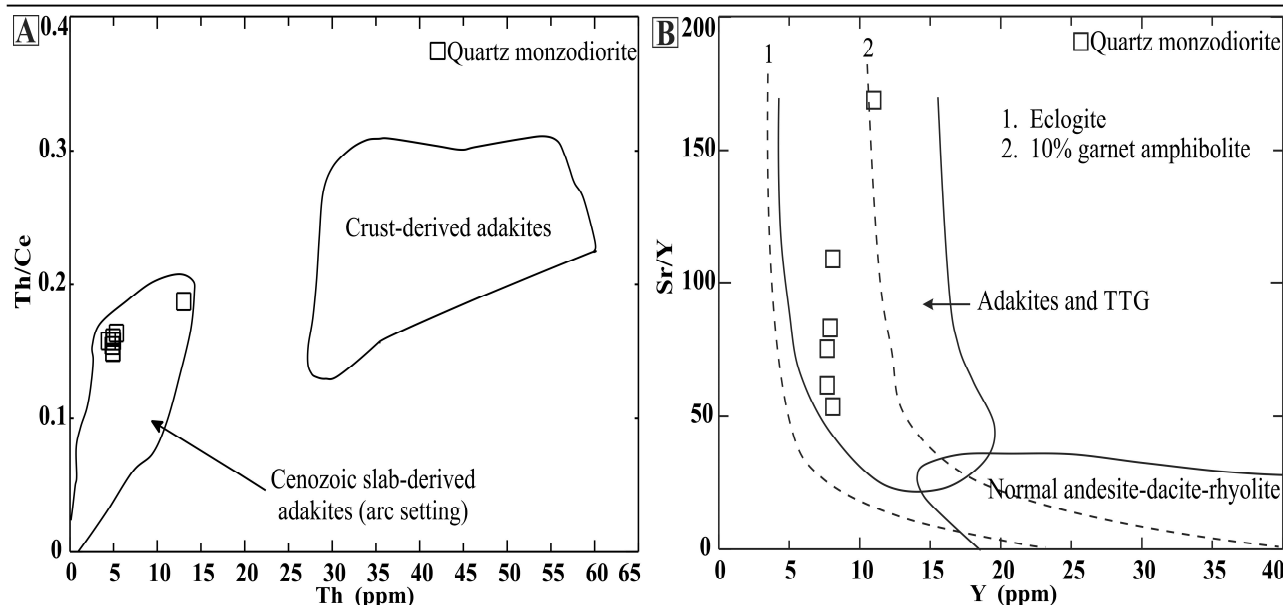


شکل ۱۰. نمودارهای ژئوشیمیایی تفکیک آداکیت‌های پر سیلیس از آداکیت‌های کم سیلیس و موقعیت کوارتز مونزودیوریت پورفیری و دایک‌های تراکی‌آندزیتی جنوب‌غرب جندق در A: نمودار $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ (Martin et al., 2005) و B: نمودار $\text{SiO}_2\text{-Nb}$ (Martin et al., 2005)

Fig. 10. Geochemical diagrams for discrimination of low-silica adakites and high-silica adakites and situation of porphyritic quartz monzodiorite and trachy andesitic dykes from southwest of Jandaq on the A: SiO_2 versus MgO diagram (Martin et al., 2005), and B: SiO_2 versus Nb diagram (Martin et al., 2005)

از عوامل مهم در تعیین میزان عناصر در ماگماهای آداکیتی، بود و یا نبود برخی از کانی‌های حاوی عناصر اصلی و کمیاب در سنگ منشأ است که می‌توان به نقش کانی‌های پلاژیوکلاز، آمفیبول، گارنت و کانی‌های تیتانیوم‌دار اشاره کرد. میزان غنی‌شدگی از Sr در مذاب‌های فلسیک تشکیل‌یافته از ذوب اسلب فرورونده اغلب توسط پلاژیوکلاز کنترل می‌شود (Martin et al., 2005). در کوارتز مونزودیوریت پورفیری مقدار $\text{Sr} = 434\text{--}1855$ ppm و میانگین آن 784 ppm است و در نمودار چند عنصری بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه، آنومالی مثبت Sr دیده می‌شود. نبود آنومالی مشخص مثبت و یا منفی Eu و مقدار زیاد Sr در این سنگ‌ها نشان می‌دهد که بخشی از پلاژیوکلازهای موجود در سنگ منشأ در ایجاد مذاب دخالت داشته‌اند (Martin et al., 2005).

مارتین و همکاران (Martin et al., 2005) عقیده دارند که آداکیت‌های غنی از سیلیس، مذاب‌های حاصل از ذوب اسلب اقیانوسی فرورونده با ترکیب اکلوژیت و یا گارنت آمفیبولیت در فشار معادل با فشار محدوده پایداری گارنت هستند که احتمال دارد در خلال صعود از میان گوه گوشته‌ای با پریدوتیت گوشته‌ای نیز واکنش نشان دهند. در کوارتز مونزودیوریت پورفیری که ویژگی‌های آداکیت‌های پر سیلیس را نشان می‌دهند، مقدار $\text{Th} = 4\text{--}13$ ppm و میانگین آن 5.91 ppm و مقدار $\text{Th/Ce} = 0.149\text{--}0.187$ و میانگین آن 0.158 است که این مقادیر نشان‌دهنده تشکیل سنگ‌های کوارتز مونزودیوریت پورفیری در محدوده آداکیت‌های با خاستگاه صفحه فرورونده و متعلق به کمان ماگمایی است (شکل ۱۱-A). بر اساس مقادیر Sr/Y و Y کوارتز مونزودیوریت‌ها در محدوده آداکیت‌های با منشأ گارنت آمفیبولیت قرار گرفته‌اند (شکل ۱۱-B).



