

# سنگ‌شناسی و ژئوشیمی داسیت‌های آداکیتی کالدرای نئوژن قره‌چای، جنوب شرق قوچان

مرضیه اسدی آورگانی<sup>۱</sup>، مهدی رضائی کهخانی<sup>۲</sup> و حبیب‌الله قاسمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه پترولوژی، ژئوشیمی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران  
<sup>۲</sup>استادیار، گروه پترولوژی، ژئوشیمی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران  
<sup>۳</sup>استاد، گروه پترولوژی، ژئوشیمی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۳۱

## چکیده

کالدرای نئوژن قره‌چای در ۳۰ کیلومتری جنوب خاور قوچان، در زون بینالود واقع شده است. سنگ‌های آتشفشانی این کالدرای دارای ترکیب غالب داسیتی و بافت‌های متنوع پورفیری، میکرولیتی پورفیری، غربالی، جریان و گلوپورپورفیری هستند و از کانی‌های پلاژیوکلاز و آمفیبول تشکیل شده‌اند. نمودارهای چندعنصری و بهنجار شده نسبت به ترکیب کندریت و گوشته اولیه برای این سنگ‌ها، نشان‌دهنده غنی‌شدگی نسبی آنها از عنصرهای خاکی نادر سبک و لیتوفیل بزرگ‌یون (LILE) و تهی‌شدگی نسبی آنها از عنصرهای خاکی نادر سنگین (HREE) و عنصرهای با شدت میدان بالا (HFSE) است. سرشت کالک‌آلکان و ناهنجاری منفی آشکار در عنصرهای با شدت میدان بالا (مانند P، Ti، Nb، Ta)، آنومالی مثبت Pb، مقادیر زیاد Sr، Sr/Y و Na<sub>2</sub>O / K<sub>2</sub>O و مقدارهای کم K و MgO در این سنگ‌ها نشان‌گر ویژگی‌های ماگمای آداکیتی پرسیلیس (HSA) مرتبط با محیط‌های حاشیه فعال قاره‌ای است. ماگمای سازنده سنگ‌های کالدرای قره‌چای از ذوب بخشی سنگ منشأ آکلوزیتی حاصل از دگرگونی لیتوسفر اقیانوسی فرورانده نئوتیس سبزوار به زیر لبه جنوبی پهنه البرز خاوری در نئوژن پدید آمده‌اند. گمان می‌رود گسل‌های بزرگ امتدادلغز قوچان و دره گز سبب ایجاد یک محیط تراکشی شده و نقش مهمی در تشکیل این کالدرای داشته‌اند.

**کلیدواژه‌ها:** داسیت، ژئوشیمی، آداکیت، کالدرای، قره‌چای، قوچان.

\*نویسنده مسئول: مهدی رضائی کهخانی

E-mail: Rezaei@shahroodut.ac.ir

## ۱- پیش‌نوشتار

مارکوه در جنوب باختر قوچان پرداخت. گنبد نیمه‌عمیق مارکوه از بزرگ‌ترین گنبد‌های آداکیتی منطقه جنوب قوچان در غرب کالدرای آتشفشانی قره‌چای است. تنها (۱۳۸۸) با مطالعه دوباره گنبد مارکوه و دیگر گنبد‌های نیمه‌عمیق منطقه جنوب قوچان، برای اولین بار ماهیت آداکیتی ماگماتیسیم نوار ماگمایی جنوب قوچان را به اثبات رسانید. قاسمی و همکاران (۱۳۸۹) ضمن بیان دقیق سرشت زمین‌شیمیایی و سن‌سنجی پتاسیم- آرگون سنگ‌های ماگمایی این نوار، آنها را از نوع آداکیتی و مرتبط با مراحل نهایی فرورانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتیس سبزوار به زیر لبه جنوبی البرز خاوری (بینالود) در نئوژن دانسته‌اند. آقاباز (۱۳۹۱) پترولوژی و ژئوشیمی سنگ‌های داسیتی و ریوداسیتی آداکیتی شمال غرب نیشابور را بررسی کرده است. جمشیدی و همکاران (۱۳۹۳ و ۱۳۹۴) سنگ‌شناسی، ژئوشیمی و سن‌سنجی U-Pb بر روی بلورهای زیرکن سنگ‌های آداکیتی پرسیلیس پساافیولیتی شمال باشتین را در منطقه سبزوار بررسی و سن دقیق تشکیل آنها را ائوسن میانی- بالایی ذکر کرده‌اند. فتح‌آبادی (۱۳۹۳) زمین‌شناسی، پترولوژی و ژئوشیمی گنبد‌های نیمه‌عمیق منطقه مقیسه واقع در جنوب باختر سبزوار را مطالعه نموده و آنها را همانند سنگ‌های مشابه در شمال سبزوار از نوع آداکیتی و مرتبط با ماگماتیسیم آداکیتی پساافیولیتی حوضه سبزوار دانسته است.

گردیده و همکاران (۱۳۹۷) با بهره‌گیری از مطالعات زمین‌شیمی عناصر اصلی، کمیاب، کمیاب خاکی و نسبت‌های ایزوتوپی Sm-Nd و Rb-Sr، شیمی کانی و سن‌سنجی U-Pb بر روی بلورهای زیرکن، ماهیت آداکیتی ماگماتیسیم فرورانش حاشیه فعال قاره‌ای سنگ‌های ماگمایی نوار قوچان- اسفراین را در زمان میوسن- پلیوسن پایانی به اثبات رسانده و آن را ناشی از ذوب بخشی ورقه اقیانوسی فرورانده شده سبزوار در رخساره آمفیبولیت/ آکلوزیت در مراحل پایانی فرورانش دانسته‌اند. رضائی کهخانی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از شیمی سنگ کل و نسبت‌های ایزوتوپی Sm-Nd و Rb-Sr سنگ کل گنبد‌های داسیتی آداکیتی منطقه چکنه در جنوب خاور قوچان، ماگمای والد سازنده این سنگ‌ها را به ذوب لیتوسفر اقیانوسی

