

پتروولوژی، سال هفتم، شماره بیست و پنجم، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۱۳۹-۱۵۶  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۱۴

## ژئوشیمی و جایگاه زمین‌ساختی گدازه‌های ترسیری منطقه گارجگان (جنوب غرب بیرجند)

آمنه ابوطالبی، سید سعید محمدی\*، محمدحسین زرین‌کوب  
گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

### چکیده

منطقه گارجگان در ۶۰ کیلومتری جنوب‌غرب بیرجند و در حاشیه شمال شرقی بلوک لوت قرار دارد. در این منطقه سنگ‌های گدازه‌ای ترسیری به شکل گنبد و با ترکیب داسیت، ریوداسیت، تراکی‌اندزیت و سنگ‌های آذرآواری توف و برش رخنمون دارند. بویی‌کلیتیک و ساب‌افیتیک بافت غالب در گدازه‌های منطقه پورفیری با زمینه ریزبلور است. فنوکریست‌های رایج در سنگ‌های داسیتی و ریوداسیتی، کوارتز، پلاژیوکلاز، هورنبلند و بیوتیت و در تراکی‌اندزیت‌ها، پلاژیوکلاز، هورنبلند، پیروکسن، بیوتیت و سانیدین هستند. توده‌های کوچکی از الیوین بازالت منسوب به پلیوکواترنری نیز در منطقه مشاهده می‌شوند که الیوین، پیروکسن و پلاژیوکلاز، فنوکریست‌های عمده آنها را تشکیل می‌دهند. دگرسانی‌های رایج در سنگ‌های گدازه‌ای ترسیری، سیلیسی، آرژیلیک، کربناتی‌شدن و اپاسیتی‌شدن هستند. سری ماگمایی این سنگ‌ها کالک‌آلکان است. نمودارهای به‌هنجارشده عناصر کمیاب و خاکی نادر گدازه‌های اسیدی و حد واسط نسبت به گوشته اولی و کندریت، گویای ارتباط زایشی نمونه‌ها با یک‌دیگر و غنی‌شدگی از LREE نسبت به HREE و هم‌چنین، LILE نسبت به HFSE (Nb و Ti) است که شاخص ماگماهای کالک‌آلکان وابسته به مناطق فرورانش در یک حاشیه فعال قاره‌ای است. بالابودن مقدار  $\text{SiO}_2$  (میانگین ۶۲/۶۱ درصد وزنی)،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (میانگین ۱۶/۲۹ درصد وزنی)، Sr (میانگین ۸۰۶ قسمت در میلیون) همراه با پایین‌بودن مقدار Yb (میانگین ۱/۷ قسمت در میلیون) و Y (میانگین ۱۵/۲۷ قسمت در میلیون) و نبودن آنومالی منفی Eu، گرایش این مجموعه به سنگ‌های آداکیتی را آشکار می‌کند. این ماگماتیسیم می‌تواند خاستگاه گارنت‌آمفیبولیتی مرتبط با یک فرایند پس از برخورد داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: گنبد داسیتی، آداکیت، پس از برخورد، گارجگان، لوت

### مقدمه

" ۱۷ ۵۹' ۵۸° شرقی و عرض‌های جغرافیایی " ۳۶' ۳۴"  
۳۲° تا " ۵۱' ۳۶' ۳۲° شمالی در پهنه ساختاری بلوک  
لوت قرار دارد (Stocklin, 1968). فعالیت ماگمایی در

منطقه گارجگان در ۶۰ کیلومتری جنوب‌غرب  
بیرجند بین طول‌های جغرافیایی " ۵۱' ۵۲' ۵۸° تا

\* ssmohammadi@birjand.ac.ir

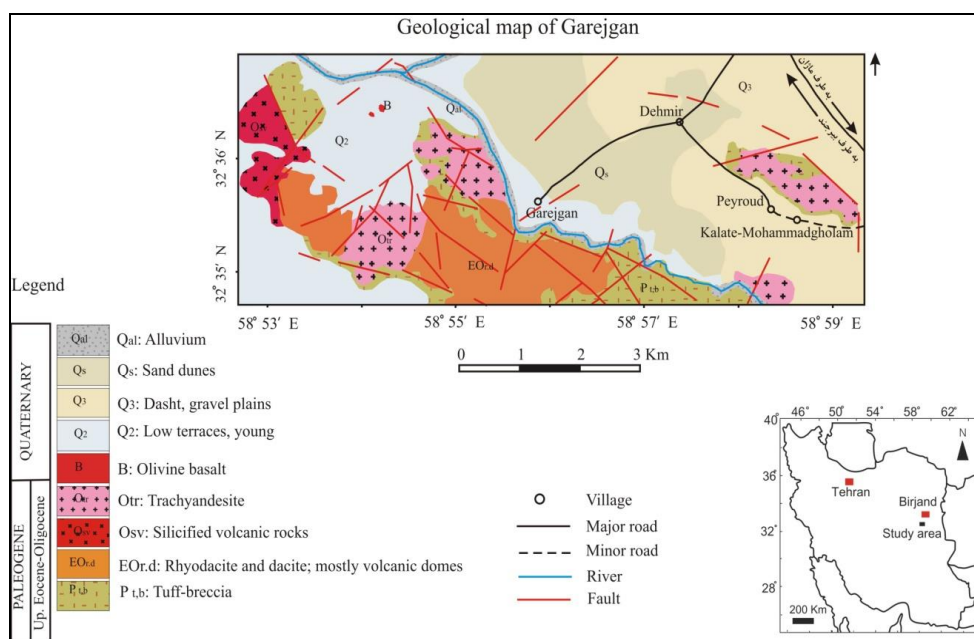
Copyright©2016, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

با مشارکت پوسته بالایی و تفریق ( Chiaradia, 2009; Guo *et al.*, 2007; Castillo, 2006)، تبلور تفریقی بازالت‌های دربردارنده آمفیبول در خزینه ماگمایی (Zhu *et al.*, 2009; Castillo, 2006)، ذوب‌بخشی بازالت دگرگون‌شده و اکلوزیتی‌شده پوسته پایینی (Topuz *et al.*, 2011; Fang *et al.*, 2010; Karsli *et al.*, 2005; Topuz *et al.*, 2010) و ذوب‌بخشی پوسته پایینی رهاشده در استنوسفر (Pinto-Linares *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2002). Zarrinkoub و همکاران (۲۰۱۰) با توجه به بررسی سرگذشت حوضه اقیانوسی در شرق ایران و بسته‌شدن آن در ۸۶ میلیون سال پیش و Pang و همکاران (۲۰۱۳) با ارائه الگوی ژئودینامیکی برای تکامل شرق ایران، ماگماتیسیم ائوسن - الیگوسن را در پهنه‌های لوت و سیستان، پس‌برخوردی و علت ماگماتیسیم را فرایند Delamination پس از برخورد بیان کرده‌اند. سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان به‌عنوان بخشی از فعالیت‌های ماگمایی ائوسن - الیگوسن تاکنون از لحاظ پترولوژیک مطالعه نشده‌اند. بنابراین، در این پژوهش، ژئوشیمی و پتروژنز آنها بررسی می‌شود.

### زمین‌شناسی منطقه

منطقه گارجگان در محدوده نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ خوسف برگرفته از Vahdati Daneshmand and Kholghi (۱۹۸۸) قرار دارد. بر اساس این نقشه، واحدهای سنگی ترسیری دربردارنده سنگ‌های آذرآواری و گدازه هستند. برای تشخیص واحدهای سنگی این منطقه، ابتدا نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ با استفاده از تلفیق تصاویر ماهواره‌ای محدوده مورد نظر با داده‌های حاصل از مطالعات سنگ‌شناسی تهیه شد (شکل ۱). گدازه‌ها با شکل‌های گنبدی روی واحدهای آذرآواری رخنمون دارند. سنگ‌های آتشفشانی منطقه، داسیت، ریوداسیت و تراکی‌اندزیت هستند که بیش‌تر، رنگ خاکستری دارند (شکل ۲ - A).

بلوک لوت در ژوراسیک میانی (۱۶۵-۱۶۲ میلیون سال) شروع شده است و در ترسیری به اوج خود رسیده است (Karimpour *et al.*, 2011). حاصل ماگماتیسیم ائوسن - الیگوسن شرق ایران، سنگ‌های آتشفشانی (گدازه‌ها و آذرآواری‌ها) و نیمه‌عمیق فراوان است که ناحی‌های در حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد (Pang *et al.*, 2013). در منطقه گارجگان نیز سنگ‌های آتشفشانی عمدتاً با ترکیب داسیت، ریوداسیت و تراکی‌اندزیت به همراه سنگ‌های آذرآواری نظیر توف و برش مشاهده می‌شوند که با فعالیت‌های ماگماتیسیم ائوسن - الیگوسن در بلوک لوت در ارتباط هستند (Pang *et al.*, 2013). بررسی‌های پترولوژیک پیرامون ولکانیسم ترسیری در برخی از مناطق جنوب‌غرب بیرجند نشان می‌دهد این سنگ‌ها از نوع کالک‌آکالن و با ماهیت آداکیتی هستند (Mohammadi *et al.*, 2011; Zarrinkoub *et al.*, 2011). آداکیت یک واژه پترولوژی است که Defant and Drummond (۱۹۹۰) برای نخستین بار آن را برای سنگ‌های آتشفشانی - نفوذی با سیلیس بالا و مقادیر Sr/Y و La/Yb بالا در کمان‌های سنوزویک مرتبط با فرورانش لیتوسفر اقیانوسی جوان با سن کم‌تر از ۲۵ میلیون سال به کار بردند. پوسته اقیانوسی داغ و جوان در مقایسه با پوسته اقیانوسی سرد و قدیمی‌تر بخش بیش‌تری از گرمای اولی خود را حفظ کرده است و برای ذوب مستعدتر است. در سال‌های اخیر پژوهش‌های گسترده‌ای در مورد خاستگاه آداکیت‌ها انجام شده است؛ اما این بررسی‌ها با مجادلات و سردرگمی‌های بسیاری همراه بوده است (Castillo, 2012). ویژگی‌های ژئوشیمیایی آداکیت‌ها منحصر به ذوب حاصل از فرورانش نیست و به طور گسترده‌ای منطبق با ذوب بازالت آبدار در فشار بالا است (Defant and Drummond, 1990). موارد دیگری نیز برای خاستگاه آداکیت‌ها در نظر گرفته شده است، از جمله شکسته‌شدن پوسته اقیانوسی و بالای‌آمدگی استنوسفر (Jahangiri *et al.*, 2007)، ماگمای مشتق شده از گوشته



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه گارجگان (جنوب غرب بیرجند)، تعیین نام واحدهای سنگی و سن آنها، برگرفته از Vahdati و Daneshmand و Kholghi (۱۹۸۸).