شکل ۱۱. نمودارهای ژئوشیمیایی تعیین سنگ منشأ کوارتز مونزودیوریت پورفیری جنوب غرب جندق در A: نمودار Th-Th/Ce (Wang et al., 2008) و B: نمودار Y-Sr/Y (Defant and Drummond, 1990)

Fig. 11. Geochemical diagrams to determine the source rock of the porphyritic quartz monzodiorite from southwest of Jandaq on the A: Th versus Th/Ce diagram (Wang et al., 2008), and B: Y versus Sr/Y diagram (Defant and Drummond, 1990)

گارنت، هورنبلند و پلاژیوکلاز به همراه فازهای تیتاندار همچون روتیل و ایلمنیت هستند.

ب) دایک‌های تراکی آندزیتی

برخی از مذاب‌های آداکیتی در نتیجه تبلور ماگمای گوشته‌ای ایجاد می‌شوند که گوشته توسط مذاب حاصل از ذوب اسلب فرورونده دچار متاسوماتیسم شده است (Grove et al., 2005; Macpherson et al., 2006; Castillo, 2012). بنابراین برخی از ماگماها با ویژگی‌های آداکیتی حاصل ذوب بخشی اسلب نیستند و در واقع از ذوب بخشی منبع گوشته‌ای متاسوماتیسم شده (توسط مذاب‌های حاصل از ذوب اسلب) ایجاد شده‌اند. آداکیت‌های فقیر از سیلیس در زون‌های فرورانش فعال تشکیل می‌شوند (Martin et al., 2005). ماگماهای کالک‌آلکانل نیز احتمال دارد در محیط‌های فرورانش در نتیجه ذوب یک منشأ گوشته متاسوماتیسم شده، ایجاد شوند. در ماگماهای کالک‌آلکانل، سیالات حاصل از آب‌زدایی اسلب عامل متاسوماتیسم گوشته هستند و ماگمای به وجود آمده غنی

وجود هورنبلند و اکسیدهای آهن و تیتانیوم همچون روتیل و ایلمنیت در سنگ منشأ، آنومالی منفی Ti، Nb و Ta را سبب شده است و باعث می‌شود مذاب‌هایی با میزان Ti پایین، تشکیل شوند (Rapp and Watson, 1995; Rosu et al., 2004). کوارتز مونزودیوریت پورفیری آنومالی منفی Ti، Nb و Ta نشان داده و دارای $Nb/Ta = 12.57 - 18.50$ ، $Nb/Ta = 0.46 - 0.72$ و $Nb/La = 26.93 - 71.12$ است که نشان می‌دهد در سنگ منشأ کوارتز مونزودیوریت پورفیری آمفیبول و اکسیدهای آهن و تیتانیوم همچون روتیل و ایلمنیت حضور داشته‌اند. مقادیر پایین HREE و Y و محتوی پایین $Sm/Yb = 2.71 - 5.15$ بیانگر سنگ منشأ دارای گارنت است که گارنت در ایجاد مذاب دخالت نداشته است (Martin et al., 2005).

بر اساس مطالب بالا و داده‌های ژئوشیمیایی، سنگ منشأ کوارتز مونزودیوریت پورفیری جنوب غرب جندق یک اسلب اقیانوسی فرورونده با ترکیب گارنت آمفیبولیتی است که مجموعه کانی‌های باقی‌مانده موجود در سنگ منشأ آنها کلینوپیروکسن،

الگوی به‌شدت تفریق‌یافته از عناصر REE می‌شوند (Martin et al., 2005). از آنجایی که سنگ‌های مربوط به دایک‌های تراکی‌آندزیتی جنوب‌غرب جندق ویژگی‌های ماگماهای مرتبط با آداکیت‌های فقیر از سیلیس را نشان می‌دهند، می‌توان گفت که ذوب گوشته متاسوماتیسم شده (به‌وسیله مذاب‌های برگرفته از ذوب اسلب) باعث تشکیل مذاب‌های آداکیتی فقیر از سیلیس سازنده دایک‌های تراکی‌آندزیتی جنوب‌غرب جندق شده است.