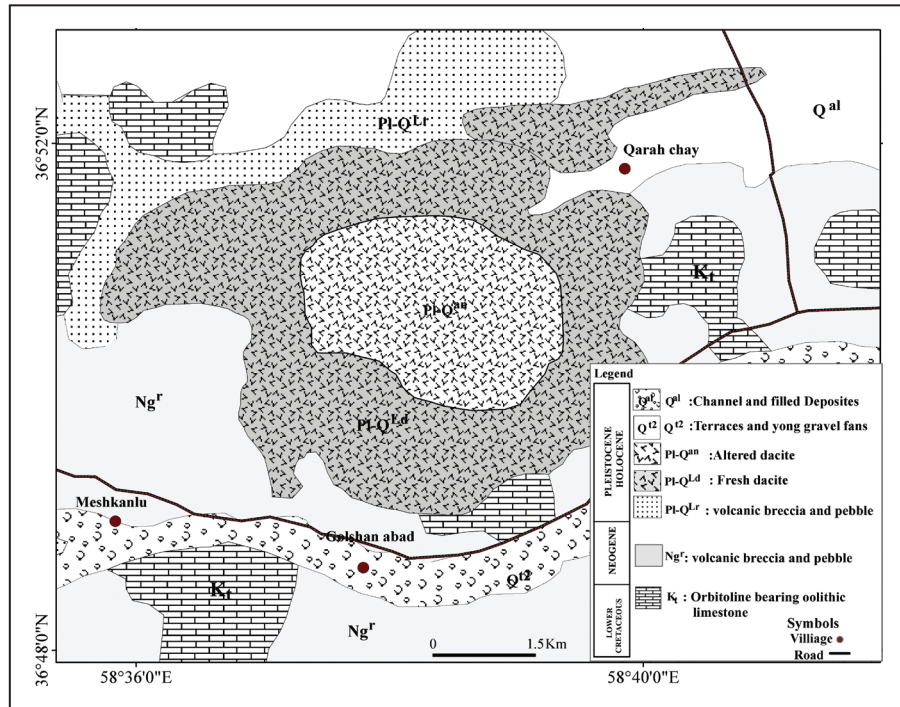
(Castillo 2006 and 2012) در جدیدترین تعریف خود از آداکیت‌ها، این سنگ‌ها را شامل سنگ‌های آذرین درونی و بیرونی غنی از سیلیس با نسبت‌های Sr/Y و La/Yb بالا می‌داند که ماگمای سازنده آنها از ذوب بخشی لیتوسفر اقیانوسی جوان فرورانده شده به زیر پوسته قاره‌ای یا لیتوسفر اقیانوسی در مناطق فرورانش حاشیه قاره یا جزایر کمانی منشأ می‌گیرد. آداکیت‌ها به‌طور معمول سنگ‌های آذرین آمفیبول و پلاژیوکلازدار سرشار از سیلیس (بیشتر از ۵۶ درصد وزنی) هستند که میزان اکسیدهای آلومینیم و سدیم آنها به ترتیب بیشتر از ۱۵ و ۳/۵ درصد وزنی است. داشتن مقدارهای Sr بیشتر از ۳۰۰ ppm، Y کمتر از ۱۸ ppm، مقدار  $wt\% > ۳/۵ Na_2O$ ،  $wt\% > ۵/۷ K_2O/Na_2O$  پایین (۴۲/۱~)، نسبت Sr/Y بزرگ‌تر از ۲۰ و نسبت La/Yb بیشتر از ۲، از دیگر ویژگی‌های شاخص آداکیت‌هاست. آنها در مقایسه با دیگر سنگ‌های آذرین معمول موجود در حاشیه فعال قاره‌ای مقادیر Y و Yb کمتری دارند (Martin, 1999).

در کرانه شمال خاوری نوار افیولیتی سبزوار و در لبه جنوبی پهنه بینالود، کمان ماگمایی جوانی در جنوب قوچان وجود دارد. این کمان ماگمایی دربردارنده سنگ‌های آتشفشانی با سرشت غالباً کالک‌آلکان 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 (در جنوب قوچان)، از ائوسن تا پلیو- پلیستوسن تغییر می‌کند. از قدیمی‌ترین مطالعات زمین‌شناختی مرتبط با موضوع حاضر صورت گرفته در منطقه می‌توان به مطالعات پژوهشگران پروژه ژئوتراورس (Spies et al., 1983; Bauman et al., 1983) اشاره کرد که در غالب گزارش شماره ۵۱ سازمان زمین‌شناسی کشور انتشار یافته است. این پژوهشگران به معرفی ماگماتیسیم کرتاسه- نئوژن منطقه سبزوار پرداخته و آن را از نوع کالک‌آلکان مرتبط با فرایندهای فرورانشی حوضه نئوتیس سبزوار دانسته‌اند. فتاحی (۱۳۸۲) برای اولین بار به مطالعه دقیق پتروژنز، رخساره‌ها و مکانیسم تشکیل گنبد نیمه‌عمیق

در این پژوهش برای اولین بار، پترولوژی و ژئوشیمی این کالدرا مورد بررسی دقیق قرار گرفته است (شکل ۱). امید است این تحقیق با حل قسمتی از مسائل زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه بتواند در روشن شدن ماگماتیسم آتشفشان‌های جوان موجود در ایران و به خصوص شمال شرق ایران نقش به‌سزایی داشته باشد.

