

Geochemistry and Isotope Geology of Adakitic Domes from Chakane Area in South of Quchan (Northeast of Iran)

Mehdi Rezaei-Kahkhaei*, Ayyoub Taheri-Sarteshnizi

Habiballah Ghasemi and Sara Gardideh

Department of Petrology and Economic Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Abstract

The Chekneh subvolcanic domes with dacite and trachydacite compositions from the Miocene is located 110 km NE of Sabzevar, and are parts of the North Sabzevar-South Ghochan magmatic belt. The dome rocks have porphyry, sieve, trachytic and glomeroporphyritic textures, consisting of plagioclase and amphibole. Primitive mantle normalized spider diagram and chondrite-normalized REE patterns of the study domes suggest that they are enriched in LREE and LILE and are depleted in HREE and HFSE. They are calc-alkaline with significant negative HFSE (e.g., P, Nb and Ti) anomalies and $(La/Yb)_N > 12$ which are characteristics of magmas formed in active continental margin. Based on SiO_2 , high Sr/Y, low K_2O/Na_2O and low Y, Yb, Cr and $Mg^\#$ contents, the study rocks are similar to high-silica adakites (HSA). Thus, it seems that the parent magma of the study domes was originated from amphibole eclogite or garnet amphibolite rocks of metamorphosed Neotethys oceanic lithosphere during its subduction beneath the southern part of eastern Alborz in the Miocene. The initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.7039-0.7043) and ϵNd_{10Ma} (2.9-4.98) of the Chekaneh domes is similar to MORB composition, which are coincided with those adakites originated from the partial melting of the Cenozoic oceanic lithosphere.

Key words: Dome, Adakite, Geochemistry, Miocene, Chekene, Sabzevar

* rezaei@shahroodut.ac.ir

پترولوژی، سال نهم، شماره سی و ششم، زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۲۵-۴۸
تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۱

زمین‌شیمی و زمین‌شناسی ایزوتوپی گنبد‌های آداکیتی منطقه چکنه در جنوب قوچان (شمال‌خاوری ایران)

مهدی رضایی کهخایی*، ایوب طاهری سرتشنیزی، حبیب‌آقا قاسمی و سارا گردیده
گروه پترولوژی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم‌زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

گنبد‌های نیمه آتشفشانی منطقه چکنه با ترکیب داسیت و تراکیت و سن میوسن، در ۱۱۰ کیلومتری شمال‌خاوری سبزوار جای دارند و بخشی از پهنه ماگمایی شمال سبزوار- جنوب قوچان به‌شمار می‌روند. سنگ‌های سازنده این گنبد‌ها بافت‌های گوناگون پورفیری، غربالی، جریان‌ی و گلومروپورفیری دارند و از کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز و آمفیبول ساخته شده‌اند. نمودارهای بهنجار شده و چندعنصری نسبت به ترکیب کندریت و گوشته اولیه برای این سنگ‌ها نشان‌دهنده غنی‌شدگی نسبی این سنگ‌ها از عنصرهای خاکی نادر سنگین (HREEs) و عنصرهای با شدت میدان بالا (HFSE) هستند. سرشت کالک‌آلکالن و ناهنجاری منفی آشکار در عنصرهای با شدت میدان بالا (مانند: Nb، P و Ti) و مقدار نسبت $La_N/Yb_N > 12$ در این سنگ‌ها نشان‌دهنده ویژگی‌های ماگماهای مرتبط با حاشیه فعال قاره‌ای است. برپایه مقدار SiO_2 ، نسبت بالای Sr/Y، نسبت کم K_2O/Na_2O و مقادیر کم Y، Yb، Cr و Mg#، این سنگ‌ها سرشت آداکیتی‌های پرسلیس (HSA) را دارند. گمان می‌رود ماگمای سازنده این گنبد‌ها از ذوب‌بخشی سنگ خاستگاه اکلوزیتی یا گارنت‌آمفیبولیتی حاصل از دگرگونی سنگ‌کره اقیانوسی فرورونده نئوتتیس سبزوار به زیر لبه جنوبی پهنه البرز خاوری در زمان میوسن پدید آمده است. در گنبد‌های آداکیتی چکنه، مقدار نسبت‌های ایزوتوپی اولیه $^{87}Sr/^{86}Sr$ برابر با $0.7039 - 0.7043$ و ϵNd_{10Ma} برابر با ۲/۹ تا ۴/۹۸ است. این مقادیر با ویژگی‌های ایزوتوپی در ترکیب‌های آداکیتی پدیدآمده از ذوب سنگ‌کره اقیانوسی فرورونده سنوزویک کاملاً همخوانی دارند.

واژه‌های کلیدی: گنبد، آداکیت، زمین‌شیمی، میوسن، چکنه، قوچان، سبزوار

توصیف داسیت‌ها و آندزیت‌های سدیم‌دار سرشار از

مقدمه

آلومینیم و استرانسیم در جزایر آداک به کار برد. Defant

نخستین بار Kay (۱۹۷۸) واژه آداکیت را برای

* rezaei@shahroodut.ac.ir

Copyright©2018, 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.

et al., 2008; Shafaii Moghadam *et al.*, 2009; Rossetti *et al.*, 2010; Agard *et al.*, 2011). هم‌زمان با آخرین رویدادهای فرورانش و بسته‌شدن اقیانوس نئوتتیس در راستای زاگرس در کرتاسه بالایی - پالئوسن و در پی همگرایی و جمع‌شدن پوسته ایران، بسته‌شدن این حوضه‌های کوچک اقیانوسی (سبزوار، نایین - بافت و سیستان) نیز در کرتاسه بالایی - پالئوسن آغاز شده است. در هنگام بسته‌شدن و در پی فراراندن تکه‌هایی از سنگ‌کره اقیانوسی این حوضه‌ها روی خردقاره ایران مرکزی، افیولیت‌های این پهنه همانند نایین - بافت، تربت حیدریه، فریمان و سبزوار پدید آمده‌اند (Rossetti *et al.*, 2010).

در کرانه شمال‌خاوری نوار افیولیتی سبزوار و در لبه جنوبی پهنه بینالود، کمان ماگمایی جوانی در جنوب قوچان وجود دارد. این کمان ماگمایی در بردارنده سنگ‌های آتشفشانی با سرشت غالباً کالک‌آلکالن است که به پهنای ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلومتر، از شمال سبزوار تا جنوب قوچان و به درازای ۲۰۰ کیلومتر از قوچان تا اسفراین ادامه دارد. سن سنگ‌های آتشفشانی این نوار از جنوب (در مجاورت نوار افیولیتی سبزوار) به سوی شمال (قوچان - اسفراین)، از ائوسن تا پلیو - پلیستوسن تغییر می‌کند (Fatahi, 2003; Tanha, 2009; Ghasemi *et al.*, 2010). بررسی‌های زمین‌شیمیایی دقیق سنگ‌های آذرین پس از ائوسن در شمال‌خاوری ایران، شناسایی و گزارش برخی از آنها به نام سنگ‌های آداکیتی مرتبط با فرورانش نئوتتیس در کمان ماگمایی سبزوار - جنوب قوچان را به دنبال داشته است (Tanha, 2009; Ghasemi *et al.*, 2010; Jamshidi *et al.*, 2014, 2015a, 2015b). به باور Soltani Dehnavi (۲۰۱۰) و برپایه بررسی‌های

و Drummond (۱۹۹۰) و Martin (۱۹۹۹) تعریف و توصیف دقیق‌تری برای آداکیت‌ها پیشنهاد دادند و آنها را واحدهای سنگی حدواسط تا اسیدی با ترکیب هورنبلند-آندزیت تا ریولیت و داسیت دانستند که فنوکریست‌هایی از پلاژیوکلاز، هورنبلند و بیوتیت دارند. فنوکریست‌های ارتو- و کلینوپیروکسن تنها در آندزیت‌های مافیک دیده می‌شوند و آپاتیت، زیرکن، تیتانیت و تیتانومگنتیت نیز از فازهای فرعی آنها هستند. جدیدترین تعریف از آداکیت‌ها را Defant و Kepezhinskas (۲۰۰۱) پیشنهاد کرده‌اند که برپایه آن، آداکیت‌ها، گدازه‌های آمفیبول و پلاژیوکلازدار سرشار از سیلیس (بیشتر از ۵۶ درصدوزنی)، آلومین (بیشتر از ۱۵ درصدوزنی) و سدیم‌داری (بیشتر از ۳/۵ درصدوزنی) هستند که در نمودار سه‌تایی پتاسیم - سدیم - کلسیم، در محدوده ترونجمیت جای می‌گیرند. داشتن مقدارهای Sr بیشتر از ۴۰۰ ppm، Y کمتر از ۱۸ ppm، نسبت Sr/Y بزرگ‌تر از ۴۰ و نسبت La/Yb بیشتر از ۲۰، از ویژگی‌های شاخص آنهاست. این سنگ‌ها بسیار گوناگون هستند و در مقایسه با دیگر سنگ‌های رخنمون‌یافته در مرزهای فعال قاره‌ای، نسبت‌های Sr/Y و La/Yb بالا و مقدارهای Y و Yb کمی دارند (Martin, 1999).

پهنه ماگمایی ارومیه - دختر به صورت نوار آتشفشانی - نفوذی طویل و مرتبط با فرورانش نئوتتیس، از باختر ترکیه تا جنوب‌خاوری ایران کشیده شده است (Berberian *et al.*, 1982). با آغاز فرورانش سنگ‌کره اقیانوسی نئوتتیس به زیر لبه جنوبی ایران مرکزی، پهنه‌های کششی پشت‌کمانی کوچکی، مانند سبزوار در پشت‌کمان ماگمایی ارومیه - دختر پدید آمده‌اند. با گسترش بیشتر در کرتاسه بالایی، این پهنه‌ها جای خود را به پهنه‌های اقیانوسی کوچک با پوسته اقیانوسی جوان و داغ داده‌اند. این حوضه‌های اقیانوسی شاخه خاوری نئوتتیس دانسته شده‌اند (Omrani

آتشفشانی و آذرآواری ائوسن و حتی قطعه‌های مارنی الیگومیوسن دارند. در نمودارهای رده‌بندی سنگ‌های آداکیتی نیز این سنگ‌ها در گروه آداکیت‌های پرسیلیس (HSA) جای گرفته‌اند. همچنین، گمان می‌رود ماگمای مادر این گنبد‌ها از سنگ منشأ اکلوژیته یا گارنت‌آمفیبولیتی سرچشمه گرفته باشد که از دگرگونی سنگ‌کره اقیانوسی فرورونده نئوتتیس سبزواری به زیر لبه جنوبی پهنه البرز خاوری پدید آمده است (Fathabadi, 2014).

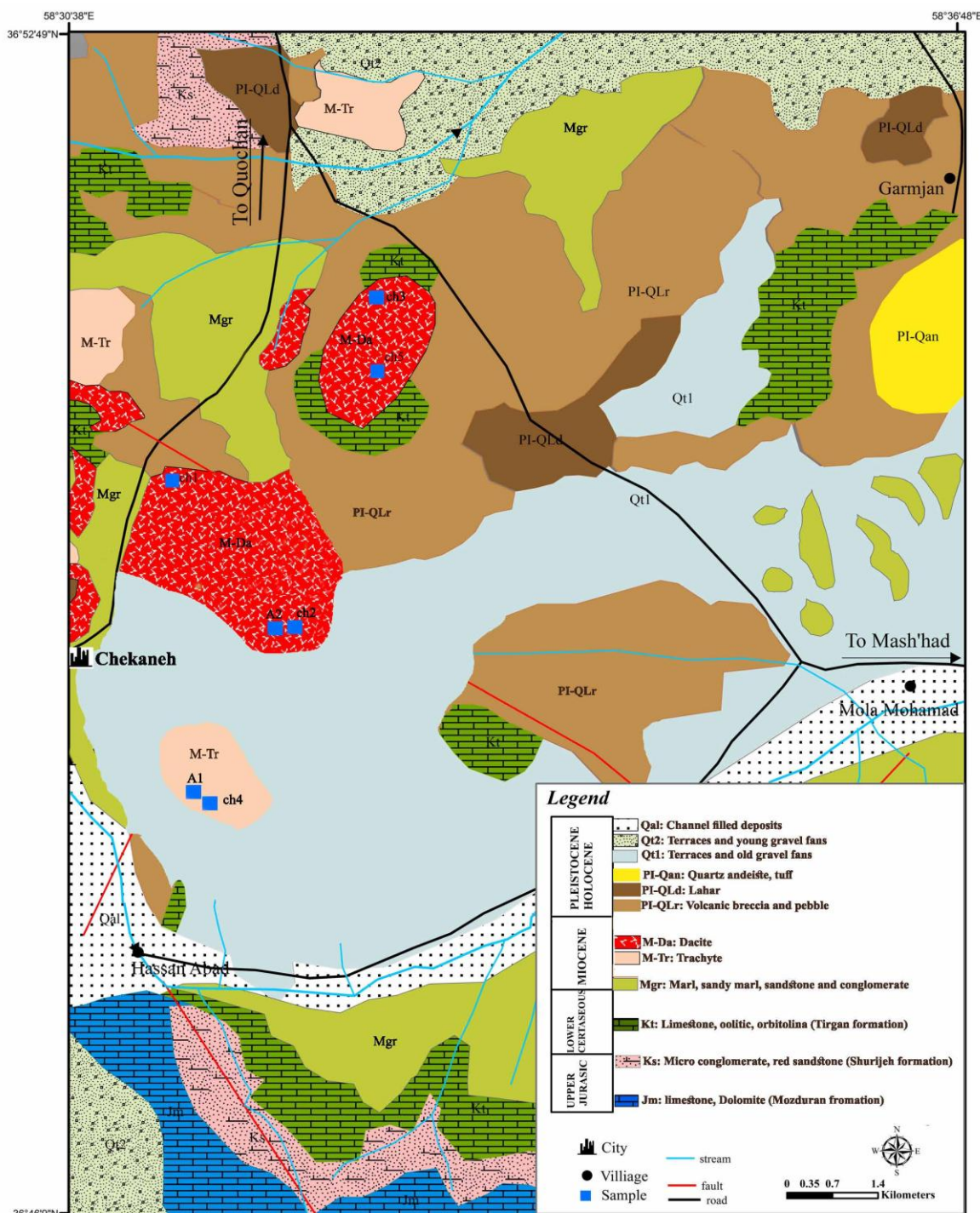
منطقه چکنه بخشی از پهنه ماگمایی شمال سبزواری - جنوب قوچان، در ۱۱۰ کیلومتری شمال خاوری سبزواری است. اگرچه، برخی پژوهشگران (Fatahi, 2003; Tanha, 2009; Ghasemi *et al.*, 2010) مناطق همجوار را پیش از این بررسی کرده‌اند، اما هیچ بررسی سنگ‌شناختی دقیقی روی منطقه چکنه انجام نشده است. Taheri-Sarteshnizi (۲۰۱۷) برای نخستین بار به بررسی گنبد‌های آداکیتی منطقه پرداخته است. در این مقاله برای نخستین بار زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی و به‌ویژه زمین‌شیمی ایزوتوپی (نسبت‌های ایزوتوپی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) گنبد‌های آداکیتی منطقه بررسی می‌شود. همانند دیگر کمان‌های ماگمایی، بررسی این کمان و به‌ویژه گنبد‌های آداکیتی آن روزه‌ای ارزشمندی برای دریافتن فرایندهای درگیر در ذوب پوسته و گوشته در پهنه‌های فرورانش است.