این انکلاوها اغلب تیره‌رنگ و به صورت بیضوی هستند و با سنگ میزبان مرز ناگهانی دارند (شکل ۲- B). منطقه گارجگان از نظر لرزه‌خیزی نیز فعال است؛ به طوری که عملکرد گسل‌ها موجب دگرریختی نهشته‌های کواترنر، ظهور چشمه‌های گسلی و ایجاد اسکارپ‌های پلکانی شده است (شکل ۲- C). این نشان‌دهنده فعالیت‌های مکرر قطعات گسلی در طول زمان است (Zamani Babgahri, 2009). در قسمت شمال غربی منطقه و در مجاورت گسل‌ها، سنگ‌های آتشفشانی، سیلیسی شده‌اند (واحد سنگی Osv، شکل ۱).

توده‌های کوچکی از الیوین‌بازالت منسوب به پلیوکواترنری نیز در شمال غربی گارجگان مشاهده می‌شوند. سنگ‌های آذرآواری، توف و برش هستند. ترکیب گندهای منطقه گارجگان از بخش شرقی به طرف غرب تغییر کرده است و از داسیت و ریوداسیت به تراکی‌آندزیت متمایل می‌شود. یکی از ویژگی‌های بارز گدازه‌های منطقه گارجگان، وجود انکلاوهای تونالیتی است که به صورت پراکنده و در ابعاد حدود ۱ تا ۱۰ سانتی‌متر در این گندها یافت می‌شوند.



شکل ۲- تصاویرهای صحرائی از منطقه گارجگان (جنوب غرب بیرجند): (A) نمای کلی از گندهای آتشفشانی (دید عکس به سمت جنوب شرق)؛ (B) انکلاو تونالیتی درون سنگ‌های داسیتی منطقه گارجگان؛ (C) قطعه گسلی گارجگان که موجب ایجاد اسکارپ پلکانی در مجاورت روستا شده است (دید به سمت شمال).

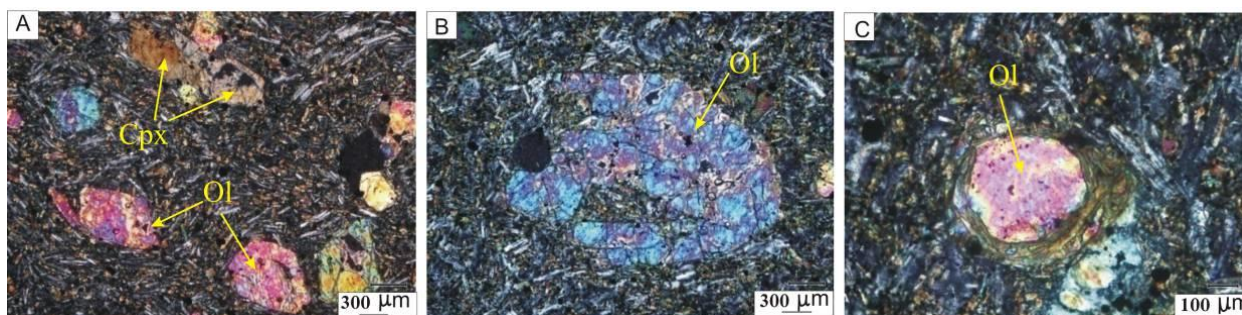
## روش انجام پژوهش

پس از جمع‌آوری اطلاعات موجود از منطقه گارجگان و تعیین مسیرهای پیمایش و نمونه‌برداری، مقاطع نازک تعداد ۹۲ نمونه سنگی بر اساس توزیع مکانی و سنگ‌شناسی، تهیه و بررسی شد. تعداد ۱۰ نمونه با دگرسانی کم برای آنالیز شیمیایی انتخاب و به شرکت ACME کانادا ارسال شد. عناصر اصلی با روش ICP-ES و عناصر کمیاب با روش ICP-MS (طیف‌سنجی از طریق ذوب به کمک لیتیوم متابورات / تتراپورات و هضم در اسیدنیتریک رقیق‌شده) تحلیل شدند (برای کسب اطلاعات بیشتر در زمینه روش آزمایش به آدرس [www.acmelab.com](http://www.acmelab.com) مراجعه شود). نمودارهای مورد نیاز با نرم‌افزارهای GCDkit و Corel Draw ترسیم شد.

## پتروگرافی

شرح پتروگرافی سنگ‌های مورد مطالعه از انواع بازیک به سمت اسیدی بیان شده است. **الیون بازالت:** این سنگ‌ها در نمونه دستی به رنگ سیاه دیده می‌شوند. در مقاطع نازک، فنوکریست‌های

الیون و کلینوپیروکسن به صورت درشت‌بلور در زمینه‌ای از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز، الیون، پیروکسن و کانی‌های کدر قرار گرفته‌اند. بافت غالب این سنگ‌ها پورفیری با خمیره میکروولیتی و بین‌دانه‌ای است (شکل ۳-A). الیون به صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار، ۲۰ تا ۳۰ درصد حجمی سنگ را تشکیل می‌دهد و میانگین اندازه ۰/۵ تا ۱/۳ میلی‌متر دارد. برخی از فنوکریست‌های الیون، حاشیه خلیجی (شکل ۳-B) و برخی حواشی گردشده دارند و از اطراف به کلریت دگرسان شده‌اند (شکل ۳-C)؛ زیرا انحلال و ناپایداری بلور، بر اثر عواملی نظیر تغییر فشار و دما در طی صعود ماگما و یا تغییر ترکیب شیمیایی آن انجام می‌شود (Chen *et al.*, 2008). پیروکسن به دو صورت درشت‌بلور و ریزبلور و اغلب بی‌شکل در این سنگ‌ها مشاهده می‌شود و حدود ۲۰ درصد حجمی سنگ را دربرمی‌گیرد. پلاژیوکلاز نیز به صورت میکروولیت در زمینه سنگ وجود دارد و با توجه به زاویه خاموشی، بیش‌تر از نوع لابرادوریت است. کانی‌های کدر از جمله کانی‌های فرعی و کربنات و کلریت، کانی‌های دگرسانی موجود در این سنگ‌ها هستند.



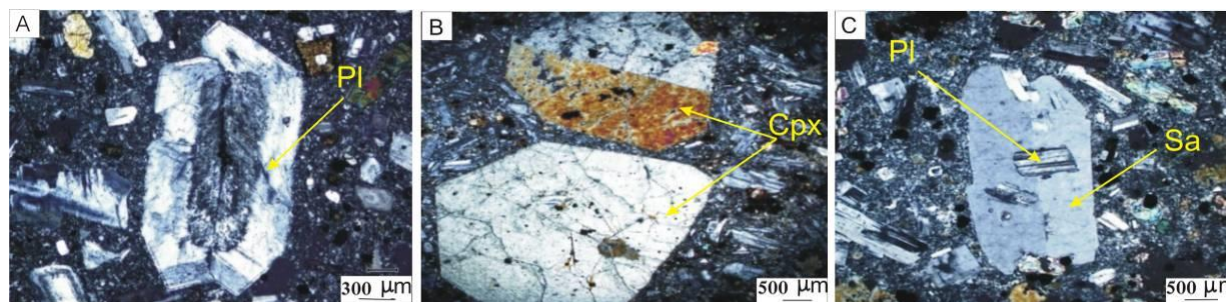
شکل ۳- ویژگی‌های میکروسکوپی الیون‌بازالت‌های منطقه گارجگان (جنوب‌غرب بیرجند): (A) بافت پورفیری؛ (B) فنوکریست الیون با حاشیه خلیجی؛ (C) بلور گردشده الیون که در حاشیه به کلریت دگرسان شده است. نور در همه شکل‌ها XPL (Cross Polarized Light) و نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از Whitney و Evans (۲۰۱۰) است.

موارد بافت‌های ساب‌افیتیک و گلومروپورفیری نیز در آن دیده می‌شود. فراوان‌ترین کانی این سنگ‌ها درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز هستند که معمولاً شکل‌دار تا

**تراکی آندزیت:** این سنگ‌ها اغلب به رنگ خاکستری تیره دیده می‌شوند. بافت اصلی سنگ پورفیری با زمینه میکروولیتی، تراکیتی و پویی‌کلیتیک است و در برخی

سنگ است و حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد حجم سنگ را تشکیل می‌دهد (شکل ۴-B). آمفیبول و بیوتیت نیز از جمله کانی‌های فرومنیزین موجود در تراکی‌اندزیت‌های منطقه هستند که اغلب به صورت شکل‌دار و نیمه شکل‌دار، کم‌تر از ۲۰ درصد از حجم سنگ را دربرگرفته‌اند و در بیش‌تر موارد حاشیه سوخته و اکسیدشده دارند. سانیدین به صورت فنوکریست‌های شکل‌دار و با ماکل کارلسباد (شکل ۴-C) و میکروولیت به میزان ۱۰ تا ۱۵ درصد حجمی در این سنگ وجود دارد. کانی کوارتز به صورت ریزبلور و عموماً بی‌شکل، کانی فرعی (کم‌تر از ۵ درصد حجمی) این سنگ است که بیش‌تر در متن سنگ به همراه میکروولیت‌های پلاژیوکلاز، آمفیبول، بیوتیت و سانیدین مشاهده می‌شود. کانی‌های کدر که محصول دگرسانی کانی‌های فرومنیزین هستند نیز در این سنگ‌ها وجود دارند. کربنات‌ها که از دگرسانی پلاژیوکلاز و پیروکسن حاصل شده‌اند از مهم‌ترین کانی‌های دگرسانی این سنگ‌ها هستند.