فروانده شده با ماهیت مورب در رخساره اکلوتیت در زمان نئوژن نسبت داده‌اند. با وجود انجام این پژوهش‌های ارزشمند بر روی بسیاری از گنبد‌های آداکیتی نیمه‌عمیق منطقه سبزوار و نوار ماگمایی جنوب قوچان-اسفراین، اما تاکنون در مورد کالدرای قره‌چای هیچ مطالعه‌ای زمین‌شناسی و به‌ویژه پترولوژی صورت نگرفته؛ لذا

شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی کالدرای قره‌چای و مناطق اطراف آن. این نقشه بر اساس نمونه‌برداری‌های صورت گرفته در این پژوهش و نقشه زمین‌شناسی چهارگوش ۱:۱۰۰۰۰۰۰. اخمد تهیه شده است.



## ۲- زمین‌شناسی منطقه

سازندها را پوشانده است (شکل ۲- پ). بر اثر پستی دریا در کرتاسه زیرین، نهشته‌های ماسه‌سنگ قرمز رنگ سازند شوربچه و سپس در اثر پیشروی دریا در اواخر کرتاسه زیرین، نهشته‌های آهکی، شیلی و مارنی سازند تیرگان (شکل ۲- ت) در جنوب منطقه مورد مطالعه نهشته شده‌اند (امینی و خان‌ناظر، ۱۳۸۰؛ پورلطیفی، ۱۳۸۵).

کالدرای قره‌چای بخشی از پهنه ماگمایی شمال سبزوار- جنوب قوچان محسوب می‌شود که در ۳۰ کیلومتری جنوب خاور قوچان واقع شده است. قدیمی‌ترین سنگ‌های موجود در منطقه، شیل و ماسه‌سنگ‌های سازندهای کشف‌رود و چمن‌بید به سن ژوراسیک میانی هستند (شکل‌های ۲- الف و ب). سازند کربناته مزدوران (ژوراسیک بالایی)، این



«شکل ۲- الف) نمای دوری از شیل‌های سازند کشف‌رود با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگی؛ ب) سازند چمن‌بید در جنوب قوچان که از تناوب سنگ‌آهک و ماسه‌سنگ به سن ژوراسیک میانی تشکیل شده و در بعضی مناطق کنگلومرای پالئوسن به صورت دگرشیب روی آن قرار گرفته است؛ پ) سازند مزدوران متشکل از سنگ‌های کربناته آهک و دولومیت ضخیم لایه؛ ت) سنگ‌های آهکی سازند تیرگان.»



نظیر کنگلومرا، ماسه‌سنگ و مارن در حوضه‌های رسوبی منطقه نهشته شده‌اند و حرکات آلیی پسین موجب چین‌خوردگی ملایم این نهشته‌ها گردیده است (امینی و خان ناظر، ۱۳۸۰). حرکات کوهزایی بعد از پلیوسن و در اوایل کواترنر موجب چین‌خوردگی پایانی مناطق جنوب قوچان، آخرین تظاهرات ماگماتیسم و ایجاد شکل امروزی آن شده است (پورلطیفی، ۱۳۸۵). جوان‌ترین نهشته‌های موجود در منطقه مربوط به آبرفت‌های کم‌ارتفاع و پادگانه‌های آبرفتی هستند.

### ۳- پتروگرافی و روابط صحرایی

بر اساس مطالعات صحرایی و سنگ‌نگاری، سنگ‌های آتشفشانی کالدرای قره‌چای به صورت روانه‌های ایگنمبریتی و دارای ترکیب داسیتی هستند. سنگ‌های داسیتی با ظاهری سفید در مرکز کالدرا و خاکستری روشن در حاشیه کالدرا نمایان می‌باشند (شکل ۳). این سنگ‌ها دارای فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و اکسی‌هورنبلند بوده که در زمینه‌های میکروولیتی تا شیشه‌ای واقع شده‌اند. علت رنگ سفید سنگ‌های مرکز کالدرا به خاطر پدیده دگرسانی می‌باشد، به طوری که اغلب کانی‌های فرومیزین آنها به اکسیدهای آهن و تیتانیم و فلدسپارها به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند (شکل ۳).

به باور قاسمی و همکاران (۱۳۹۷ الف) و Kazemi et al. (2019) این حوضه به صورت یک حوضه کششی پشت کماتی فرافورانشی از تریاس بالایی- ژوراسیک زیرین شروع به تشکیل کرده؛ در خلال ژوراسیک بالایی- کرتاسه زیرین توسعه یافته؛ از کرتاسه بالایی به صورت پهنه فرورانش جزایر کماتی شروع به فرورانش کرده و در پالئوسن- ائوسن به طور کامل بسته شده است. ماگماتیسم حاصل از تولد، توسعه و تکامل، بسته شدن و تصادم در این حوضه از ژوراسیک (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۷ ب) تا کرتاسه (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۷ الف؛ Kazemi et al., 2019)، ائوسن (جمشیدی و همکاران، ۱۳۹۳، ۱۳۹۴؛ Ghasemi and Rezaei-Kahkhai, 2015; Jamshidi et al., 2015 and 2018)، الیگوسن (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۵)، میوسن (گردیده و همکاران، ۱۳۹۷) و حتی تا زمان پلیو- پلیستوسن (قاسمی و همکاران، ۱۳۸۹) ادامه داشته است. در ائوسن، سری‌های آتشفشانی- رسوبی در این حوضه بر جای گذاشته شده‌اند. حرکات کوهزایی ائوسن پایانی- الیگوسن سبب تغییر رژیم دریایی ائوسن به قاره‌ای شده و پس از آن، فعالیت‌های آتشفشانی فاز کوهزایی پیرنه در فاصله زمانی الیگوسن- میوسن تا پلیو- پلیستوسن، باعث ظهور ماگماتیسم حدواسط تا اسیدی به صورت گنبد‌های نیمه‌عمیق شده است (قاسمی و همکاران، ۱۳۸۹). در میوسن نیز رسوباتی



شکل ۳- تصویری از کالدرای قره‌چای و سنگ‌های داسیتی تشکیل دهنده آن. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اغلب سنگ‌های مرکزی آن کاملاً آتزه شده‌اند و به رنگ سفید دیده می‌شوند و سنگ‌های حاشیه آن به رنگ خاکستری دیده می‌شوند...

