

Petrography and Geochemistry of post-collisional adakites and Nb-enriched basalts association in the Sang-e-Rahuzg area (south of Birjand)

**Hamid Reza Mohammadi¹, Seyyed Saeid Mohammadi^{1*}
Malihe Nakhaei² and Mohammad Hossein Zarrinkoub¹**

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

² Department of mining engineering, Faculty of Mining, Civil, Chemical Engineering, Birjand University of technology, Birjand, Iran

Abstract

The studied rocks consist of Paleogene units with andesite and dacite composition and basaltic lavas belong to the Neogene time. Acid and intermediate lavas have medium to high-K calc alkaline nature and basalt is alkaline. Geochemical evidences show enrichment of LILEs relative to HFSEs in all volcanic rocks of Sang-e-Rahuzg area. Lack of negative Eu anomaly, low HREE (e.g. Yb= 0.67 - 1.62 ppm and Y=7.4 - 17.3 ppm), high Sr content (347.1 - 1010 ppm) and high Sr/Y ratio (31.84-99.99) indicate that the acid and intermediate rocks of Sang-e-Rahuzg area have adakitic nature. Moreover, high SiO₂ content (56.65-68.48 wt.%), CaO+ Na₂O (7.57-10.47 wt.%) and Sr show that the rocks studied are classified as high-SiO₂ adakites. Also, high K₂O content (1.22-3.14wt.%), and high K₂O/Na₂O ratio (0.4-0.8) in compare with high-SiO₂ adakites document that these rocks belong to post-collisional adakite type. Low HREE content (YbN<8 ppm) and Y/Yb ratio (10-11.59), suggest that garnet is residual phase in their source. Furthermore, high TiO₂ (1.52 wt.%), Nb (14.9 ppm), Nb/La (0.43) as well as high HFSE content of the basaltic samples of Sang-e-Rahuzg are characteristics of Nb-enriched basalts. Partial melting of metasomatised mantle by adakitic melts, caused suitable conditions for generation of Nb-enriched basalt. All lavas of Sang-e-Rahuzg area were generated, as the result of collision of Lut and Afghan blocks during the Paleogene to the Neogene time, in post-collisional tectonic environment, result of collision of Lut and Afghan blocks in Paleogene to Neogene.

Key words: adakite, Nb-enriched basalt, post collision, Sang-e-Rahuzg, Lut block

* ssmohammadi@birjand.ac.ir

سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی گدازه‌های آداکیتی پس از برخورد و بازالت‌های سرشار از نیوبیم همراه در منطقه سنگ رهوزگ (جنوب بیرجند)

حمیدرضا محمدی^۱، سیدسعید محمدی^{۱*}، ملیحه نخعی^۲ و محمدحسین زرین‌کوب^۱
^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
^۲ گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، عمران و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده شامل واحدهای پالئوژن با ترکیب آندزیت و داسیت و گدازه‌های بازالتی نئوژن هستند. گدازه‌های اسیدی و حد واسط، سرشت کالک‌آلکان پتاسیم متوسط تا بالا داشته و نمونه بازالتی سرشت آلکان دارند. یافته‌های زمین‌شیمیایی برای همه سنگ‌های آتشفشانی سنگ رهوزگ نشان‌دهنده غنی‌شدگی LILE در برابر HFSE هستند. نبود آنومالی منفی Eu، مقادارهای HREE کم (برای نمونه: $Yb = 0.67-1.62$ ppm و $Y = 7.4-17.3$ ppm)، مقادارهای Sr بالا ($1010-3471$ ppm) و نسبت Sr/Y بالا (31.84 تا 99.99)، نشان‌دهنده سرشت آداکیتی سنگ‌های اسیدی و حد واسط منطقه سنگ رهوزگ است. محتوای بالای SiO_2 ($68.48 - 56.65$ درصد وزنی)، $CaO+Na_2O$ ($10.47 - 7.57$ درصد وزنی) و Sr، نشان‌دهنده فرارگیری آداکیت‌های سنگ رهوزگ در محدوده آداکیت‌های پرسیلیس است. میزان K_2O بالا ($3.14 - 1.22$ درصد وزنی) و نسبت K_2O/Na_2O بالاتر (0.4 تا 0.8)، در مقایسه با آداکیت‌های پرسیلیس، نشان می‌دهد که این سنگ‌ها در گروه آداکیت‌های پس از برخورد هستند. مقادارهای کم HREE ($Yb_N < 8$ ppm) و نسبت Y/Yb ($10 - 11.59$)، نشان می‌دهد که خاستگاه این سنگ‌ها دارای فاز به‌جای‌مانده گارنت بوده است. نمونه بازالتی منطقه سنگ رهوزگ دارای مقادارهای بالای TiO_2 (1.52 درصد وزنی) و Nb (14.9 ppm)، نسبت Nb/La (0.43) و HFSE بالاست. این ویژگی‌ها از ویژگی‌های بازالت‌های سرشار از Nb هستند. ذوب‌بخشی گوشته آستنوسفری متاسوماتیسم‌شده به‌وسیله مذاب‌های آداکیتی، شرایط خوبی را برای پیدایش مذاب بازالتی سرشار از Nb پدید آورده است. همه گدازه‌های منطقه سنگ رهوزگ در پهنه زمین‌ساختی پس‌برخوردی و در پی برخورد بلوک‌های لوت و افغان در پالئوژن تا نئوژن پدید آمده‌اند.
واژه‌های کلیدی: آداکیت، بازالت غنی از Nb، پس‌برخوردی، سنگ رهوزگ، بلوک لوت

* ssmohammadi@birjand.ac.ir

مقدمه

منطقه سنگ رهوزگ در ۸۰ کیلومتری جنوب بیرجند و میان طول‌های جغرافیایی خاوری $59^{\circ}14'$ تا $59^{\circ}20'$ و عرض‌های جغرافیایی شمالی $32^{\circ}19'$ تا $32^{\circ}22'$ جای دارد. این منطقه در نزدیکی روستای سنگ رهوزگ، در محدوده نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰:مختاران (Movahhed- avval and Emami, 1978) است و از دیدگاه ساختاری در لبه خاوری بلوک لوت (Karimpour *et al.*, 2011) جای دارد. بلوک لوت از سنگ‌های دگرگونی پیش از ژوراسیک و سنگ‌های رسوبی ژوراسیک، همراه با توده‌های آذرین درونی ژوراسیک تا ترشیری (با ترکیب بیشتر گرانیتوئیدی) ساخته شده و با گدازه‌های مافیک تا فلسیک ترشیری پوشیده شده است (Arjmandzadeh and Santos, 2014).

در منطقه سنگ رهوزگ، گدازه‌های آندزیتی و داسیتی ترشیری همراه با سنگ‌های آذرآواری (مانند: توف و برش) هستند و گدازه‌های بازیک آنها را پوشانده‌اند. بررسی‌های سنگ‌شناسی انجام شده درباره ولکانیسم ترشیری در برخی مناطق جنوب و جنوب‌باختری بیرجند نشان می‌دهد که سنگ‌های گدازه‌ای و نیمه‌عمیق این منطقه دارای سرشیت آداکیتی هستند (Ketabi, 2010; Zarrinkoub *et al.*, 2011; Mohammadi *et al.*, 2011; Sadri, 2011; Fakuri, 2013; Aboutalebi, 2014; Ketabi *et al.*, 2015). بر پایه بررسی‌های انجام‌شده، پهنه زمین‌ساختی پیدایش این سنگ‌ها وابسته به فرورانش دانسته شده است.

برای نخستین بار، سنگ‌های آداکیتی در جزایر آداک شناسایی شدند (Kay, 1978). این سنگ‌ها مقادیر MgO بالا، غنی‌شدگی LILE و نسبت

Sr/Y بالای هستند. Drummond و Defant (۱۹۹۰) واژه آداکیت را برای سنگ‌های آذرین اسیدی و حد واسط سرشار از سدیم به‌کار برده‌اند. به باور Martin و همکاران (۲۰۰۵)، آداکیت‌ها به دو دسته آداکیت‌های پر سیلیس و کم سیلیس رده‌بندی شده‌اند. آداکیت‌های پر سیلیس (که MgO کمی دارند) از ذوب مستقیم پوسته زیرین پدید می‌آیند و آداکیت‌های کم سیلیس (که MgO بالایی دارند) پیامد ذوب گوشته هستند (Castillo, 2012). این دو گروه از آداکیت‌ها در مقدار Sr و Nd و نیز نسبت‌های Cr/Ni و Sr/Y تفاوت آشکاری نشان می‌دهند. مقدار LREE، Nd و Ti در آداکیت‌های پر سیلیس کمتر از آداکیت‌های کم سیلیس است. یکی از ویژگی‌های مجموعه‌های آداکیتی، همراهی بازالت‌های Nb بالا (با بیشتر از ۲۰ ppm) (Defant *et al.*, 1992) و بازالت‌های سرشار از Nb (با برابر ۵ ppm تا ۲۰ ppm) (Defant *et al.*, 1991; Hastie *et al.*, 2011) است. مجموعه‌هاست (Imaoka *et al.*, 2014; Mazhari, 2016). این بازالت‌ها سرشت سری ماگمایی آلکان را دارند و از Al_2O_3 ، P_2O_5 و MgO غنی‌شدگی نشان می‌دهند. همچنین، از عنصرهای با قدرت میدان بالا (HFSE) به‌ویژه Nb سرشار هستند (Petroni and Ferrari, 2008; Mazhari, 2016). در سال‌های اخیر، در بررسی‌های زمین‌شیمیایی دقیق روی سنگ‌های آذرین پس از ائوسن در بخش‌های مختلف (مانند: شمال‌باختری، شمال‌خاوری و خاور ایران) برخی از این سنگ‌ها، سنگ‌های آداکیتی دانسته شده‌اند (Ghasemi *et al.*, 2010; Jamshidi *et al.*, 2014; Pirmohammadi Alishah, 2015; Modjarrad, 2015; Jamshidi *et al.*, 2015a, b; Ghadami *et al.*, 2015; Jalili Ghareh Ghaye *et al.*, 2015;

بخش‌های جنوبی منطقه دیده می‌شود. مرز گسلی سنگ‌های رسوبی (که از کنگلومرا، ماسه‌سنگ و مارن‌های پالئوژن ساخته شده‌اند) را از واحد فیلیت جدا کرده است. روندهای ساختاری فراوانی در این گستره دیده می‌شوند؛ اما مهمترین پهنه‌های گسلی در راستای کمابیش خاوری-باختری هستند (شکل ۱). نقش مولفه قائم و عملکرد راندگی در پهنه گسلی خاوری-باختری در جنوب سنگ رهوزگ، راندگی فیلیت‌های کرتاسه پسین روی واحدهای پالئوژن را در پی داشته است. دنباله خاوری این پهنه گسلی در بیرون از این منطقه، دستخوش تغییر شده و به روند شمال-باختری-جنوب‌خاوری و در پایان به روند شمالی-جنوبی (روند اصلی در پهنه ساختاری سیستان) پیوسته است.

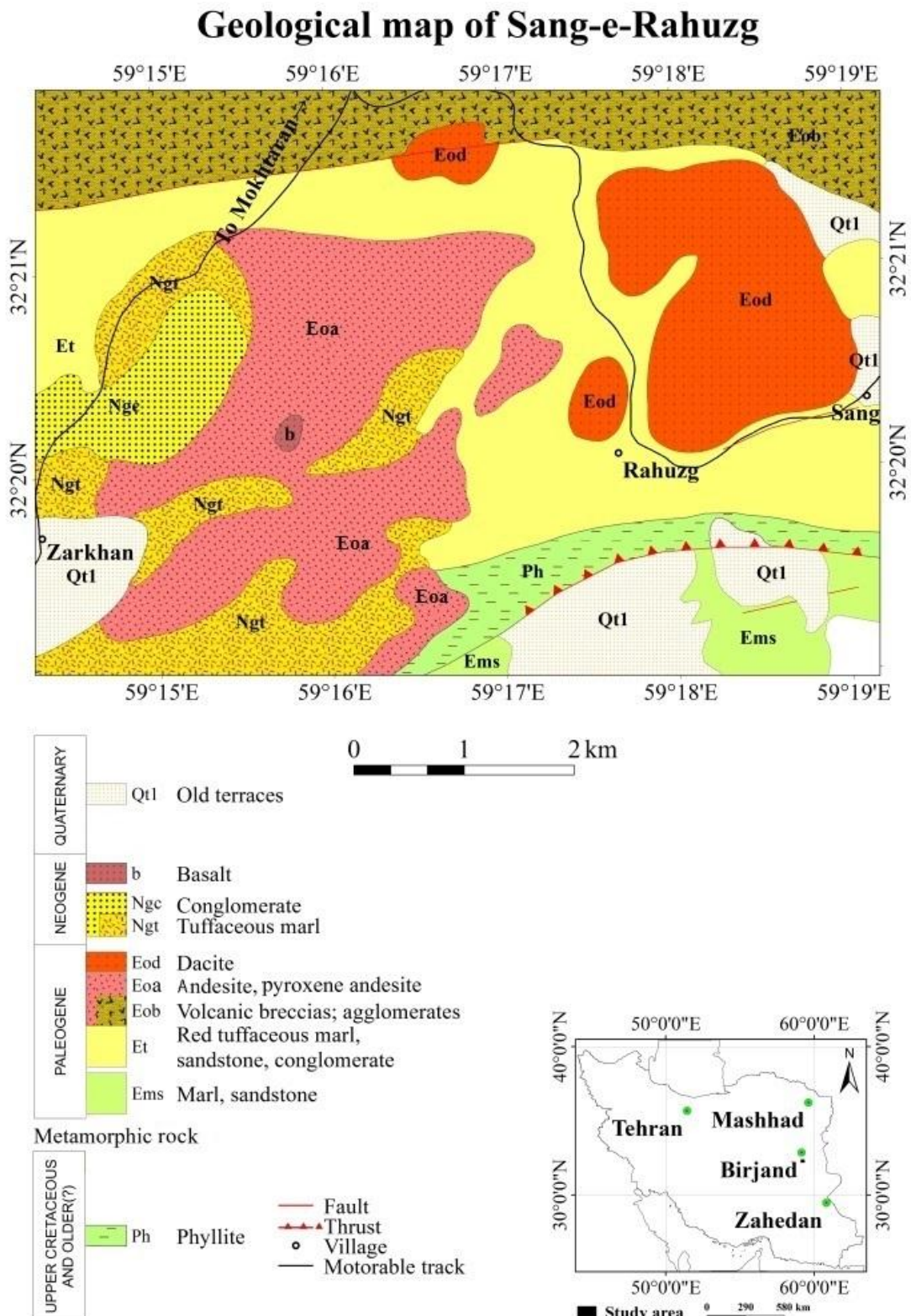
فعالیت آتشفشانی در منطقه سنگ رهوزگ با پیدایش گدازه‌های آندزیتی و سنگ‌های آذرآواری (توف، برش و آگلومرا) در ائوسن آغاز شده است که بیشتر در بخش‌های مرکزی و شمالی این محدوده رخنمون دارند (شکل ۱). ادامه فعالیت آتشفشانی ترشیری پیدایش گدازه‌های آندزیتی و داسیتی پالئوژن را در پی داشته است که دارای گسترش کمابیش گسترده در بخش‌های مرکزی این محدوده بوده و سرانجام با آشکارشدن رخنمون‌های کوچکی از گدازه‌های بازالتی پایان یافته است (شکل ۱). سنگ‌های بررسی‌شده در این پژوهش، شامل گدازه‌های حد واسط-اسیدی پالئوژن و واحد بازالتی نئوژن هستند. آندزیت با گسترش چشمگیر و به‌رنگ خاکستری (شکل ۲-A) و گاه مایل به صورتی، در باختر و جنوب‌باختری محدوده بررسی‌شده (از خاور روستای زرخان تا باختر و شمال‌باختری رهوزگ) رخنمون دارد (شکل ۱).