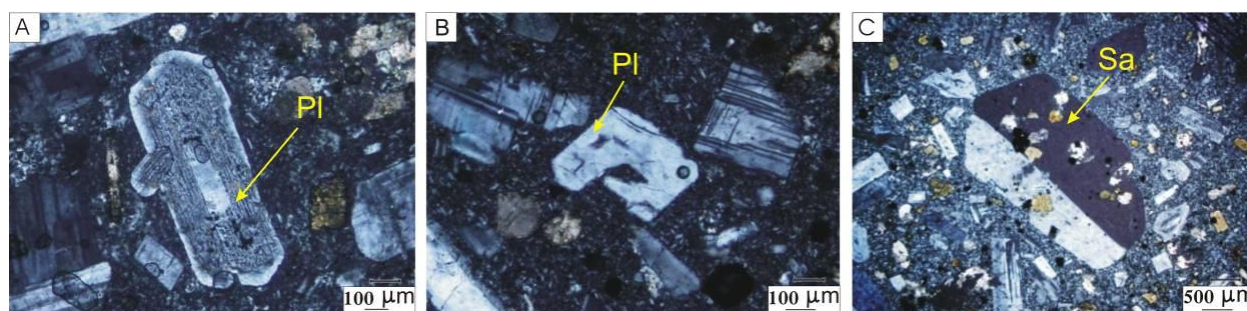
نیمه‌شکل‌دار و به صورت فنوکریست و میکروولیت هستند و حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد از حجم سنگ را دربرمی‌گیرند. اندازه پلاژیوکلازها به طور میانگین در حدود ۰/۴ تا ۲/۸۵ میلی‌متر است. برخی از بلورهای پلاژیوکلاز حالت منطقه‌بندی از خود نشان می‌دهند. ایجاد تغییرات ناگهانی در حرارت، فشار و یا ترکیب ماگما عامل ظهور منطقه‌بندی است (Ustunisik *et al.*, 2012; Perugini and Poli, 2014). هم‌چنین، در این کانی‌ها بافت غربالی مشاهده می‌شود (شکل ۴-A). برخی از پژوهشگران ظهور این بافت را به فرایند اختلاط ماگمایی نسبت می‌دهند (Renjith, 2014)، اما برخی دیگر معتقدند که ناپایداری بلورهای پلاژیوکلاز در هنگام حرکت سریع ماگما به سمت بالا موجب پیدایش بافت غربالی در پلاژیوکلاز می‌شود (Reubi *et al.*, 2002; Kuscı and Floyd, 2001). در نمونه‌های مورد مطالعه، شواهدی از اختلاط ماگمایی مشاهده نشد. پیروکسن به صورت شکل‌دار تا بی‌شکل و میانگین اندازه ۰/۹ تا ۲/۴ میلی‌متر از لحاظ فراوانی دومین کانی در



شکل ۴- خصوصیات میکروسکوپی تراکی‌اندزیت‌های منطقه گارجگان (جنوب غرب بیرجند): (A) بافت غربالی در مرکز بلورهای پلاژیوکلاز؛ (B) مگاکریست‌های خودشکل پیروکسن با ماکل کارلسباد؛ (C) فنوکریست سانیدین و تشکیل بافت پویی‌کلیتیک (نور در همه شکل‌ها XPL است).

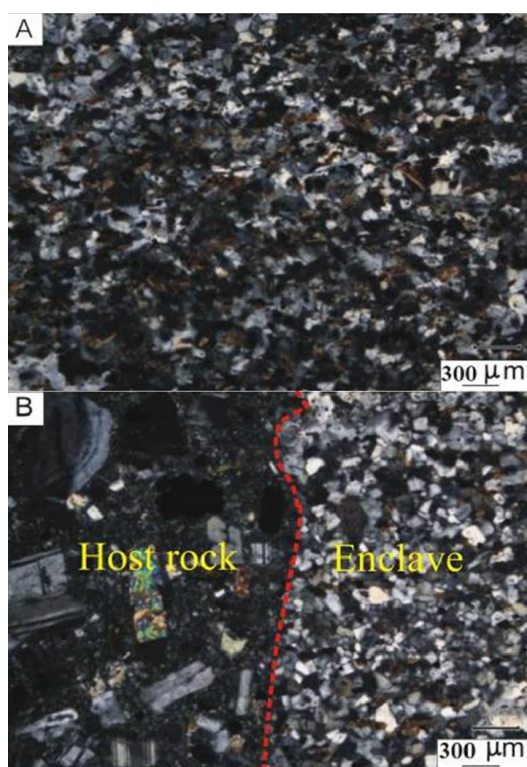
نیمه‌شکل‌دار به صورت فنوکریست و میکروولیت از نوع الیگوکلاز تا آندزین، حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد حجمی سنگ را تشکیل می‌دهند. اندازه آنها به طور میانگین در حدود ۰/۴ تا ۳ میلی‌متر است. منطقه‌بندی، بافت غربالی و خوردگی خلیجی از ویژگی‌های بارز فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در این سنگ‌ها است (شکل‌های ۵-A و B).

داسیت: داسیت‌ها بیش‌تر به صورت گنبدی رخنمون دارند و در نمونه دستی به رنگ خاکستری روشن تا متوسط دیده می‌شوند. بافت‌های غالب، پورفیری با خمیره ریزدانه و گاهی بافت پویی‌کلیتیک هستند. کوارتزهای بی‌شکل به صورت ریزبلور بیش‌تر در متن سنگ وجود دارند و بیش از ۲۰ درصد حجمی سنگ را تشکیل می‌دهند. پلاژیوکلازهای خودشکل تا



شکل ۵- خصوصیات میکروسکوپی داسیت‌ها و ریوداسیت‌های منطقه گارجگان (جنوب غرب بیرجند)، (A) بافت غربالی در بلورهای پلاژیوکلاز؛ (B) بلورهای پلاژیوکلاز با حاشیه خوردگی خلیجی؛ (C) ماکل کارلسباد در بلور سانیدین و ایجاد بافت پویی کلیتیک (نور در همه شکل‌ها XPL است).

حدود ۱ سانتی‌متر تا حدود ۱۰ سانتی‌متر در تغییر است. بافت اصلی در این نوع انکلاوها دانه‌ای است (شکل ۶- A) و مرز ناگهانی با سنگ میزبان دارند (شکل ۶- B). کوارتز، پلاژیوکلاز و بیوتیت سازندگان مهم این انکلاوها هستند.



شکل ۶- خصوصیات میکروسکوپی (نور XPL) انکلاو تونالیتی و سنگ میزبان منطقه گارجگان (جنوب غرب بیرجند): (A) بافت گرانولار؛ (B) مرز بین سنگ میزبان (تراکی‌اندزیت) و انکلاو تونالیتی. است.

این مشخصات در پلاژیوکلازها از نشانه‌های وجود شرایط تعادل نداشتن در طول انجماد ماگما است که این شرایط احتمالاً بر اثر صعود سریع ماگما، افزایش فشار بخار آب، فرایندهای آلیس و هضم و کاهش فشار حاکم بر ماگما ایجاد شده است (Monfaredi *et al.*, 2009). آمفیبول و بیوتیت به صورت شکل دار تا نیمه‌شکل دار با چند رنگ شدید قهوه‌ای، حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد حجمی سنگ را تشکیل می‌دهند. بلورهای هورنبلند و بیوتیت اغلب حاشیه سوخته دارند؛ به طوری که برخی از بلورها کاملاً سوخته‌اند و فقط قالبی از آنها به جای مانده است. اوپاسیتی شدن نشانه بالابودن فوگاسیتته اکسیژن و فشار بخار آب، هنگام تشکیل این کانی‌ها و از دست رفتن آب مذاب در طول فوران ماگما است (Best, 2003). کربنات‌ها، کانی‌های رسی و سربسیت که از دگرسانی پلاژیوکلازها حاصل شده‌اند، کانی‌های دگرسانی رایج در داسیت‌ها هستند. فنوکریست‌های سانیدین، ماکل کارلسباد دارند و حدود ۵ درصد حجمی سنگ را تشکیل می‌دهند (شکل ۵- C). فراوانی بالای فنوکریست‌های سانیدین در برخی نمونه‌ها سبب تمایل ترکیب آنها به ریوداسیت شده است.

**انکلاو تونالیتی:** با بررسی‌های صحرایی و پتروگرافی در سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان، انکلاوهایی با ترکیب تونالیتی شناسایی شدند. این انکلاوها رنگ تیره دارند و ابعاد آنها از

## ژئوشیمی

منطقه گارجگان در گستره ۵۸/۰۵ تا ۶۴/۹۱ درصد وزنی متغیر است و سنگ‌ها در نمودار مجموع آلکان در برابر سیلیس Middlemost (۱۹۹۴) در محدوده‌های تراکی آندزیت، تراکی داسیت و داسیت قرار می‌گیرند (شکل ۷- A).