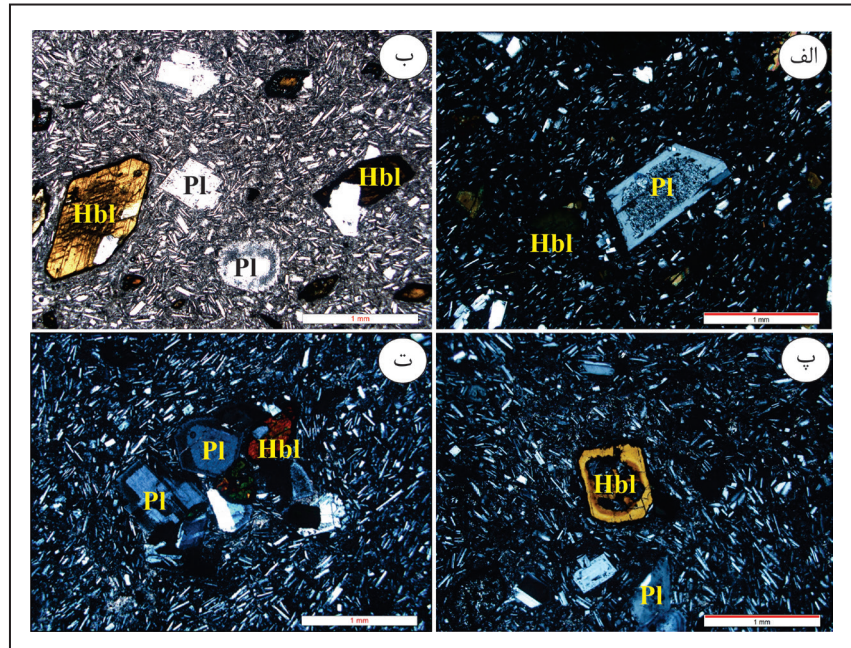
اکسیدان به هورنبلند بازالتی یا اکسی‌هورنبلند تبدیل می‌شود که احتمالاً این مکانیسم سبب تشکیل اکسی‌هورنبلند‌های کالدرای قره‌چای شده است. همچنین تعدادی از هورنبلندها بازالتی، خوردگی خلیجی نشان می‌دهند که حاکم بودن شرایط ناتعادلی در طی فرایند تبلور ماگما را تأیید می‌کند (شکل ۴- پ).

در سنگ‌های مورد مطالعه بافت گلومروپورفیری نیز مشاهده می‌شود (شکل ۴- ت). تجمع بلورها و تشکیل گلومروکریست می‌تواند ناشی از نطفه‌بندی ناهمگن این بلورها باشد (Kirkpatrick, 1977). نیروی انبساطی و تنش برشی باعث قطعه قطعه و برشی شدن بلورهای انباشتی در ماگما و تولید تجمع‌ها و لخته‌های گلومروپورفیری می‌شود که با صعود مذاب به طرف بالا آورده می‌شوند. اتصال فنوکریست‌ها در مذاب‌ها، احتمالاً به کاهش دما و افزایش گرانیروی ناشی از آن مرتبط است (Baker, 1998). در نهایت صعود و انجماد سریع مذاب‌های باقیمانده باعث انجماد زمینه و در برگرفتن تجمع‌های فنوکریستی و ایجاد بافت گلومروپورفیری می‌شود.

پلاژیوکلاز بافت غربالی و منطقه‌بندی نشان می‌دهد، که بیانگر حاکم بودن شرایط ناتعادلی در فرایند تبلور ماگماست. این بافت‌ها ممکن است بر اثر کاهش فشار ناشی از صعود، گاززدایی ماگما، بروز فرایند همرفت در آشیانه ماگمایی، اختلاط، آلایش و یا ورود ماگمای داغ جدید ایجاد شوند (شکل ۴- الف) (Stewart and Pearce, 2004). منطقه‌بندی ترکیبی در پلاژیوکلازهای کالدرای قره‌چای را می‌توان به تغییرات بزرگ‌مقیاس در پارامترهای دما، فشار، میزان آب و ترکیب مذاب نسبت داد، که احتمالاً با ورود ماگمای جدید به آشیانه ماگمایی همراه است (Foley et al., 2013).

تعدادی از هورنبلند‌های موجود در سنگ‌های مورد مطالعه دارای حاشیه سوخته هستند (شکل ۴- ب). وجود حاشیه سوخته در هورنبلندها را می‌توان به بالا بودن فوگاسته اکسیژن و فشار بخار آب در خلال صعود ماگما نسبت داد (Best, 2003). به اعتقاد Deer et al. (1986) ضمن صعود ماگمای داغ، هورنبلند در مجاورت با محیط

شکل ۴- الف) وجود بافت غربالی در فنوکریست‌های پلاژیوکلاز سنگ‌های داسیتی کالدرای قره‌چای؛ ب) اکسی‌هورنبلند با حاشیه اوپاسیتی شده (سوخته)؛ پ) هورنبلندهای بازالتی که دارای خوردگی خلیجی هستند و حکایت از شرایط غیر تعادلی ماگمای والد سنگ‌های تشکیل‌دهنده کالدرای قره چای دارند؛ ت) وجود بافت گلومروپورفیری ناشی از تجمع بلورهای پلاژیوکلاز و اکسی‌هورنبلند در سنگ‌های مورد مطالعه. علائم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans (2010) اقتباس شده‌اند.



#### ۴- روش آنالیز

(جدول ۱). دقت این دستگاه برای عناصر اصلی ۰/۰۵ درصد وزنی و برای عناصر کمیاب از ۰/۰۵ تا ۵ پی‌پی‌ام و برای عناصر کمیاب خاکی از ۰/۰۵ تا ۱ پی‌پی‌ام متغیر می‌باشد. در پایان داده‌های تجزیه‌ای بانرم‌افزارهای سنگ‌شناسی و اکسل پردازش شدند.