Pirmohammadi Alishah and Jahangiri, 2015). بر پایه یافته‌های این پژوهش‌ها، ماگمای سازنده سنگ‌های آداکیتی از ذوب‌بخشی یک خاستگاه گارنت‌آمفیبولیتی یا اکلوژیتی (که از دگرگونی سنگ‌کره اقیانوسی فرورانده شده نئوتتیس پدیدآمده است) و گاه در ارتباط با جایگاه پس از برخورد پدید آمده است.

در ایران، Azizi و همکاران (۲۰۱۴) بازالت‌های Nb بالای منطقه قروه (در پهنه سنندج-سیرجان) و Mazhari (۲۰۱۶) بازالت‌های Nb بالای جنوب‌باختری سبزوار را وابسته به ماگماتیسم آداکیتی دانسته‌اند. با توجه به کمبود در زمینه پژوهش‌های جامع درباره زمین‌شناسی، ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و جایگاه زمین‌ساختی گدازه‌های ترشیری منطقه سنگ رهوزگ و نیز ابهام‌هایی درباره جایگاه خاستگاه ماگمای سازنده این سنگ‌ها، این واحدهای سنگی بسیار نیازمند انجام بررسی‌های سنگ‌شناسی هستند. در این پژوهش تلاش شده است تا با بهره‌گیری از بررسی‌های زمین‌شناسی، ویژگی‌های سنگ‌شناسی و تحلیل داده‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌های بررسی‌شده، خاستگاه و پهنه زمین‌ساختی پیدایش گدازه‌های حد واسط-اسیدی و همچنین، بازالت سرشار از Nb همراه آنها در منطقه سنگ رهوزگ تا اندازه‌ای روشن شود.

زمین‌شناسی منطقه

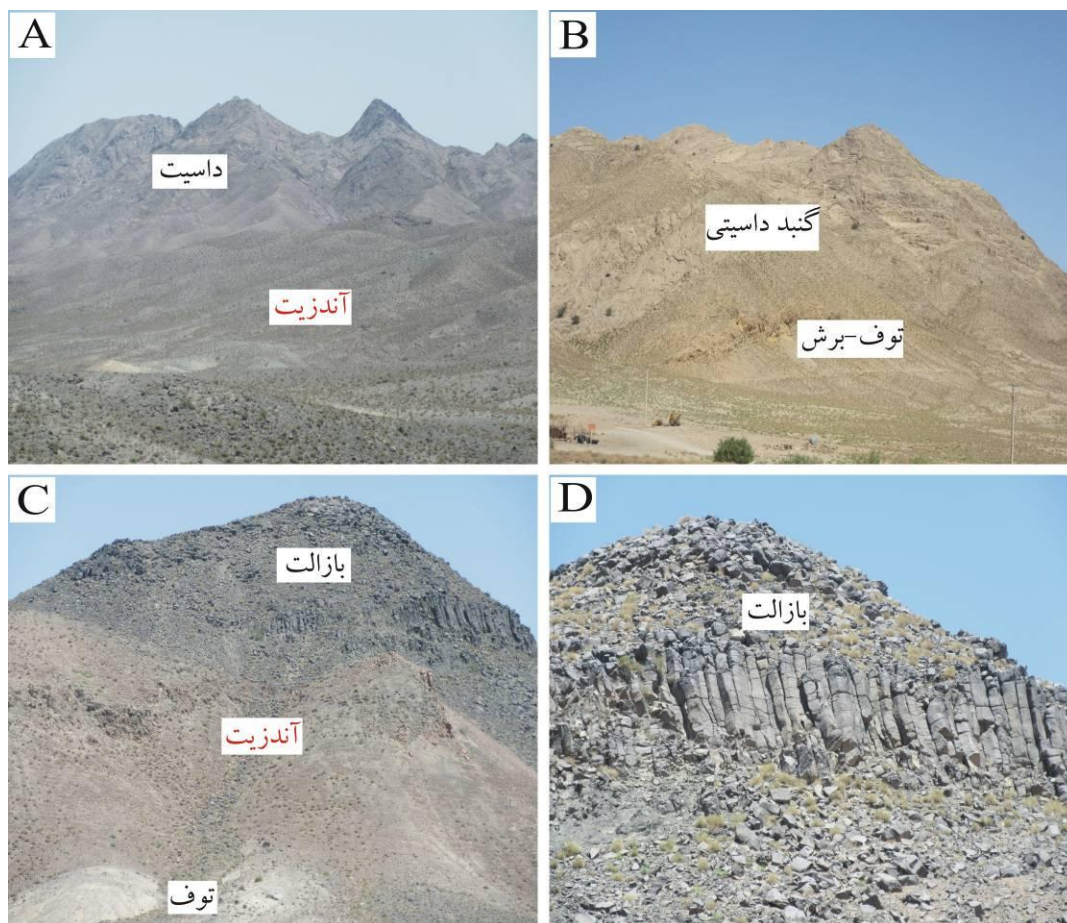
در منطقه سنگ رهوزگ چهار گروه سنگی شامل سنگ‌های دگرگونی، رسوبی، آذرآواری و گدازه‌ای رخنمون دارند (شکل ۱). رخنمون کمابیش کوچکی از سنگ‌های دگرگونی با ترکیب فیلیت (با سن کرتاسه پسین یا کهن‌تر) (Movahhed-avval and Emami, 1978) در



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه سنگ رهوزگ، بر گرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ مختاران (Movahhed-avval and Emami, 1978)

ناشی از انجماد نظیر درزه‌های انقباضی، فرسایش پوست پیازی و لانه زنبوری اشاره نمود. جوانترین واحد گدازه‌ای در منطقه سنگ رهوزگ شامل بازالت‌های نئوژن با گسترش بسیار محدود است که در باختر روستای رهوزگ روی آندزیت رخنمون دارد (شکل ۲- C). بازالت‌ها به رنگ سبز تیره و آفانیتیک بوده و ساخت ستونی نشان می‌دهد (شکل ۲- D). ذکر این نکته لازم است که دگرسانی توف‌ها که از گسترش قابل توجهی در منطقه بررسی شده برخوردار هستند، سبب تشکیل پهنه‌های بنتونیتی در برخی نقاط گردیده است که می‌تواند حائز اهمیت اکتشافی باشد.

میزان هوازدگی و خردشدگی در این سنگ‌ها کمابیش بالا بوده و بیشتر به صورت تپه‌های کم‌ارتفاع دیده می‌شود (شکل ۲- A). توده داسیتی به شکل گنبدی و به رنگ روشن (شکل‌های ۲- A و B) از حاشیه شمال‌باختری روستای سنگ تا خاور رهوزگ گسترش یافته است (شکل ۱). همچنین رخنمون‌های کوچکی از گدازه‌های داسیتی در شمال و شمال‌باختری روستای رهوزگ دیده می‌شود. در حاشیه خاوری و جنوبی گنبد داسیتی، واحدهای آذرآواری متشکل از توف-برش در قاعده داسیت رخنمون دارد (شکل ۲- B). از ویژگی‌های داسیت می‌توان به حضور ساختارهای



شکل ۲- تصاویر صحرایی گدازه‌های منطقه سنگ رهوزگ. A) رخنمون آندزیت با رنگ خاکستری و مورفولوژی ملایم در باختر رهوزگ (دید به سوی خاور)، B) گنبدی داسیتی در شمال‌باختری روستای سنگ (دید به سوی شمال‌باختری)، C) حضور بازالت روی آندزیت در باختر روستای رهوزگ (دید به سوی شمال)، D) ساخت ستونی در گدازه‌های بازالتی باختر رهوزگ (دید به سوی شمال).

روش انجام پژوهش

پس از برداشته‌های صحرائی و نمونه‌برداری، شمار ۱۲۰ مقطع نازک تهیه و بررسی‌های میکروسکوپی انجام شد. سپس، برپایه تنوع سنگ‌شناسی گدازه‌ها، شمار ۱۵ نمونه با دگرسانی کمتر برگزیده و به آزمایشگاه زمین‌شیمی ACME کانادا فرستاده شد. نمونه‌ها به روش بسته ترکیبی با کد 4A02 (با روش ICP-ES) برای عنصرهای اصلی، مواد فرار و برخی عنصرهای کمیاب و بسته ترکیبی با کد 4B03 (با روش ICP-MS) برای عنصرهای کمیاب و خاکی نادر دیگر تجزیه شیمیایی شدند (جدول ۱). برای رسم نمودارهای مورد نیاز، نرم‌افزارهای GCDkit و CorelDraw به کار برده شدند.

سنگ‌نگاری

سنگ‌های آتشفشانی منطقه سنگ ره‌وزگ دارای ترکیب داسیت، آندزیت (پیروکسن‌آندزیت) و بازالت هستند که در زیر به بررسی آنها پرداخته شده است:

داسیت‌ها: بافت اصلی این سنگ‌ها، پورفیری با زمینه ریزدانه (شکل‌های A-۳ و B-۳) و گاه پوی کیلیتیک است. فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، بیوتیت و آمفیبول (هورنبلند)، ۲۵ تا ۳۰ درصد حجم سنگ و زمینه ساخته‌شده از بلورهای ریز پلاژیوکلاز و کوارتز ۷۰ تا ۷۵ درصد حجم سنگ را ساخته‌اند. فراوان‌ترین فنوکریست داسیت‌ها، بلورهای پلاژیوکلاز به‌میزان ۵۵ تا ۶۰ درصد حجمی است. بلورهای پلاژیوکلاز شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار هستند. بیشتر پلاژیوکلازها دارای ماکل پلی‌سنتتیک (شکل B-۳) هستند و بافت غربالی، به‌همراه منطقه‌بندی، نشان می‌دهند.

دارا بودن بافت غربالی می‌تواند نشان‌دهنده آمیزش ماگمایی و یا ناپایداری بلورهای پلاژیوکلاز در هنگام حرکت پرشتاب ماگما به‌سوی بالا باشد (Stewart and Pearce, 2004). بافت‌های وابسته به رشد بلور به‌شکل غربالی، منطقه‌بندی و حاشیه‌واذب‌ی هستند که هنگام تغییر تعادل بلور-مذاب در پی تغییر دما، میزان آب، فشار و یا ترکیب مذاب در حال تبلور پدیدار می‌شوند (Renjith, 2014). منطقه‌بندی می‌تواند در پی تبلور دو مرحله‌ای، تبلور پلاژیوکلاز در پی انتقال ماگمایی و تبلور دو مرحله‌ای در پی وقفه نیز روی دهد (Nelson and Montana, 1992; Ustunisk *et al.*, 2014). از ویژگی‌های دیگر این کانی در داسیت‌ها می‌توان خوردگی خلیجی (شکل B-۳) را نام برد که از نشانه‌های دیگر نبود تعادل در هنگام تبلور این کانی است.

آمفیبول نوع هورنبلند، نزدیک به ۱۰ درصد فنوکریست‌های سازنده این سنگ‌ها را در بر گرفته است. حضور هورنبلند نشانه وجود آب در هنگام پیدایش ماگماست (White *et al.*, 2014). درشت‌بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار هورنبلند (شکل B-۳) گاه دارای ماکل تیغه‌ای هستند. همچنین، نشانه‌های تحلیل‌شدگی نشان می‌دهند و در لبه‌های برخی از آنها کانی کدر (مگنتیت) جایگزین شده‌اند. بلورهای بیوتیت، نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل (شکل‌های A-۳ و B-۳) هستند. این بلورها گاه دارای لبه‌های خورده‌شده و کدر هستند و نزدیک به ۱۵ درصد حجم فنوکریست‌ها را در بر می‌گیرند. این سنگ‌ها دارای مقدار کمی فنوکریست کوارتز هستند. این کانی بیشتر به‌صورت ریزبلور در زمینه سنگ دیده می‌شود. کلسیت و سیریسیت از کانی‌های دگرسانی بوده و زیرکن کانی کمیاب است.