زمین‌شناسی منطقه

گنبد‌های آداکیتی منطقه چکنه در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ خلمد میان طول‌های جغرافیایی خاوری $۵۸^{\circ} ۳۰'$ تا $۵۸^{\circ} ۴۸'$ و عرض‌های جغرافیایی شمالی $۳۶^{\circ} ۴۵'$ تا $۳۷^{\circ} ۰۰'$ درجه هستند و میان دو پهنه زمین‌ساختی البرز خاوری و کپه‌داغ جای گرفته‌اند (شکل ۱).

سنگ‌شناسی و زمین‌شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی ترشیری شمال‌باختری نیشابور، ذوب لبه اقیانوسی فرورونده پیدایش بازالت و آندزیت‌های بازالتی سرشار از Nb در این منطقه را در پی داشته است. به باور ایشان، سنگ‌های حد واسط و اسیدی این منطقه نیز در پی جدایش بلوری ماگمایی، آلودگی پوسته‌ای و حضور مقادیری از رسوب‌های فرورونده در هنگام فرورانش پدید آمده‌اند. Aghabazzaz (۲۰۱۲) سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی آداکیت‌های شمال‌باختری نیشابور را بررسی کرده است. سنگ‌های داسیتی و ریوداسیتی بررسی شده ایشان فنوکریست‌های فراوان آمفیبول و به‌میزان کمتر، بیوتیت و پیروکسن و سرشت آداکیتی دارند و از ذوب‌بخشی خاستگاهی اکلوژیته یا متبازالتی و واکنش آن با پریدوتیت‌های گوشته پدید آمده‌اند. Shabanian و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی ارتباط میان فعالیت‌های آتشفشانی کواترنر درون ورقه‌ای و ساختارهای دیده‌شده در ایران و خاور ترکیه پرداخته‌اند. ایشان ماگماتیسیم درون ورقه‌ای در ناحیه مشکان در جنوب گنبد‌های نیمه عمیق چکنه را پیامد گسل‌های راست‌الغز و معکوس دانسته‌اند. Mohammadi و همکاران (۲۰۱۵) با تکیه بر داده‌های ایزوتوپ‌های Sr-Nd-Pb به بررسی زمین‌شیمی و سنگ‌زایی آداکیت‌های دامنه جنوبی نوار افیولیتی شمال سبزواری پرداخته‌اند و این آداکیت‌ها را پیامد ذوب‌بخشی خاستگاهی گارنت‌آمفیبولیتی دانسته‌اند.

Fathabadi (۲۰۱۴) گنبد‌های آداکیتی منطقه مقیسه در جنوب‌باختری سبزواری را بررسی کرد. این گنبد‌ها ترکیب داسیت-ریوداسیت دارند. همچنین، قطعه‌هایی از سنگ میزبان‌های



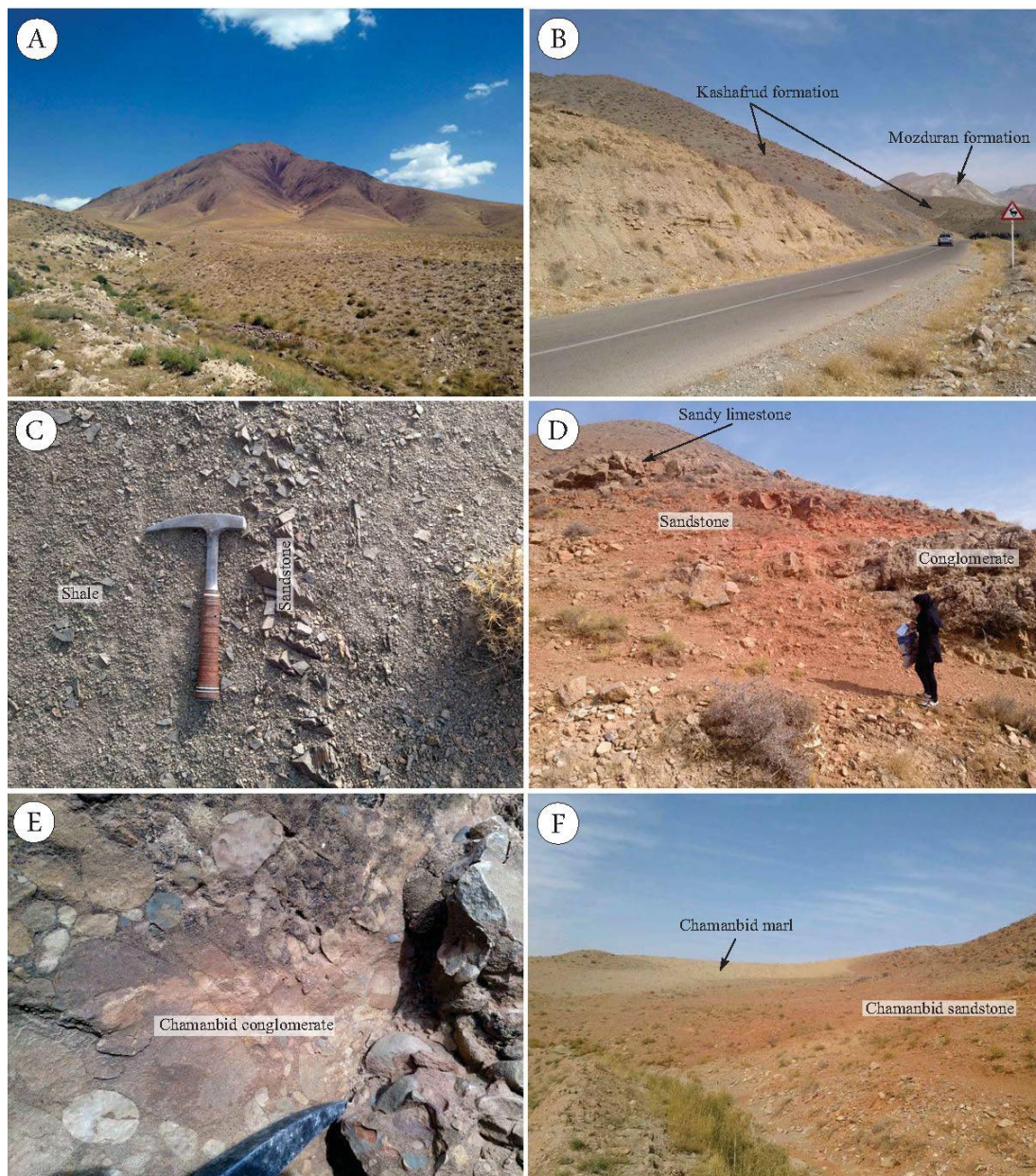
شکل ۱- نقشه زمین شناسی گنبد‌های نیمه عمیق منطقه چکنه (این نقشه به کمک نمونه برداری‌های انجام شده رسم شده است و برای این پژوهش، عکس‌های ماهواره‌ای، و نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ (Pourlatifi, 2006) رسم شده است)

از این گنبد‌ها انجام داده‌اند نشان می‌دهند سن آنها نزدیک به ۱۰ میلیون سال پیش است. کوهزایی پاسادین از مهم‌ترین رویدادهای زمین ساختی منطقه

این گنبد‌ها بلندترین ارتفاع‌های منطقه هستند (شکل ۲- A) و سن سنجی‌های U-Pb که Gardideh و همکاران (۲۰۱۸) به تازگی روی زیرکن‌های جدا شده

در منطقه دیده نمی‌شود، وجود آنها در زیر لایه‌های مزوزوییک نیز انکار نمی‌شود.

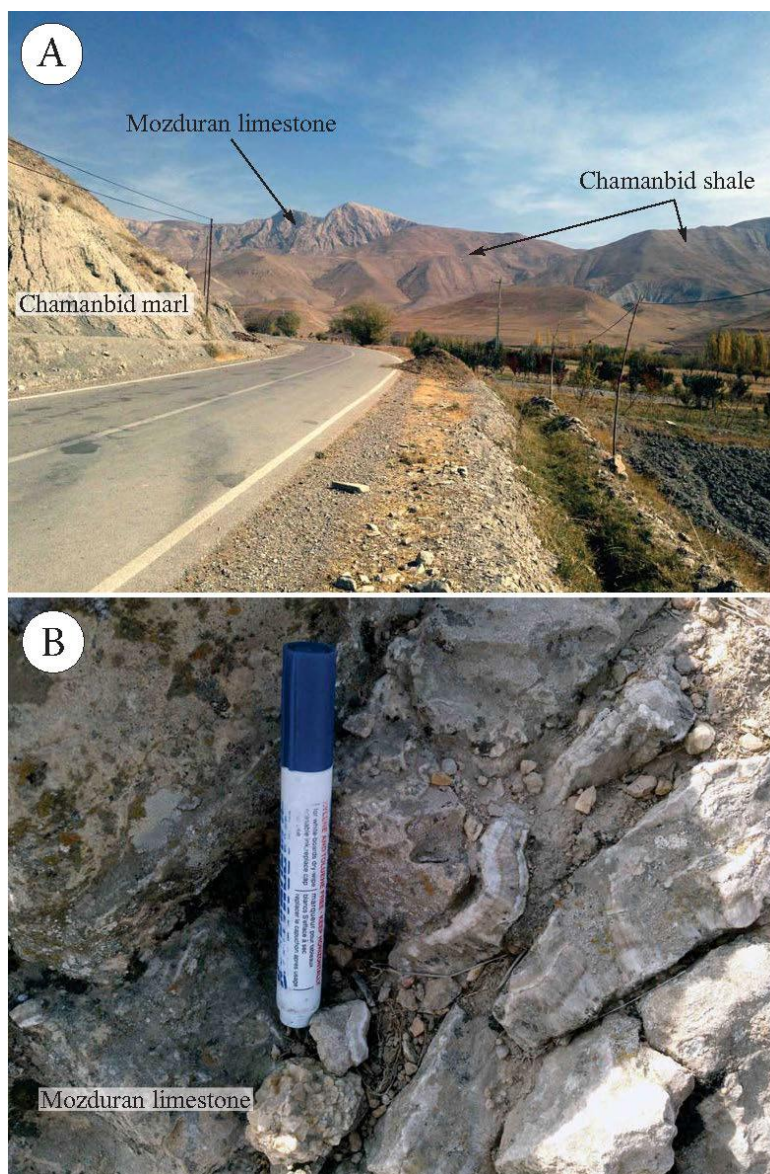
است که نهشته‌های نئوژن را دچار چین‌خوردگی کرده است. اگرچه رخنمونی از سازندهای پالئوزوییک



شکل ۲- A) نمای یکی از گنبد‌های نیمه‌عمیق منطقه چکنه در شمال‌خاوری این شهر؛ B) تصویری از شیل و ماسه‌سنگ‌های سازند کشف‌رود و آهک‌های سازند مزدوران (دید رو به خاور؛ تصویر از جنوب منطقه بررسی شده و در امتداد جاده چکنه- بقیع گرفته شده است)؛ C) نمای نزدیکی از همان شیل‌های سازند کشف‌رود شکل B که میان‌لایه‌هایی با ضخامت کمتر از ماسه‌سنگ دارند؛ D) سازند چمن‌بید در این عکس دیده می‌شود که از کنگلومرا، ماسه‌سنگ و آهک ماسه‌ای ساخته شده است (دید رو به جنوب‌خاوری)؛ E) نمایی نزدیکی از همان کنگلومراهای شکل D (همان‌گونه که در این تصویر دیده می‌شود کنگلومراهای سازند چمن‌بید در این منطقه گردش‌دگی خوب و جورشدگی بد دارند. همچنین، این لایه‌های کنگلومرای اساساً از قلوه‌های آهکی تشکیل شده‌اند)؛ F) تصویری از مارن و ماسه‌سنگ‌های سازند چمن‌بید (دید رو به شمال‌باختری). این مارن‌ها در سمت چپ شکل D جای گرفته‌اند

(شکل‌های ۲-D، ۲-E و ۲-F) روی آنها جای گرفته‌اند. سازند چمن‌بید نیز خود با سنگ‌های کربناته سازند مزدوران (شکل‌های ۳-A و ۳-B) به سن ژوراسیک بالایی پوشیده شده است.