نتایج آنالیز عناصر اصلی و کمیاب نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ آمده است. از نمونه الیون بازالت به علت فراوانی اندک، نمونه‌ای آنالیز نشده است. مطابق جدول ۱، محتوای سیلیس در سنگ‌های آتشفشانی

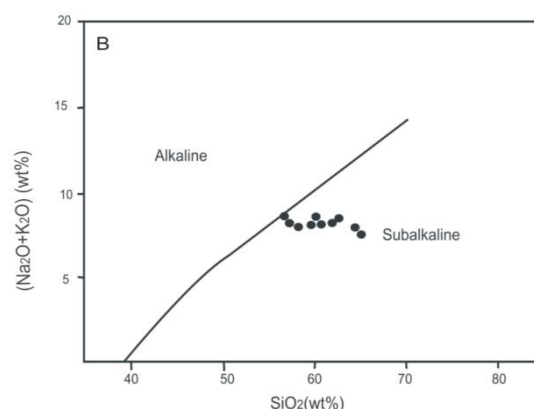
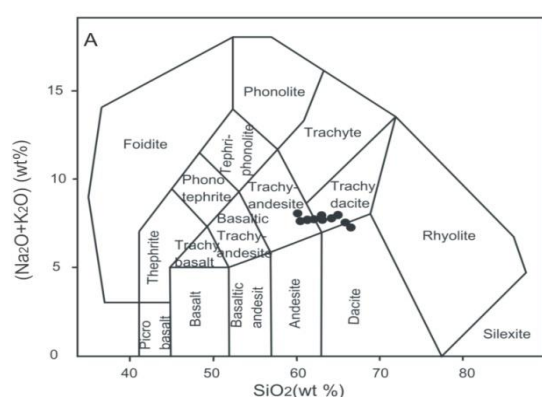
جدول ۱- نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی عناصر اصلی (بر حسب درصد وزنی) و عناصر فرعی (بر حسب ppm) سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان (جنوب غرب بیرجند).

Sample No.	UB51	UB53	UB54	UB56	UB55	UB57	UB48	UB49	UB50	UB52
Rock type	تراکی آندزیت	تراکی آندزیت	تراکی آندزیت	تراکی آندزیت	داسیت	داسیت	تراکی داسیت	تراکی داسیت	تراکی داسیت	تراکی داسیت
SiO <sub>2</sub>	60.81	58.05	59.85	59.22	64.62	64.91	62.34	63.52	60.86	62.02
TiO <sub>2</sub>	0.48	0.63	0.50	0.49	0.48	0.50	0.50	0.49	0.48	0.47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.92	16.77	16.16	16.72	16.07	16.62	16.23	16.44	16.21	15.71
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.41	6.20	5.47	6.04	5.28	4.99	5.45	4.99	4.99	5.15
MnO	0.11	0.08	0.12	0.06	0.04	0.03	0.06	0.04	0.05	0.13
MgO	2.03	1.25	2.04	1.46	0.58	0.51	1.03	0.43	0.96	1.73
CaO	5.43	5.46	5.62	5.61	3.40	2.63	3.88	3.93	5.33	5.48
Na <sub>2</sub> O	3.72	3.73	3.80	3.68	3.41	3.17	3.56	3.76	3.61	3.69
K <sub>2</sub> O	3.87	3.80	3.69	3.77	3.93	3.94	3.98	3.97	3.93	3.90
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.26	0.36	0.30	0.33	0.27	0.28	0.28	0.27	0.26	0.26
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LOI	1.70	3.40	2.20	2.20	1.70	2.20	2.40	1.90	3.10	1.20
Sum	99.74	99.73	99.75	99.58	99.78	99.78	99.71	99.74	99.78	99.74
Mg#	40.5	25	40.2	30	16.1	15.9	25.5	12.5	25.5	37.7
CaO+Na <sub>2</sub> O	9.15	9.19	9.42	9.29	6.81	5.8	7.44	7.69	8.94	9.17
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.04	1.02	0.9710	1.02	1.15	1.24	1.12	1.06	1.09	1.06
Ni	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
Sc	10	14	10	13	9	7	7	7	10	10
Ba	707	827	791	790	710	675	708	715	709	719
Cs	2.4	5.5	4.1	5.6	5.7	7	5.8	5.6	4.3	2.4
Ga	15.8	16.5	15.8	16.7	15.9	16.4	16.6	16.4	15.9	15.9
Hf	2.9	3.6	3.1	3.6	3.2	3.3	2.9	3.3	3.2	3.3
Nb	5.3	6.2	5.5	6.6	5.7	5.9	5.7	5.3	5.9	5.5
Rb	103.9	107.3	98.2	111.6	111.6	109.9	110.7	106	108.2	107
Sr	797.1	902.6	889.7	820.3	762.1	640.5	815.1	816.3	790.8	825.8
Ta	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.8	0.4	0.4
Th	10.1	8.9	10.7	9.3	11.1	10.9	10.6	10	9.8	10.8
U	2.3	1.5	2.5	2.6	1.6	1.9	1.9	1.9	1.7	2.7
V	134	250	154	151	139	143	137	127	136	130
Zr	109	119.3	114.2	134.9	117.4	116.7	106.9	113.6	110	118.4
Y	15	16.6	17.2	16	15.4	14.6	14.1	13.3	14.2	16.3
La	25.1	25.4	29.2	25.5	27.4	27.1	26.9	25.2	25.2	26.7
Ce	48.4	50.3	53.6	48.9	51.5	51.9	50.6	47.1	46.4	48.6
Pr	5.72	5.86	6.4	5.76	6.05	6.05	5.97	5.63	5.61	5.71
Nd	21.4	24	24.8	22.2	22.6	22.6	22.4	21.1	20.7	21.1
Sm	4	4.56	4.46	4.35	4.15	4.41	4.08	3.69	3.92	4.07
Eu	1.04	1.26	1.13	1.16	1.03	1.14	1.13	1	1.07	1.09
Gd	3.32	3.75	3.66	3.56	3.43	3.48	3.55	3.13	3.31	3.36
Tb	0.52	0.57	0.54	0.53	0.5	0.51	0.5	0.45	0.48	0.5
Dy	2.67	2.74	3.07	2.73	3.13	3.02	3.6	2.49	2.45	2.76
Ho	0.52	0.55	0.6	0.55	0.63	0.56	0.71	0.48	0.46	0.54
Er	1.49	1.52	1.69	1.52	1.72	1.58	2.09	1.37	1.42	1.59
Tm	0.24	0.25	0.26	0.24	0.27	0.26	0.34	0.21	0.22	0.25
Yb	1.65	1.68	1.73	1.59	1.87	1.77	2.17	1.4	1.44	1.71
Lu	0.27	0.26	0.26	0.25	0.3	0.26	0.32	0.2	0.22	0.26
Cr/Ni	0.80	0.79	0.89	0.85	0.77	0.80	0.65	0.95	0.92	0.82
Sr/Y	53.14	54.37	51.73	51.27	49.48	43.87	57.80	61.38	55.69	50.67
(La/Yb) <sub>N</sub>	10.26	10.19	11.37	10.81	9.88	10.32	8.36	12.13	11.8	10.53
(Nb/Zr) <sub>N</sub>	0.76	0.81	0.76	0.77	0.76	0.79	0.83	0.73	0.84	0.72
Ta/Yb	0.30	0.29	0.23	0.31	0.26	0.28	0.18	0.57	0.27	0.23
Th/Yb	6.12	5.29	6.18	5.84	5.93	6.15	4.88	7.14	6.80	6.31
Sm/Yb	2.42	2.71	2.57	2.21	2.57	2.49	1.88	2.63	2.72	2.38

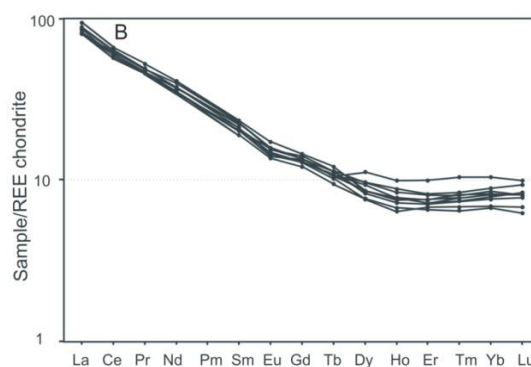
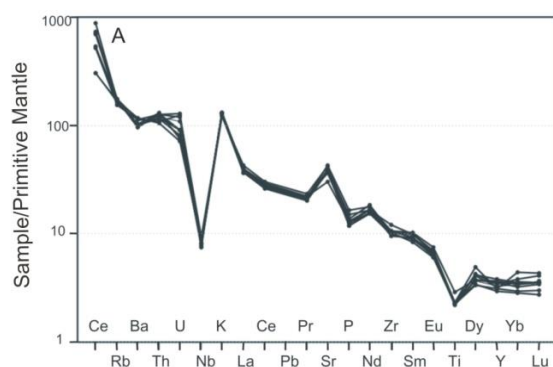
است. بر اساس نمودار  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  در برابر  $\text{SiO}_2$  برگرفته از Irvine و Baragar (۱۹۷۱)، نمونه‌ها در محدوده ساب‌آلکان جای می‌گیرند (شکل ۷- B). نمونه‌های مورد مطالعه نسبت به ترکیب گوشته اولی در نمودار چند عنصری Sun و McDonough (۱۹۸۹) به‌هنجار شده‌اند (شکل ۸- A).

الگوی فراوانی عناصر خاکی نادر (REE) سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان روی نمودارهای عنکبوتی روند موازی با هم را نشان می‌دهد که نشانه هم‌خاستگاه‌بودن آنها است. این نمودار گویای غنی‌شدگی LREEها نسبت به HREE و نبودن آنومالی منفی Eu است که از ویژگی‌های آداکیت‌هاست (Castillo, 2012; Ghadami *et al.*, 2008; Richard *et al.*, 2005; Kerrich, 2007; Martin *et al.*, 2005).