جدول ۱- داده‌های تجزیه شیمیایی گدازه‌های منطقه سنگ رهوزگ (جنوب بیرجند) (عنصرهای اصلی برپایه درصد وزنی و عنصرهای کمیاب برپایه ppm) (AB: آلکالی‌بازالت؛ A: آندزیت؛ D: داسیت)

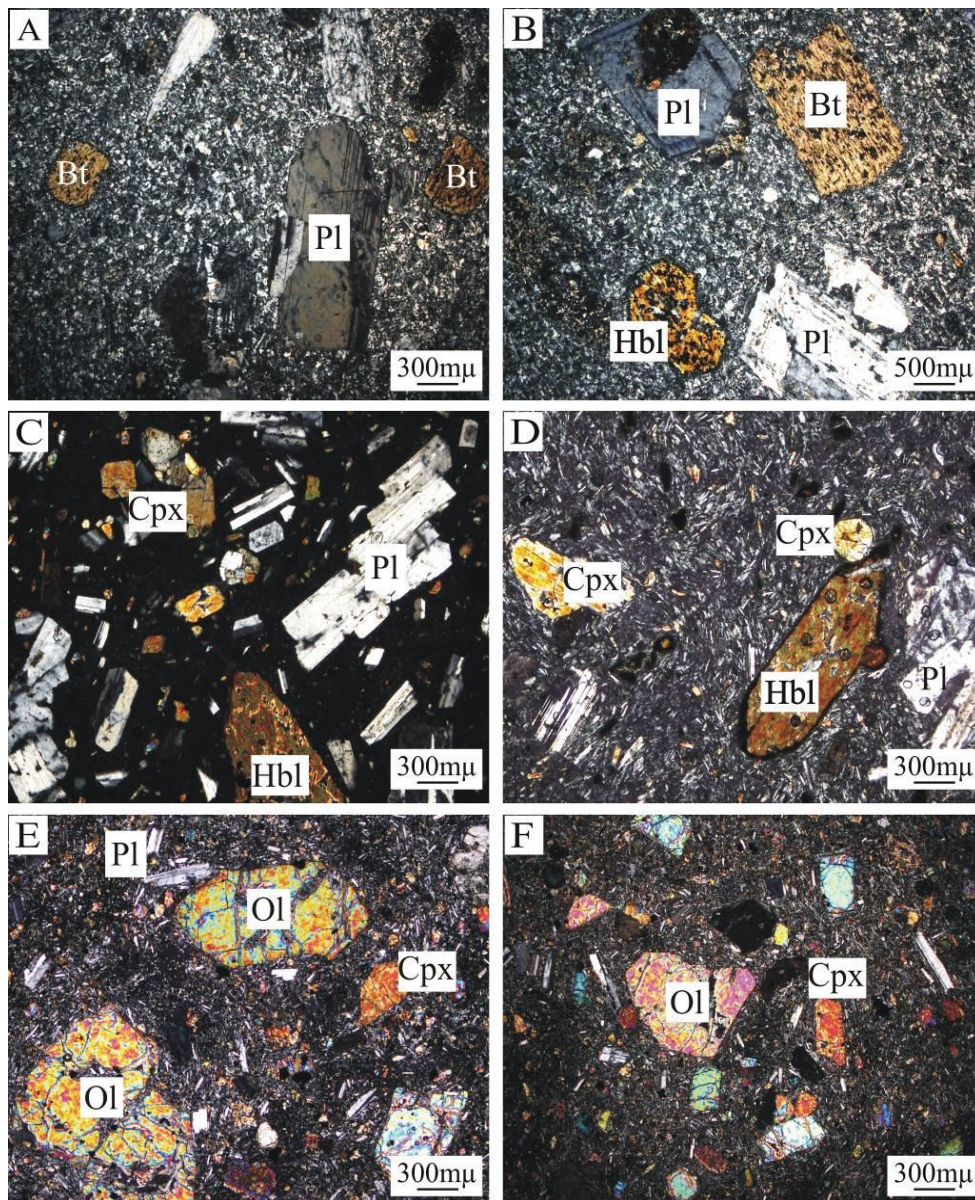
Sample No.	S41	S140	S153	S129	S22	S160	S182	S16	
Rock type	AB	A	A	A	A	A	A	A	
Location	X	32°20'10.02"	32°20'52"	32°20'10.8"	32°20'1.45"	32°21'10.65"	32°19'57.1"	32°20'26.3"	32°21'0.5"
	Y	59°15'47.15"	59°16'17.8"	59°17'32.5"	59°16'37.5"	59°18'43.12"	59°14'54.6"	59°15'57"	59°17'41.9"
SiO ₂	46.2	56.65	57.54	57.57	58.68	59.45	60.97	61.66	
TiO ₂	1.52	0.72	0.75	0.76	0.56	0.66	0.55	0.5	
Al ₂ O ₃	14.24	16.62	16.6	17.63	16.27	16.63	15.92	15.6	
Fe ₂ O _{3T}	10.08	6.63	5.91	5.37	4.67	5.06	5.08	4.18	
MnO	0.14	0.08	0.05	0.16	0.05	0.12	0.08	0.07	
MgO	11.79	4.32	2.9	1.23	3.7	2.7	3.28	3.08	
CaO	8.47	6.96	5.74	5.37	5.37	5.55	5.38	4.36	
Na ₂ O	3.28	3.51	3.7	3.98	3.59	3.68	3.74	3.63	
K ₂ O	1.22	1.63	2.94	2.98	2.04	3.14	2.1	2.92	
P ₂ O ₅	0.37	0.22	0.32	0.32	0.25	0.3	0.2	0.23	
LOI	2.1	2.4	3.2	4.3	4.5	2.2	2.4	3.4	
Total	99.41	99.74	99.65	99.67	99.68	99.49	99.7	99.63	
Mg#	0.70	0.52	0.61	0.56	0.50	0.57	0.31	0.60	
Ni	295	76	47	35	58	30	59	42	
Sc	22	18	14	14	11	13	11	10	
Ba	710	654	1129	1280	1183	1789	871	1130	
Co	53.3	23.1	22.6	32.2	15.3	23.3	19.7	13.5	
Cs	0.5	2.4	1.7	1.8	1	5.1	3	1.9	
Ga	16.2	17.5	16.7	19.5	16.8	17.4	16.3	16.5	
Hf	3.4	3.1	3.8	3.8	3.1	4.5	3.5	3.4	
Nb	14.9	7.3	12.9	13.3	9.7	12.2	8.1	8.6	
Rb	27.7	54.7	82.3	80.2	29.5	105.4	83.9	71.9	
Sr	1105	633.9	949.2	1010.5	826	977.7	699.6	689.4	
Ta	0.7	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.4	0.6	
Th	9	8.1	14.1	15.4	11.1	22	9.2	11.5	
U	1.3	1.5	3.2	2.3	1.4	5.1	2.4	2.2	
V	175	140	119	145	101	129	109	94	
Zr	158.1	119.8	153.3	151.7	123.2	177	124	131.8	
Y	18.3	15.4	15.9	16.6	11	17.3	12.3	10.6	
La	34.7	25.6	43.2	44	33.3	50.3	24.5	33.8	
Ce	64.2	45.5	73.3	78.1	57.3	84.9	42.1	54.7	
Pr	7.14	5	7.63	8.25	6.13	9.37	4.7	5.99	
Nd	26.8	18.1	27.7	28.5	21.9	31.6	16.7	21.5	
Sm	4.91	3.6	4.58	4.75	3.29	4.98	2.83	3.25	
Eu	1.48	0.97	1.23	1.26	0.96	1.43	0.84	0.91	
Gd	4.53	3.4	4.02	4.12	2.89	4.39	2.62	2.66	
Tb	0.63	0.49	0.53	0.54	0.4	0.6	0.4	0.38	
Dy	3.63	2.82	2.94	2.98	2.18	3.08	2.21	1.8	
Ho	0.64	0.53	0.57	0.55	0.42	0.58	0.41	0.38	
Er	1.77	1.5	1.57	1.45	1.05	1.48	1.16	1.03	
Tm	0.27	0.22	0.22	0.24	0.17	0.26	0.18	0.17	
Yb	1.62	1.43	1.4	1.34	1.06	1.61	1.1	1.06	
Lu	0.24	0.22	0.21	0.24	0.16	0.27	0.17	0.16	
Eu/Eu*	0.9	1	1	0.8	0.9	0.9	0.9	1	
La _N /Yb _N	14.4	21.1	21.2	15	20.8	12.1	22.1	21.5	

جدول ۱- ادامه

Sample No.		S102	S5	S24	S54	S70	S145	S190
Rock type		A	A	A	D	D	D	D
Location	X	32°20'33.2"	32°20'31.87"	32°21'19.2"	32°21'6.6"	32°20'21.4"	32°20'32.6"	32°19'27.4"
	Y	59°18'24.9"	59°19'1.29"	59°18'10.2"	59°15'43.1"	59°18'2.3"	59°17'10.2"	59°16'2.8"
SiO ₂		62.2	62.55	62.76	63.05	63.24	64.24	68.48
TiO ₂		0.43	0.44	0.46	0.54	0.46	0.47	0.46
Al ₂ O ₃		15.93	15.61	15.47	16.11	15.91	15.97	15.59
Fe ₂ O _{3T}		3.9	4.04	4.29	4.55	4.08	4	3.05
MnO		0.06	0.05	0.07	0.01	0.02	0.03	0.01
MgO		2.62	2.45	1.12	0.8	1.74	1.41	0.4
CaO		4.7	4.68	4.73	4.29	4.05	4.29	3.79
Na ₂ O		3.84	3.69	3.6	3.65	3.76	3.61	3.78
K ₂ O		2.42	2.55	2.57	2.75	2.66	2.59	2.75
P ₂ O ₅		0.19	0.21	0.2	0.19	0.22	0.21	0.14
LOI		3.4	3.4	4.4	3.8	3.6	2.9	1.4
Total		99.69	99.67	99.67	99.74	99.74	99.72	99.85
Mg#		0.57	0.55	0.34	0.26	0.46	0.41	0.21
Ni		33	37	34	46	42	32	20
Sc		9	9	9	11	9	9	6
Ba		1007	1099	1121	1125	1059	1060	715
Co		11.6	11.9	10.9	9.8	11.2	10.7	6.1
Cs		2.1	2	1.9	1.6	1.9	1	1.9
Ga		15.4	15.9	15.7	15.8	16.8	17.6	15.6
Hf		2.9	3.2	3	3.3	3.3	3.4	4.4
Nb		8.1	8.4	8.5	8.1	8.5	8.8	9.1
Rb		64.3	69.1	64.7	73.7	68.4	45.8	79.7
Sr		732.2	697.6	732.1	643.7	739.9	702.5	347.1
Ta		0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.5	0.7
Th		11.3	10.7	10.7	9.1	11.9	11.4	12.7
U		3	2.5	2	1.9	2	2.1	2.4
V		81	85	48	86	79	81	55
Zr		115.5	129.8	116	128.5	119.5	126.5	159.5
Y		10.2	9.5	9.3	11	7.4	9.6	10.9
La		29.4	31.4	31.8	26.4	33.2	31.2	26.9
Ce		51.7	53.2	51.2	43.3	48.5	52.7	45.6
Pr		5.22	5.69	5.49	4.78	5.6	5.68	4.83
Nd		17.9	19.3	19.3	18.3	19.3	18.8	16.6
Sm		2.84	3	2.88	3.23	2.81	3.39	2.98
Eu		0.85	0.8	0.77	0.9	0.81	0.83	0.8
Gd		2.52	2.58	2.57	2.71	2.12	2.59	2.83
Tb		0.33	0.34	0.33	0.41	0.27	0.37	0.41
Dy		1.75	2	1.72	2.12	1.43	1.81	2.09
Ho		0.34	0.34	0.33	0.36	0.26	0.35	0.37
Er		0.88	0.91	0.88	1.1	0.66	0.92	1.03
Tm		0.14	0.14	0.14	0.17	0.1	0.13	0.15
Yb		0.88	0.93	0.89	1.01	0.67	0.84	1.03
Lu		0.15	0.14	0.14	0.14	0.1	0.12	0.14
Eu/Eu*		0.9	0.8	0.9	0.9	1	0.9	0.9
La _N /Yb _N		22.5	22.8	24.1	17.6	33.4	25	17.6

Eu* = Eu_{cn} / (Sm_{cn} · Gd_{cn})^{0.5} (Topuz *et al.*, 2011).

cn: مقادیر بهنجار شده عنصرهای خاکی نادر نسبت به کندریت



شکل ۳- تصویرهای میکروسکوپی XPL از: A، B بافت پورفیری با زمینه ریز دانه و حضور فنوکریست‌های پلاژیوکلاز با ماکل پلی‌سنتتیک و خوردگی خلیجی، بیوتیت و هورنبلند (داسیت)؛ C، D بافت‌های ویتروفیری و پورفیری با زمینه میکرولیتی و حضور فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن و هورنبلند (آندزیت‌ها)؛ E، F بافت‌های پورفیری و تدریجی و کانی‌های پلاژیوکلاز، الیوین و کلینوپیروکسن (بازالت) (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از Whitney و Evans (۲۰۱۰) است)

هورنبلند (۵ تا ۱۰ درصد حجمی) هستند (شکل‌های ۳- C و ۳- D). بیشتر بلورهای کمابیش ریز پیروکسن به کلریت و به مقدار کمتر، اپیدوت دگرسان شده‌اند. بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار هورنبلند قهوه‌ای بیشتر دارای لبه‌های اپاسیته هستند (شکل ۳- D) و ماکل تیغه‌ای نشان می‌دهند. پلاژیوکلازها گاه دارای

آندزیت- پیروکسن آندزیت: بافت اصلی این سنگ‌ها ویتروفیری است (شکل ۳- C). از بافت‌های دیگر دیده‌شده در این سنگ‌ها می‌توان بافت پورفیری با زمینه میکرولیتی (شکل ۳- D)، جریان‌ی و تدریجی را نام برد. بیشتر فنوکریست‌ها شامل پلاژیوکلاز (۶۵ تا ۷۰ درصد حجمی)، اوژیت (۱۵ تا ۲۰ درصد حجمی) و

گدازه‌های منطقه سنگ رهوزگ، از داده‌های عنصرهای اصلی، کمیاب و خاکی نادر بهره گرفته شده است (جدول ۱). سنگ‌های آتشفشانی منطقه سنگ رهوزگ دارای SiO_2 از ۴۶/۲ تا ۶۸/۴۸ درصد وزنی، Al_2O_3 (۱۴/۲۴ تا ۱۷/۶۳ درصد وزنی)، MgO (۰/۴ تا ۱۱/۷۹ درصد وزنی)، Fe_2O_{3T} (۳/۰۵ تا ۱۰/۰۸ درصد وزنی)، K_2O (۱/۲۲ تا ۳/۱۴ درصد وزنی)، Na_2O (۳/۲۸ تا ۳/۹۸ درصد وزنی) و نسبت بالای $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (بیشتر از ۱) هستند. میزان Mg\# در این سنگ‌ها از ۲۱ تا ۷۰ است.