کهن‌ترین سنگ‌های منطقه، شیل و ماسه‌سنگ‌های سازندهای کشف‌رود به سن ژوراسیک میانی (شکل‌های ۲-B و ۲-C) هستند که کنگلومرا، ماسه‌سنگ و آهک‌های سازند چمن‌بید



شکل ۳- A) همجواری شیل‌های سازند چمن‌بید در کنار آهک‌های مزدوران در امتداد جاده چکنه- بقیع. مرز این دو واحد گسله است؛ B) نمای نزدیکی از همان آهک‌ها شکل A که رگه‌های نازکی از آراگونیت (در مرکز تصویر) دارند

میانی و بسته‌شدن تتیس کهن دانست (Aghanabati, 2004). شواهد گویای آن است که در زمان رسوب‌گذاری سازند مزدوران نیز،

یکنواختی ضخامت در نهشته‌های فیلیشی ژوراسیک میانی را شاید بتوان پیامد سازوکار جنبش‌های کوهزایی سیمین پیشین در تریاس

جنوبی نیز که در فاصله ۲ کیلومتری شمال‌خاوری روستای حسن آباد است، ترکیب تراکیت دارد؛ اما دو گنبد دیگر که با فاصله ۱ و ۵ کیلومتری در شمال این گنبد جای دارند، ترکیب داسیت نشان می‌دهند (شکل ۱). در بررسی‌های صحرایی روشن شد که این گنبد‌ها رخنمون‌های جدا از هم دارند و هر کدام از آنها ترکیب یکنواختی نشان می‌دهند و تنوع سنگ‌شناسی ندارند.

بررسی‌های سنگ‌نگاری نشان می‌دهد سنگ‌های سازنده این گنبد‌ها از کانی‌های پلاژیوکلاز، هورنبلند، کوارتز، ارتوکلاز و اکسیدهای آهن - تیتانیم ساخته شده‌اند و بافت‌های گوناگون پورفیری (شکل ۴- A)، میکرولیتی پورفیری و گلمروپورفیری (شکل‌های ۴- B و ۴- C) دارند. در برخی نمونه‌ها، بافت‌های سری‌ایت و جریان‌ی (شکل ۴- D) نیز به‌خوبی دیده می‌شوند. پلاژیوکلاز و هورنبلند از فنوکریست‌های این سنگ‌ها هستند. پلاژیوکلاز، بافت غربالی (شکل ۴- E)، منطقه‌بندی و ماکل پلی‌سینتتیک نشان می‌دهد (شکل ۴- A) که نشان‌دهنده حاکم‌بودن شرایط ناعادلی در فرایند تبلور ماگما هستند (شکل‌های ۴- A و ۴- E). بافت غربالی در پلاژیوکلاز چه‌بسا پیامد تغییر شرایط فیزیکیوشیمیایی حاکم بر ماگمای در حال تبلور باشد که معمولاً به‌دنبال کاهش فشار در پی بالآمدن و گاززدایی ماگما، رویداد فرایند همرفت در آشیانه ماگمایی، آمیختگی ماگمایی، آلابش و یا ورود ماگمای داغ جدید رخ می‌دهد (Stewart and Pearce, 2004). منطقه‌بندی ترکیبی در پلاژیوکلاز وابسته به تغییرهای بزرگ‌مقیاس در پارامترهای دما، فشار، میزان آب و ترکیب مذاب دانسته شود و چه‌بسا با افزوده‌شدن مذاب جدید به آشیانه ماگمایی همراه است (Foley et al., 2013).

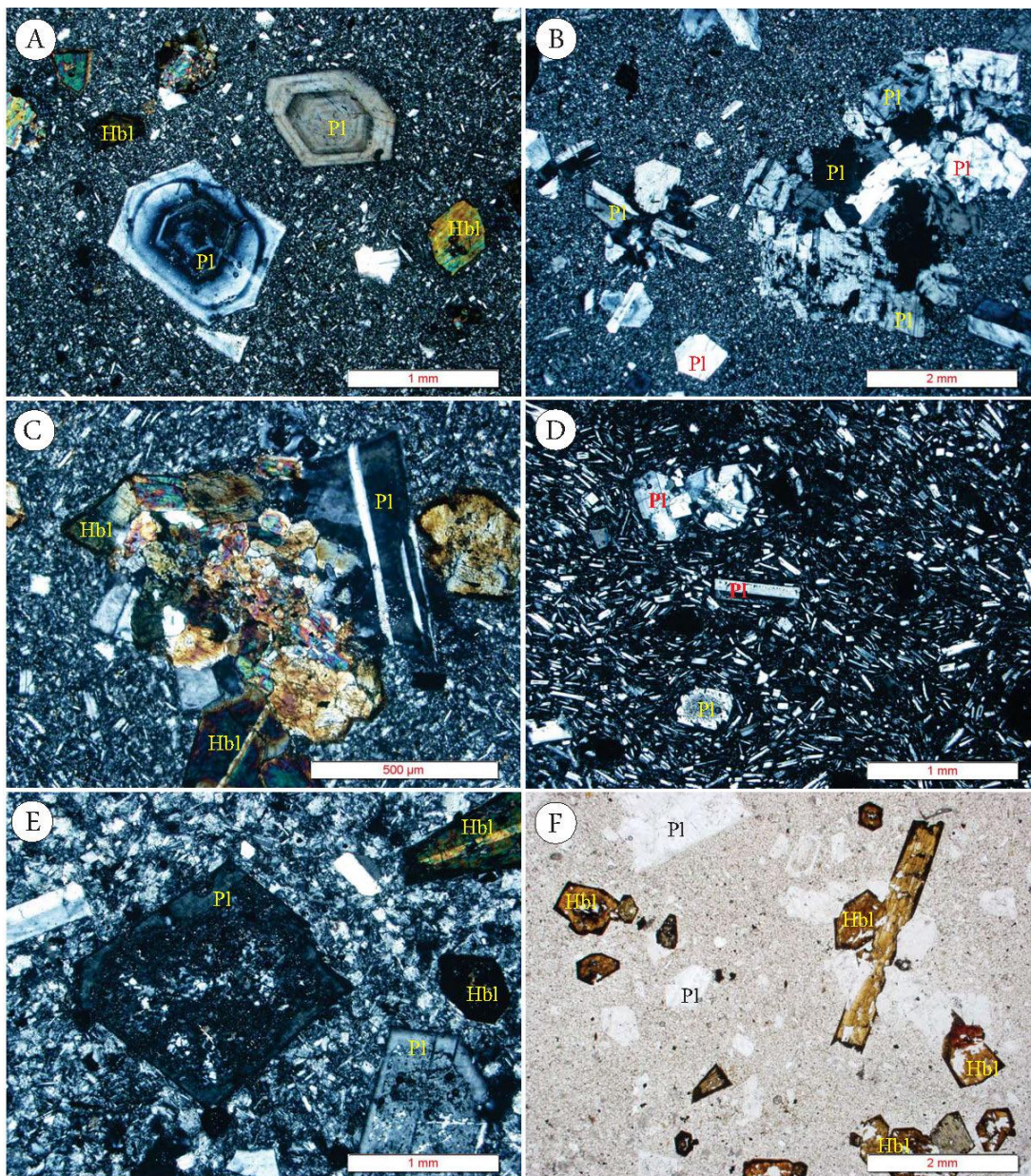
حوضه‌ای کم‌ژرفا و وابسته به حاشیه فعال قاره، منطقه بررسی‌شده را دربرگرفته بوده و کم‌کم ژرفای این حوضه افزایش یافته و سنگ‌های آهکی را پدید آورده است (شکل ۳- B). سازند مزدوران حجم بزرگی از سنگ‌های جنوب توده‌های نیمه‌عمیق چکنه را در بر گرفته است. در این منطقه، پس از وقفه‌ای در رسوب‌گذاری سازند شوربچه، پیشروی دریای کرتاسه لایه‌هایی کربناته اربیتولین‌دار (سازند تیرگان) را به‌گونه هم‌شیب روی نهشته‌های کهن‌تر برجای گذاشته است. ستبرای این سازند در این منطقه نزدیک به ۱۵۰ متر است و فسیل‌های آن به سن بارمین - آپسین هستند (Pourlatifi, 2006).

با پیدایش حوضه‌های تخییری در نئوژن روی سطح ناهمواری‌ها در این منطقه، کنگلومرای انباشته شده است که قلوه‌هایی از سنگ‌های مزوزوییک دارد و روی این سنگ‌ها به‌صورت دگرشیب و یا گسله جای گرفته است. این کنگلومراها سیمانی قهوه‌ای تا سرخ‌رنگ دارند و در زیرترین بخش پادگانه‌های آبرفتی کواترنر جای گرفته‌اند. قلوه‌های موجود گردش‌دگی خوبی دارند؛ اما جورشدگی آن ضعیف است. در نزدیکی گنبد‌های چکنه، تناوبی از شیل و ماسه‌سنگ‌های نئوژن به‌چشم می‌خورند که در پی کوهزایی پاسادین دچار چین خوردگی شده‌اند.

جوان‌ترین نهشته‌های موجود در منطقه مربوط به آبرفت‌های کم‌ارتفاع و پادگانه‌های آبرفتی جوان هستند که بستر کهن رودخانه‌های با ارتفاع کم را نیز شامل می‌شوند. این نهشته‌ها تا دشت‌ها ادامه دارند.

سنگ‌نگاری و روابط صحرایی

گنبد‌های نیمه‌عمیق منطقه چکنه با قطر ۱/۴ تا ۳ کیلومتر، ترکیب داسیت و تراکیت دارند. گنبد



شکل ۴- تصویرهای میکروسکوپی از بافت‌ها و کانی‌های گنبدی نیمه‌عمیق منطقه چکنه (جنوب قوچان): (A) بافت پورفیری با فنوکریست‌های پلاژیوکلاز (Pl) و هورنبلند (Hbl). اندازه فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در این سنگ‌ها نزدیک به ۱ میلی‌متر است و منطقه‌بندی زیبا نشان می‌دهند؛ (B) بافت گلومرپورفیری که پیامد انباشته‌شدن فنوکریست‌های پلاژیوکلاز؛ (C) بافت گلومرپورفیری که در پی انباشته‌شدن بلورهای هورنبلند پدید آمده است؛ (D) بافت جریان‌ی که در پی پشت سرهم جای گرفتن میکروولیت‌ها و بلورهای پلاژیوکلاز پدید آمده است؛ (E) بافت غربالی بلورهای پلاژیوکلاز؛ (F) حاشیه سوخته بلورهای هورنبلند در سنگ‌های بررسی‌شده (نام اختصاری کانی‌ها از Kretz (۱۹۸۳) برگرفته شده است)

(۲۰۰۳)، هنگام بالا آمدن ماگمای داغ، هورنبلند در مجاورت با محیط اکسیدان با هورنبلند بازالتی جایگزین می‌شود.
در سنگ‌های گنبدی منطقه، بافت

شماری از هورنبلندها حاشیه سوخته دارند (شکل ۴-F). داشتن حاشیه سوخته در هورنبلندها پیامد بالا بودن فوگاسیته اکسیژن و فشار بخار آب در هنگام بالا آمدن ماگماست. به باور Best

اپیدوت نیز از کانی‌های ثانویه در گنبد‌های نیمه‌عمیق منطقه چکنه هستند.

زمین‌شیمی

پس از انجام دقیق بررسی‌های سنگ‌نگاری روی بیشتر از ۶۰ نمونه سنگی، ۵ نمونه سالم برگزیده و برای انجام تجزیه شیمیایی عنصرهای اصلی و کمیاب سنگ کل به روش‌های ICP-OES و ICP-MS به آزمایشگاه ACME (در ونکوور کانادا) فرستاده شدند (جدول‌های ۱ و ۲). افزون‌براین، ۳ نمونه نیز برای بررسی‌های ایزوتوپی به آزمایشگاه زمین‌شناسی ایزوتوپی دانشگاه آویرو در کشور پرتغال فرستاده شدند (جدول ۳). در پایان داده‌های تجزیه‌ای با نرم‌افزارهای سنگ‌شناسی و اکسل پردازش شدند.