با توجه به این نمودار، عناصر لیتوفیل بزرگ یون (LILE) از قبیل Cs, Rb, Ba, K, U و Sr نسبت به عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) از جمله Nb و Ti و همچنین، عناصر خاکی نادر سبک (LREE) نسبت به عناصر خاکی نادر سنگین (HREE)، غنی‌شدگی را نشان می‌دهند. برای بررسی عناصر خاکی نادر در نمونه‌های منطقه گارجگان از نمودار عنکبوتی به‌هنجار شده با ترکیب کندریت Boynton (۱۹۸۴) استفاده شد (شکل ۸- B). محتوای اکسیدهای  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (۱۵/۷۱ تا ۱۶/۷۷ درصد وزنی)، MgO (۰/۴۳ تا ۲/۰۴ درصد وزنی)،  $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$  (۵/۸ تا ۹/۴۲ درصد وزنی) و محتوای عناصر کمیاب Y (۱۴/۱ تا ۱۷/۲ ppm یا قسمت در میلیون)، Yb (۱/۴ تا ۱/۸۷ قسمت در میلیون)، و Sr (۶۴۰/۵ تا ۹۰۲/۶ قسمت در میلیون)



شکل ۷- موقعیت ترکیبی سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان (جنوب غرب بیرجند) در نمودارهای مجموع آکالی‌ها در برابر سیلیس. A) برگرفته از Middlemost (۱۹۹۴)؛ B) برگرفته از Baragar و Irvine (۱۹۷۱).



شکل ۸- سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان (جنوب غرب بیرجند) بر روی: A) نمودار چندعنصری به‌هنجار شده نسبت به ترکیب گوشته اولی (Sun and McDonough, 1989)؛ B) نمودار چندعنصری عناصر کمیاب خاکی به‌هنجار شده نسبت به ترکیب کندریت (Boynton, 1984).



مطالعه نسبت به کندریت (Boynton, 1984) به‌هنجار شده‌اند. بر این اساس، گدازه‌های منطقه گارجگان در قلمرو مشترک آداکیت‌ها و سنگ‌های کالک‌آلکان معمولی قرار گرفته‌اند (شکل ۹- B). بر اساس بررسی و مطالعه گسترده آداکیت‌ها توسط Martin و همکاران (۲۰۰۵)، آداکیت‌ها از نظر ترکیبی به دو گروه آداکیت‌های سیلیس بالا و آداکیت‌های سیلیس پایین تقسیم می‌شوند. آداکیت‌های سیلیس بالا (MgO پایین) از ذوب مستقیم پوسته زیرین به‌وجود آمده‌اند و آداکیت‌های سیلیس پایین (MgO بالا) نشان‌دهنده ذوب گوشته هستند (Castillo, 2012). این دو گروه آداکیت‌ها در مقادیر Sr، Nd و نسبت‌های Cr/Ni و Sr/Y تفاوت آشکاری را نشان می‌دهند. آداکیت‌های سیلیس بالا نسبت به سیلیس پایین، تمرکز کم‌تر از LREE، Ti و Nd دارند.

در جدول ۳ ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان با سنگ‌های آداکیتی پرسیلیس و کم‌سیلیس مقایسه شده است. نمونه‌های مورد مطالعه از نظر ترکیبی در محدوده آداکیت‌های سیلیس بالا قرار می‌گیرند (شکل ۱۰).

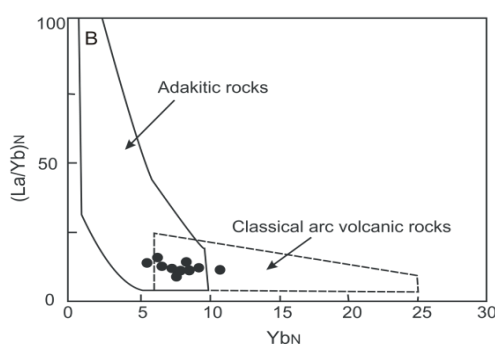
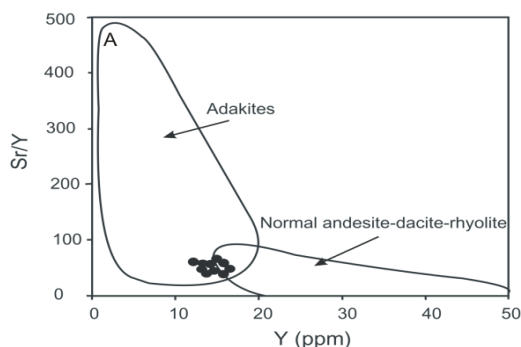
در جدول ۲ ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان با سنگ‌های آداکیتی مقایسه شده است. مقدار میانگین نسبت Sr/Y در سنگ‌های منطقه گارجگان برابر ۵۲/۹۴ است و در نمودار Sr/Y در برابر Y (Defant and Drummond, 1990) در محدوده آداکیت‌ها قرار می‌گیرند (شکل ۹- A).

جدول ۲- مقایسه میانگین ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان (جنوب غرب بیرجند) با آداکیت‌ها (Castillo, 2012; Moyen, 2009; Castillo, 2006; Rollinson and Tarney, 2005; Martin et al., 2005; Martin, 1999; Defant and Drummond, 1990).

میانگین آداکیت‌ها	میانگین سنگ‌های آتشفشانی گارجگان
56 wt% SiO <sub>2</sub> ≥	62.61 wt%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≥ 15 wt%	16.29 wt%
MgO < 3 wt%	1.2 wt%
3.5 ≤ Na <sub>2</sub> O ≤ 7.5 wt%	3.6 wt%
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O ≈ 0.42	1.07
Sr > 400 ppm	806 ppm
Low HREE	Low HREE
No anomaly of Eu	No anomaly of Eu
Yb 1.8 ≤ ppm	1.7 ppm
Y 18 ≤ ppm	15.27 ppm

نمونه‌های مورد مطالعه در نمودار (La/Yb)<sub>N</sub> در برابر Yb<sub>N</sub> (Eyuboglu et al., 2011; Martin, 1999; Defant and Drummond, 1990) نشان داده شده است.

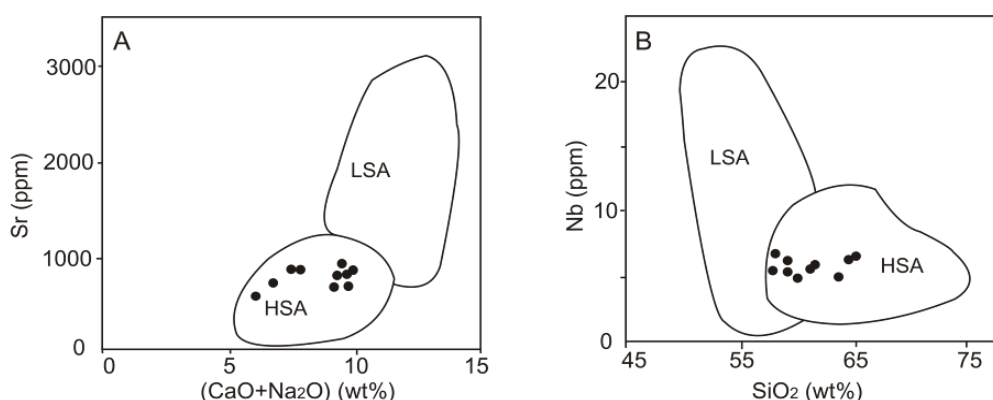
در این نمودار مقادیر La و Yb نمونه‌های مورد



شکل ۹- A) موقعیت ترکیبی سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان (جنوب غرب بیرجند) در نمودار Sr/Y در برابر Y (Defant and Drummond, 1990)؛ B) نمودار (La/Yb)<sub>N</sub> در برابر Yb<sub>N</sub> (Eyuboglu et al., 2011; Martin, 1999; Defant and Drummond, 1990).

جدول ۳- مقایسه میانگین ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان (جنوب‌غرب بیرجند) با سنگ‌های آداکیتی پرسیلیس و کم‌سیلیس (Martin et al., 2005).

میانگین سنگ‌های آتشفشانی گارجگان	میانگین آداکیت‌های کم‌سیلیس	میانگین آداکیت‌های پرسیلیس
SiO <sub>2</sub> > 60 wt%	SiO <sub>2</sub> < 60 wt%	SiO <sub>2</sub> > 60 wt%
MgO = 0.5- 2.4 wt%	MgO = 4-9 wt%	MgO = 0.5- 4 wt%
CaO+Na <sub>2</sub> O < 9.42 wt%	CaO+Na <sub>2</sub> O > 10 wt%	CaO+Na <sub>2</sub> O < 11 wt%
TiO <sub>2</sub> < 0.63 wt%	TiO <sub>2</sub> > 3 wt%	TiO <sub>2</sub> < 0.9 wt%
Sr < ppm 902.6	Sr > ppm 1000	Sr < ppm 1100



شکل ۱۰- موقعیت ترکیبی سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان (جنوب‌غرب بیرجند) در نمودارهای تشخیص آداکیت‌های سیلیس بالا و سیلیس پایین (Martin et al., 2005).