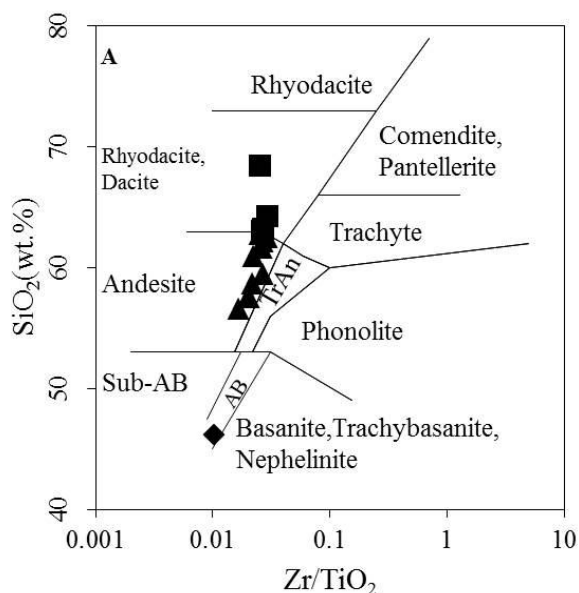
در نمودار SiO_2 در برابر Zr/TiO_2 ، گدازه‌های سنگ رهوزگ در محدوده آکالی‌بازالت، آندزیت و داسیت جای می‌گیرند (شکل ۴- A). در نمودار شناسایی سری ماگمایی برپایه SiO_2 در برابر $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ، نمونه‌های اسیدی و حد واسط در گستره ساب‌آلکان و نمونه بازالتی در گستره آلکان هستند (شکل ۴- B).

لبه‌های گردشده هستند و به کربنات دگرسان شده‌اند. زمینه سنگ بیشتر از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز، به همراه مقدار کمی پیروکسن و آمفیبول ساخته شده است. حضور مقداری سانیدین در زمینه برخی نمونه‌ها، ترکیب آنها را به تراکی‌آندزیت نزدیک کرده است.

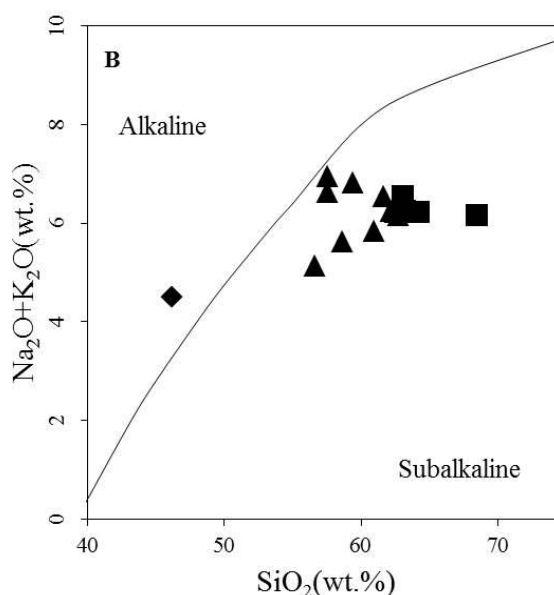
بازالت: بافت اصلی این سنگ پورفیری (شکل‌های E-۳ و F-۳) و گاه پورفیری با زمینه میکروولیتی شیشه‌ای است. بلورهای پلاژیوکلاز کمابیش ریز، شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار (شکل‌های E-۳ و F-۳) و گاه دارای منطقه‌بندی هستند. در این سنگ‌ها پلاژیوکلاز به میزان ۴۵ تا ۵۰ درصد حجمی، الیون ۲۰ تا ۲۵ درصد حجمی و پیروکسن ۱۵ تا ۲۰ درصد حجم سنگ را ساخته‌اند. از بافت‌های دیگر دیده‌شده، می‌توان بافت تدریجی را نام برد (شکل F-۳).

زمین‌شیمی

برای بررسی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی



◆ Alkali Basalt ▲ Andesite ■ Dacite

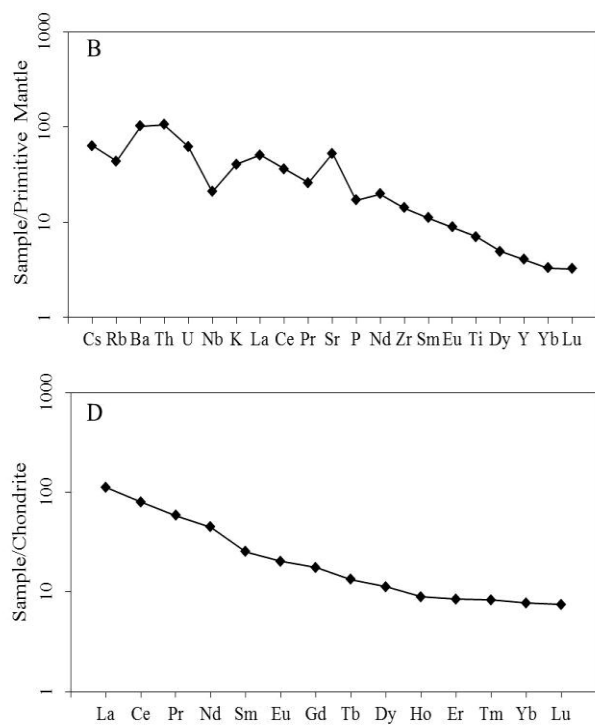
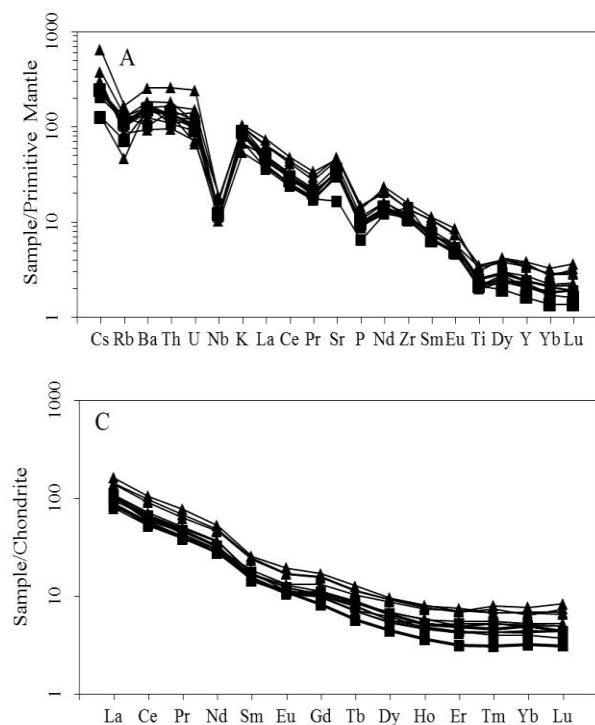


شکل ۴- گدازه‌های سنگ رهوزگ (جنوب بیرجند) در: (A) نمودار نام‌گذاری برپایه SiO_2 در برابر Zr/TiO_2 (Winchester and Floyd, 1977)؛ (B) نمودار شناسایی سری ماگمایی $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ در برابر SiO_2 (Irvine and Baragar, 1971)

Ge *et al.*, 2002; Morata *et al.*, 2005; Qin *et al.*, 2010; Ahmadian *et al.*, 2016).

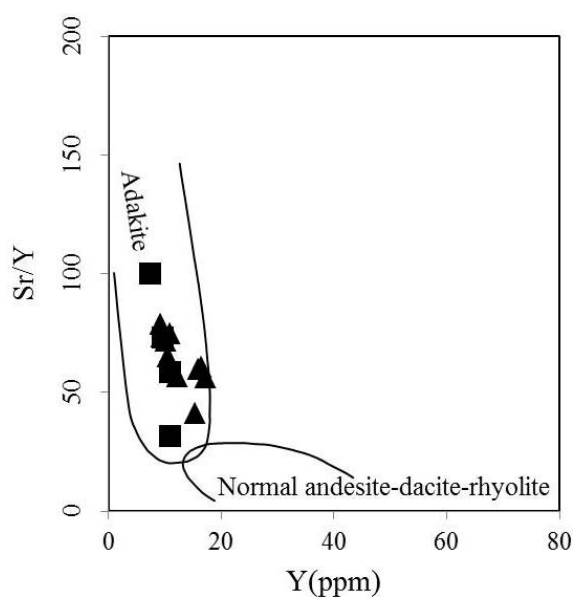
روندهای کمابیش همانند و موازی نمونه‌های اسیدی و حد واسط در نمودارهای چندعنصری می‌توانند نشان‌دهنده خاستگاه یکسان برای این سنگ‌ها باشد. نمونه بازالتی منطقه سنگ رهوزگ دارای ۱/۵۲ درصد وزنی TiO_2 ، Nb برابر ۱۴/۹ ppm، نسبت Nb/La برابر ۰/۴۳ و HFSE بالاست. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده بازالت‌های سرشار از Nb هستند (Petroni and Ferrari, 2008). برپایه پیشنهاد Kepezhinskas و همکاران (۱۹۹۷) و Defant و Kepezhinskas (۲۰۰۱)، بازالت‌های سرشار از Nb، با نسبت Nb/La بالا (بیشتر از ۰/۵)، مقدار HFSE بالا و داشتن سرشت آکالن یا آکالن انتقالی شناخته می‌شوند.

در نمودار چندعنصری بهنجار شده در برابر ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)، نمونه‌های حد واسط و اسیدی منطقه سنگ رهوزگ، از LILE (مانند: Ba, Rb و Th) در برابر HFSE (مانند: Ti و Nb) غنی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۵- A). این پدیده از ویژگی‌های ماگماهای وابسته به کمان است (Kazimoto and Ikingura, 2014). در نمودار عنصرهای خاکی نادر بهنجار شده در برابر ترکیب کندریت (Boynton, 1984)، این سنگ‌ها از LREE در برابر HREE غنی‌شدگی دارند (شکل ۵- C). همچنین، روندهای کمابیش همواری نشان می‌دهند. محتوای کم HREE ($Yb_N < 8ppm$) و همچنین، نسبت بالای Y/Yb (۱۰-۱۱/۵۹) در این سنگ‌ها، نشان‌دهنده خاستگاهی با فاز بجامانده گارنت است.



شکل ۵- سنگ‌های آذرین سنگ رهوزگ (جنوب بیرجند) در: (A) نمودار عنکبوتی بهنجار شده به ترکیب گوشته اولیه برای نمونه‌های اسیدی و حد واسط؛ (B) نمودار عنکبوتی بهنجار شده به ترکیب گوشته اولیه برای نمونه بازالتی؛ (C) نمودار عنصرهای خاکی نادر بهنجار شده به ترکیب کندریت برای سنگ‌های اسیدی و حد واسط؛ (D) نمودار عنصرهای خاکی نادر بهنجار شده به ترکیب کندریت برای نمونه بازالتی (ترکیب گوشته اولیه از Sun و McDonough (۱۹۸۹)؛ ترکیب کندریت از Boynton (۱۹۸۴) (نماد نمونه‌ها همانند شکل ۴ است)

در نمودار عنصرهای خاکی نادر، نبود آنومالی منفی Eu نشان‌دهنده این است که پلاژیوکلاز نقشی در فرآیندهای جدایش بلورین نداشته است (Khalatbari *et al.*, 2013; Aydınçakır, 2014). مقدار HREE کم (برای نمونه: Yb برابر با ۰/۶۷-۱/۶۲ ppm و Y برابر با ۷/۴-۱۷/۳ ppm)، مقدار Sr بالا (۱۰۱۰ - ۳۴۷/۱ ppm) و نسبت Sr/Y بالا (۳۱/۸۴ تا ۹۹/۹۹)، نشان‌دهنده سرشت آداکیتی (شکل ۶) سنگ‌های اسیدی و حد واسط منطقه سنگ رهوزگ هستند (Liu *et al.*, 2010; Jiang *et al.*, 2012; Guan *et al.*, 2012; Castillo, 2012; Wang *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2015).

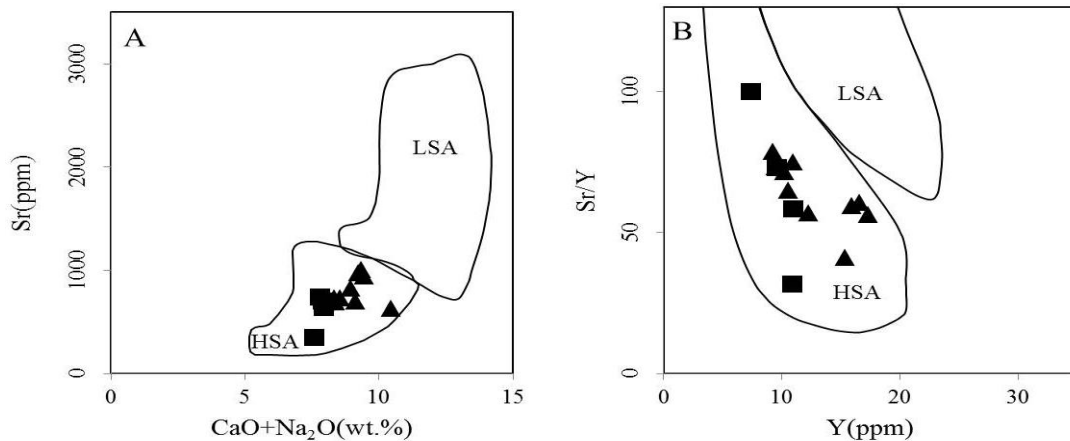


شکل ۶- جایگاه نمونه‌های منطقه سنگ رهوزگ (جنوب بیرجند) در نمودار Y در برابر Sr/Y (Defant and Drummond, 1990) (نماد نمونه‌ها همانند شکل ۴ است)

بر پایه Martin و همکاران (۲۰۰۵)، محتوای بالای SiO_2 (۶۸/۴۸ - ۵۶/۶۵ درصد وزنی)، $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}$ (۱۰/۴۷ - ۷/۵۷ درصد وزنی) و Sr (۱۰۱۰ ppm - ۳۴۷/۱ ppm) نشان‌دهنده جای‌گرفتن آداکیت‌های سنگ رهوزگ در گستره آداکیت‌های پرسیلیس هستند (شکل ۷). هرچند این آداکیت‌ها، با آداکیت‌های پرسیلیس اصلی تفاوت‌هایی نیز دارند. برای نمونه، آداکیت‌های پرسیلیس، سنگ‌هایی کم پتاسیم بوده و نسبت

در نمودارهای چندعنصری بهنجارشده در برابر ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) و کندریت (Boynton, 1984)، نمونه بازالتی دارای غنی‌شدگی از LILE و LREE، تهی‌شدگی از HREE و نسبت بالای LREE/HREE است (شکل‌های B-۵ و D-۵). همچنین، فراوانی HFSE در نمونه بازالتی، بیشتر از نمونه‌های آداکیتی است (شکل‌های A-۵ و B). در نمونه‌های بررسی‌شده، نسبت La_N/Yb_N از ۱۲/۷ تا ۳۳/۴ (میانگین: ۲۳/۰۵) بوده و نشان‌دهنده روندهای بسیار جدایش‌یافته REE در این سنگ‌هاست.