گلوومروپرفیری نیز دیده می‌شود (شکل‌های ۴-B و ۴-C). تجمع بلورها و پیدایش گلوومرول چه‌بسا پیامد هسته‌بندی ناهمگن این بلورها باشد (Kirkpatrick, 1977). نیروی انبساطی و تنش برشی باعث قطعه‌قطعه شدن و برشی شدن بلورهای انباشتی در ماگما و پیدایش تجمع‌ها و لخته‌های گلوومروپرفیری شده‌اند که همراه با بالآمدن مذاب، به بالا آورده می‌شوند. بهم‌پیوستن گلوومروپرفیرها در مذاب، شاید به کاهش دما و افزایش گرانیروی حاصل از آن وابسته است (Baker, 1998). در پایان، بالآمدن و انجماد سریع مذاب‌های بجامانده، تشکیل زمینه و در برگرفتن تجمع‌های فنوکریستی و گلوومروپرفیری قدیمی را در پی داشته است (شکل‌های ۴-B و ۴-C). کلسیت و

جدول ۱- داده‌های تجزیه شیمیایی اکسید عنصرهای اصلی (بر پایه wt%) برای نمونه‌های گنبد‌های نیمه‌عمیق منطقه چکنه (جنوب قوچان) و درصد نرم‌تایو کانی‌های آنها

Rock Type	Trachyte	Dacite	Dacite	Dacite	Dacite	Average
Sample No.	Ch4	Ch1	Ch2	Ch3	Ch5	
SiO ₂	63.49	66.44	66.80	67.99	68.61	66.67
Al ₂ O ₃	16.68	18.10	17.56	16.49	16.72	17.11
Fe ₂ O _{3total}	4.25	3.09	3.03	3.16	2.55	3.22
MgO	2.24	1.43	1.35	1.87	1.12	1.60
CaO	3.47	4.55	4.67	4.35	4.48	4.30
Na ₂ O	5.98	4.02	4.17	3.79	4.26	4.44
K ₂ O	3.10	1.85	1.92	1.84	1.81	2.11
TiO ₂	0.45	0.34	0.34	0.35	0.28	0.35
P ₂ O ₅	0.22	0.13	0.12	0.10	0.12	0.14
MnO	0.12	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
L.O.I.	2.40	1.50	2.20	3.30	2.10	2.3
Total	100.00	100.00	100.00	100.01	99.99	100.00
Orthoclase	19.70	5.71	6.34	2.97	6.94	8.33
Albite	50.62	34.05	35.32	32.11	36.05	37.63
Anorthite	3.11	21.72	22.38	20.90	20.82	17.79
Quartz	5.88	26.59	25.52	29.85	27.44	23.06
Apatite	0.51	0.31	0.28	0.24	0.29	0.33
Magnetite	3.08	1.80	1.76	0.57	1.48	1.74
Ilmenite	0.43	0.32	0.32	0.34	0.26	0.34
Biotite	2.46	8.36	8.01	12.98	6.01	7.56
Amphibole	19.45	0.00	0.00	0.00	0.97	4.08
Corundum	0.00	1.50	0.40	0.58	0.00	0.50

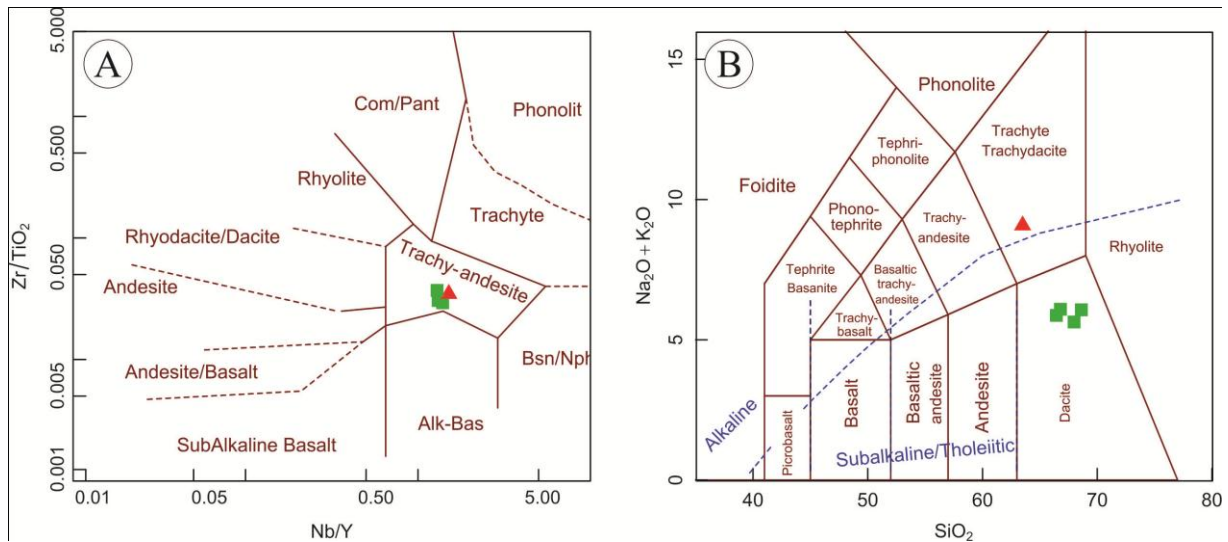
جدول ۲- داده‌های تجزیه شیمیایی عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب (برپایه ppm) نمونه‌های گنبدی نیمه عمیق منطقه چکنه (جنوب قوچان)

Sample No.	Ch4	Ch1	Ch2	Ch3	Ch5	average
Ba	554	409	436	433	389	444
Be	1.00	1.00	1.00	2.00	1.00	1.20
Ni	20.00	7.10	7.70	20.00	20.00	14.96
Co	8.50	7.00	6.50	6.80	4.70	6.70
Cs	0.60	0.70	0.70	1.20	1.20	0.88
Ga	15.00	16.30	15.60	15.70	16.80	15.88
Hf	3.50	2.90	2.90	2.80	3.00	3.2
Nb	17.50	10.60	10.00	9.90	8.00	11.20
Rb	61.00	44.80	43.50	45.20	32.80	45.46
Sr	350.80	507.80	516.30	483.30	556.40	482.92
Ta	1.40	0.90	0.90	0.80	0.90	0.98
Th	7.60	7.00	7.00	9.10	4.30	7
U	2.10	2.10	1.90	1.90	1.50	1.90
V	72.00	45.00	41.00	45.00	34.00	47.40
W	0.80	0.70	0.70	0.50	0.50	0.64
Zr	156.70	104.00	99.50	107.80	102.20	114.04
Y	11.60	8.10	7.20	7.20	6.20	8.06
La	25.70	19.30	19.30	19.40	16.20	19.98
Ce	42.00	33.60	31.50	31.50	27.80	33.28
Pr	4.32	3.64	3.43	3.25	2.92	3.51
Nd	15.00	12.90	11.50	11.70	10.70	12.36
Sm	2.51	2.15	1.93	2.05	1.78	2.08
Eu	0.72	0.63	0.60	0.59	0.53	0.61
Gd	2.36	1.84	1.67	1.69	1.60	1.83
Tb	0.36	0.27	0.25	0.26	0.22	0.27
Dy	1.91	1.42	1.29	1.41	1.20	1.45
Ho	0.37	0.28	0.27	0.25	0.21	0.28
Er	1.16	0.79	0.72	0.63	0.67	0.79
Tm	0.18	0.12	0.13	0.10	0.10	0.13
Yb	1.27	0.77	0.72	0.71	0.63	0.82
Lu	0.20	0.12	0.12	0.10	0.09	0.13
Sc	8.00	8.00	7.00	7.00	4.00	6.80
FeO/MgO	0.95	1.30	1.35	1.48	1.37	1.29
Sr/Y	30.24	62.69	71.70	67.13	89.74	64.3
La _N /Yb _N	13.64	16.9	18.07	13.64	17.34	16.87
Mg#	65.25	57.9	57	54.68	56.51	58.27
Yb _N	6.08	3.68	3.45	3.40	3.01	3.92

همان‌گونه که در شکل‌های ۴- A تا ۴- F دیده می‌شود، زمینه سنگ‌های سازنده گنبدی نیمه عمیق منطقه چکنه از شیشه و بلورهای کوچک فلدسپار و کوارتز ساخته شده است. از این‌رو، برای نامگذاری این سنگ‌ها رده‌بندی‌های شیمیایی و نرماتیو به کار برده شد. برپایه نمودار رده‌بندی شیمیایی Nb/Y در برابر Zr/TiO₂ (شکل ۵- A) سنگ‌های بررسی شده در محدوده تراکی آن‌دزیت و در نمودار رده‌بندی شیمیایی SiO₂ در برابر Na₂O+K₂O (شکل ۵- B) در محدوده داسیت و تراکیت جای گرفته‌اند.

جدول ۳- داده‌های تجزیه‌های ایزوتوپی Rb-Sr و Sm-Nd برای نمونه‌های گنبدی نیمه عمیق منطقه چکنه (جنوب قوچان) (سن ۱۰ Ma که برای تعیین مقدارهای اولیه ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr، ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd و εNd به کار برده شده است، برپایه سن‌سنجی‌های جدید روی کانی‌های زیرکن در این سنگ‌هاست که Gardideh و همکاران (۲۰۱۸) آن را انجام داده‌اند)

Sample	A1	A2	Ch5
Nd(ppm)	9.10	8.70	10.70
Sm(ppm)	1.55	1.60	1.78
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512887	0.512783	0.512820
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd _{10Ma}	0.51288	0.51278	0.51281
εNd _{10Ma}	4.98	2.95	3.68
Error(2s)	0.000026	0.000011	0.000011
Rb(ppm)	37.70	36.50	32.80
Sr(ppm)	475.30	553.20	556.40
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.704286	0.704110	0.703927
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr _{10Ma}	0.70425	0.70408	0.70390
Error(2s)	0.000015	0.000021	0.000018



شکل ۵- موقعیت نمونه‌های گنبد‌های آداکیتی منطقه چکنه (جنوب قوچان) در نمودارهای رده‌بندی: (A) Nb/Y در برابر Zr/TiO₂ (Le Bas et al., 1986) و (B) SiO₂ در برابر Na₂O+K₂O (Winchester and Floyd, 1977)

همچنین، این سنگ‌ها سرشت مت‌آلومین تا پرآلومین ضعیفی نشان می‌دهند (شکل ۶- B). بالابودن مقدار K₂O و سرشت پرآلومین سنگ‌های بررسی‌شده با آرایش ماگمای مادر سنگ‌های بررسی‌شده در هنگام گذر از پوسته قاره‌ای توجیه‌شدنی است.

بحث

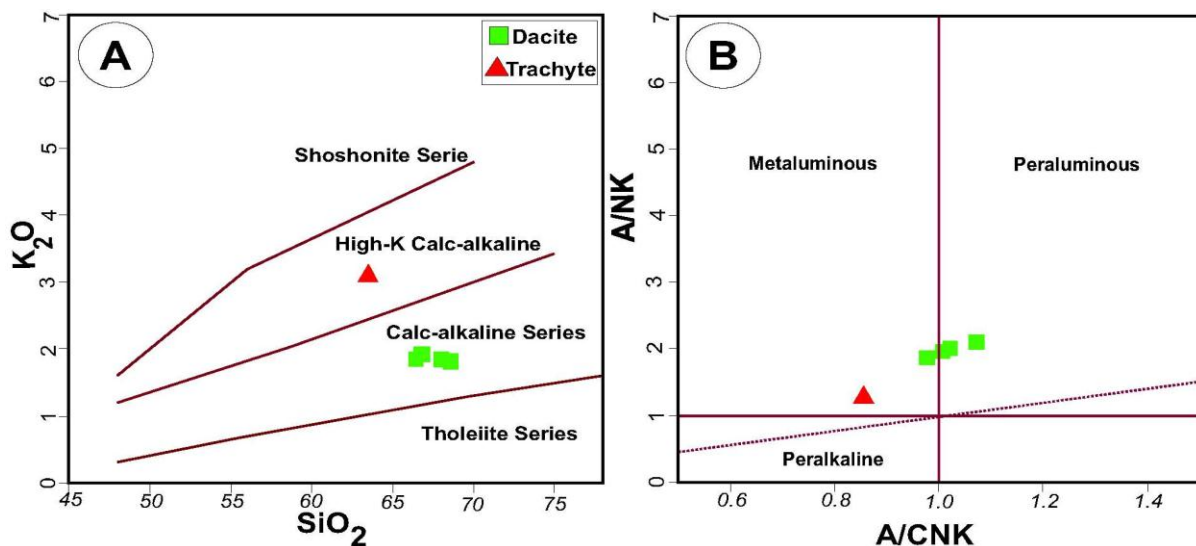
گنبد‌های نیمه‌عمیق منطقه چکنه ترکیب داسیت و تراکیت دارند. این سنگ‌ها سرشت کالک‌آلکان نشان می‌دهند. نمودارهای چندعنصری و بهنجارشده به ترکیب کندریت (شکل ۷- A) و گوشته اولیه (شکل ۷- B) نشان‌دهنده غنی‌شدگی این سنگ‌ها از LREEs در برابر HREEs و عنصرهای خاکی کمیاب بزرگ‌یون (K, Ba و Rb) در برابر عنصرهای با قدرت میدان بالا (HFSE) هستند. همچنین، سنگ‌های گنبد‌های نیمه‌عمیق منطقه چکنه از عنصرهای P, Ti و Nb آنومالی منفی نشان می‌دهند (شکل ۷). آنومالی منفی از این عنصرها با کانی‌های فرعی و عارضه‌ای فسفردار و تیتانییم‌دار (مانند: مونازیت، آپاتیت، اسفن، روتیل، ایلمنیت) و برخی

از آنجایی که سنگ‌های سازنده گنبد‌های چکنه دارای هورنبلند هستند، گمان می‌رود روش مزونورم گرانیت با هورنبلند (Granite Mesonorm with hornblende; Mielke and Winkler, 1979) برای ارزیابی درصد نورماتیو کانی‌های سازنده آنها روش بهتری باشد. درصد نورماتیو کانی‌های این سنگ‌ها عبارت است از: ارتوکلاز (۳۱/۰ تا ۱۹/۷ درصد)، آلبیت (۳۲/۱ تا ۵۰/۶ درصد)، آنورتیت (۳/۱ تا ۲۲/۴ درصد)، کوارتز (۵/۹ تا ۲۹/۹ درصد)، آپاتیت (۰/۲ تا ۰/۳ درصد)، مگنتیت (۰/۶ تا ۳/۱ درصد)، ایلمنیت (۰/۳ تا ۰/۴ درصد)، بیوتیت (۲/۵ تا ۱۳/۰ درصد)، آمفیبول (۰ تا ۱۹/۵ درصد) و کزندوم (۰ تا ۱/۵ درصد). بر این پایه، نمونه ch4 از نوع تراکیت و نمونه‌های دیگر داسیت نامگذاری می‌شوند (جدول ۱) که با بررسی‌های سنگ‌نگاری نیز کاملاً همخوانی دارد.