می‌تواند نشان‌دهنده مشارکت پوسته‌ای در فرایندهای ماگمایی باشد (Rollinson, 1993). غنی‌شدگی عناصر U و Th در نمودارهای عنکبوتی به اضافه شدن رسوبات پلاژیک و پوسته اقیانوسی دگرسان‌شده به منبع ذوب‌شدگی نسبت داده می‌شود (Fan et al., 2003). از سوی دیگر، این غنی‌شدگی احتمالاً به آلودگی پوسته‌ای و ویژگی‌های خاستگاه نیز مربوط است. بالا بودن نسبت LREE/HREE نشان‌دهنده این است که ماگما از یک خاستگاه غنی از گارنت منشأ گرفته است (Wilson, 2007). هم‌چنین، یکی از ویژگی‌های بارز سنگ‌های مناطق فرورانش، غنی‌شدگی از LREE در مقایسه با HREE است (Kuscu and Geneli, 2010; Helvacı et al., 2007; Harangi et al., 2007; Wilson, 2007; al., 2009). از خصوصیات آشکار ماگماتیسم آداکیتی می‌توان به غالب بودن مجموعه سنگی ریولیت-داسیت - آندزیت، تمرکزهای بسیار بالای LREE، مقادیر بسیار پایین

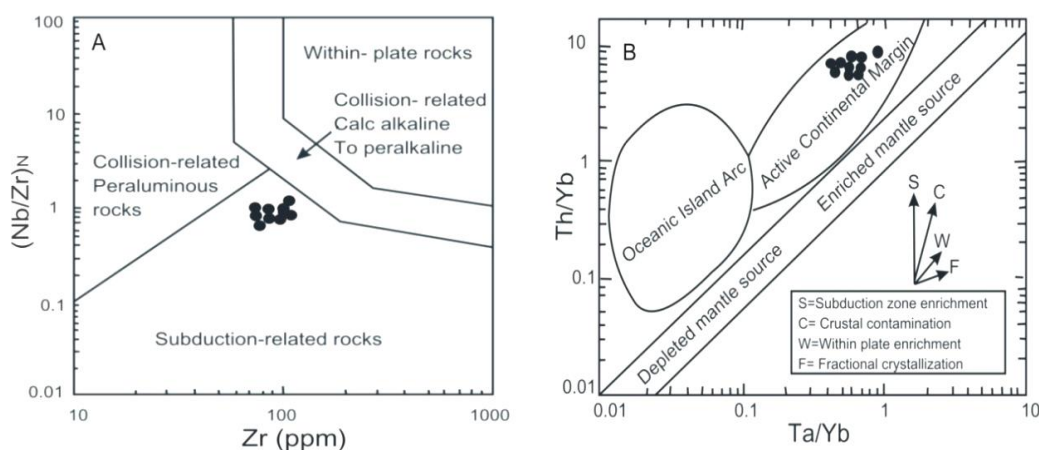
## بحث

ویژگی‌های شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان نظیر غنی‌شدگی LILE، LREE و آنومالی منفی Nb و Ti نشان‌دهنده ماگماهای وابسته به فرورانش است (Kuscu and Geneli, 2010; Rollinson, 1993). در مناطق فرورانش به‌علت تأثیر سیالات ناشی از ورقه فرورانده، نسبت LILE/HFSE افزایش می‌یابد. در واقع این بی‌هنجاری‌ها و بالا بودن نسبت LILE/HFSE در سنگ‌های آتشفشانی کالک‌آلکان در نتیجه ورود اجزای LILE موجود در صفحه فرورونده به درون گوه گوشته‌ای بالای آن به وجود می‌آیند (Mohamed et al., 2000; Zanetti et al., 1999). به‌علاوه آنومالی مثبت K، Th، Cs، Rb و هم‌چنین، آنومالی منفی Ti و Nb در محیط‌های حاشیه فعال قاره‌ای دیده می‌شوند (Wilson, 2007). بی‌هنجاری منفی Nb شاخص سنگ‌های قاره‌ای است و

(McDonough, 1989) به‌هنجار شده است، گویای وابستگی آنها به محیط فرورانش است (شکل ۱۱ - A). برای تشخیص این که سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان در محیط قوس جزیره اقیانوسی فوران کرده‌اند یا در جایگاه تکتونیکی حاشیه قاره‌ای، از نمودار  $Th/Yb$  در برابر  $Ta/Yb$  که Pearce (۱۹۸۳) آن را ارائه کرده است، استفاده شد. با توجه به این نمودار (شکل ۱۱ - B) که بر پایه عناصر کمیاب غیر متحرک بنا شده است، مشخص شد که این سنگ‌ها به حاشیه قاره‌ای فعال، متعلق هستند و ماگمای مادر آنها بر اثر ذوب‌بخشی یک گوشته غنی شده حاصل شده است. ماگماهای کمان بیش‌تر بر اثر ذوب‌بخشی در گوته گوشته‌ای وابسته به فرورانش به علت اضافه شدن اجزای متاسوماتیک آذاشده از لیتوسفر اقیانوسی فرورونده به وجود می‌آیند. شاره‌های متاسوماتیک ممکن است شامل سیال آبدار یا مذاب‌های بخشی اولی حاصل از رسوبات و یا پوسته بازالتی فرورانده شده به گوته گوشته‌ای باشد و سبب تولید ماگما شود (Harangi et al., 2011; Hoang et al., 2007).

HREE و Y و نسبت‌های بالای  $Sr/Y$  و  $La/Yb$  اشاره کرد (Ling et al., 2011; Ghasemi et al., 2010; Liu et al., 2010; Ling et al., 2009; Hou et al., 2007). بالابودن مقدار  $SiO_2$  (میانگین ۶۲/۶۱ درصد وزنی)،  $Al_2O_3$  (میانگین ۱۶/۲۹ درصد وزنی) و  $Sr$  (میانگین ۸۰۶/۰۳ قسمت در میلیون) همراه با پایین بودن مقدار  $Yb$  (میانگین ۱/۷ قسمت در میلیون) و  $Y$  (میانگین ۱۵/۲۷ قسمت در میلیون) و نبودن آنومالی منفی  $Eu$ ، گرایش این مجموعه به سنگ‌های آداکیتی را آشکار می‌کند (Castillo, 2012; Ghadami et al., 2008; Richard and Kerrich, 2007; Martin et al., 2005). مقدار نسبت‌های  $Sr/Y$  در دامنه ۴۳/۸۷ تا ۶۱/۳۸ و  $La/Yb$  در دامنه ۱۲/۴ تا ۱۸ در تغییر است و نشانه این است که سنگ‌های مورد مطالعه ماهیت آداکیتی دارند (Castillo, 2012; Richards and Kerrich., 2007; Castillo, 2006; Martin et al., 2005).

نمودار  $Zr$  در برابر  $(Nb/Zr)_N$  برگرفته از Ivanova (۲۰۰۵) که در آن محتوای  $Nb$  و  $Zr$  نمونه‌ها نسبت به مقادیر  $Nb$  و  $Zr$  در ترکیب گوشته اولی (Sun and

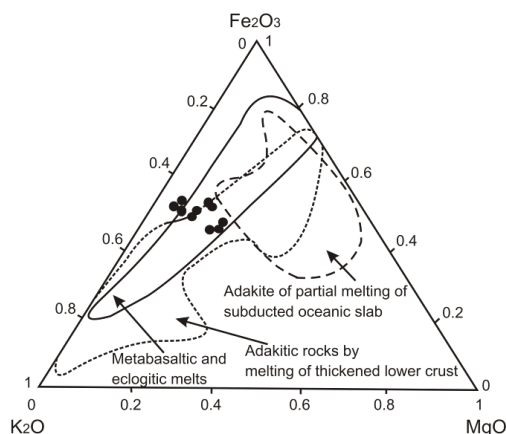


شکل ۱۱- موقعیت ترکیبی سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان (جنوب غرب بیرجند) در: (A) نمودار  $Zr$  در برابر  $(Nb/Zr)_N$  (Pearce, 1983)؛ (B) نمودار  $Th/Yb$  در برابر  $Ta/Yb$  (Ivanova, 2005).

ذوب‌بخشی پوسته ضخیم شده و آداکیت‌های حاصل از بخشی منابع متابازالتی و اکلوزیتی قرار می‌گیرند (شکل ۱۲). به نظر بیش‌تر سنگ‌شناسان، آداکیت‌های الگو

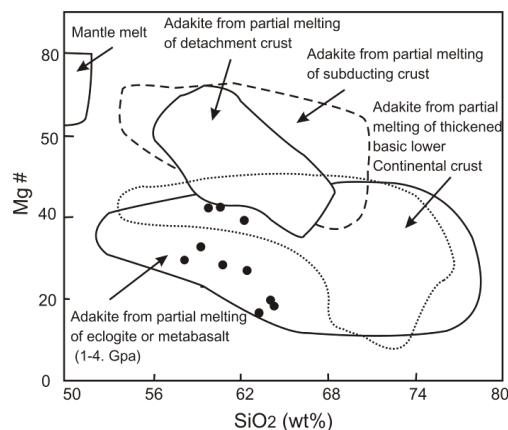
در نمودارهایی که بر پایه مقدار  $Mg\#$  در برابر محتوای  $SiO_2$  طراحی شده‌اند (Wang et al., 2006)، نمونه‌ها در محدوده مشترک آداکیت‌های حاصل از

اساس اکسید عناصر اصلی در تعیین خاستگاه آداکیت‌ها به کار می‌رود، نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده مشترک آداکیت‌های حاصل از ذوب‌بخشی پوسته زیرین ضخیم‌شده و آداکیت‌های حاصل از ذوب‌بخشی منابع متابازالتی و اکلوزیتی قرار گرفته‌اند (شکل ۱۳). بنابراین می‌توان گفت که ذوب پوسته قاره‌ای زیرین ضخیم‌شده در تکامل سنگ‌های منطقه گارجگان نقش به‌سزایی داشته است. در نمودار Sm/Yb در برابر Th/Nb از Karsli و همکاران (۲۰۱۱)، نمونه‌های منطقه گارجگان از ذوب‌بخشی منبعی با ترکیب ۱۰ درصد گارنت آمفیبولیت حاصل شده‌اند (شکل ۱۴).