پس از انجام دقیق مطالعات پتروگرافی روی بیش از ۶۰ نمونه سنگی، ۸ نمونه سالم انتخاب و برای انجام آنالیز شیمیایی عناصر اصلی و کمیاب سنگ کل به روش XRF و ICP-MS به آزمایشگاه مطالعاتی شرکت زرآما (مشهد) ارسال شد

جدول ۱- نتایج آنالیز شیمیایی عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی نمونه‌های کالدرای قره‌چای. عناصر اصلی برحسب درصد وزنی (%wt) و عناصر کمیاب بر حسب ppm گزارش شده‌اند.

Sample	Ach-24	Ach-43	Ach-38	Ach-28	Ach-29	Ach-14	Ach-39	Ach-12
SiO <sub>2</sub>	66.05	66.23	67.19	67.2	67.35	67.6	67.85	68.29
TiO <sub>2</sub>	0.3	0.35	0.31	0.32	0.31	0.3	0.29	0.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.5	16.56	16.7	16.41	16.6	16.53	16.36	15.29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.4	2.68	2.47	2.47	2.48	2.41	2.34	2.4
MnO	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05
MgO	1.2	1.12	1.1	0.92	0.93	0.87	1.1	1.17
CaO	5.16	4.49	4.26	4.55	4.4	4.13	4.58	4.81
Na <sub>2</sub> O	4.80	4.93	4.62	4.83	5.05	4.53	4.95	4.53
K <sub>2</sub> O	1.35	1.84	1.8	1.86	1.84	1.75	1.57	1.40
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.15	0.14	0.13	0.13	0.11	0.13	0.17
LOI	1.66	1.55	1.23	1.21	0.8	1.66	0.77	0.91
Total	99.59	99.96	99.95	99.95	99.95	99.94	99.99	99.95
V	43	45	38	32	48	30	42	43
Cr	12	18	16	14	14	13	22	20
Co	12.5	18.9	14.3	10.2	13.7	33.2	15.6	13.8
Zn	32	38	33	33	30	32	33	33
Sn	0.8	1.1	0.9	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8
Ba	513	405	398	402	365	389	370	395
Sr	477.5	411.7	410.6	421.6	312.8	381.8	444	459.4
Rb	34	42	35	38	34	36	35	24
Nb	8.4	11.9	8.6	8.5	7.1	5.4	8.6	8
Y	8.1	9.7	7.6	8.1	7.3	7.6	7.9	8.1
Zr	87	109	24	62	56	86	84	88
Cs	0.9	1.1	0.9	0.6	1	0.5	1	0.7

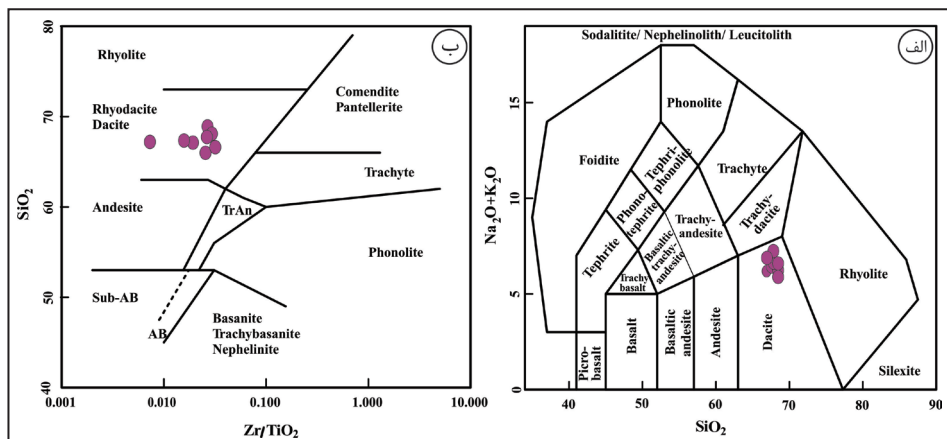
ادامه جدول ۱-

Sample	Ach-24	Ach-43	Ach-38	Ach-28	Ach-29	Ach-14	Ach-39	Ach-12
Hf	2.76	3.46	1.02	1.99	2.23	2.92	2.75	2.61
Ta	0.67	1.07	0.71	0.65	0.38	0.27	0.74	0.63
Th	5.17	6.91	4.83	5.5	4.97	5.17	5.31	4.93
U	1.62	2.1	1	1.4	1.37	1.4	1.6	1.4
La	15	18	17	17	13	14	15	16
Ce	26	34	23	27	20	24	26	26
Pr	2.79	3.74	2.79	2.95	2.56	2.52	2.84	2.58
Nd	11.9	14.9	12	11.9	11.1	10.9	12.1	11.3
Sm	2.06	2.66	1.98	2.03	1.96	1.93	2.06	1.92
Eu	0.54	0.73	0.55	0.54	0.55	0.52	0.55	0.54
Gd	1.47	2.1	1.47	1.51	1.39	1.3	1.47	1.42
Tb	0.28	0.35	0.27	0.27	0.27	0.26	0.29	0.27
Dy	1.85	2.3	1.72	1.86	1.76	1.74	1.82	1.74
Er	0.89	1.17	0.78	0.84	0.84	0.83	0.91	0.82
Tm	0.15	0.19	0.12	0.14	0.13	0.15	0.15	0.14
Yb	0.5	0.6	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Lu	0.13	0.17	0.1	0.11	0.11	0.12	0.13	0.12
Li	6	4	16	4	4	8	3	12
Pb	9	13	10	9	16	10	8	10
Zr/Sm	42.23	40.97	12.12	30.54	28.57	44.56	40.77	45.83
(La/Yb) <sub>N</sub>	20.23	20.23	38.20	28.65	21.19	23.60	25.28	26.97
Sr/Y	58.95	42.44	54.02	53.04	42.84	50.23	56.20	56.71
Y/Yb	16.2	16.16	25.33	20.25	18.25	19	19.75	20.25