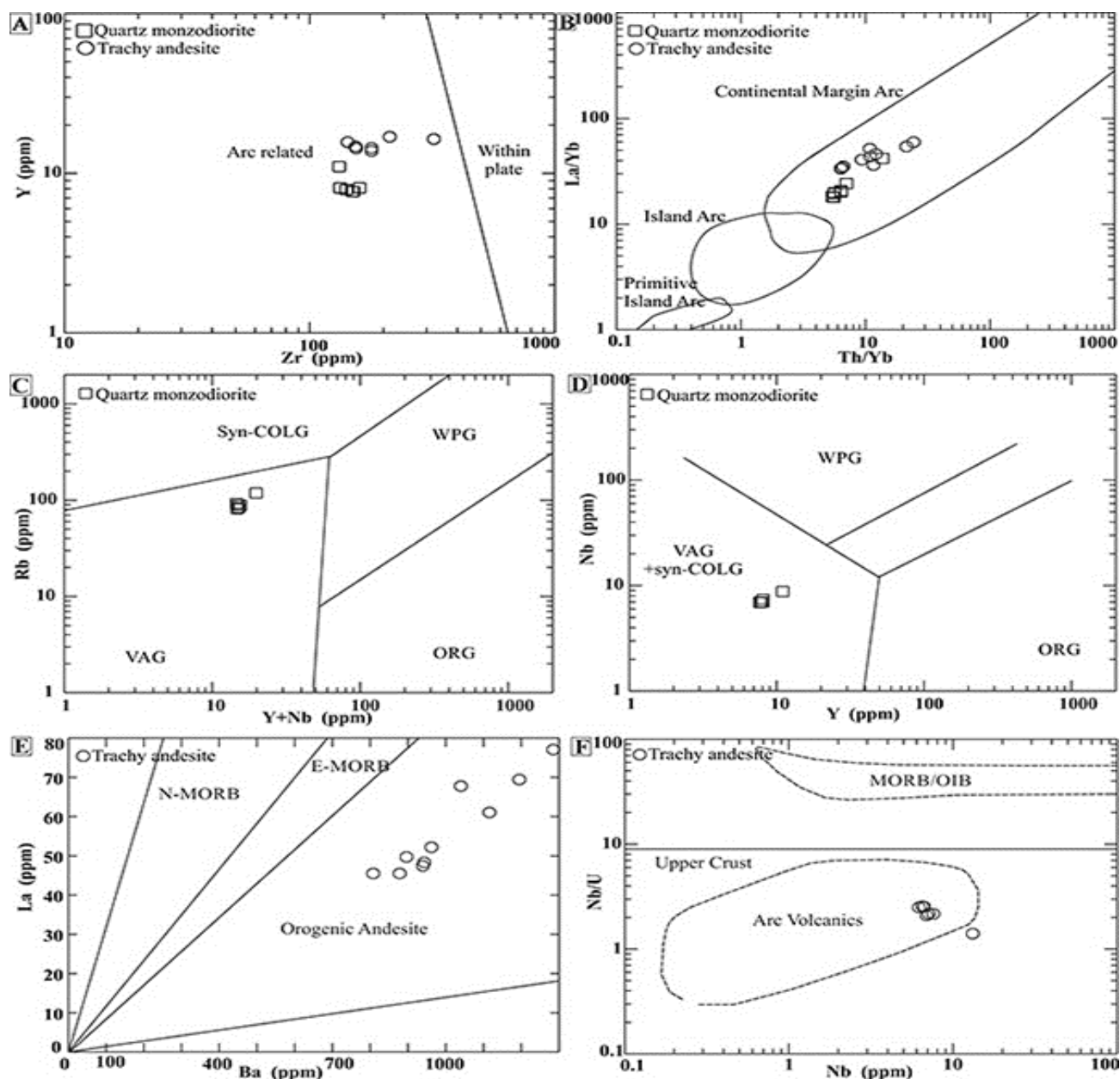
جایگاه تکتونیکی

آداکیت‌ها در محیط‌های مرتبط با فروورانش و در زمانی که اسلب فروورونده گرم و جوان باشد، تشکیل می‌شوند (Defant and Drummond, 1990; Martin et al., 2005). در کوارتز مونزودیوریت پورفیری و دایک‌های تراکی‌آندزیتی جنوب‌غرب جندق، غنی‌شدگی از عناصر LILE مثل Ba, Rb, Cs و تهی‌شدگی از عناصر HFSE مثل Ti, Nb و Ta دیده می‌شود. آنومالی مثبت یا منفی بسیار واضح Eu در این سنگ‌ها وجود ندارد. HREE‌ها و Y در کوارتز مونزودیوریت پورفیری و دایک‌های مورد بررسی مقادیر پایینی دارند. مقادیر کم HREE و Y بیانگر تشکیل مذاب در ارتباط با محیط‌های فروورانش است. همچنین از نسبت‌های Nb/La و Sr/Sm می‌توان برای شناسایی محیط تشکیل سنگ‌ها استفاده کرد. سنگ‌های مرتبط با فروورانش نسبت Nb/La پایین و Sr/Sm بالایی دارند (Arndt, 2008). کوارتز مونزودیوریت پورفیری دارای $0.46-0.22$ و $Nb/La = 378-169$ و $Sr/Sm = 82-312$ هستند. مجموع این شواهد بیانگر تشکیل کوارتز مونزودیوریت پورفیری و دایک‌های تراکی‌آندزیتی مورد بررسی در محیطی مرتبط با فروورانش است. بررسی مقادیر Y و Zr و نسبت Th/Yb در برابر La/Yb در کوارتز مونزودیوریت پورفیری و دایک‌های تراکی‌آندزیتی جنوب‌غرب جندق نشان می‌دهد که این سنگ‌ها در محیطی زمین‌ساختی وابسته به کمان ماگمایی و در محدوده کمان‌های حاشیه‌ای قاره‌ای فعال تشکیل شده‌اند (شکل ۱۲-A و