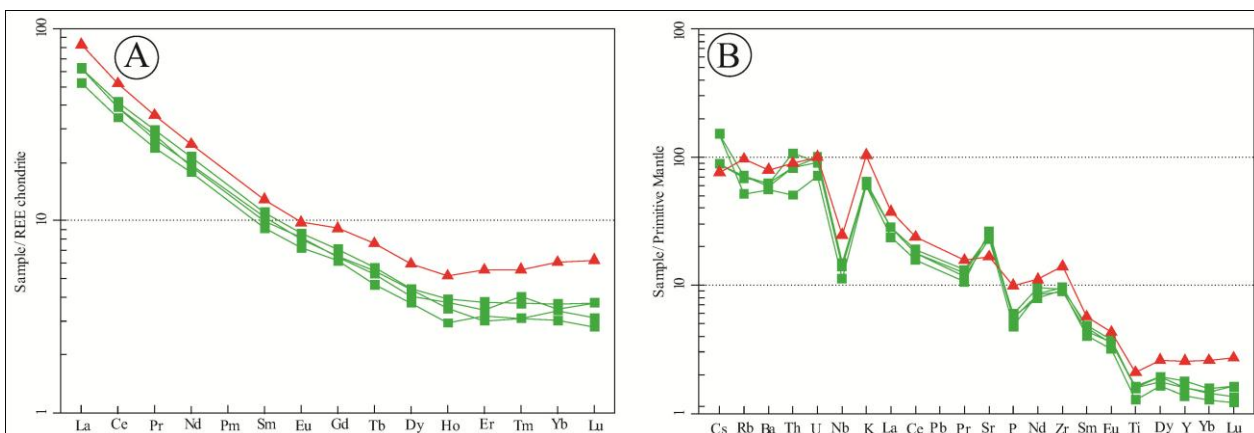
نمودار SiO₂ در برابر K₂O (شکل ۶- A) برای بررسی سری ماگمایی گنبد‌های نیمه‌عمیق منطقه چکنه به کار برده شد. همان‌گونه که دیده می‌شود، سنگ‌های بررسی‌شده سرشت کالک‌آلکان دارند.

ساختار بلوری خود، در مذاب بخشی تولیدشده آنومالی منفی پدید می‌آورند (Gaetani, 2004). در برابر، سیال‌ها و مذاب‌های پدیدآمده از آب‌زدایی و ذوب‌بخشی سنگ‌کره اقیانوسی فرورونده، با صعود به گوه گشته‌ای رویی و متاسوماتیسم‌کردن آن، آنومالی مثبت در عنصرهای خاکی بزرگ یون (LILEs) و آنومالی منفی در عنصرهای با قدرت میدان بالا (HFSE) را پدید آورده‌اند؛ از این‌رو، آنومالی‌های مثبت و منفی این عنصرهای کمیاب در سنگ‌های منطقه نشان دهنده پیدایش آنها در پهنه فرورانش است.

آمفیبول‌ها (انواع دما- فشار بالای پارگازیتی) کنترل می‌شود. با افزایش فشار (در رخساره‌های آمفیبولیت و اکلوزیت در پهنه‌های فرورانش)، حلالیت این فازهای کانیایی در سیال‌های آبدار کاهش می‌یابد. پس کانی‌های یادشده که سرشار از عنصرهای HFS هستند، هنگام فرایندهای ذوب‌بخشی در ژرفای بیشتر از ۳۰ کیلومتر، به‌صورت فازهای دیرگداز در سنگ‌مادرهای آمفیبولیتی و اکلوزیتی پدیدآمده از دگرگونی سنگ‌کره اقیانوسی فرورونده، بجای می‌مانند و با نگهداری این عنصرها در



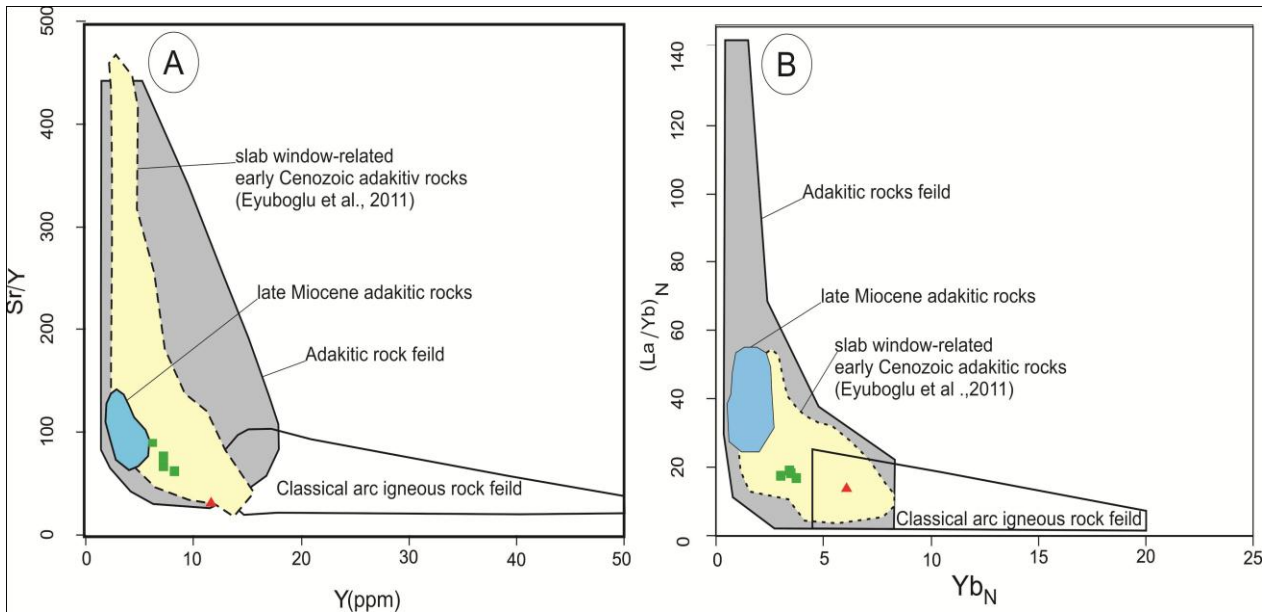
شکل ۶- جایگاه نمونه‌های گنبد‌های داسیتی-تراکیتی منطقه چکنه (جنوب قوچان) در: (A) نمودار K_2O در برابر SiO_2 در برابر برای تعیین سری ماگمایی؛ (B) نمودار A/CNK در برابر A/NK (Shand, 1943) (نمادها همانند شکل ۶ هستند)



شکل ۷- الگوی فراوانی عنصرهای گنبد‌های داسیتی- تراکیتی چکنه (جنوب قوچان) در: (A) نمودار بهنجارشده به ترکیب پیشنهادی Boynton (۱۹۸۴) برای کندریت؛ (B) نمودار چندعنصری (عنکبوتی) بهنجارشده به ترکیب پیشنهادی Sun و McDonough (۱۹۸۹) برای گوشته اولیه (نمادها همانند شکل ۶ هستند)

محدوده آداکیت‌ها و دور از محدوده سنگ‌های معمول کمان ماگمایی (Classical arc igneous rocks) جای گرفته‌اند.

نمونه‌های سنگی گنبد‌های نیمه‌عمیق منطقه چکنه در نمودارهای Y در برابر Sr/Y (شکل ۸-ا) و Yb_N در برابر La_N/Yb_N (شکل ۸-ب) در



شکل ۸- جایگاه ترکیبی نمونه‌های گنبد‌های داسیتی- تراکیتی چکنه (جنوب قوچان) در نمودارهای Y در برابر Sr/Y و Yb_N در برابر La_N/Yb_N (Defant and Drummond, 1990) (نمادها همانند شکل ۶ هستند)

ذوب سنگ‌کره اقیانوسی هستند. مقدار این نسبت‌ها در سنگ‌های بررسی شده نیز در این بازه جای گرفته است (شکل ۸)؛

(۲) میانگین مقادارهای Y و Yb در این سنگ‌ها به ترتیب از $۰/۸۲$ و $۸/۰۶$ کمتر است و در محدوده مقادارهای مربوط به ماگماهای آداکیتی ($Yb < ۱۸ppm$) و ($Y < ۱۸ppm$) جای گرفته است (جدول ۱؛ Martin, ۱۹۹۹)؛

(۳) الگوهای بهنجار شده عنصرهای کمیاب سنگ‌های چکنه مقادارهای Y و HREEs کم و Sr و Sr/Y بالایی نشان می‌دهند (همانند ماگماهای آداکیتی پدید آمده از ذوب سنگ‌های گارنت آمفیبولیتی در ژرفای بیشتر از ۳۵ کیلومتر) (شکل ۷؛ جدول ۱؛ Wang و همکاران، ۲۰۰۶، b).

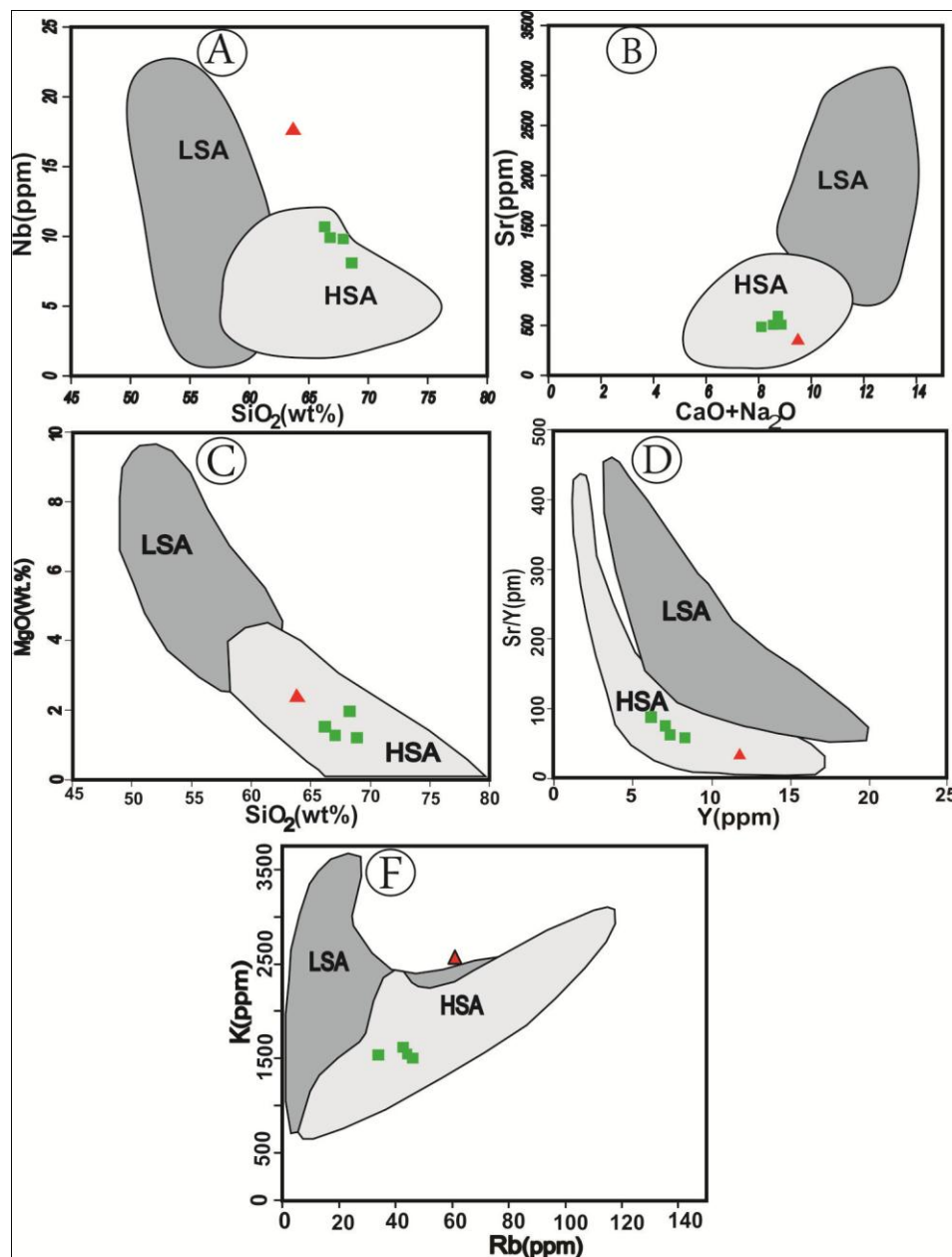
Martin (۱۹۹۹) آداکیت‌ها را به دو گروه پرسیلیس

همچنین، همان‌گونه که در این نمودارها دیده می‌شود، نمونه‌های سنگی برداشت شده از گنبد‌های نیمه‌عمیق منطقه چکنه در محدوده آداکیت‌های سنوزویک و مرتبط با سنگ‌کره اقیانوسی فرورونده (Eyuboglu et al., 2011) نیز جای گرفته‌اند (شکل ۸). دیگر ویژگی‌هایی که نشان‌دهنده آداکیتی بودن ماگمای سازنده گنبد‌های منطقه چکنه و پیدایش آن از ذوب بخشی سنگ‌کره اقیانوسی فرورونده هستند، عبارتند از:

(۱) برپایه پژوهش‌های Kay (۱۹۷۸)، Defant و Drummond (۱۹۹۰) و همکاران (۲۰۰۵) روی ترکیب‌های آداکیتی، مقدار $Sr/Y > ۴۰$ و $La_N/Yb_N > ۱۲$ از مهم‌ترین ویژگی‌های زمین‌شیمیایی آداکیت‌های وابسته به

Rb در برابر K (شکل ۹- F)، نمونه‌های گنبد‌های آداکیتی چکنه در محدود HSA جای دارند. این ویژگی آنها با سرشت پرسیلیس این نمونه‌ها همخوانی دارد (Martin et al., 2005).