### ۵- بحث

کم دگرسانی به صورت غیر متحرک باقی می ماند، می تواند ابزار مفیدتری جهت تعیین ترکیب و ماهیت این سنگ ها باشند. بر اساس نمودار طبقه بندی  $Zr/TiO_2$  در مقابل  $SiO_2$  سنگ های مورد مطالعه در محدوده داسیت واقع می شوند (شکل ۵-ب). در نمودار  $K_2O$  در مقابل  $SiO_2$  (Peccerillo and Taylor, 1976) (شکل ۶-الف) نیز سنگ های کالدرای قره چای در محدوده کالک آلکالن قرار می گیرند که با یافته های سایر پژوهشگران (از قبیل گردیده و همکاران، ۱۳۹۷؛ رضائی کهخانی و همکاران، ۱۳۹۷) بر روی گنبد های آداکیتی نیمه عمیق مناطق مجاور نیز سازگار است. مطابق دیاگرام A/CNK در مقابل A/NK (اقتباس شده از Shand, 1943) نمونه های کالدرای قره چای ماهیت متآلومین دارند (شکل ۶-ب).

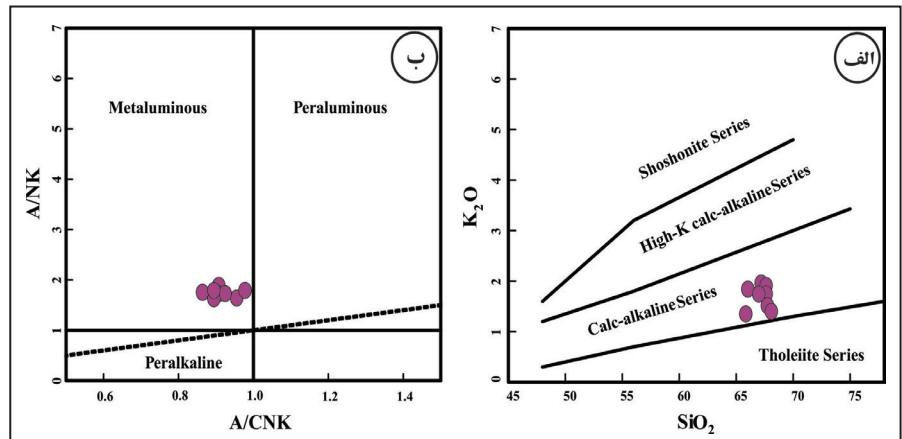
طیف تغییرات  $SiO_2$  در سنگ های کالدرای قره چای از ۶۶ درصد وزنی تا ۶۸ درصد وزنی متغیر می باشد. این سنگ ها در نمودار  $SiO_2$  در مقابل مجموع آلکالی ( $Na_2O+K_2O$ ) در قلمرو داسیت قرار می گیرند (شکل ۵-الف) (Middlemost, 1994) که با مشاهدات پتروگرافی (حضور فنوکریست فراوان پلاژیوکلاز و کانی های آب دار هورنبلند و بلورهای ریز کوارتز و ساندین) کاملاً مطابقت دارد. سنگ های قسمت مرکزی کالدرای قره چای کاملاً دگرسان شده اند و فقط قسمت کمی از این سنگ ها سالم می باشد (شکل ۳). از آنجایی که فرایند دگرسانی بر روی انشطار و تمرکز عناصر اصلی سنگ اثر می گذارد؛ بنابراین نمودارهای مربوط به عناصر کمیاب (مانند  $Zr$ ،  $Ti$ ،  $Nb$  و  $Y$ ) که در درجات



شکل ۵-الف) موقعیت نمونه های کالدرای قره چای در نمودار  $Na_2O+K_2O$  در مقابل  $SiO_2$  که در محدوده داسیت قرار می گیرند (Middlemost, 1994)؛ ب) موقعیت نمونه های کالدرای قره چای در نمودار  $Zr/TiO_2$  در مقابل  $SiO_2$  که در این نمودار نیز در محدوده داسیت واقع می شوند (Winchester and Floyd, 1977).

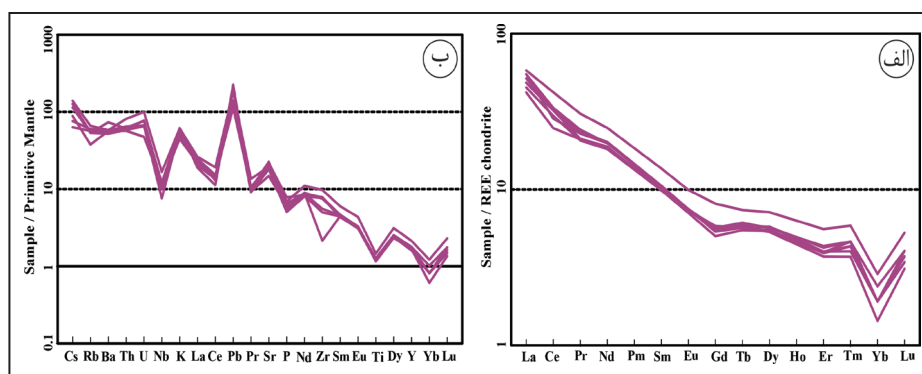


شکل ۶- الف) نمودار  $K_2O - SiO_2$  معرفی شده توسط Peccerillo and Taylor (1976). همانطور که مشاهده می‌شود سنگ‌های این کالدرا در محدوده کالک‌آلکان می‌باشد با مقدار پتاسیم متوسط واقع می‌شوند؛ (ب) موقعیت نمونه‌های کالدراي قره‌چای در نمودار  $A/CNK - A/NK$  (Shand, 1943) که بیانگر متآلومین بودن ماگمای والد آنهاست.