از LILE (K) تهی‌شده از Ta و Nb و دارای مقادیر بالای HREE هستند؛ در حالی که آداکیت‌های فقیر از سیلیس، دارای نسبت K_2O/Na_2O پایین‌تر بوده و میانگین Nb در این سنگ‌ها حدود ۱۱ ppm است و دارای مقادیر بالایی از ($1100 \text{ ppm} >$) Sr و مقادیر پایینی از HREE هستند (Martin et al., 2005). دایک‌های تراکی‌آندزیتی جنوب‌غرب جندق دارای $1.38-0.75$ K_2O/Na_2O و میانگین 0.92 ، مقدار $13.20-6.20$ ppm Nb= و به‌طور میانگین دارای 1347.06 ppm Sr > هستند که مشابه با مقادیر ارائه‌شده برای آداکیت‌های فقیر از سیلیس هستند. میانگین Yb در آداکیت‌های فقیر از سیلیس حدود 0.93 ppm بوده و در سنگ‌های داسیتی مربوط به محیط کمان حدود 4.4 ppm است (Martin et al., 2005). در تراکی‌آندزیت‌های جنوب‌غرب جندق میانگین Yb در حدود 1.3 ppm است. پریدوتیت‌ها به‌طور معمول دارای Yb حدود 0.37 ppm هستند که بیانگر این مطلب است که تمامی کانی‌های باقی‌مانده در پریدوتیت گوشته‌ای دارای $1 < \text{Min/Liq}$ Kd_{Yb} هستند که ناشی از رفتار Yb به‌عنوان عنصری شدیداً ناسازگار است (Martin et al., 2005). مذاب‌های حاصل از ذوب اسلب به‌وسیله مقادیر پایین Yb مشخص می‌شوند. متاسوماتیسم نیز چندان ترکیب پریدوتیت را از نظر میزان فراوانی Yb تغییر نمی‌دهد، بنابراین مقادیر پایین HREE در آداکیت‌های فقیر از سیلیس، نقش کانی‌های با $1 > \text{Min/Liq}$ $Kd_{(HREE)}$ را مشخص می‌کند (Martin et al., 2005). بر اساس پژوهش‌های پروتنو و همکاران (Proureau et al., 2001)، متاسوماتیسم گوشته به‌وسیله مذاب‌های حاصل از ذوب اسلب حدود ۱۵ برابر بیشتر از متاسوماتیسم سیال، پریدوتیت گوشته را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در این حالت پریدوتیت به مجموعه متاسوماتیکی پیروکسن + گارنت + آمفیبول + فلوگوپیت تبدیل می‌شود (Martin et al., 2005). آداکیت‌های فقیر از سیلیس به‌طور غیرمستقیم مرتبط با ذوب اسلب و واکنش‌های متاسوماتیسم در گوشته هستند که گارنت را در محدوده گسترده‌ای از ذوب پایدار نگه می‌دارد و باعث ایجاد

نوع آندزیت‌های کوه‌زایی هستند که همچون کوارتز مونزودیوریت پورفیری در یک کمان آتشفشانی تشکیل شده‌اند (شکل ۱۲-E و F).

(B). با توجه به میزان Y، Nb و Rb در کوارتز مونزودیوریت پورفیری، این سنگ‌ها در محدوده سنگ‌های اسیدی مرتبط با کمان‌های آتشفشانی قرار می‌گیرند (شکل ۱۲-C و D). دایک‌های تراکی آندزیتی بر اساس مقادیر La، Ba و U از



شکل ۱۲. نمودارهای ژئوشیمیایی تفکیک محیط زمین‌ساختی و موقعیت کوارتز مونزودیوریت پورفیری و دایک‌های تراکی آندزیتی جنوب غرب جندق در A: نمودار Zr-Y (Le Maitre, 1989)، B: نمودار Th/Yb-La/Yb (Condie, 1989)، C و D: نمودار (Y+Nb)-Rb و (Y+Nb)-Nb (Gill, 1981) و F: نمودار Nb-(Nb/U) (Hofmann et al., 1986).

Fig. 12. Geochemical Tectonic discrimination diagrams and position of the porphyritic quartz monzodiorite and trachy andesitic dykes from southwest of Jandaq on the A: Zr versus Y diagram (Le Maitre, 1989), B: Th/Yb versus La/Yb diagram (Condie, 1989), C and D: (Y+Nb) versus Rb and Y versus Nb diagrams (Pearce et al., 1984), E: Ba versus La diagram (Gill, 1981), and F: Nb versus (Nb/U) diagram (Hofmann et al., 1986).