(HSA) و کم‌سیلیس (LSA) رده‌بندی کرده است. در نمودارهای SiO_2 در برابر Nb (شکل ۹- A)، Na_2O+CaO در برابر Sr (شکل ۹- B)، SiO_2 در برابر MgO (شکل ۹- C)، Y در برابر Sr/Y (شکل ۹- D) و



شکل ۹- جایگاه ترکیبی نمونه‌های گنبد‌های آداکیتی منطقه چکنه (جنوب قوچان) در نمودارهای رده‌بندی آداکیت‌های پرسیلیس (HSA) و کم‌سیلیس (LSA) (Martin et al., 2005) (نمادها همانند شکل ۶ هستند)

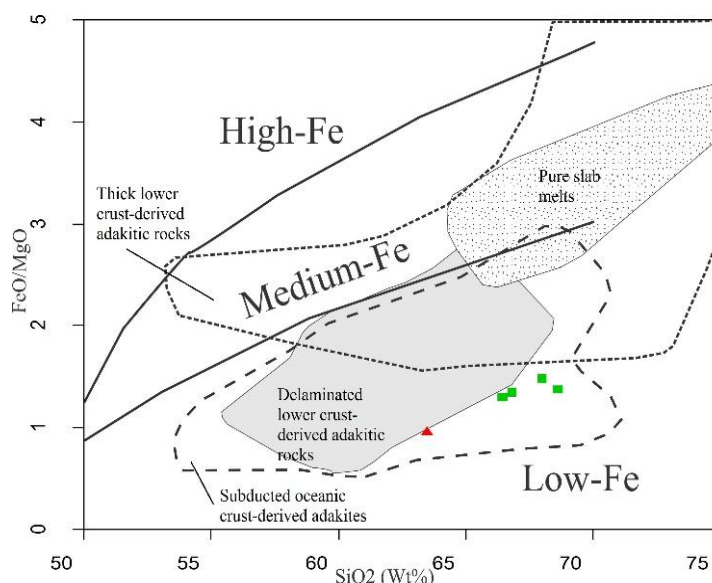
گارنت آمفیبولیت در فشار برابر با گستره پایداری گارنت تفسیر می‌شوند که در هنگام بالا آمدن از گوه گشته‌ای

آداکیت‌های پرسیلیس، مذاب‌های پدید آمده از ذوب سنگ کره اقیانوسی فرورونده با ترکیب اکلوزیت یا

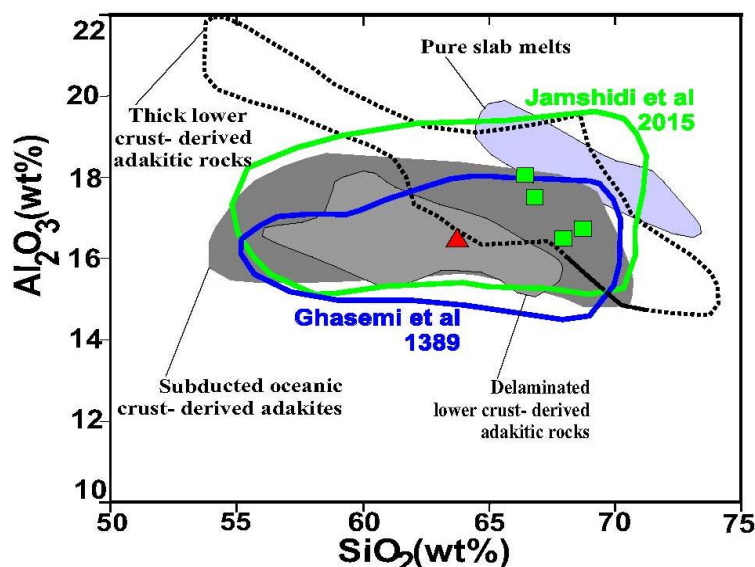
اقیانوسی فرورونده جای گرفته‌اند. در نمودار Mg# در برابر SiO_2 نیز این نمونه‌ها در محدوده آداکیت‌های پدیدآمده از ذوب‌بخشی سنگ‌کره اقیانوسی فرورونده و در محدوده آداکیت‌های سنوزویک (Eyuboglu *et al.*, 2011) جای دارند (شکل ۱۳) و این نکته پیدایش این سنگ‌ها از ذوب سنگ‌کره اقیانوسی فرورونده را نشان می‌دهد.

اندکی با پریدوتیت گوشته واکنش داده‌اند (Martin *et al.*, 2005; Rapp *et al.*, 2006).

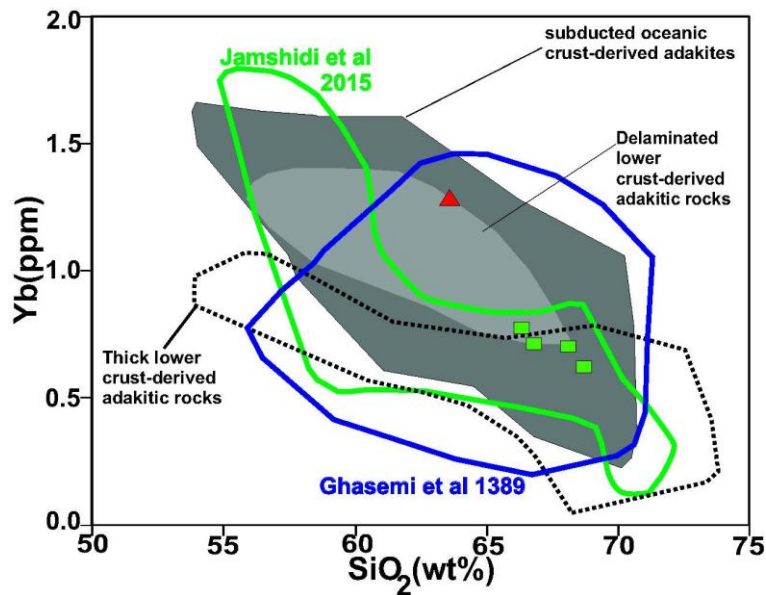
همچنین، در نمودارهای SiO_2 در برابر FeO/MgO (شکل ۱۰)، Al_2O_3 در برابر SiO_2 (شکل ۱۱) و در برابر Yb (شکل ۱۲؛ Wang *et al.*, 2006a, b)، نمونه‌های تجزیه‌شده از گنبد‌های نیمه‌عمیق منطقه چکنه در محدوده آداکیت‌های پدیدآمده از ذوب‌بخشی سنگ‌کره



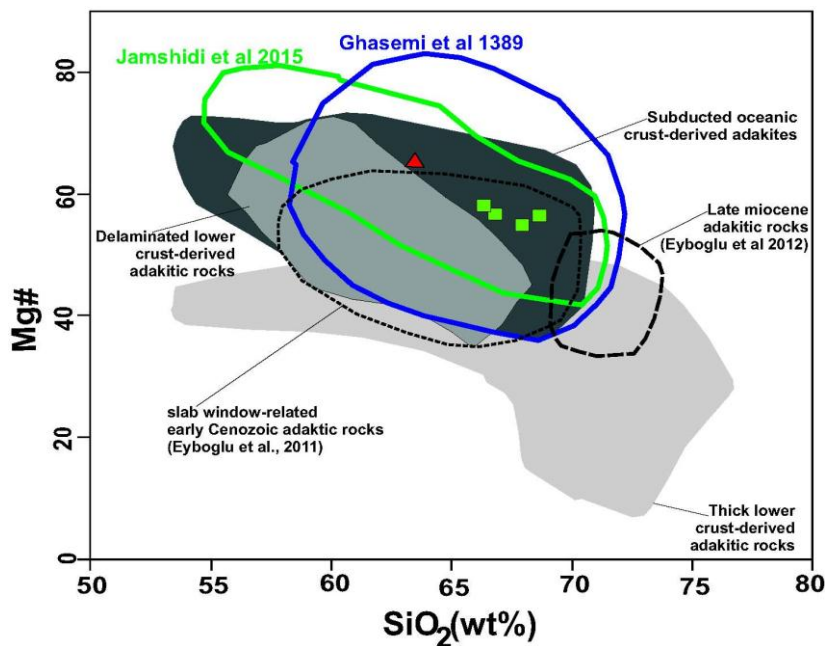
شکل ۱۰- جایگاه ترکیب شیمیایی نمونه‌های گنبد‌های آداکیتی منطقه چکنه (جنوب قوچان) در نمودار SiO_2 در برابر FeO/MgO (Wang *et al.*, 2006a) (نمادها همانند شکل ۶ هستند)



شکل ۱۱- نمونه‌های گنبد‌های آداکیتی چکنه (جنوب قوچان) در نمودار Al_2O_3 در برابر SiO_2 (Wang *et al.*, 2006a) (نمادها همانند شکل ۶ هستند)



شکل ۱۲- موقعیت نمونه‌های گنبدی‌های آداکیتی چکنه (جنوب قوچان) در نمودار SiO_2 در برابر Yb (Wang *et al.*, 2006a) (نمادها همانند شکل ۶ هستند)

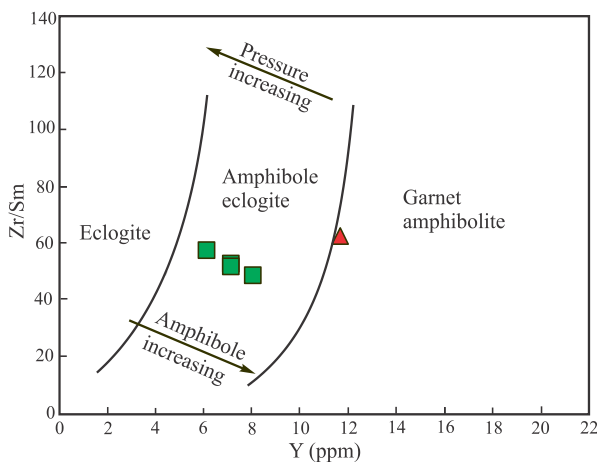


شکل ۱۳- موقعیت نمونه‌های گنبدی‌های آداکیتی چکنه (جنوب قوچان) در نمودار Mg# در برابر SiO_2 در محدوده آداکیت‌های پدیدآمده از ذوب سنگ‌کره اقیانوسی فرورونده (Wang *et al.*, 2006a) و آداکیت‌های حاصل از پنجره اسلب (Eyuboglu *et al.*, 2012) (نمادها همانند شکل ۶)

al., 2014, 2015a, 2015b; Jamshidi, 2015; Gardideh *et al.*, 2018) بررسی کرده‌اند و داده‌های شماری از این پژوهشگران نیز به شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ افزوده شده است. علت

خوشبختانه در سال‌های اخیر گنبدی‌های جنوب منطقه چکنه و اطراف سبزوار را بسیاری از پژوهشگران (مانند: Ghasemi, 2009; Tanha, 2009; Fathabadi, 2014; Jamshidi *et al.*, 2010)

گرفته است. از این‌رو، تهی‌شدگی این سنگ‌ها از HREE و Y به‌همراه مقادیر بالای نسبت Sr/Y در آنها (جدول ۲)، نشانه حضور گارنت به‌عنوان فاز کانیایی بجا مانده در محل خاستگاه ماگما در هنگام ذوب‌بخشی فشار بالاست (Rapp *et al.*, 2006). تهی‌شدگی از عنصرهای HFS (مانند: Nb و Ti) در این سنگ‌ها نیز نشان‌دهنده حضور فازهای کانیایی بجا مانده معمول (مانند: مونازیت، آپاتیت، اسفن، روتیل، ایلمنیت و آمفیبول پارگازیتی تیتانیم‌دار) در پوسته اقیانوسی دگرگون‌شده گارنت آمفیبولیتی / اکلوزیتی در سنگ خاستگاه ماگماست (Xiong *et al.*, 2005). این نکته با جایگیری این سنگ‌ها در محدوده اکلوزیت آمفیبول‌دار و گارنت آمفیبولیت نیز سازگار است (شکل ۱۴).