در محل خاستگاه ماگما در هنگام ذوب بخشی در فشار بالاست (جدول ۱) (Rapp et al., 2006; Wang et al., 2012). این شواهد با یک خاستگاه گارنت آمفیبولیتی یا اکلوژیته به عنوان محل منشأ ماگمای سازنده این سنگ‌ها سازگار است. نمونه‌های کالدراي قره‌چای در نمودار بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه دارای آنومالی مثبت Pb و آنومالی‌های منفی از Ti، Nb، و P می‌باشند (شکل ۷- ب). آنومالی مثبت Pb در این نمونه‌ها می‌تواند بخاطر متاسوماتیسم گوه گوشته‌ای و آرایش ماگمای والد سنگ‌های مورد مطالعه با مواد پوسته‌ای باشد (Rollinson, 1993). آنومالی منفی Nb (شکل ۷- ب) و Ta (در نمودار بهنجار شده نسبت به primordial mantle که از Wood et al. (1979) اقتباس شده و در اینجا نشان داده نشده است) حکایت از تشکیل سنگ‌های کالدراي قره‌چای در حاشیه فعال قاره‌ای و در طی فرورانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتیس حوضه سیزوار به زیر لبه جنوبی پهنه البرز خاوری دارد. آنومالی منفی Ti توسط کانی‌های تیتانیم‌دار مانند اسفن، ایلمنیت، روتیل و بعضی از آمفیبول‌ها کنترل می‌شود. با افزایش فشار، حلالیت کانی‌های تیتانیم‌دار در سیالات آبدار کاهش می‌یابد و کانی‌های مذکور که غنی از عناصر HFS هستند، در طی فرایندهای ذوب بخشی در اعماق بیش از ۳۰ کیلومتر به صورت فازهای تفاله باقی می‌مانند و باعث پیدایش آنومالی منفی Ti در مذاب حاصل می‌شوند (Gaetani, 2004). از آنجایی که سفر در ماگماهای متآلومین به صورت یک عنصر سازگار رفتار می‌کند، تفریق آپاتیت باعث ایجاد آنومالی منفی P در این سنگ‌ها شده است (Kumar and Singh, 2014).

فراوانی عناصر کمیاب Co، Rb، Ba و V با افزایش  $SiO_2$  کاهش می‌یابد. Ba و Rb وارد ساختار کانی‌های اصلی به ویژه فلدسپارها می‌شوند و می‌توانند به عنوان ابزار مفید در تعیین نقش فرایند تبلور تفریقی در تحولات ماگمایی استفاده شوند. عنصر Ba جانشین K موجود در بلورهای ساینیدین می‌شود و لذا کاهش این عنصر در نمونه‌های کالدراي قره‌چای با افزایش مقدار  $SiO_2$ ، شاید به خاطر تغییر در فراوانی مقدار ساینیدین باشد (جدول ۱). کاهش مقادیر عناصر سازگاری مانند Co و V نیز به خاطر تفریق کانی‌های فرومینزین (از قبیل اکسی‌هورنبلند) با افزایش  $SiO_2$  است؛ چرا که نمونه ACH-43 با  $SiO_2 = 66.23 \text{ wt } \%$  که دارای اکسی‌هورنبلند بیشتری نسبت به نمودار بهنجار شده عناصر خاکی نادر سنگ‌های کالدراي قره‌چای نسبت به کندریت، (شکل ۷- الف)، همه نمونه‌ها دارای روند موازی هستند که حاکی از ارتباط زایشی آنهاست. در این نمودار سنگ‌های مورد مطالعه از عناصر خاکی سبک (نظیر La، Ce) غنی شده‌اند و از عناصر خاکی نادر سنگین (از قبیل Lu و Yb) تهی‌شدگی نشان می‌دهند، که شاخص ماگماهای کالک‌آلکان مناطق فرورانش است (Hawkesworth et al., 1993). در این نمودار، تهی‌شدگی شدید Yb مشاهده می‌شود. از آنجایی که ضریب جدایش عنصر Yb برای گارنت حدود ۴۰ می‌باشد (Rollinson, 1993)، لذا تهی‌شدگی این عنصر بیانگر وجود گارنت در سنگ منشأ ماگمای والد کالدراي قره‌چای است. همچنین نسبت  $Y/Yb$  در سنگ‌های مورد مطالعه بیشتر از ۳۰ بوده که بیانگر حضور گارنت به عنوان فاز کانیایی باقی‌مانده

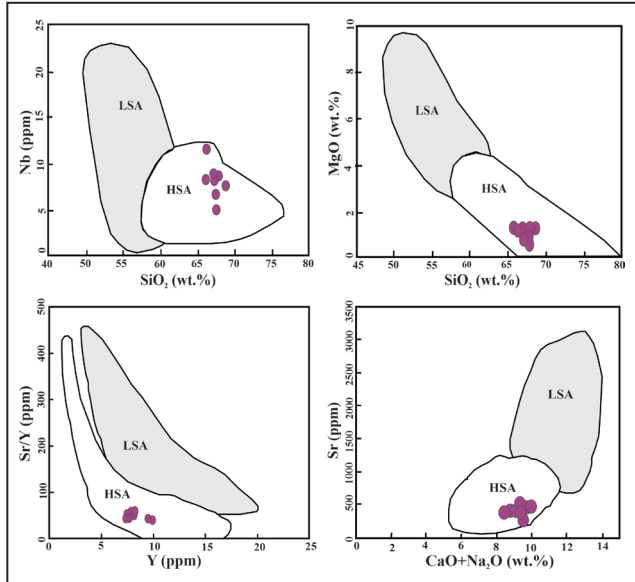


شکل ۷- الف) تغییرات فراوانی عناصر خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت (Boynton, 1984)؛ (ب) عناصر اصلی و کمیاب بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه (Sun) بر اساس این دو نمودار (McDonough, 1989). سنگ‌های کالدراي قره‌چای غنی‌شدگی از عناصر کمیاب خاکی سبک و عناصر لیتوفیل بزرگ‌یون و تهی‌شدگی از عناصر نادر خاکی سنگین و عناصر با شدت میدان بالا نشان می‌دهند.