در مورد ارتباط تشکیل این سنگ‌ها با فروورانش، می‌توان دو فرضیه پیشنهاد کرد: ۱- فروورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به سمت شمال شرق در امتداد تراست زاگرس به زیر ایران مرکزی که در طی تریاس تا ائوسن (Omrani et al., 2008; Torabi, 2009) رخ داده است و ۲- فروورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس که در قسمت غربی خرد قاره شرق-ایران مرکزی و در امتداد گسل کویر بزرگ صورت گرفته است (Shirdashtzadeh et al., 2014). مجموعه‌های افیولیتی اطراف خرد قاره شرق-ایران مرکزی، بقایایی از پوسته اقیانوسی نئوتتیس هستند که تشکیل این اقیانوس در اطراف خرد قاره شرق-ایران مرکزی در اواخر تریاس آغاز شده است (Shirdashtzadeh et al., 2014). این اقیانوس شاخه شرقی نئوتتیس است که بیشترین گسترش آن در کرتاسه پایانی رخ داده است. فرایند بسته شدن این اقیانوس به احتمال زیاد در کرتاسه پایانی شروع و در اوایل ائوسن به پایان رسیده است (Torabi, 2011). وجود افیولیت‌های مزوزوئیک تا اوایل سنوزوئیک (مانند افیولیت ناین، عشین و سورک) (Shirdashtzadeh et al., 2017) و ولکانیسم‌های کالک‌آلکالین تا شوشونیتی پالئوسن تا ائوسن (مانند واحدهای ولکانیکی کالک‌آلکالین و شوشونیتی جنوب غرب جندق، واحدهای ولکانیکی عروسان، واحدهای ولکانیکی کالک‌آلکالین شمال انارک) از جمله شواهد مربوط به فروورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس در اطراف خرد قاره شرق-ایران مرکزی هستند. منطقه مورد بررسی از تراست زاگرس بیش از ۳۵۰ کیلومتر فاصله دارد؛ در حالی که در مجاورت با گسل کویر بزرگ (محل فروورانش خرد قاره شرق-ایران مرکزی) و با توجه به تاریخچه زمین‌شناسی این منطقه، می‌توان رخداد فروورانش در جنوب غرب جندق را به فروورانش پوسته اقیانوسی اطراف خرد قاره شرق-ایران مرکزی نسبت داد.

نتیجه‌گیری

در جنوب غرب جندق (استان اصفهان) توده نفوذی با ترکیب کوارتز مونزودیوریت پورفیری رخنمون دارد که این توده نفوذی، توسط دایک‌های ائوسن با ترکیب تراکی‌آندزیتی

قطع شده است. بافت کوارتز مونزودیوریت‌ها پورفیریتیک بوده و عمده کانی‌های تشکیل دهنده سنگ پلاژیوکلاز ($93/40-99/20$ Ab=)، سانیدین ($69/40-80/70$ Or=) و کوارتز هستند؛ در حالی که دایک‌های تراکی‌آندزیتی اغلب بافت گرانولار، اینترگرانولار و پورفیریتیک داشته و کانی‌های اصلی آنها کلینوپروکسن (دیوپسید و اوریت)، پلاژیوکلاز (آندزین و لابرادوریت)، سانیدین و فلوگوپیت هستند. شواهد صحرایی، کانی‌شناسی و آنالیز سنگ کل بیانگر متفاوت بودن سنگ منشأ کوارتز مونزودیوریت پورفیری و تراکی‌آندزیت‌هاست. بررسی‌های ژئوشیمیایی کوارتز مونزودیوریت پورفیری و تراکی‌آندزیت‌ها بیان می‌کند که کوارتز مونزودیوریت پورفیری ماهیت کالک‌آلکالین و تراکی‌آندزیت‌ها ماهیت کالک‌آلکالین پتاسیم بالا تا شوشونیتی دارند و در ارتباط با فروورانش تشکیل شده‌اند. کوارتز مونزودیوریت پورفیری و تراکی‌آندزیت‌ها ویژگی‌های مرتبط با ماگماهای آداکیتی را نشان می‌دهند.

کوارتز مونزودیوریت پورفیری ویژگی‌های آداکیت‌های غنی از سیلیس و دایک‌های تراکی‌آندزیتی ویژگی‌های آداکیت‌های فقیر از سیلیس را نشان می‌دهند.

بررسی‌های پترولوژیکی نشان می‌دهد که در جنوب غرب جندق پس از آنکه پوسته اقیانوسی اطراف خرد قاره شرق-ایران مرکزی در طی کرتاسه پایانی تا اوایل ائوسن و در قسمت غربی خرد قاره شرق-ایران مرکزی فروورانش کرده است، در مرحله نخست کوارتز مونزودیوریت پورفیری به صورت توده نفوذی و با ماهیت شبیه به آداکیت‌های غنی از سیلیس از ذوب بخشی یک سنگ منشأ گارنت آمفیبولیتی تشکیل شده و در مرحله بعدی تراکی‌آندزیت‌ها به صورت دایک و با ویژگی‌هایی شبیه به آداکیت‌های فقیر از سیلیس در نتیجه ذوب پریدوتیت گواشته‌ای ایجاد شده‌اند که گواشته محل تشکیل این ماگما قبلاً توسط مذاب برگرفته از ذوب اسلب فروورنده دچار متاسوماتیسم شده است.

قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت‌های مالی معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه اصفهان تشکر می‌کنند.