آداکیت‌های سنگ رهوزگ در آن‌ها کمتر از ۰/۴ است؛ اما آداکیت‌های سنگ رهوزگ محتوای K_2O بالایی دارند (۳/۱۴ - ۱/۲۲ درصد وزنی) و نسبت $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ در آن‌ها بالاتر از آداکیت‌های پرسیلیس است (۰/۴ تا ۰/۸). این ویژگی آداکیت‌های سنگ رهوزگ را همانند آداکیت‌های پس از برخورد (Marchev *et al.*, 2013) یا آداکیت‌های نوع C (Xiao and Clemens, 2007) کرده است.



شکل ۷- جای گرفتن گدازه‌های حد واسط و اسیدی سنگ رهوزگ (جنوب بیرجند) در گستره آداکیت‌های پر سیلیس: (A) نمودار $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$ در برابر Sr/Y (Liu *et al.*, 2012)؛ (B) نمودار Sr/Y در برابر Y (Liu *et al.*, 2012)؛ (High- SiO_2 adakites = HSA)؛ (Low- SiO_2 adakites = LSA) (نماد نمونه‌ها همانند شکل ۴ است)

زیرین لایه‌لایه شده یا پوسته قاره‌ای فرورونده هستند، در پهنه کششی درون صفحه‌ای و یا پهنه‌های برخوردی پدید می‌آیند (Chen *et al.*, 2015). ذوب‌بخشی پوسته زیرین ضخیم‌شده در پی برخورد دو قاره، خاستگاه آداکیت‌های پس از برخورد دانسته شده است (Chung *et al.*, 2003; Hou *et al.*, 2004; Topuz *et al.*, 2005, 2011; Karsli *et al.*, 2010, 2011). اگر این سنگ‌ها پیامد ذوب‌بخشی پوسته بازالتی زیرین ضخیم‌شده باشند، معمولاً MgO و یا Mg\# کم (معمولاً کمتر از ۴۵) دارند (Sen and Dunn, 1994; Rapp *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 1999). برپایه نمودار La/Yb در برابر La رندهای ترکیبی پدیدآمده از ذوب‌بخشی را نشان می‌دهند (شکل ۸)؛ اما معمولاً Mg\# بالایی دارند (میانگین: ۴۶) و از این رو، پیامد ذوب‌بخشی پوسته بازالتی زیرین ضخیم‌شده نیستند.

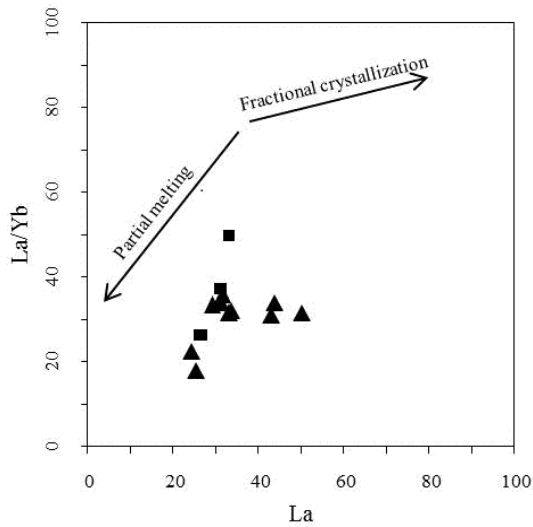
نمودارهای SiO_2 در برابر MgO ، Mg\# و Ni و Cr (Lu *et al.*, 2013) برای شناسایی آداکیت‌های پدیدآمده از ذوب پوسته لایه‌لایه شده و پوسته ضخیم‌شده به کار می‌روند (Ahmadian *et al.*, 2016). در این نمودارها، بیشتر نمونه‌ها در گستره آداکیت‌های پدیدآمده از پوسته زیرین لایه‌لایه شده جای گرفته‌اند (شکل ۹).

بحث

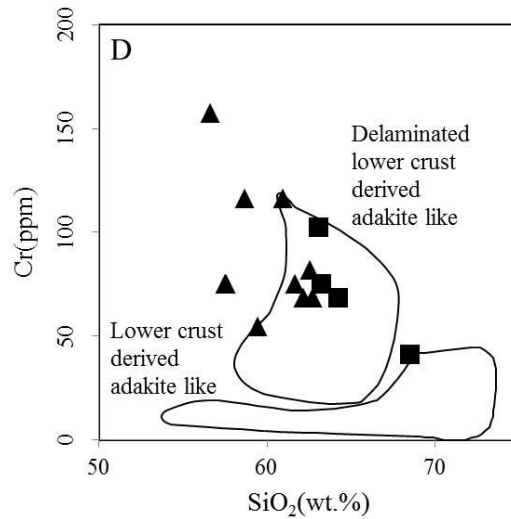
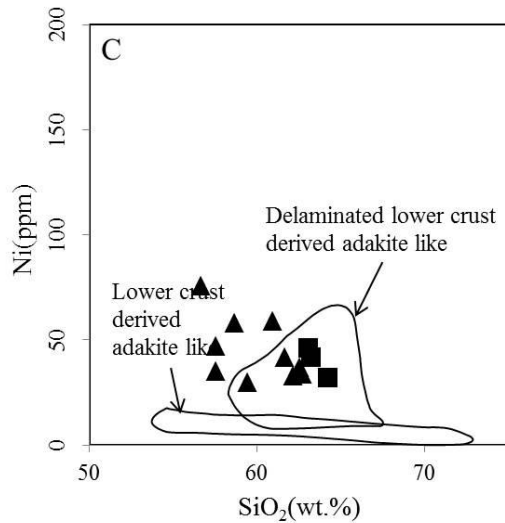
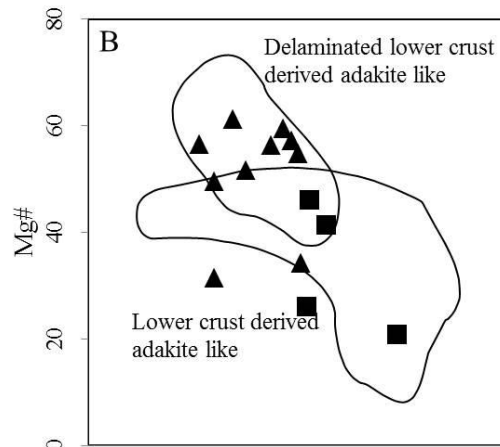
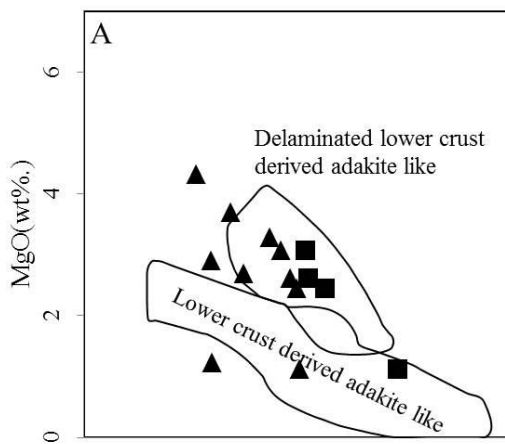
پتروژنز

همانگونه که پیش از این گفته شد، سنگ‌های اسیدی و حد واسط منطقه سنگ رهوزگ سرشت آداکیتی دارند. آداکیت‌ها می‌توانند پیامد ذوب صفحه اقیانوسی داغ فرورونده (Defant and Drummond, 1990)، ذوب‌بخشی پوسته زیرین لایه‌لایه شده (Atherton and Petford, 1993; Xu *et al.*, 2002; Topuz *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2008)، ذوب‌بخشی پوسته زیرین بازالتی ضخیم‌شده (Chung *et al.*, 2003; Hou *et al.*, 2004; Guan *et al.*, 2012)، فرآیند تبلوربخشی-هضم (AFC) یا تبلور جزء به جزء ماگماهای بازالتی مادر (Castillo *et al.*, 1999; Macpherson *et al.*, 2006; Castillo, 2012) یا آمیزش ماگمای اسیدی با ماگمای بازیک (Streck *et al.*, 2007; Guo *et al.*, 2007) باشند. شناخت سرشت آداکیت‌ها به درک فرآیندهای متاسوماتیسم گوه گشته‌ای و بازایی پوسته کمک می‌کند (Kay, 1978; Saunders *et al.*, 1987; Defant and Drummond, 1990; Yogodzinski and Kelemen, 1998; Shimoda, 2009).

سنگ‌های آداکیتی که پیامد ذوب‌بخشی پوسته



شکل ۸- جایگاه گدازه‌های آداکیتی منطقه سنگ رهوزگ (جنوب بیرجند) در نمودار La/Yb در برابر La (Chen *et al.*, 2015) (نماد نمونه‌ها همانند شکل ۴ است)



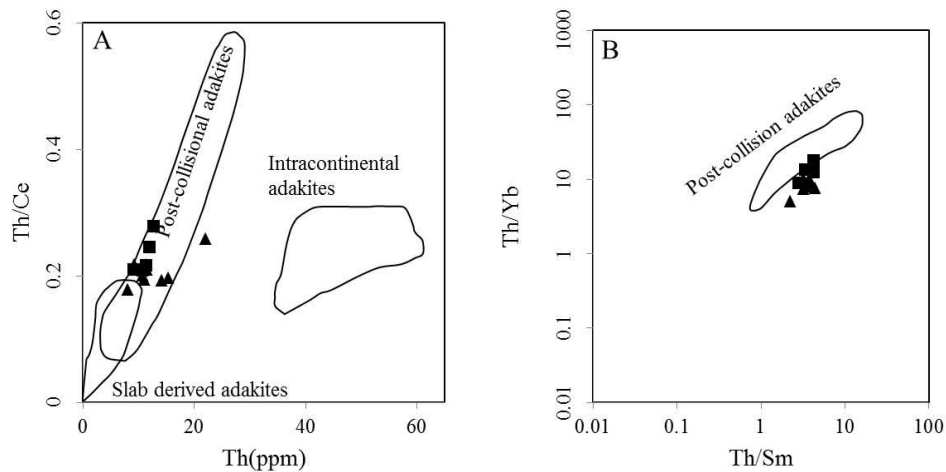
شکل ۹- نمودارهای هارکر برگزیده برای داده‌های زمین‌شیمیایی گدازه‌های آداکیتی منطقه سنگ رهوزگ (جنوب بیرجند) (Wang *et al.*, 2006; Ahmadian *et al.*, 2016) (نماد نمونه‌ها همانند شکل ۴ است)

جای می‌گیرد و از این‌رو، سازوکار پیدایش آن با فرایندهای یادشده مرتبط است.

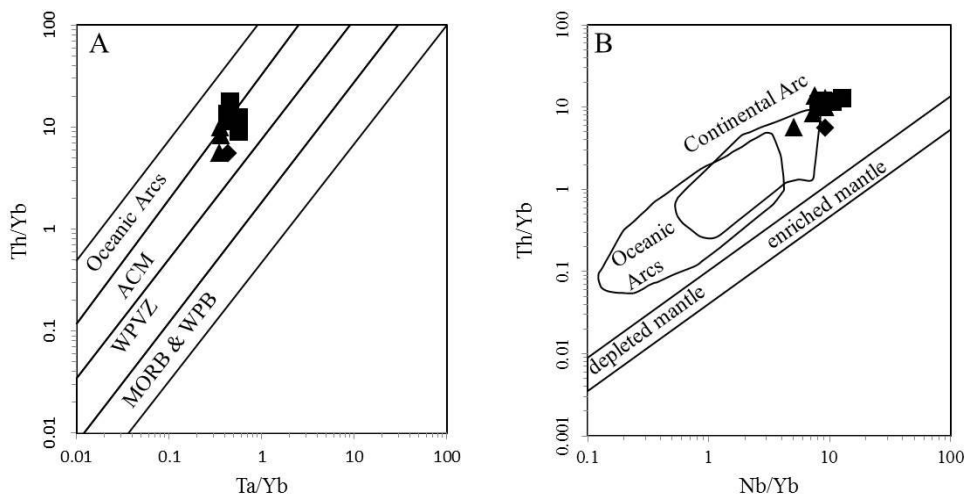
شناسایی پهنه زمین‌ساختی

در مقایسه با آداکیت‌های برخاسته از پوسته اقیانوسی فرورونده، گدازه‌های آداکیتی منطقه سنگ رهوزگ دارای محتوای Th بیشتر ($22\text{ ppm} - 8/1$) و نسبت Th/Ce بالاتر ($0/28 - 0/18$) بوده و همانند آداکیت‌های وابسته به جایگاه زمین‌ساختی پس از برخورد (Wu *et al.*, 2015) هستند. برای بررسی و شناسایی پهنه زمین‌ساختی گدازه‌های آداکیتی منطقه سنگ رهوزگ، نمودارهای Th در برابر Th/Ce (Wu *et al.*, 2016; Mazhari, 2015) و Th/Sm در برابر Th/Yb (Chen *et al.*, 2015) به کار برده شدند. برپایه این نمودارها، نمونه‌های بررسی شده در گستره آداکیت‌های پس از برخورد هستند (شکل ۱۰). به کارگیری داده‌های به دست آمده از تجزیه شیمیایی از مهمترین روش‌های شناسایی پهنه زمین‌ساختی پیدایش سنگ‌های آذرین است. سنگ‌های آتشفشانی سنگ رهوزگ ویژگی‌های زمین‌شیمیایی ماگماهای کمان را نشان می‌دهند. برپایه نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb (Gorton and Schandl, 2000)، این سنگ‌ها در مرز کناره فعال قاره و پهنه کمان اقیانوسی جای می‌گیرند (شکل ۱۱ - A). برپایه پیشنهاد Pearce (۱۹۸۳)، برای شناخت این دو گروه از یکدیگر از نسبت Zr/Y می‌توان بهره گرفت. درباره گدازه‌های منطقه بررسی شده، این نسبت بیشتر از ۶ بوده و نشان‌دهنده ارتباط آنها با کمان قاره‌ای است. افزون‌براین، در نمودار Th/Yb در برابر Nb/Yb (Zhao *et al.*, 2009) نیز این سنگ‌ها در گستره سنگ‌های کمان قاره‌ای هستند (شکل ۱۱ - B).