شکل ۱۴- جایگاه نمونه‌های گنبد‌های آداکیتی منطقه چکنه (جنوب قوچان) در نمودار Y در برابر Zr/Sm (Deng *et al.*, 2017)

همچنین، همان‌گونه که پیشتر گفته شد، با افزایش SiO₂ در سنگ‌های آداکیتی منطقه چکنه، مقدار Yb آنها کم می‌شود که این نکته نشان‌دهنده خاستگاه گرفتن ماگمای سازنده این سنگ‌ها از ذوب‌بخشی سنگ‌های گارنت و آمفیبول‌دار (اکلوزیت

انتخاب داده‌های این پژوهشگران، بررسی‌های کامل‌تر آنها در منطقه و داشتن نسبت‌های ایزوتوپی ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr و ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd افزون‌بر داده‌های عنصرهای اصلی، کمیاب و سن‌سنجی است. همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، سنگ‌های آداکیتی منطقه چکنه در محدوده داده‌های Ghasemi و همکاران (۲۰۱۰) و Jamshidi و همکاران (۲۰۱۴، ۲۰۱۵a، ۲۰۱۵b) جای گرفته‌اند. از این‌رو، برای سنگ‌های آداکیتی منطقه چکنه نیز خاستگاهی همانند آن گنبد‌ها (یعنی ذوب سنگ‌کره اقیانوسی فرورونده) در نظر گرفته می‌شود. همچنین، از آنجایی که ژرفای موهو در منطقه بررسی‌شده از ۴۴ کیلومتر کمتر گزارش شده است (Dehghani and Makris, 1983) و به‌باور Wang و همکاران (۲۰۰۵)، پوسته زیرین مسئول پیدایش ماگماهای آداکیتی چکنه نبوده است؛ زیرا به‌باور نامبردگان، برای پیدایش چنین آداکیت‌هایی به ضخامت بیشتر از ۵۵ کیلومتر نیاز است. افزون‌بر آن، آداکیت‌های پدیدآمده از ذوب پوسته زیرین، K₂O > Na₂O و آنومالی منفی Sr دارند که برخلاف این ویژگی‌ها در سنگ‌های آداکیتی منطقه چکنه هستند (جدول ۱؛ شکل ۷). از این‌رو، اگرچه سنگ‌های بررسی‌شده گاه در بخش مشترک آداکیت‌های پدیدآمده از ذوب سنگ‌کره اقیانوسی فرورونده و پوسته زیرین جای گرفته‌اند، برپایه شواهد یادشده، داشتن خاستگاه پوسته زیرین برای آنها منتهی است.

برپایه ویژگی‌های یادشده، گمان می‌رود ماگمای مادر سنگ‌های آداکیتی منطقه چکنه از ذوب‌بخشی سنگ‌کره اقیانوسی فرورونده منشأ

زیرکن است که Gardideh و همکاران (۲۰۱۸) آن را انجام داده‌اند.

سنگ‌های آداکیتی بررسی شده مقدرهای $\epsilon\text{Nd}_{10\text{Ma}}$ مثبتی (۲/۹۵ تا ۴/۸) دارند و در نمودار تغییر $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه در برابر ϵNd ، در محدوده MORB و نزدیک به محدوده آداکیت‌های پدیدآمده از ذوب بخشی سنگ کرة اقیانوسی فرورونده و سنگ کرة گوشته‌ای زیر پوسته ضخیم شده جای می‌گیرند (شکل ۱۵). همچنین، این سنگ‌ها دور از آداکیت‌های حاصل از ذوب پوسته قاره‌ای زیرین ورقه‌ورقه شده (delaminated crust) و محدوده‌های پوسته زیرین و بالایی جای گرفته‌اند (Wang et al., 2015). این نکته نشان می‌دهد آداکیت‌های منطقه چکنه به احتمال بالا از ذوب سنگ کرة اقیانوسی فرورونده پدید آمده‌اند؛ زیرا آداکیت‌هایی پدیدآمده از ذوب پوسته زیرین ϵNd (۲- تا ۵-) و نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه بالایی (۰/۷۰۷۲ تا ۰/۷۰۷۵) دارند (Wang et al., 2005). نمونه‌های بررسی شده در نمودار $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ در برابر Rb (Drummond et al., 1996) نیز در میدان آداکیت‌های برخاسته از پوسته اقیانوسی فرورونده سنوزویک جای گرفته‌اند (شکل ۱۶).

نسبت‌های ایزوتوپی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه گنبدیهای آداکیتی منطقه چکنه همانند نسبت‌های گنبدیهای آداکیتی مناطق سبزوآر-کاشمر-قوچان (۰/۷۰۳۸ تا ۰/۷۰۴۶؛ Jamshidi و همکاران، ۲۰۱۴) هستند. این مقدرها، گرچه کم هستند، از میانگین این نسبت در ماگماهای برخاسته از گوئه گوشته‌ای در پهنه‌های فرورانش (Sun and McDonough, 1989) بالاتر هستند (۰/۷۰۳۵). از این رو، گمان می‌رود

آمفیبول‌دار و گارنت‌آمفیبولیت) است (شکل ۱۲؛ Dokuz et al., 2006).

زمین‌شیمی ایزوتوپی

در کل، سنگ‌های آداکیتی از سه خاستگاه متمایز سرچشمه می‌گیرند:

(۱) ذوب بخشی ورقه اقیانوسی فرورونده با ترکیب بازالتی که مذاب پدیدآمده در هنگام بالآمدن با پریدوتیت گوئه گوشته‌ای اندکی واکنش داده است؛

(۲) ذوب بخشی پوسته قاره‌ای زیرین در ژرفای بیشتر از ۵۵ کیلومتر؛

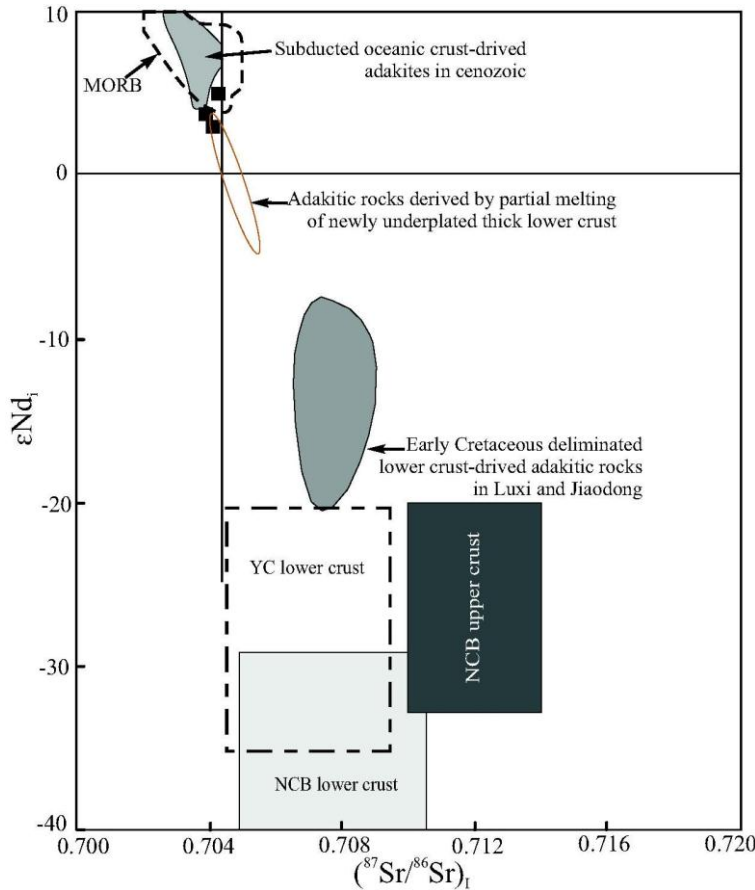
(۳) ذوب گوئه گوشته‌ای پریدوتیتی متاسوماتیسم شده که ترکیب آن با سیال‌ها و مذاب‌های فلسیک پدیدآمده از ذوب سنگ کرة اقیانوسی فرورونده تحول پیدا کرده است (Martin, 1999; Martin et al., 2005; Wang et al., 2005; Wang et al., 2006a, b).

همان‌گونه که پیشتر گفته شد، ماگمای مادر سنگ‌های آداکیتی منطقه چکنه از نوع سرشار از سیلیس (HSA) بوده است که با محل خاستگاه شماره ۱ همخوانی دارد.

برای اطمینان بیشتر درباره ترکیب محل خاستگاه این سنگ‌ها، از داده‌های ایزوتوپی Sm-Nd و Rb-Sr سنگ کل نیز بهره گرفته شد. مقدرهای نسبت $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{10\text{Ma}}$ در این سنگ‌ها در محدوده ۰/۵۱۲۸ تا ۰/۵۱۲۹ و مقدرهای نسبت $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{10\text{Ma}}$ آنها نیز از ۰/۷۰۳۹ تا ۰/۷۰۴۲ متغیر است (جدول ۳). سن ۱۰ میلیون سال پیش که برای به دست آوردن مقدرهای اولیه $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ، $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ و ϵNd به کار برده شده است، برپایه سن‌سنجی‌های جدید روی کانی‌های

و آلودگی ماگمای یادشده با مواد پوسته قاره‌ای در هنگام بالا آمدن و جایگزینی پدید آمده‌اند.

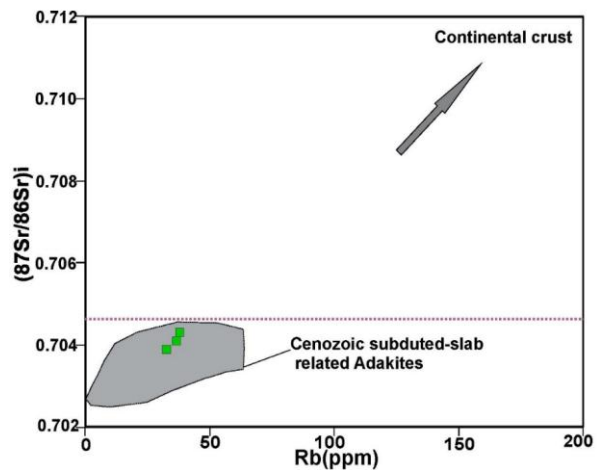
ماگمای سازنده سنگ‌های منطقه از ذوب بخشی یک سنگ‌کره اقیانوسی فرورونده و رسوب‌های روی آن در یک پهنه فرورانشی در مرز فعال قاره



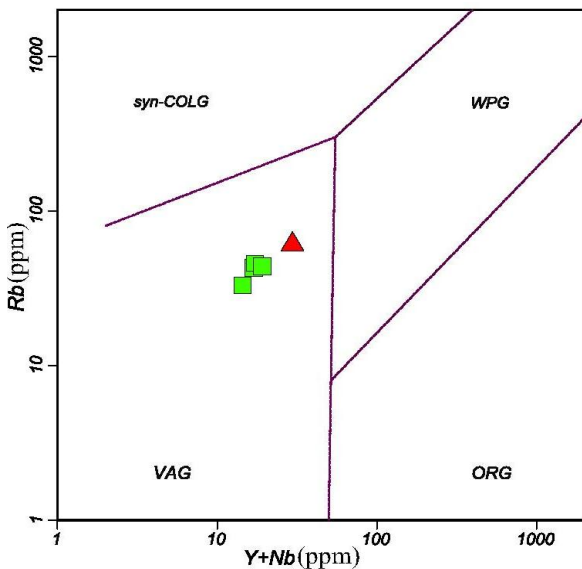
شکل ۱۵- جایگاه سه نمونه برگزیده از سنگ‌های آداکیتی منطقه چکنه (جنوب قوچان) در نمودار نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه در برابر $\epsilon\text{Nd}_{10\text{Ma}}$ (این شکل با تلفیق نمودارهای پیشنهادی Wang و همکاران (۲۰۱۵) و Liu و همکاران (۲۰۰۹) رسم شده است)

محیط زمین‌ساختی

فرایندهایی مانند دگرسانی پس از جایگزینی شاید ویژگی‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی اولیه سنگ‌های آتشفشانی را تغییر دهند و در بازسازی شرایط دیرینه زمین‌ساخت آنها مشکلاتی پدید آورند. با وجود این، به‌کارگیری نمودارهای محیط زمین‌ساختی بر پایه عنصرهای نامتحرک کارگشاست. از این‌رو، نمودار دومتغیره Y+Nb در برابر Rb (شکل ۱۷) برای شناخت جایگاه زمین‌ساختی و خاستگاه احتمالی پیدایش ماگمای کالک‌آلکان سازنده سنگ‌های آداکیتی منطقه چکنه به کار برده شد. در

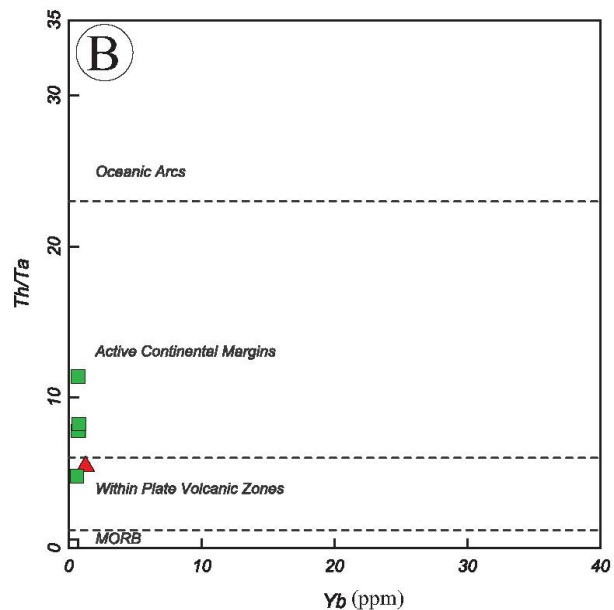
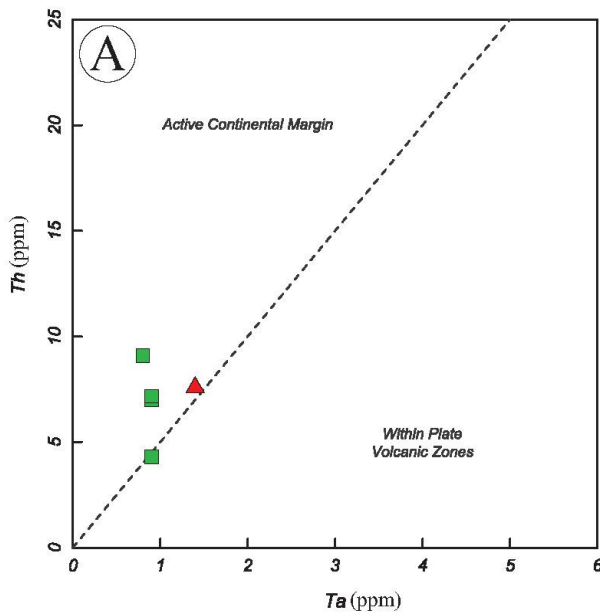