References

- Ahmadian, J., Sarjoughian, F., Lentz, D., Esna-Ashari, A., Murata, M. and Ozawa, H., 2016. Eocene K-rich adakitic rocks in the Central Iran: Implications for evaluating its Cu–Au– Mo metallogenic potential. *Ore Geology Reviews*, 72(1): 323–342.
- Aistov, L., Melnikov, B., Krivyakin, B. and Morozov, L., 1984. *Geology of the Khur Area (Central Iran)*. Geological Survey of Iran, Tehran, Report 20, 132 pp.
- Arndt, N.T., 2008. *Komatiite*. Cambridge University Press, Cambridge, 467 pp.
- Calmus, T., Aguilon-Robles, A., Maury, R.C., Bellon, H., Benoit, M., Cotten, J., Bourgois, J. and Michaud, F., 2003. Spatial and temporal evolution of basalts and magnesian andesites (“bajaite”) from Baja California, Mexico: the role of slab melts. *Lithos*, 66(1): 77–105.
- Castillo, P.R., 2006. An overview of adakite petrogenesis. *Chinese Science Bulletin*, 51(3): 257–268.
- Castillo, P.R., 2012. Adakite petrogenesis. *Lithos*, 134(5): 304–316.
- Condie, K.C., 1989. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: identification and significance. *Lithos*, 23(1-2): 1-18.
- Defant, M.J. and Drummond, M.S., 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662–665.
- Gill, J.B., 1981. *Orogenic andesite and plate tectonics*. Springer, Berlin, 390 pp.
- Grove, T.L., Baker, M.B., Price, R.C., Parman, S.W., Elkin-Tanton, L.T., Chatterjee, N. and Muntener, O., 2005. Magnesian andesite and dacite lavas from Mt. Shasta, northern California: products of fractional crystallization of H₂O-rich mantle melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(5): 542–565.
- Hofmann, A.W., Jochum, K.P., Seufert, M. and White, W.M., 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 79(1-2): 33–45.
- Irvine, T. and Baragar, W., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523–548.
- Lan, T.G., Fan, H.R., Santosh, M., Hu, F.F., Yang, K.F., Yang, Y.H. and Liu, Y., 2012. Early Jurassic high-K calc-alkaline and shoshonitic rocks from the Tongshi intrusive complex, eastern North China Craton: implication for crust–mantle interaction and post-collisional magmatism. *Lithos*, 140(2): 183–199.
- Le Maitre, R.W., 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms, Recommendations of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Blackwell, Oxford, 193 pp.
- Le Maitre, R.W., 2002. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press, Cambridge, 254 pp.
- Macpherson, C.G., Dreher, S.T. and Thirlwall, M.F., 2006. Adakites without slab melting: high pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3): 581–593.
- Mahmoodabadi, L., 2009. *Petrography and petrology Eocene Volcanics from Southwest of Jandaq (Northeast Isfahan)*. M.Sc. Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran, 220 pp. (in Persian with English abstract)
- Martin, H., 1999. The adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411–429.
- Martin, H. and Moyen, J.F., 2002. Secular changes in tonalite-trondjemite-granodiorite composition as markers of the progressive cooling of earth. *Geology*, 30(4): 319–322.
- Martin, H., Smithies, R.H., Rapp, R., Moyen, J.F. and Champion, D., 2005. An overview of adakite, tonalite-trondjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79(1): 1–24.
- McDonough, W.F. and Sun, S.S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3–4): 223–253.
- Middlemost, E.A., 1989. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chemical Geology*, 77(1): 19–26.

- Moyen, J.F., 2009. High Sr/Y and La/Yb ratios: the meaning of the “adakitic signature”. *Lithos*, 112(3): 556–574.
- Nazari, G.H. and Torabi, G., 2017. Petrogenetic processes, crystallization conditions and nature of the Lower- Oligocene calc-alkaline spessartitic lamprophyres from Kal-e-kafi area (East of Anarak, Isfahan province). *Journal of Economic Geology*, 9(2): 375–395. (in Persian with English abstract)
- Nosouhian, N., Torabi, G. and Arai, S., 2016. Late Cretaceous dacitic dykes swarm from Central Iran, a trace for amphibolite melting in a subduction zone. *Geotectonics*, 50(3): 295–312.
- Omran, J., Agard, P., Whitechurch, H., Benoit, M., Prouteau, G. and Jolivet, L., 2008. Arc-magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: A new report of adakites and geodynamic consequences. *Lithos*, 106(3–4): 380–398.
- Pearce, J.A., Lippard, S.J. and Roberts, S., 1984. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites. In: B.P. Kokelaar and M.F. Howells (Editors), *Marginal Basin Geology: Volcanic and Associated Sedimentary and Tectonic Processes in Modern and Ancient Marginal Basins*. Geological Society of London Publications, Special Publication, 16, London, pp. 77–94.
- Prouteau, G., Scaillet, B., Pichavant, M. and Maury, R.C., 2001. Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts derived from subducted oceanic crust. *Nature*, 410(6825): 197–200.
- Rajabi, S. and Torabi, G., 2013. Mineralogy and geochemistry of xenoliths in the Eocene volcanic rocks from southwest of Jandaq. *Journal of Economic Geology*, 5(1): 65–82. (in Persian with English abstract)
- Rapp, R.P. and Watson, E.B., 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931.
- Reich, M., Parada, M.A., Palacios, C., Dietrich, A., Schultz, F. and Lehmann, B., 2003. Adakite-like signature of Late Miocene intrusions at the Los Pelambres giant porphyry copper deposit in the Andes of central Chile: metallogenic implications. *Mineralium Deposita*, 38(7): 876–885.
- Rosu, E., Seghedi, I., Downes, H., Alderton, D.H.M., Szakacs, A., Pecskey, Panaiotu, C.E. and Nedelcu, L., 2004. Extension related Miocene calc-alkaline magmatism in the Apuseni Mountains, Romania: Origin of magmas. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 84(1): 153–172.
- Shirdashtzadeh, N., Torabi, G., Meisel, T., Arai, S., Bokhari, S.N.H., Samadi, R. and Gazel, E., 2014. Origin and evolution of metamorphosed mantle peridotites of Darreh Deh (Nain Ophiolite, Central Iran): implications for the Eastern Neo-Tethys evolution. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*, 273(1): 89–120.
- Shirdashtzadeh, N., Torabi, G. and Samadi, R., 2017. Petrography and mineral chemistry of metamorphosed mantle peridotites of Nain Ophiolite (Central Iran). *Journal of Economic Geology*, 9(1): 57–72. (in Persian with English abstract)
- 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 the Ocean Basins*. Geological Society of London Publications, Special Publication, 42, London, pp. 313–345.
- Tabatabaei Manesh, S.M., Sharifi, M. and Romanko, A., 2010. P-T condition of the Jandagh metapelitic schists, Northeastern Isfahan Province, Iran. *Petrology*, 18(3): 308–317.
- Tang, Y., Li, X., Xie, Y., Liu, L., Lan, T., Meffre, S. and Huang, C., 2017. Geochronology and geochemistry of late Jurassic adakitic intrusions and associated porphyry Mo–Cu deposit in the Tongcun area, east China: Implications for metallogenesis and tectonic setting. *Ore Geology Reviews*, 80(1): 289–308.
- Torabi, G., 2009. Subduction-related Eocene shoshonites from the Cenozoic Urumieh-Dokhtar magmatic arc (Qaleh-Khargooshi area, West of the Yazd province, Iran). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 18(4): 583–613.
- Torabi, G., 2010. Early Oligocene alkaline lamprophyric dykes from the Jandaq area (Isfahan Province, Central Iran): Evidence of Central–East Iranian microcontinent confining