از دیدگاه خاستگاه پیدایش، بازالت‌های سرشار از Nb در ارتباط با پیدایش آداکیت‌ها هستند، بدین‌گونه که مذاب‌های آداکیتی متاسوماتیسم پریدوتیت‌های گوشته‌ای را در پی دارند و شرایط خوبی را برای پیدایش مذاب‌های بازالتی سرشار از Nb فراهم می‌آورند (Kepezhinskis *et al.*, 1996; Sajona *et al.*, 1996; Hastie *et al.*, 2011; Mazhari, 2016). درباره چگونگی پیدایش بازالت‌های Nb بالا (HNB) و بازالت‌های سرشار از Nb (NEB)، بحث و پیشنهادهای فراوانی هست (Hastie *et al.*, 2011). بازالت‌های Nb بالا از دیدگاه ترکیبی همانند گدازه‌های OIB برخاسته از پلوم‌های گوشته‌ای و گدازه‌های آلکالن درون‌صفحه‌ای دیگر هستند؛ اما بر خلاف گدازه‌های OIB، خاستگاه آنها مستقیماً از گوشته اولیه نیست. این سنگ‌ها تنها در پهنه‌های وابسته به فرورانش یافت می‌شوند (Defant *et al.*, 1992; Hastie *et al.*, 2011). باور بر این است که بازالت‌های Nb بالا می‌توانند از ترکیبی از گوشته بالایی (مشابه OIB غنی‌شده) و گوشته نوع MORB تهی‌شده (Castillo *et al.*, 2007; Castillo, 2008) و یا متاسوماتیسم گوه گوشته به دست مذاب‌های صفحه فرورونده یا اسلب (Sajona *et al.*, 1996) پدید آیند. بازالت‌های سرشار از Nb نیز در پی فرایندهای همانندی پدید می‌آیند؛ اما خاستگاه آنها حجم کمتری از گوشته غنی‌شده مشابه OIB و یا گوشته متاسوماتیسم‌شده (که عنصرهای ناسازگار کمتری را از مذاب‌های بالارونده از صفحه فرورونده به دست آورده است) را دارد (Hastie *et al.*, 2011). بازالت سنگ رهوزگ با مقدار Nb برابر $14/9\text{ ppm}$ در رده بازالت‌های سرشار از Nb (Defant *et al.*, 1991; Hastie *et al.*, 2011)



شکل ۱۰- جایگاه سنگ‌های آذرین منطقه سنگ رهوزگ (جنوب بیرجند) در: (A) نمودار Th در برابر Th/Ce (Wu *et al.*, 2015;)؛ (B) نمودار Th/Sm در برابر Th/Yb (با تغییر پس از Chen و همکاران، ۲۰۱۵) (نماد نمونه‌ها همانند شکل ۴ است)



شکل ۱۱- جایگاه گدازه‌های منطقه سنگ رهوزگ (جنوب بیرجند) در: (A) نمودار Ta/Yb در برابر Th/Yb (Gorton and Schandl, 2000)؛ (B) نمودار Nb/Yb در برابر Th/Yb (Zhao *et al.*, 2009) برای شناخت پهنه زمین‌ساختی (نماد نمونه‌ها همانند شکل ۴ است)

برای شناخت پهنه زمین‌ساختی هر گروه، نمودارهای ویژه همان گروه به کار برده شدند. در این نمودارها محورهای x و y با متغیرهای DF1 (between-group) و DF2 (within-group) (degrees of freedom) (Verma *et al.*, 2006; Agrawal *et al.*, 2008; Verma and Agrawal, 2011; Verma and Verma, 2013; Verma *et al.*, 2013; Velikoslavinsky and Krylov, 2014)

در این پژوهش، برای بررسی دقیق پهنه زمین‌ساختی گدازه‌های بررسی شده، از نمودارهایی که با بررسی‌های آماری دقیق به دست آمده‌اند نیز بهره گرفته شد. بر پایه محتوای SiO_2 ، گدازه‌های منطقه سنگ رهوزگ در سه گروه بازیک (SiO_2 کمتر از ۵۲ درصد وزنی)، حد واسط (SiO_2 از ۵۲ تا ۶۳ درصد وزنی) و اسیدی (SiO_2 بیشتر از ۶۳ درصد وزنی) جای می‌گیرند.

Krylov و Velikoslavinsky (۲۰۱۴)، معادله‌های دیگری را برای شناسایی پهنه زمین‌ساختی پیشنهاد کرده‌اند که صورت کلی آنها در زیر آورده شده است:

$$DF(x) = \sum_{i=0}^n a_i X_i + const$$

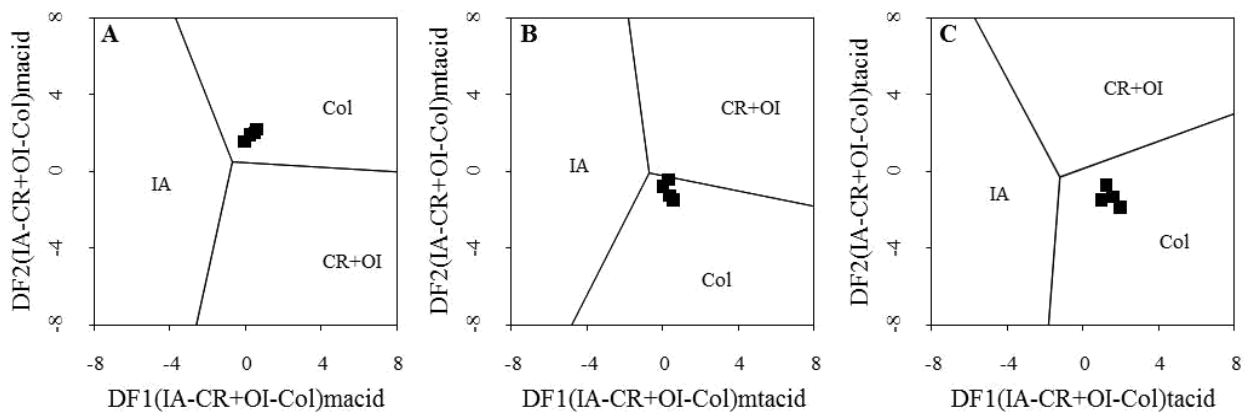
در این معادله، $const$ مقداری ثابت و a_i ضریب هر متغیر است و Velikoslavinsky و Krylov (۲۰۱۴) آن را به دست آورده‌اند. X_i مقدار متغیر (محتوای اکسید دلخواه برپایه درصد وزنی یا محتوای عنصر کمیاب یادشده برپایه ppm است.

برای شناسایی پهنه زمین‌ساختی سنگ‌های اسیدی از نمودارهایی برپایه عنصرهای اصلی (Major element based diagram for acidic magmas)، عنصرهای اصلی نامتحرک به همراه عنصرهای کمیاب نامتحرک (Major and Trace element based diagram for acidic magmas) و عنصرهای کمیاب نامتحرک (Trace element based diagram for acidic magmas) بهره گرفته می‌شود که Verma و همکاران (۲۰۱۳) آنها را پیشنهاد داده‌اند. بر پایه این نمودارها، گدازه‌های اسیدی منطقه سنگ رهوزگ وابسته به پهنه زمین‌ساختی پس از برخورد هستند (شکل ۱۲).

صورت کلی معادله‌های پیشنهادشده به این صورت است:

$$DF(x) = \sum_{i=0}^n K_i \ln \left(\frac{A_i}{B_i} \right)_{adj} + const$$

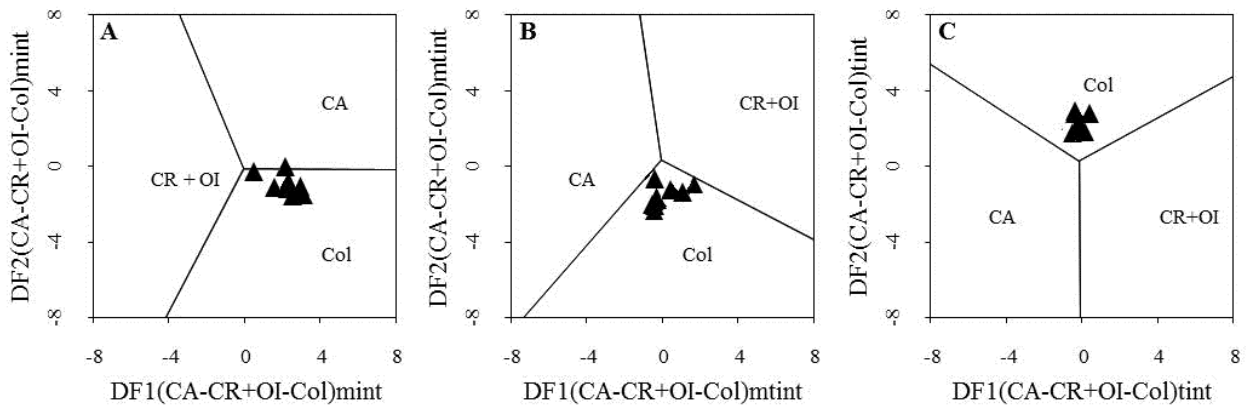
adj و یا «فاکتور اصلاح» برای داده‌های نزدیک به هم (متمرکز) نادیده گرفته می‌شود. این متغیر را می‌توان با نرم‌افزار SINCLAS (Verma *et al.*, 2002) به دست آورد. K_i ضریب و $const$ مقدار ثابتی است که در سری مقاله‌های Verma و همکاران (۲۰۰۶)، Agrawal و همکاران (۲۰۰۸)، Verma و Verma (۲۰۱۱)، Agrawal و Verma (۲۰۱۳) و Verma و همکاران (۲۰۱۳) آورده شده‌اند. A_i مقدار متغیر (محتوای اکسید دلخواه برپایه درصد یا عنصر کمیاب دلخواه برپایه ppm) و B_i برای نمودارهایی که عنصرهای اصلی را به کار برده‌اند، برابر است با مقدار SiO_2 برپایه درصد وزنی؛ برای نمودارهایی که عنصرهای اصلی به همراه عنصرهای کمیاب نامتحرک را به کار برده‌اند، برابر است با مقدار TiO_2 بر پایه درصد وزنی و در نمودارهایی که عنصرهای کمیاب را به کار برده‌اند، برابر است با مقدار Yb برپایه ppm.



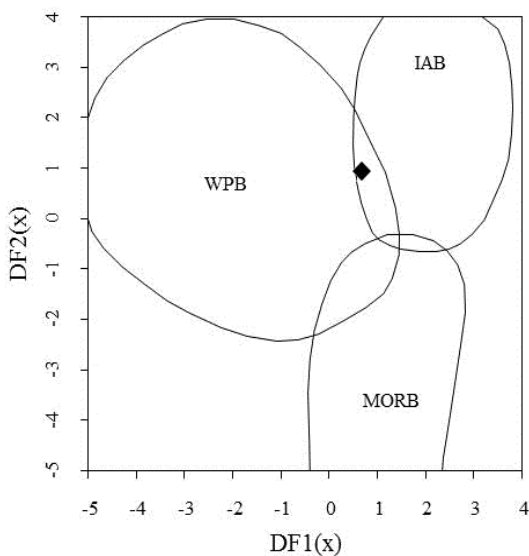
شکل ۱۲- جایگاه سنگ‌های اسیدی منطقه سنگ رهوزگ (جنوب بیرجند) در نمودارهای شناسایی پهنه زمین‌ساختی با به کارگیری: (A) عنصرهای اصلی؛ (B) عنصرهای اصلی نامتحرک به همراه عنصرهای کمیاب؛ (C) عنصرهای کمیاب (Col): پهنه زمین‌ساختی پس از برخورد؛ IA: کمان اقیانوسی؛ CR: بازشدگی میان‌قاره‌ای؛ OI: جزایر اقیانوسی) (نماد نمونه‌ها همانند شکل ۴ است)

رفت. بر پایه این نمودارها، نمونه‌های حد واسط منطقه بررسی شده نیز وابسته به پهنه زمین‌ساختی پس از برخورد هستند (شکل ۱۳).