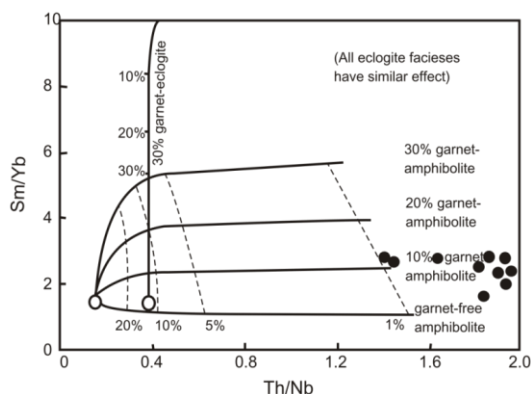


شکل ۱۳- موقعیت ترکیبی سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان (جنوب‌غرب بیرجند) در نمودار  $Fe_2O_3$ - $K_2O$ - $MgO$  (Karsli et al., 2011).

در بردارنده گارنت به‌عنوان یک مرحله اصلی دیرگداز تفاله در محل منبع خود هستند و بنابراین، ترکیب سنگ‌شناسی محل منبع آن‌ها از نوع اکلوزیت، اکلوزیت آمفیبول‌دار یا گارنت - آمفیبولیت واقع در اعماق بیش از ۴۰ کیلومتری (فشار بیش از ۱۲ کیلوبار) است (Jamshidi et al., 2014). چنان‌چه گارنت، مرحله کانی‌شناختی غالب در محل خاستگاه باشد، نسبت‌های Y/Yb مذاب‌های آداکیتی معمولاً بیش‌تر از ۱۰ خواهد شد (Wang et al., 2012). میانگین این نسبت در نمونه‌های بررسی شده برابر با ۹/۱ است که می‌تواند نشانه حضور گارنت در خاستگاه باشد.



شکل ۱۴- موقعیت ترکیبی سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان (جنوب‌غرب بیرجند) در نمودار Mg# در برابر  $SiO_2$  (Wang et al., 2006).



شکل ۱۴- موقعیت ترکیبی سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان (جنوب‌غرب بیرجند) در نمودار Sm/Yb در برابر Th/Nb (Karsli et al., 2011).

به طور کلی سنگ‌های آتشفشانی به Mg# بالا ( $Mg\# > 45$ ) و Mg# پایین ( $Mg\# < 45$ ) تقسیم می‌شوند (Lai et al., 2013). میانگین Mg# در سنگ‌های آتشفشانی منطقه گارجگان حدود ۲۶/۸۵ است. بر این اساس سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه Mg# پایینی دارند. آداکیت‌های حاصل از ذوب‌بخشی پوسته زیرین قاره‌ای در مقایسه با سایر آداکیت‌ها، محتوای MgO، Cr، Ni پایین‌تری دارند (Lai et al., 2013). در نمودار سه‌تایی  $Fe_2O_3$ - $K_2O$ - $MgO$  که از Karsli و همکاران (۲۰۱۱) اقتباس شده است و بر

## نتیجه‌گیری

اصلی و فرعی، نمونه‌های مورد مطالعه، مشخصات آداکیت‌های سیلیس بالا را نشان می‌دهند که از ذوب مستقیم پوسته زیرین ضخیم‌شده حاصل شده‌اند. با توجه به پژوهش‌های محققان مختلف درباره بررسی سرگذشت حوضه اقیانوسی در شرق ایران که مبنی بر رخداد برخورد لوت و افغان قبل از ائوسن است، ماگماتیسیم پس از ائوسن منطقه گارجگان را می‌توان یک رخداد پس‌برخوردی دانست که از ذوب پوسته زیرین ضخیم‌شده در فرایند لایه‌لایه‌شدگی (Delamination) از منبعی که در آن گارنت مرحله پایدار بوده است (ذوب بخشی منبعی با ترکیب ۱۰ درصد گارنت آمفیبولیت) به وجود آمده است.

## سپاس‌گزاری

نگارندگان از معاونت آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه بیرجند به علت حمایت‌های مادی و معنوی برای به‌ثمر رسیدن این پژوهش صمیمانه سپاس‌گزاری می‌کنند.

سنگ‌های آتشفشانی ترسیری منطقه گارجگان، داسیت، ریوداسیت و تراکی‌اندزیت با ویژگی کالک‌آلکان هستند. منطقه‌بندی، بافت غربالی و خوردگی خلیجی در فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و گردشدگی برخی از کانی‌ها از ویژگی‌های سنگ‌های گدازه‌ای این منطقه است که گویای وجود شرایط تعادل‌نداشتن هنگام انجماد ماگماست. بر اساس نمودارهای به‌هنجارشده عناصر کمیاب و خاکی نادر نسبت به گوشته اولی و کندریت، غنی‌شدگی از LREE نسبت به HREE و هم‌چنین، LILE نسبت به HFSE (Nb و Ti) در نمونه‌های منطقه گارجگان مشاهده می‌شود که شاخص ماگماهای کالک‌آلکان وابسته به مناطق فرورانش در یک حاشیه فعال قاره‌ای است. بالابودن نسبت LREE/HREE و مقدار  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و Sr همراه با پایین‌بودن مقدار Yb و Y و نبودن آنومالی منفی Eu، ارتباط این مجموعه را به ماگماهای آداکیتی نشان می‌دهد. بر اساس خصوصیات ژئوشیمیایی عناصر

## منابع

- Best, M. G. (2003) *Igneous and metamorphic petrology*, Blackwell, Oxford.
- Boynton, W. V. (1984) Cosmochemistry of rare earth elements: meteorite studies. In: *Rare earth element geochemistry* (Ed. Henderson, P.) 63-114. Elsevier, Amsterdam.
- Castillo, P. R. (2006) An overview of adakite petrogenesis. *Chinese Science Bulletin* 51: 257-268.
- Castillo, P. R. (2012) Adakite petrogenesis. *Lithos* 134: 304-316.
- Chen, Y. and Zhang, Y. (2008) Olivine dissolution in basaltic melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72: 4756-4777.
- Chiaradia, M. (2009) Adakite magmas from fractional crystallization and melting assimilation of mafic lower crust (Eocene Macuchi arc, Western Cordillera, Ecuador). *Chemical Geology* 265: 468-487.
- Defant, M. J. and Drummond, M. S. (1990) Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature* 347: 662-665.
- Eyuboglu, Y., Santosh, M. and Chung, S. L. (2011) Crystal fractionation of adakitic magmas in the crust-mantle transition zone: Petrology, geochemistry and U-Pb zircon chronology of the Seme adakites, eastern Pontides, NE Turkey. *Lithos* 121: 151-166.
- Fan, W. M., Gue, F., Wang, Y. J. and Lin, G. (2003) Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of post-orogenic

- extention in the northern Da Hinggan Mountains, northeastern China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 121: 115-135.
- Fang, H. and Sheng, H. (2010) Partial melting of the dry mafic continental crust: Implications for petrogenesis of C-type adakites. *Chinese Science Bulletin* 55: 2428–2439.
- Ghadami, G. R., Shahre Babaki, A. M. and Mortazavi, M. (2008) Post-collisional Plio-Pleistocene adakitic volcanism in Central Iranian volcanic belt: Geochemical and geodynamic implications. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 19(3): 223-235.
- Ghasemi, H., Sadeghian, M., Khanalizadeh, A. and Tanha, A. (2010) Petrography, geochemistry and radiometric ages of high-silica adakitic domes of Neogene continental arc, South of Quchan. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 3: 347-370 (in Persian).
- Guo, Y., Hou, Z., Kamber, B. S., Wei, R., Meng, X. and Zhao, R. (2007) Adakite-like porphyries from the southern Tibetan continental collision zones: Evidence for slab melt metasomatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 153: 105-120.
- Harangi, S., Downes, H., Thirlwall, M. and Gmeling, K. (2007) Geochemistry, petrogenesis and geodynamic relationships of Miocene calcalkaline volcanic rocks in the Western Carpathian arc, eastern Central Europe. *Journal of Petrology* 48 (12): 2261-2287.
- Helvacı, C., Ersoy, E. Y., Sözbilir, H., Erkül, F., Sümer, Ö. and Uzel, B. (2009) Geochemistry and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of Miocene volcanic rocks from the Karaburun Peninsula: implications for amphibole-bearing lithospheric mantle source, Western Anatolia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 185: 181-202.
- Hoang, N., Itoh, J. and Miyagi, I. (2011) Subduction components in Pleistocene to recent Kurile arc magmas in NE Hokkaido, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 200: 255-266.
- Hou, K. J., Li, Y. H., Zhou, T. R., Shi, Y. R. and Xie, G. Q. (2007) Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications. *Acta Petrologica Sinica* 23(10): 2595–2604.
- Irvine, T. N. and Baragar, W. R. A. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8: 523-548.
- Ivanova, R. (2005) Volcanology and petrology of acid volcanic rocks from the Paleogene Sheinovets caldera, Eastern Rhodopes. *Bulgarian Academy of Sciences, Geochemistry Mineralogy and Petrology* 42: 23-45.
- Jahangiri, A. (2007) Post-collisional Miocene adakitic volcanism in NW Iran: Geochemical and geodynamic implications. *Asian Earth Sciences* 30: 433-447.
- Jamshidi, K., Ghasemi, H. and Sadeghian, M. (2014) Petrology and geochemistry of the Sabzevar post-ophiolitic high silica adakitic rocks. *Petrology* 5(17): 51-68 (in Persian).
- Karimpour, M. H., Stern, C. R., Farmer, L., Saadat, S. and Malekezadeh, A. (2011) Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut block, Eastern Iran. *Geopersia* 1(1): 19-36.
- Karsli, O., Dokuz, A., Uysal, I., Aydin, F., Kandemir, R. and Wijbrans, R. J. (2010) Generation of the Early Cenozoic adakitic volcanism by partial melting of mafic lower crust, Eastern Turkey: Implications for crustal thickening to delamination. *Lithos* 114: 109–120.
- Karsli, O., Ketenci, M., Uysal, I., Dokuz, A., Aydin, F., Chen, B., Kandemir, R. and Wijbrans, R. J. (2011) Adakite like granitoid porphyries in the Eastern Pontides, NE Turkey: Potential parental melts and geodynamic implications. *Lithos* 127: 354–372.