- oceanic crust subduction. *Island Arc*, 19(2): 277–291.
- Torabi, G., 2011. Late Permian blueschist from Anarak ophiolite (Central Iran, Isfahan province), a mark of multi-suture closure of the Paleo-Tethys Ocean. *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas*, 28(3): 544–554.
- Torabi, G., 2012. Late Permian post-ophiolitic trondhjemites from Central Iran: a mark of subduction role in growth of Paleozoic continental crust. *Island Arc*, 21(3): 215–229.
- Vernon, R. H., 2004. A practical guide to rock microstructure. Cambridge University Press, Cambridge, 606 pp.
- Wang, Q., Wyman, D.A., Xu, J., Wan, Y., Li, C., Zi, F., Jiang, Z., Qiu, H., Chu, Z., Zhao, Z. and Dong, Y., 2008. Triassic Nb-enriched basalts, magnesian andesites, and adakites of the Qiangtang terrane (Central Tibet): evidence for metasomatism by slab-derived melts in the mantle wedge. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155(4): 473–490.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Zhang, J.Q., Li, S.R., Santosh, M., Wang, J.Z. and Li, Q., 2015. Mineral chemistry of high-Mg diorites and skarn in the Han-Xing Iron deposits of South Taihang Mountains, China: Constraints on mineralization process. *Ore Geology Reviews*, 64(1): 200–214.
- Zhu, A.C., Zhao, Z.D., Pan, G.T., Lee, H.Y., Kang, Z.Q., Liao, Z.L., Wang, L.Q., Li, G.M., Dong, G.C. and Liu, B., 2009. Early Cretaceous subduction-related adakite-like rocks of the Gangdese Belt, southern Tibet: products of slab melting and subsequent melt-peridotite interaction? *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 298–309.



Petrology of porphyritic quartz monzodiorite stock and Eocene dykes with adakitic nature from SW of Jandaq (NE of Isfahan province); Evidence of oceanic crust subduction around the Central-East Iranian Microcontinent

Ahmad Jamshidzaei and Ghodrat Torabi*

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

Submitted: Apr. 26, 2017

Accepted: Nov. 29, 2017

Keywords: *Quartz monzodiorite, Trachy andesite, Subduction, Adakite, Eocene, Central-East Iranian Microcontinent*

Introduction

The “adakite” term was used for the first time by Defant and Drummond (1990) to display Cenozoic arcs igneous rocks with intermediate composition ($\text{SiO}_2 > 56$ wt.%), which were produced by partial melting of subducted oceanic crust. The adakites are series of intermediate to acidic rocks, with composition range from hornblende-andesite to dacite and rhyolite; and basaltic composition are lacking. In adakitic magmas, phenocrysts are mainly plagioclase, hornblende and biotite; while orthopyroxene and clinopyroxene phenocrysts are known only in mafic andesites (Calmus et al., 2003). Geochemically, adakites are identified with $\text{SiO}_2 > 56$ wt.%, $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15$ wt.%, $\text{MgO} < 3$ wt.%, $\text{Sr} > 400$ ppm and enriched LILE and LREE and depleted Y and HREE ($\text{Y} < 18$ ppm, $\text{Yb} < 1.9$ ppm) and high ratios of $\text{Sr/Y} > 40$ and $\text{La/Yb} > 20$ (Castillo, 2006 and Castillo, 2012). By using geochemical data, adakites were classified into high silica adakites (HSA, $\text{SiO}_2 > 60$ wt.%) and low silica adakites (LSA, $\text{SiO}_2 < 60$ wt.%) main groups. The high silica adakites were produced by partial melting of subducted oceanic crust basalts and the resulting melts also interact with peridotite during their ascent through the mantle wedge. While, low silica adakites were produced by melting of mantle peridotite that were metasomatized by melts resulting from slab (Martin and Moyen, 2002).