همانند سنگ‌های اسیدی، برای شناسایی پهنه زمین‌ساختی سنگ‌های حد واسط نیز نمودارهای پیشنهادشده Verma و Verma (۲۰۱۳) به‌کار



شکل ۱۳- جایگاه سنگ‌های حدواسط منطقه سنگ رهوزگ (جنوب بیرجند) در نمودارهای شناسایی پهنه زمین‌ساختی با به‌کارگیری (A: عنصرهای اصلی، B) عنصرهای اصلی نام‌تحرک به‌همراه عنصرهای کمیاب، C) عنصرهای کمیاب (CA: کمان قاره‌ای؛ نام‌های مخفف دیگر همانند شکل ۱۲ هستند) (نماد نمونه‌ها همانند شکل ۴ است)



شکل ۱۴- نمودار $DF1(x)$ در برابر $DF2(x)$ برای رده‌بندی بازالت‌ها (Velikoslavinsky and Krylov, 2014) (نماد نمونه‌ها همانند شکل ۴ است)

مقدار به‌دست‌آمده $DF4$ برای نمونه بازالتی، برابر $۲/۰۱-$ و مقدار $DF5$ برابر $۱/۵۳$ است. پس بازالت سنگ رهوزگ در رده بازالت‌های پس از برخورد جای می‌گیرد.

برای شناسایی پهنه زمین‌ساختی نمونه بازالتی منطقه سنگ رهوزگ، نمودار $DF1$ برابر $DF2$ (Velikoslavinsky and Krylov, 2014) به‌کار برده شد. برپایه این نمودار، نمونه بازالتی در گستره مشترک میان بازالت‌های جزایر اقیانوسی (IAB) و بازالت‌های درون‌قاره‌ای (WPB) جای دارد (شکل ۱۴). برپایه پیشنهاد Velikoslavinsky و Krylov (۲۰۱۴)، بازالت‌هایی که در پهنه‌های پس از برخورد پدید می‌آیند چه‌بسا ویژگی‌های بازالت‌های درون‌قاره‌ای و بازالت‌های جزایر اقیانوسی را داشته باشند.

برپایه رده‌بندی پیشنهادی Velikoslavinsky و Krylov (۲۰۱۴)، در بررسی پهنه زمین‌ساختی نمونه بازالتی، معادله‌های $DF4$ برای شناسایی IAB از PCB (بازالت‌های پهنه‌های پس از برخورد) و $DF5$ برای شناخت WPB از PCB به‌کار برده شد.

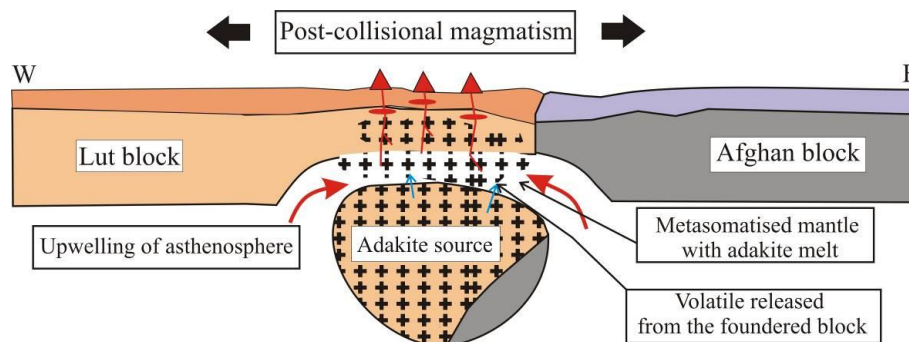
زمین‌درز سیستان به یکدیگر برخورد کرده‌اند. در پی این برخورد، برخاستگی کوه‌های خاور ایران روی داده و سنگ‌کره زیر آن سست شده است. جداسدن پی سنگ‌کره‌ای سنگین و بالآمدن سست‌کره، ذوب‌بخشی پوسته زیرین لایه‌لایه شده و رخداد ماگماتیسم آداکیتی در رژیم زمین‌ساختی پس‌برخوردی (post-collisional) در ائوسن-ایگوسن را در پی داشته است.

در پایان، در هنگام بالآمدن، متاسوماتیسم گوشته سست‌کره‌ای به‌وسیله مذاب‌های آداکیتی و ذوب گوشته در ژرفای کمتر، پیدایش ماگمای آلکالن را در پی داشته است که سازنده بازالت سرشار از Nb در پهنه کششی پس از برخورد بلوک‌های لوت و افغان در نئوژن (میوسن؟) بوده است (شکل ۱۵).

در این بازالت‌ها $DF4(x) < -0.49$ و $DF5(x) > 1.14$ است (Velikoslavinsky and Krylov, 2014).

برپایه یافته‌های این پژوهش، الگوی زمین‌ساختی-ماگمایی در منطقه سنگ رهوزگ را می‌توان با الگوی پیشنهادی Pang و همکاران (۲۰۱۳) توجیه کرد. در الگوی یادشده، ماگماتیسم ائوسن-ایگوسن خاور ایران وابسته به پهنه زمین‌ساختی پس از برخورد دانسته شده است.

برپایه الگوی پیشنهادشده، فرورانش به‌سوی باختر پوسته اقیانوسی سیستان در کرتاسه پیشین تا میانی روی داده است. برپایه این الگو، رسوب‌ها، محلول‌ها و مذاب‌های پدیدآمده از پوسته فرورونده، گوشته بالایی زیر بلوک لوت را تحت تأثیر قرار داده است. سپس، بلوک‌های لوت و افغان چه‌بسا در کرتاسه پسین در راستای



شکل ۱۵- تصویر نمادین از چگونگی رخداد ماگماتیسم آداکیتی پس از برخورد و پیدایش بازالت سرشار از Nb همراه در خاور ایران، با الگوگرفتن از الگوی پیشنهادشده Pang و همکاران (۲۰۱۳)

نتیجه‌گیری

کانی‌ها، از ویژگی‌های گدازه‌های اسیدی و گاهی حد واسط در منطقه بررسی شده هستند. این ویژگی‌ها نشان دهنده نبود تعادل هنگام انجماد ماگما هستند. همه نمونه‌ها دارای غنی‌شدگی LREE در برابر HREE و روندهای کمابیش تخت HREE هستند. محتوای کم HREE ($Yb_N < 8\text{ppm}$) و همچنین، نسبت بالای Y/Yb (۱۱/۵۹-۱۰) در این سنگ‌ها، حضور فاز بجامانده گارنت در خاستگاه آنها را نشان می‌دهد. روندهای کمابیش مشابه و موازی نمونه‌های اسیدی

آندزیت، داسیت و بازالت، سنگ‌های آتشفشانی منطقه سنگ رهوزگ هستند. پلاژیوکلاز، پیروکسن (اوژیت) و هورنبلند از کانی‌های اصلی سازنده آندزیت‌ها و پلاژیوکلاز، کوارتز، بیوتیت و آمفیبول (هورنبلند) از کانی‌های سازنده داسیت‌ها هستند. گدازه بازالتی سنگ رهوزگ از پلاژیوکلاز، الیوین و پیروکسن ساخته شده است. منطقه‌بندی، بافت غربالی و خوردگی خلیجی در فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و همچنین، گردشگری برخی

سست کره، ذوب‌بخشی پوسته زیرین لایه‌لایه شده و ماگماتیسم آداکیتی در رژیم زمین‌ساختی پسابر خوردی در ائوسن-الیگوسن روی داده است. متاسوماتیسم گوشته سست کره‌ای در حال بالآمدن به دست مذاب آداکیتی و ذوب گوشته در ژرفای کمتر، پیدایش بازالت سرشار از Nb در نئوژن (میوسن؟) را در پی داشته است. با وجود این، برای پیشنهاد یک الگوی زمین‌ساختی ماگمایی در خور باور، به داده‌های زمین‌شیمیایی بیشتر و همچنین، بررسی‌های ایزوتوپی خاستگاه و سن‌سنجی آداکیت‌ها و بازالت نیاز است.

سپاس‌گزاری

نگارندگان از معاونت آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه بیرجند برای پشتیبانی‌های مادی و معنوی در به‌انجام‌رسیدن این پژوهش بسیار سپاس‌گزار هستند.

و حد واسط در نمودارهای چندعنصری می‌تواند نشان‌دهنده خاستگاه یکسان برای این سنگ‌ها باشد. داده‌های زمین‌شیمیایی عنصرهای اصلی و کمیاب گدازه‌های اسیدی و حد واسط بررسی شده، ویژگی‌های آداکیت‌های پر سیلیس و همانندی آنها با آداکیت‌های پس از برخورد یا آداکیت‌های نوع C را نشان می‌دهند. بازالت منطقه سنگ رهوزگ، ویژگی‌های بازالت‌های غنی از Nb را دارد. نمودارهای شناسایی پهنه زمین‌ساختی برپایه عنصرهای اصلی، عنصرهای اصلی نامتحرک به عنصرهای کمیاب نامتحرک و عنصرهای کمیاب نامتحرک، نشان‌دهنده پهنه زمین‌ساختی پس از برخورد برای گدازه‌های منطقه سنگ رهوزگ هستند. فرورانش سنگ‌کره اقیانوسی سیستان و برخورد بلوک‌های لوت و افغان برخاستگی کوه‌های خاور ایران و پیدایش سنگ‌کره ستبری در زیر آن را در پی داشته است. در پی جداشدن پی سنگ‌کره سنگین و بالآمدن

منابع

- Aboutalebi, A. (2014) Petrology of Garejgan Tertiary volcanic rocks (southwest of Birjand). MSc thesis, University of Birjand, Birjand, Iran (in Persian).
- Agrawal, S., Guevara, M. and Verma, S. P. (2008) Tectonic discrimination of basic and ultrabasic volcanic rocks through log-transformed ratios of immobile trace elements. *International Geology Review* 50: 1057–1079.
- Ahmadian, J., Sarjoughian, F., Lentz, D. and Esna-Ashari, A. (2016) Eocene K-rich adakitic rocks in the Central Iran: Implications for evaluating its Cu–Au–Mo metallogenic potential. *Ore Geology Reviews* 72: 323–342.
- Arjmandzadeh, R. and Santos, J. F. (2014) Sr–Nd isotope geochemistry and tectonomagmatic setting of the Dehsalm Cu–Mo porphyry mineralizing intrusives from Lut block, eastern Iran. *International Journal of Earth Sciences* 103: 123–140.
- Atherton, M. P. and Petford, N. (1993) Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature* 362: 144–146.
- Aydınçakır, E. (2014) The petrogenesis of early Eocene non-adakitic volcanism in NE Turkey: Constraints on the geodynamic implications. *Lithos* 208–209: 361–377.
- Azizi, H., Asahara, Y. and Tsuboi, M. (2014) Quaternary high-Nb basalts: existence of young oceanic crust under the Sanandaj–Sirjan Zone, NW Iran. *International Geology Review* 56(2): 167–186.
- Boynnton, W. V. (1984) Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: rare earth element geochemistry (Ed. Henderson, P) 63–114. Elsevier, Amsterdam.

- Castillo, P. R. (2008) Origin of the adakite–high-Nb basalt association and its implications for postsubduction magmatism in Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin* 120: 451–462.
- Castillo, P. R. (2012) Adakite petrogenesis. *Lithos* 134–135: 304–316.
- Castillo, P. R., Janney, P. E. and Solidum, R. U. (1999) Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 134: 33–51.
- Castillo, P. R., Rigby, S. J. and Solidum, R. U. (2007) Origin of high field strength element enrichment in volcanic arcs: geochemical evidence from the Sulu Arc, southern Philippines. *Lithos* 97: 271–288.
- Chen, L., Qin, K. Z., Li, G. M., Li, J. X., Xiao, B., Zhao, J. X. and Fan, X. (2015) Zircon U–Pb ages, geochemistry and Sr–Nd–Pb–Hf isotopes of the Nuri intrusive rocks in the Gangdese area, southern Tibet: Constraints on timing, petrogenesis and tectonic transformation. *Lithos* 212–215: 379–396.
- Chung, S. L., Liu, D. Y., Ji, J. Q., Chu, M. F., Lee, H. Y., Wen, D. J., Lo, C. H., Lee, T. Y., Qian, Q. and Zhang, Q. (2003) Adakites from continental collision zones: melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. *Geology* 31: 1021–1024.
- Defant, M. J. and Drummond, M. S. (1990) Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature* 347: 662–665.
- Defant, M. J. and Kepezhinskas, P. (2001) Evidence suggests slab melting in arc magmas. *EOS, Transactions, American Geophysical Union* 82(6): 65–80.
- Defant, M. J., Jackson, T. E., Drummond, M. S., de Boer, J. Z., Bellon, H., Feigenson, M. D., Maury, R. C. and Stewart, R. H. (1992) The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: an overview. *Journal of Geological Society of London* 149: 569–579.
- Defant, M. J., Richerdson, M., de Boer, J. Z., Stewart, R. H., Maury, R. C., Bellon, H., Drummond, M. S., Feigenson, M. D. and Jackson, T. E. (1991) Dacite genesis via both slab melting and differentiation: petrogenesis of La Yeguada volcanic complex, Panama. *Journal of Petrology* 32: 1101–1142.
- Fakuri, M. (2013) Petrology of volcanic-subvolcanic rocks in Mahakan area (South of Birjand). MSc thesis, University of Birjand, Birjand, Iran (in Persian).
- Ge, X., Li, X., Chen, Z. and Li, W. (2002) Geochemistry and petrogenesis of Jurassic high Sr/low Y granitoids in eastern China: constrains on crustal thickness. *Chinese Science Bulletin* 47(11): 962–968.
- Ghadami, G. R., Ebadi, S. and Poosti, M. (2015) Petrography and geochemistry of Mio-Pliocene volcanic masses in the north of Shahre-Babak, insight on neogene adakitic magmatism. *Petrology* 6(21): 107–122 (in Persian).
- Ghasemi, H., sadeghian, M., Khanalizadeh, A. and Tanha, A. (2010) Petrology, geochemistry and radiometric ages of high silica adakitic domes of Neogene continental arc, south of Quchan. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 18(3): 347–370 (in Persian).
- Gorton, M. P. and Schandl, E. S. (2000) From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. *The Canadian Mineralogist* 38: 1065–1073.
- Guan, Q., Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Dong, G. C., Zhang, L. L., Li, X. W., Liu, M., Mo, X. X., Liu, Y. S. and Yuan, H. L. (2012) Crustal thickening prior to 38 Ma in southern Tibet: Evidence from lower crust-derived adakitic magmatism in the Gangdese Batholith. *Gondwana Research* 21: 88–99.
- Guo, Z., Hertogen, J., Liu, J., Pasteels, P., Boven, A., Punzalan, L., He, H., Luo, X. and Zhang, W. (2005) Potassic magmatism in western Sichun and Yunnan provinces, SE Tibet, China: petrological and geochemical constraints on petrogenesis. *Journal of Petrology* 46: 33–78.