- Kuscu, G. G. and Floyd, P. A. (2001) Mineral compositional and textural evidence for magma mingling in the Saraykent volcano. *Lithos* 56: 207–230.
- Kuscu, G. G. and Geneli, F. (2010) Review of post-collisional volcanism in the central Anatolian volcanic province (Turkey), with special reference to the Tepekey volcanic complex. *International Journal of Earth Sciences* 99: 593-621.
- Lai, S. C. and Qin, J. F. (2013) Adakitic rocks derived from the partial melting of subducted continental crust: Evidence from the Eocene volcanic rocks in the northern Qiangtang block. *Gondwana Research* 23: 812–824.
- Ling, M. X., Wang, F. Y., Ding, X., Hu, Y. H., Zhou, J. B., Zartman, R. E., Yang, X. Y. and Sun, W. D. (2009) Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River Belt, eastern China. *Economic Geology* 104: 303–321.
- Ling, M. X., Wang, F. Y., Ding, X., Zhou, J. B. and Sun, W. D. (2011) Different origins of adakites from the Dabie mountains and the lower Yangtze river belt in eastern China: Geochemical constraints. *International Geology Review* 53:727–740.
- Liu, S. A., Li, S. G., He, Y. S. and Huang, F. (2010) Geochemical contrasts between early Cretaceous ore-bearing and ore-barren high-Mg adakites in central-eastern China, Implications for petrogenesis and Cu-Au mineralization. *Geochimica Cosmochimica Acta* 74: 7160–7178.
- Martin, H. (1999) The adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos* 46(3): 411-429.
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., Moyen, J. F. and Champion, D. (2005) An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos* 79:1-24.
- Middlemost, E. A. K. (1994) Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Science Reviews* 37: 215–224.
- Mohamed, F. H., Moghazi, A. M. and Hassanen, M. A. (2000) Geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of late Neoproterozoic Dokhan-type volcanic rocks in the Fatira area, eastern Egypt. *International Journal of Earth Sciences* 88: 764-777.
- Mohammadi, S. S., Zarrinkoub, M. H. and Keramati, F. (2011) The geochemistry and petrogenesis of Hossein abad Tertiary volcanic rocks (Southwest of Birjand, East of Iran). *Petrology* 2(6): 83-96 (in Persian).
- Monfaredi, B., Masoudi, F. and Tabbakh Shabani, A. A. (2009) Magmatic interaction as recorded in texture and composition of plagioclase phenocrysts from the Sirjan area, Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 20(3): 243-251.
- Moyen, J. F. (2009) High Sr/Y and La/Yb ratios: The meaning of the adakitic signature. *Lithos* 112: 556-574.
- Pang, K. W., Chung, S. L., Zarrinkoub, M. H., Khatib, M. M., Mohammadi, S. S., Chu, C. H., Lee, H. Y. and Lo, C. H. (2013) Eocene-Oligocene post-collisional magmatism in the Lut-Sistan region, eastern Iran: Magma genesis and tectonic implications. *Lithos* 87-88: 231-245.
- Pearce, J. A. (1983) Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: *Continental basalts and mantle xenoliths* (Eds. Hawkesworth, C. J. and Norry, M. J.): 230-249. Shiva, Nantwich.
- Perugini, D. and Poli, G. (2012) The mixing of magmas in plutonic and volcanic environments. analogies and differences. *Lithos* 153: 261–277.

- Pinto-Linares, P. J., Levesse, G., Tritlla, J., Valencia, V. A., Torres-Aguilera, J. M., González, M. and Estrada, D. (2008) Transitional adakite-like to calc-alkaline magmas in a continental extensional setting at La Paz Au-Cu skarn deposits, Mesa Central, Mexico: metallogenic implications. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 25(1):39-58.
- Renjith, M. L. (2014) Micro-textures in plagioclase from 1994-1995 eruption, Barren Island Volcano: Evidence of dynamic magma plumbing system in the Andaman subduction zone. *Geoscience Frontiers* 5: 113-126.
- Reubi, O., Nicholls, I. A. and Kamenetsky, V. S. (2002) Early mixing and mingling in the evolution of basaltic magmas: evidence from phenocryst assemblages, Slamet volcano, Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 119: 274-255.
- Richards, J. and Kerrich, R. (2007) Special paper: Adakite-like rocks: their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology* 102: 1-40.
- Rollinson, H. (1993) Using geochemical data: evolution, presentation, interpretation. Longman Scientific and Technical, London.
- Rollinson, H. R. and Tarney, J. (2005) Adakites- the key to understanding LILE depletion in granulites. *Lithos* 79: 61-81.
- Stöcklin, J. (1968) Structural history and tectonics of Iran: a review. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin* 52: 1229-1258.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the ocean basins* (Eds. Saunders, A. D. and Norry, M. J.) Special Publications 42: 313-345. Geological Society, London.
- Topuz, G., Altherr, R., Schwarz, W. H., Siebel, W., Satır, M. and Dokuz, A. (2005) Post-collisional plutonism with adakite-like signatures: the Eocene Saraycık granodiorite (Eastern Pontides, Turkey). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 150: 441-455.
- Topuz, G., Okay, A. I., Altherr, R., Schwarz, W. H., Siebel, W., Zack, T., Satır, M. and Şen, C. (2011) Post-collisional adakite-like magmatism in the Agvanis massif and implications for the evolution of the Eocene magmatism in the Eastern Pontides (NE Turkey). *Lithos* 125: 131-150.
- Ustunisik, G., Kilinc, A. and Nielsen, R. L. (2014) New insights into the processes controlling compositional zoning in plagioclase. *Lithos* 200-201: 80-93.
- Vahdati Daneshmand, F. and Kholghi, M. H. (1988) Geological Map of Iran, 1:100000 series, sheet 7755-Khusf. Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).
- Wang, Q., Xu, J. F., Jian, P., Bao, Z. W., Zhao, Z. H., Li, C. F., Xiong, X. L. and Ma, J. L. (2006) Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, south China: implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology* 47: 119-144.
- Wang, Q., Xu, J. F., Zhao, Z. H., Bao, Z. W., Xu, W. and Xiong, X. L. (2004) Cretaceous high potassium intrusive rocks in the Yueshan-Hongzhen area of east China: Adakites in an extensional tectonic regime within a continent. *Geochemical Journal* 38: 417-434.
- Wang, X. L., Shu, X. J., Xu, X., Tang, M. and Gasching, R. (2012) Petrogenesis of early Cretaceous adakite-like porphyries and associated basaltic andesites in the eastern Jiangnan orogen, southern China. *Journal of Asian Earth Sciences* 61: 243-256.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95: 185-187.



- Wilson, M. (2007) *Igneous Petrogenesis*, Springer Verlag, Netherlands.
- Xu, J. F., Shinjo, R., Defant, M. J., Wang, Q. and Rapp, R. P. (2002) Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology* 30: 1111-1114.
- Zamani Babgohari, M. (2009) Evaluation of activity period of Giv fault-segments using study of co-seismic travertines. MSc thesis, University of Birjand, Birjand, Iran (in Persian).
- Zanetti, A., Mazzucchelli, M., Rivalenti, G. and Vannuci, R. (1999) The Finero phlogopite peridotite massif: an example of subduction-related metasomatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 134: 107-122.
- Zarrinkoub, M. H., Chung, S-L., Chiu, H. Y., Mohammadi, S. S., Khatib, M. M. and Lin, I. J. (2010) Zircon U-Pb age and geochemical constraints from the northern Sistan Suture Zone on the Neotethyan magmatic and tectonic evolution in eastern Iran. *Tectonic Crossroads*, Ankara, Turkey.
- Zarrinkoub, M. H., Mohammadi, S. S. and Yousefi, F. (2011) Geochemistry and petrogenesis of Givshad volcanic and subvolcanic rocks (southwest of Birjand, east of Iran). *Petrology* 2(7): 39-50 (in Persian).
- 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: 298-309.



## Geochemistry and tectonic setting of Tertiary volcanic rocks from Garejgan area (southwest of Birjand)

Ameneh Aboutalebi, Seyyed Saeid Mohammadi \* and Mohammad Hossein Zarrinkoub

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

### Abstract

The study area is located in 60 km to the southwest of Birjand, and northeastern margin of the Lut block. Tertiary volcanic domes of dacite, rhyodacite, trachyandesite along with tuff and breccia are cropped out in this area. The main textures of lavas are porphyritic with microcrystalline groundmass, poikilitic and subophitic. Common phenocrysts in dacite and rhyodacite include plagioclase, quartz, hornblende and biotite; and phenocrysts of trachyandesite are consisting of plagioclase, hornblende, pyroxene, biotite and sanidine. There are also some small bodies of Plio-Quaternary olivine basalt in this area that olivine, pyroxene and plagioclase are main phenocrysts. Common alterations in Tertiary volcanic rocks are silicic, argillic, carbonatization and opacitization. Magma series of these rocks are calcalkaline. The trace and REE patterns normalized to primary mantle and chondrite show these acidic and intermediate volcanic rocks are co-magmatic and their enrichment of LREE and LILE and depletion of HREE and HFSE (Nb and Ti), indicating that they are related to subduction zone and active continental margin. Geochemical characteristics such as high values of SiO<sub>2</sub> (62.61 wt%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (16.29 wt%), Sr (806 ppm) associated with low Yb (1.7 ppm), Y (15.27 ppm) and no Eu anomaly show that these rocks have adakitic nature. This magmatism can be originated from a garnet amphibolite source that is related to a post collisional tectonic setting.

**Key words:** Dacitic domes, Adakite, Post collision, Garejgan, Lut

\* ssmohammadi@birjand.ac.ir