The intrusion bodies with porphyritic texture has

been studied and reported in different areas (e.g. Lan et al., 2012; Zhang et al., 2015). This intrusion bodies are often in a stock shape and the texture is porphyritic due to fast crystallization.

The study area (Kuh-e Godar-e Siah) is located in southwest of Jandaq (northeast of Isfahan province) and northwest of Central-East Iranian Microcontinent. The quartz monzodiorite intrusion with stock shape cross cutting by Eocene dykes swarm with trachy andesitic composition. In this paper, the petrology and chemical characteristics of quartz monzodiorites and trachy andesitic dykes are discussed.

Material and methods

The chemical compositions of minerals from quartz monzodiorites and dykes were conducted by a JEOL JXA-8600 (WDS) electron probe microanalyzer (EPMA) at the Kanazawa University, Japan. Analyses were performed by an accelerating voltage of 20 kV and a beam current of 20 nA. The Fe^{2+} and Fe^{3+} contents of minerals were calculated by assuming mineral stoichiometry. The $\text{Fe}^{2+}\#$ and $\text{Mg}\#$ parameters of minerals are $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})$ and $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ atomic ratios, respectively. Representative chemical analyses of the minerals are listed in Table 1 and 2. To obtain whole rock chemical data, eighteen samples of the studied rocks were analyzed at the ALS-Mineral Company of Canada, by a combination of inductively coupled plasma spectrometry (ICP-MS) and inductively

*Corresponding authors Email: torabighodrat@sci.ui.ac.ir

coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES) methods. The whole rocks geochemical data are presented in Table 3 and 4. Also, X-ray diffraction analyses were carried out in order to typify the K-feldspar mineral using an XRD D8 ADVANCE, Bruker machine, at the Central Laboratory of the University of Isfahan. The FeO and Fe₂O₃ concentrations are recalculated from Fe₂O₃^{*}, using recommended ratios of Middlemost (1989). Mineral abbreviations are from Whitney and Evans (2010).

Results and discussion

The main texture in quartz monzodiorites is porphyritic; and Eocene dykes are granular, intergranular and porphyritic in texture. The quartz monzodiorites consist of plagioclase (albite), sanidine, quartz, biotite, muscovite, chlorite, magnetite, calcite and apatite. The minerals in trachy andesitic dykes are plagioclase (andesine and labradorite), clinopyroxene (diopside and augite), sanidine, phlogopite, quartz, amphibole, magnetite, calcite and apatite. The chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized multi-elemental diagram of the quartz monzodiorites and trachy andesitic dykes show enrichment in LREE and LILEs and depletion in HFSEs such as Ta, Nb and Ti. There is no evident positive or negative anomaly of Eu. Petrographical and geochemical characteristics of quartz monzodiorites and trachy andesitic dykes show that these rocks have been derived from different sources. The quartz monzodiorites have high content of La/Yb= 17.49-41.89, SiO₂= 64.60-68.80 wt.%, Sr= 434-1855 ppm, Sr/Y= 53.58-168.63 and low content of MgO= 0.16-1.10 wt.%, Y< 11 ppm and Yb< 0.95 ppm that show characteristics of high silica adakites which have been produced by melting of subducted oceanic crust. The trachy andesitic dykes have La/Yb= 33.45-59.76, SiO₂= 53.40-57.60 wt.%, Sr= 859-2050 ppm, Sr/Y= 50.82-125, MgO= 1.93-4.53 wt.%, Y< 13.8 ppm and Yb< 1.14 ppm, which display characteristics related to low silica adakites, produced by melting of metasomatized mantle peridotite.

Acknowledgments

The authors thank the University of Isfahan for financial supports.

References

- Calmus, T., Aguillon-Robles, A., Maury, R.C., Bellon, H., Benoit, M., Cotten, J., Bourgois, J. and Michaud, F., 2003. Spatial and temporal evolution of basalts and magnesian andesites ("bajaite") from Baja California, Mexico: the role of slab melts. *Lithos*, 66(1): 77–105.
- Castillo, P.R., 2006. An overview of adakite petrogenesis. *Chinese Science Bulletin*, 51(3): 257–268.
- Castillo, P.R., 2012. Adakite petrogenesis. *Lithos*, 134(5): 304–316.
- Defant, M.J. and Drummond, M.S., 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662–665.
- Lan, T.G., Fan, H.R., Santosh, M., Hu, F.F., Yang, K.F., Yang, Y.H. and Liu, Y., 2012. Early Jurassic high-K calc-alkaline and shoshonitic rocks from the Tongshi intrusive complex, eastern North China Craton: implication for crust–mantle interaction and post-collisional magmatism. *Lithos*, 140(2): 183–199.
- Martin, H. and Moyen, J.F., 2002. Secular changes in tonalite-trondhjemite-granodiorite composition as markers of the progressive cooling of earth. *Geology*, 30(4): 319–322.
- Middlemost, E.A., 1989. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chemical Geology*, 77(1): 19–26.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Zhang, J.Q., Li, S.R., Santosh, M., Wang, J.Z. and Li, Q., 2015. Mineral chemistry of high-Mg diorites and skarn in the Han-Xing Iron deposits of South Taihang Mountains, China: Constraints on mineralization process. *Ore Geology Reviews*, 64(1): 200–214.