- Hastie, A. R., Mitchell, S. F., Kerr, A. C., Minifie, M. J. and Millar, I. L. (2011) Geochemistry of rare high-Nb basalt lavas: Are they derived from a mantle wedge metasomatised by slab melts? *Geochemica et Cosmochemica Acta* 75: 5049–5072.
- Hou, Z. Q., Gao, Y. F., Qu, X. M., Rui, Z. Y. and Mo, X. X. (2004) Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east–west extension in southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters* 220: 139–155.
- Imaoka, T., Nakashima, K., Kamei, A., Itaya, T., Ohira., Nagashima, M., Kono, N. and Kiji, M. (2014) Episodic magmatism at 105 Ma in the Kinki district, SW Japan: Petrogenesis of Nb-rich lamprophyres and adakites and geodynamic implications. *Lithos* 184–187: 105–131.
- Irvine, T. N. and Baragar, W. R. A. (1971) A guide to the classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8: 523–458.
- Jalili Ghareh Ghaye, V., Amel, N., Hajialioghli, R. and Moayyed, M. (2015) Petrogenesis of adakitic Plio-Quaternary post collision rocks, north of Sahand volcano (NW of Iran). *Petrology* 6(22): 157–172 (in Persian).
- Jamshidi, K., Ghasemi, H. and Miao, L. (2015a) U-Pb age dating and determination of source region composition of post-ophiolite adakitic domes of Sabzevar. *Petrology* 6(23): 121–138 (in Persian).
- 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).
- Jamshidi, K., Ghasemi, H., Troll, V. R., Sadeghian, M. and Dahren, B. (2015b) Magma storage and plumbing of adakite-type post-ophiolite intrusions in the Sabzevar ophiolitic zone, northeast Iran. *Solid Earth* 6: 49–72.
- Jiang, Z. Q., Wang, Q., Li, Z. X., Wyman, D. A., Tang, G. J., Jia, X. H. and Yang, Y. H. (2012) Late Cretaceous (ca. 90 Ma) adakitic intrusive rocks in the Kelu area, Gangdese belt (southern Tibet): Slab melting and implications for Cu–Au mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences* 53: 67–81.
- 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., Aydın, F., Kandemir, R. and Wijbrans, 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, İ., Dokuz, A., Aydın, F., Chen, B., Kandemir, R. and Wijbrans, J. (2011) Adakite-like granitoid porphyries in the Eastern Pontides, NE Turkey: potential parental melts and geodynamic implications. *Lithos* 127: 354–372.
- Kay, R. W. (1978) Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific Ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 4: 117–132.
- Kazimoto, E. O. and Ikingura, J. R. (2014) Trace element geochemistry and petrogenesis of the granitoids and high-K andesite hosting gold mineralization in the Archean Musoma-Mara Greenstone Belt, Tanzania. *Journal of African Earth Sciences* 91:66–78.
- Kepezhinskas, P., Defant, M. J. and Drummond, M. S. (1996) Progressive enrichment of island arc mantle by melt-periodotite interaction inferred from Kamchatka xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60(7): 1217–1229.
- Kepezhinskas, P., McDermott, F., Defant, M. J., Hochstaedter, A., Drummond, M. S., Hawkesworth, C. J., Koloskov, A., Maury, R. C. and Bellon, H. (1997) Trace element and Sr–Nd–Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka arc petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61(3): 577–600.

- Ketabi, P. (2010) Petrography and petrology of volcanic rocks of Shah-Soleyman area (southwest of Birjand, east of Iran). MSc thesis, University of Birjand, Birjand, Iran (in Persian).
- Ketabi, P., Mohammadi, S. S. and Zarrinkoub, M. H. (2015) Geochemistry and petrogenesis of Tertiary high silica adakitic rocks, Shah Soleyman Ali area (southwest of Birjand, east of Iran). *Scientific Quarterly Journal Geosciences* 24(95): 373-382 (in Persian).
- Khalatbari Jafari, M., Babaie, H. A. and Gani, M. (2013) Geochemical evidence for late Cretaceous marginal arc-to-back arc transition in the Sabzevar ophiolitic extrusive sequence, northeast Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 70–71: 209–230.
- Liu, S. A., Li, S., He, Y. 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 et Cosmochimica Acta* 74: 7160–7178.
- Liu, Y., Wang, X., Wang, D., He, D., Zong, K., Gao, C., Hu, Z. and Gong, H. (2012) Triassic high-Mg adakitic andesites from Linxi, Inner Mongolia: Insights into the fate of the Paleo-Asian ocean crust and fossil slab-derived melt–peridotite interaction. *Chemical Geology* 328: 89–108.
- Lu, Y. J., Kerrich, R., McCuaig, T. C., Li, Z. X., Hart, C. J. R., Cawood, P. A., Hou, Z. Q., Bagas, L., Cliff, J., Belousova, E. A. and Tang, S. H. (2013) Geochemical, Sr–Nd–Pb, and zircon Hf–O isotopic compositions of Eocene–Oligocene shoshonitic and potassic adakite-like felsic intrusions in western Yunnan, SW China: petrogenesis and tectonic implications. *Journal of Petrology* 54: 1309–1348.
- 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: 581–593.
- Marchev, P., Georgiev, S., Raicheva, R., Peytcheva, I., Quadt, A., Ovtcharova, M. and Bonev, N. (2013) Adakitic magmatism in post-collisional setting: An example from the early–middle Eocene magmatic belt in Southern Bulgaria and Northern Greece. *Lithos* 180–181: 159–180.
- 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.
- Mazhari, S. A. (2016) Petrogenesis of adakite and high-Nb basalt association in the SW of Sabzevar zone, NE of Iran: evidence for slab melt-mantle interaction. *Journal of African Earth Sciences* 116: 170–181.
- Modjarrad, M. (2015) Geochemistry of Bezow-Daghi volcanic rocks, Urmia adakitic magmatism in the Uromieh-Dokhtar magmatic belt. *Petrology* 6(21): 121-138 (in Persian).
- 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* 6(2): 83-96 (in Persian).
- Morata, D., Oliva, C., Cruz, R. and Suarz, M. (2005) The bandurrias gabarro: Late oligocene alkaline magmatism in the patagonian cordillera. *Journal of South American Earth Sciences* 18: 147-162.
- Movahhed-avval, J. and Emami, M. H. (1978) Geological map 1:100000 Mokhtaran, sheet 7854. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Nelson, S. and Montana, A. (1992) Sieve-textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression. *American Mineralogist* 77: 1242-1249.
- Pang, K. N., Chung, S. L., Zarrinkoub, M. H., Khatib, M. M., Mohammadi, S. S., Chiu, H. Y., 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* 180–181: 234–251.

- Pearce, J. A. (1983) Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins: In continental basalts and xenoliths (Eds. Hawkesworth, C. and Norry, M. J.) 230-272. Shiva, Nantwiche.
- Petrone, C. M. and Ferrari, L. (2008) Quaternary adakite—Nb-enriched basalt association in the western Trans-Mexican volcanic belt: is there any slab melt evidence? *Contributions to Mineralogy and Petrology* 156: 73-86.
- Pirmohammadi Alishah, F. (2015) Petrogenesis of post-collisional Plio-Quaternary adakitic rocks in south of Tabriz. *Petrology* 6(22): 71-90 (in Persian).
- Pirmohammadi Alishah, F. and Jahangiri, A. (2015) Genesis of adakitic magmatism in Sahand region, Eastern Azarbaijan. *Petrology* 5(20): 15-34 (in Persian).
- Qin, J. F., Lai, S. C., Grapes, R., Diwu, C. R., Ju, Y. J. and Li, Y. F. (2010) Origin of Late Triassic high-Mg adakitic granitoid rocks from the Dongjiangkou area, Qinling orogen, central China: Implications for subduction of continental crust. *Lithos* 120: 347–367.
- Rapp, R., Shimizu, N., Norman, M. and Applegate, G. (1999) Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology* 160: 335–356.
- Renjith, M. (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(1): 113 - 126.
- Sadri, Y. (2011) Petrology of volcanic rocks in Shadan area (southwestern Birjand, east of Iran). MSc thesis, University of Birjand, Birjand, Iran (in Persian).
- Sajona, F. G., Maury, R. C., Bellon, H., Cotten, J. and Defant, M. (1996) High field strength element enrichment of Pliocene-Pleistocene island arc basalts, Zomboanga Peninsula, Western Mindanao Philippines. *Journal of Petrology* 37: 693–726.
- Saunders, A. D., Rogers, G., Marriner, G. F., Terrell, D. J. and Verma, S. P. (1987) Geochemistry of Cenozoic volcanic rocks, Baja-California, Mexico—implications for the petrogenesis of postsubduction magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 32: 223–245.
- Sen, C. and Dunn, T. (1994) Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: implications for the origin of adakites. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 117: 394–409.
- Shimoda, G. (2009) Genetic link between EMI and EMII: An adakite connection. *Lithos* 112: 591–602.
- Stewart M. L. and Pearce T. H. (2004) Sieve-textured plagioclase in dacitic magma: Interference imaging results. *American Mineralogist* 89: 348-351.
- Streck, M. J., Leeman, P. W. and Chesley, J. (2007) High-magnesian andesite from Mount Shasta: a product of magma mixing and contamination, not a primitive mantle melt. *Geology* 35: 351–354.
- Sun, G. Y., Hu, X. M., Zhu, D. C., Hong, W. T., Wang, J. G. and Wang, Q. (2015) Thickened juvenile lower crust-derived ~90 Ma adakitic rocks in the central Lhasa terrane, Tibet. *Lithos* 224–225: 225–239.
- 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 142: 313-345. Geological Society, London.
- Topuz, G., Altherr, R., Schwarz, W. H., Siebel, W., Satır, M. and Dokuz, A. (2005) Postcollisional plutonism with adakite-like signatures: The Eocene Saraycik 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 Ağvanis 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 L. Nielsen, R. (2014) New insights into the processes controlling compositional zoning in plagioclase. *Lithos* 200–201: 80–93.
- Velikoslavinsky, S. D. and Krylov, D. P. (2014) Geochemical discrimination of basalts formed in major geodynamic settings. *Geotectonics* 48: 427–439.
- Verma, S. P. and Agrawal, S. (2011) New tectonic discrimination diagrams for basic and ultrabasic volcanic rocks through log-transformed ratios of high field strength elements and implications for petrogenetic processes. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 28: 24–44.
- Verma, S. P. and Verma, S. K. (2013) First 15 probability-based multidimensional tectonic discrimination diagrams for intermediate magmas and their robustness against postemplacement compositional changes and petrogenetic processes. *Turkish Journal of Earth Sciences* 22: 931–995.
- Verma, S. P., Guevara, M. and Agrawal, S. (2006) Discriminating four tectonic settings: Five new geochemical diagrams for basic and ultrabasic volcanic rocks based on log–ratio transformation of major-element data. *Journal of Earth System Science* 115(5): 485–528.
- Verma, S. P., Pandarinath, K., Verma, S. K. and Agrawal, S. (2013) Fifteen new discriminant-function-based multi-dimensional robust diagrams for acid rocks and their application to Precambrian rocks. *Lithos* 168–169: 113–123.
- Verma, S. P., Torres-Alvarado, I. S. and Sotelo-Rodríguez, Z. T. (2002) SINCLAS: standard igneous norm and volcanic rock classification system. *Computers and Geosciences* 28: 711–715.
- Wang, Q., McDermott, F., Xu, J. F., Bellon, H. and Zhu, Y. T. (2005) Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: lower crustal melting in an intracontinental setting. *Geology* 233: 464–468.
- 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, Y. H., Xue, C. J., Liu, J. J., Wang, J. P., Yang, J. T., Zhang, F. F., Zhao, Z. N., Zhao, Y. J. and Liu, B. (2015) Early Carboniferous adakitic rocks in the area of the Tuwu deposit, eastern Tianshan, NW China: Slab melting and implications for porphyry copper mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences* 103: 332–349.
- White, L., Hall, R. and Armstrong, R. (2014) The age of undeformed dacite intrusions within the Kolaka Fault zone, SE Sulawesi, Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences* 94: 105 - 112.
- Whitney, D. and Evans, B. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95: 185–187.
- Winchester, J. A. and Floyd, P. A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 20: 325–342.
- Wu, H., Li, C., Hu, P. and Li, X. (2015) Early Cretaceous (100–105 Ma) Adakitic magmatism in the Dachagou area, northern Lhasa terrane, Tibet: implications for the Bangong–Nujiang Ocean subduction and slab break-off. *International Geology Review* 57(9–10): 1172–1188.
- Xiao, L. and Clemens, J. D. (2007) Origin of potassic (C-type) adakite magmas: Experimental and field constraints. *Lithos* 95: 399–414.
- 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.

- Yang, H., Zhang, H., Luo, B., Zhang, J., Xiong, Z., Guo, L. and Pan, F. (2015) Early Paleozoic intrusive rocks from the eastern Qilian orogen, NE Tibetan plateau: Petrogenesis and tectonic significance. *Lithos* 224–225: 13–31.
- Yogodzinski, G. M. and Kelemen, P. B. (1998) Slab melting in the Aleutians: implications of an ion probe study of clinopyroxene in primitive adakite and basalt. *Earth and Planetary Science Letters* 158: 53–65.
- 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* 7(2): 39-50.
- Zhao, Z. H., Xiong, X. L., Wang, Q., Wyman, D. A., Bao, Z. W., Bai, Z. W. and Qiao, Y. L. (2008) Underplating-related adakites in Xinjiang Tianshan, China. *Lithos* 102: 374–391.
- Zhao, Z., Mo, X., Dilek, Y., Niu, Y., DePaolo, D. J., Robinson, Z., Zhu, D., Sun, C., Dong, G., Zhou, S., Luo, Z. and Hou, Z. (2009) Geochemical and Sr–Nd–Pb–O isotopic compositions of the post-collisional ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Petrogenesis and implications for India intra-continental subduction beneath southern Tibet. *Lithos* 113: 190–212.