شکل ۱۶- جایگاه سه نمونه برگزیده از سنگ‌های آداکیتی منطقه چکنه (جنوب قوچان) در نمودار Rb در برابر $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Drummond et al., 1996)



شکل ۱۷- جایگاه سنگ‌های گنبدی‌های آداکیتی منطقه چکنه (جنوب قوچان) در نمودار شناسایی پهنه زمین‌ساختی پیدایش ماگما (Pearce et al., 1984) (نمادها همانند شکل ۶ هستند)

این نمودار، نمونه‌های بررسی شده در گستره گرانیتوئیدهای کمان آتشفشانی جای گرفته‌اند. همچنین، در این راستا نمودارهای شناسایی پهنه زمین‌ساختی پیدایش ماگما نیز به کار برده شدند (شکل ۱۸). در همه آنها، نمونه‌های بررسی شده ویژگی‌های حاشیه فعال قاره‌ای را نشان می‌دهند. این پهنه‌های زمین‌ساختی با جهت شیب سنگ‌کره اقیانوسی نئوتتیس شاخه سبزوار که در هنگام فروانش به سوی شمال خاوری و به زیر لبه خاوری رشته کوه‌های البرز (پهنه بینالود) بوده است، کاملاً سازگار هستند. گمان می‌رود سنگ‌های آداکیتی منطقه چکنه در پی ذوب سنگ‌کره اقیانوسی در ۱۰ میلیون سال پیش (میوسن) پدید آمده‌اند.



شکل ۱۸- نمونه‌های گنبدی‌های آداکیتی منطقه چکنه (جنوب قوچان) در نمودارهای شناسایی پهنه زمین‌ساختی پیدایش ماگما (Schandl and Gorton, 2002) (نمادها همانند شکل ۶ هستند)

(مانند: تهی‌شدگی از HREE و Y به همراه مقادیرهای بالای St/Y) نشان‌دهنده پیدایش ماگمای مادر این سنگ‌ها در فشار بالا هستند. همچنین، تهی‌شدگی از عنصرهای HFS (مانند: Nb و Ti) در این سنگ‌ها نیز حضور فازهای کنیایی بجامانده دیرگداز (مانند روتیل و

نتیجه‌گیری

سنگ‌های گنبدی‌های آذرین منطقه چکنه ترکیب داسیت و تراکیت دارند و سرشت کالک‌آلکان و سرشت آداکیتی پرسیلیس پدیدآمده از ذوب سنگ‌کره اقیانوسی فرورونده هستند. ویژگی‌های زمین‌شیمیایی این سنگ‌ها

این سنگ‌ها نیز این نکته را تایید می‌کنند.

سپاس‌گزاری

نگارندگان از حوزه‌ی معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود برای حمایت‌های مالی و معنوی از انجام این پژوهش سپاس‌گزاری می‌کنند.

آمفیبول تیتانیم‌دار) در محل خاستگاه را نشان می‌دهد. همه این ویژگی‌ها بازگوکننده‌ی پیدایش ماگمای سازنده‌ی سنگ‌های آداکیتی یادشده از ذوب‌بخشی خاستگاهی گارنت‌آمفیبولیتی یا اکلوژیت آمفیبول‌دار حاصل از دگرگونی سنگ‌کره‌ی اقیانوسی فرورونده‌ی سبزوار در زمان میوسن است. نسبت‌های اولیه $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$

منابع

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monie, P., Meyer, B. and Wortel, R. (2011) Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazine* 148(5-6): 692-725.
- Aghabazzaz, F. (2012) Petrogenesis of calc-alkaline and adakitic volcanic rocks in north Firouzeh, west Neyshabour. MSc thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (in Persian).
- Aghanabati, A. (2004) Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).
- Baker, D. R. (1998) Granitic melt viscosity and dike formation. *Journal of Structural Geology* 20(9-10): 1395-1404.
- Berberian, F., Muir, I. D., Pankhurst, R. J. and Berberian, M. (1982) Late Cretaceous and early Miocene Andean-type plutonic activity in northern Makran and Central Iran. *Journal of the Geological Society* 139(5): 605-614.
- Best, M. G. (2003) *Igneous and Metamorphic Petrology*. 2nd Edition. Oxford Blackwell Science.
- Boynton, W. V. (1984) Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: *Developments in geochemistry* (Ed. Henderson, P.) 2: 63-114.
- Defant, M. J. and Drummond, M. S. (1990) Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature* 347(6294): 662-665.
- Defant, M. J. and Kepezhinkas, P. (2001) Evidence suggests slab melting in arc magmas. *EOS, Transactions, American Geophysical Union* 82(6): 62-70.
- Dehghani, G. A. and Makris, J. (1983) The gravity field and crustal structure of Iran. *Geodynamics Project (Geotraverse) in Iran*. Geological Survey of Iran, Tehran, Report No. 51: 51-68.
- Deng, J., Yang, X., Qi, H., Zhang, Z. F., Mastoi, A. S. and Sun, W. (2017) Early Cretaceous high-Mg adakites associated with Cu-Au mineralization in the Cebu Island, Central Philippines: Implication for partial melting of the paleo-Pacific Plate. *Ore Geology Reviews* 88: 251-269.
- Dokuz, A., Tanyolu, E. and Genç, S. (2006) A mantle and a lower crust-derived bimodal suite in the Yusufeli (Artvin) area, NE Turkey: trace element and REE evidence for subduction-related rift origin of Early Jurassic Demirkent intrusive complex. *International Journal of Earth Sciences* 95(3): 370-394.
- Drummond, M. S., Defant, M. J. and Kepezhinkas, P. K. (1996) Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences* 87(1-2): 205-215.
- Eyuboglu, Y., Chung, S. L., Santosh, M., Dudas, F. O. and Akaryal, E. (2011) Transition from shoshonitic to adakitic magmatism in the Eastern Pontides, NE Turkey: implications for slab window melting. *Gondwana Research* 19(2): 413-429.

- Eyuboglu, Y., Santosh, M., Yi, K., Bektas, O. and Kwon, S. (2012) Discovery of Miocene adakitic dacite from the Eastern Pontides Belt (NE Turkey) and a revised geodynamic model for the late Cenozoic evolution of the Eastern Mediterranean region. *Lithos* 146: 218-232.
- Fatahi, A. A. (2003) Petrogenesis, facies and eruption mechanism of Markoh volcano, Sarvelayat area, SW Quchan. M.Sc. thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran (in Persian).
- Fathabadi, F. (2014) Geology, petrology and geochemistry of subvolcanic domes of Moghiseh area (SW-Sabzevar). M.Sc. thesis, Shahrood University OF Technology, Shahrood, Iran (in Persian).
- Foley, F., Norman, J., Pearson, N.J., Rushmer, T., Turner, S. and Adam, J. (2013) Magmatic evolution and magma mixing of Quaternary adakites at Solander and little Solander Islands, New Zealand. *Journal of Petrology* 54(4): 703-744.
- Gaetani, G. A. (2004) The influence of melt structure on trace element partitioning near the peridotite solidus. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 147(5): 511-527.
- Gardideh, S., Ghasemi, H. and Sadeghian, M. (2018) Geochemistry, Sr-Nd isotopic ratio and U-Pb dating of Neogene Adakitic Domes of Quchan-Esfarayen magmatic arc, Northeast of Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 26(2): 455-478 (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).
- Jamshidi, K. (2015) Petrology, geochemistry and petrogenesis of north Bahshtin Adakitic Domes, Sabzevar. Ph.D. thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran (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. *Iranian Journal of Petrology* 6(23): 21-138 (in Persian).
- Jamshidi, K., Ghasemi, H. and Sadeghian, M. (2014) Petrology and geochemistry of the Sabzevar post-ophiolitic high silica adakitic rocks. *Iranian Journal of 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, NE Iran. *Solid Earth Discussions* 6(2): 49-72.
- Kay, R. W. (1978) Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific Ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 4(1-2): 117-132.
- Kirkpatrick R. G. (1977) Nucleation and growth of plagioclase, Makaopu and Alane lava lakes Kilauea volcano, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin* 88: 78-84.
- Kretz, R. (1983) Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist* 68(1-2): 277-279.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A. and Zanettin, B. (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology* 27(3): 745-750.
- Liu, S., Hu, R. Z., Gao, S., Feng, C. X., Yu, B. B., Qi, Y. Q., Wang, T., Feng, G. Y. and Coulson, I. M. (2009) Zircon U-Pb age, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of adakitic volcanic rocks from Jiaodong, Shandong province, eastern China: constraints on petrogenesis and implications. *Journal of Asian Earth Sciences* 35(5): 445-458.
- Martin, H. (1999) 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): 1-24.
- Mielke, P. and Winkler, H. G. F. (1979) Eine bessere Berechnung der Mesonorm fuer granitische Gesteine. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte* 10: 471-480.

- Mohammadi, E., Ghorbani, G. and Shafaii Moghadam, H. (2015) Geochemistry and Petrogenesis of the Adakites in the Southern Domains of the Northern Sabzevar Ophiolites; With Emphasis on Sr-Nd-Pb Isotopes Results. *Iranian Journal of Geoscience* 24(95): 51-62 (in Persian).
- Omrani, J., Agard, P., Witechurch, H., Benoit, M., Prouteau, G. and Jolivet, L. (2008) Arc magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: a new report of adakites and geodynamic consequences. *Lithos* 106(3): 380-398.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W. and Tindle, A. J. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rock. *Journal of Petrology* 25: 956-83.
- Pourlatifi, A. (2006) Akhlamad Geological Quadrangle Map 1:100000, No. 7763, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Rapp, R. P., Shimizu, N., Norman, M. D. and Applegate, G. S. (2006) Reaction between slab derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology* 160(4): 335-356.
- Rossetti, F., Nasrabad, M., Vignaroli, G., Theye, T., Gerdes, A., Razavi, S. M. H. and Moin Vaziri, H. (2010) Early Cretaceous migmatitic mafic granulites from the Sabzevar range (NE Iran): Implications for the closure of the Mesozoic peri-Tethyan oceans in central Iran. *Terra Nova* 22(1): 26-34.
- Schandl, E. S. and Gorton, M. P. (2002) Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology* 97(3): 629-642.
- Shabanian, E., Acocella, V., Gioncada, A., Ghasemi, H. and Bellier, O. (2012) Structural control on volcanism in intraplate post collisional settings: Late Cenozoic to Quaternary examples of Iran and Eastern Turkey. *Tectonics* 31(3): Tc3013.
- Shafaii Moghadam, H. S., Whitechurch, H., Rahgoshay, M. and Monsef, I. (2009) Significance of Nain-Baft ophiolitic belt (Iran): Short-lived, transtensional Cretaceous back-arc oceanic basins over the Tethyan subduction zone. *Comptes Rendus Geoscience* 341(12): 1016-1028.
- Shand, S. J. (1943) *Eruptive Rocks*. 2nd Edition, John Wiley, New York, US.
- Soltani Dehnavi, A. (2010) Petrology and Geochemistry of Tertiary volcanic rocks from NW Neyshabur, Iran. M.Sc. thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (in Persian).
- Stewart, M. L. and Pearce, T. H. (2004) Sieve-textured plagioclase in dacitic magma: Interference imaging results. *American Mineralogist* 89(2-3): 348-351.
- Sun, S. S. and McDonough, W. S. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications 42(1): 313-345.
- Taheri-Sarteshnizi, A. (2017) Geochemistry and Isotopic Geology of Dacite Domes of Chakaneh Area. MSc thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran (in Persian).
- Tanha, A. (2009) Petrogenesis of Neogene Igneous Rocks in the North Anbarabad (Mashkan). MSc thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran (in Persian).
- Wang, H., Fu, B., Xu, Z., Lu, X., Lu, J., Li, H., Qu, W., Yang, X., Chen, W. and Zhang, J. (2015) Geology, geochemistry, and geochronology of the Wangjiazhuang porphyry-breccia Cu (-Mo) deposit in the Zouping volcanic basin, eastern North China Block. *Ore Geology Reviews* 67: 336-353.
- 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* 33(6): 465-468.
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J. F., Zhao, Z. H., Jian, P., Xiong, X. L., Bao, Z. W., Lid., C. F. and Bai, Z. H. (2006a) Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos* 89(3): 424-446.

- Wang, Q., Xu, J. F., Jian, P., Bao, Z. -W., Zhao, Z. H., Li, C. F., Xiong, X. L. and Ma, J. L. (2006b) Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology* 47(1): 119–144.
- Winchester, J. A. and Floyd, P. A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical geology* 20: 325-343.
- Xiong, X. L., Adam, J. and Green, T. H. (2005) Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: implications for TTG genesis. *Chemical Geology* 218(3-4): 339–359.