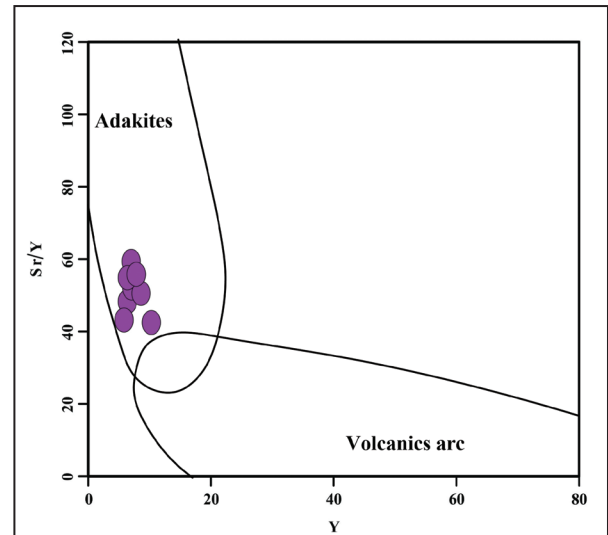
از ذوب سنگ‌های گارنت آمفیبولیتی / اکلوژیته در اعماق بیش از ۳۵ کیلومتر می‌باشد (شکل ۸). علاوه بر آن، سنگ‌های مورد مطالعه در نمودارهای Y مقابل  $Sr/Y$  (شکل ۸) و  $Yb_N$  مقابل  $(La/Yb)_N$  (در اینجا نشان داده نشده است) (Defant and Drummond 1990) در محدوده آداکیت‌ها و دور از محدوده سنگ‌های معمول کمان‌های ماگمایی (Classical arc igneous rocks) قرار می‌گیرند.

سنگ‌های کالدراي قره‌چای دارای تمرکز بالای Sr بین ۳۱۲ تا ۴۷۷ پی‌پی‌ام (میانگین ۴۱۵ ppm) و مقادیر پایین Y (۷/۳-۹/۷ ppm) و Yb (۰/۳-۰/۶ ppm) در مقایسه با ماگماهای معمول کمان‌ها می‌باشند و ویژگی ماگماهای آداکیتی ( $Yb < 8 / Sr < 300 \text{ ppm}$  و  $Y > 18 \text{ ppm}$ ) را دارند (جدول ۱) (Martin, 1999). همچنین مقادیر Y و عناصر نادر خاکی سنگین آنها پایین و Sr و Yb نیز زیاد است که مشابه ماگماهای آداکیتی (Wang et al., 2006) حاصل

به عبارت دیگر، سنگ‌های آداکیتی مورد مطالعه احتمالاً آخرین تظاهرات ماگمایی ناشی از ذوب بخشی لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس حوضه سبزوار در فشار بالا بوده و در طی فرورانش به زیر لبه جنوبی پهنه البرز خاوری (بینالود) در زمان میوسن تشکیل شده‌اند (شکل ۱۰-الف). واقع شدن نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده آداکیت‌های مرتبط با فرورانش نیز این موضوع را تأیید می‌کند (شکل ۱۰-ب).



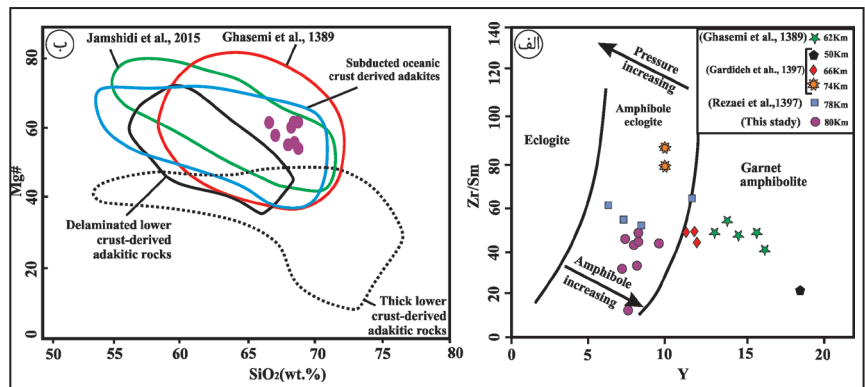
شکل ۸- نمودارهای متمایزکننده آداکیت‌های پرسلیس (HSA) و آداکیت‌های کم‌سلیس (LSA) (Martin et al., 2005). همانطور که مشاهده می‌شود سنگ‌های داسیتی کالدرای قره‌چای از نوع آداکیت‌های پرسلیس می‌باشند.



شکل ۹- موقعیت نمونه‌های داسیتی کالدرای قره‌چای در نمودار Y در مقابل Sr/Y از Defant and Drummond (1990) که در محدوده آداکیت‌ها قرار می‌گیرند.

Martin (1999) آداکیت‌ها را از نظر ترکیبی به دو گروه آداکیت‌های پرسلیس (HSA) و آداکیت‌های کم‌سلیس (LSA) تقسیم‌بندی کرد. در دیاگرام‌های شکل ۹، با توجه به پایین بودن مقادیر  $K + MgO$ ،  $Sr$ ،  $Sr/Y$  و  $Nb$ ، سنگ‌های کالدرای قره‌چای در محدوده آداکیت‌های HSA واقع می‌شوند. قرار گرفتن این سنگ‌ها در محدوده HSA نشان می‌دهد که ماگمای والد آنها احتمالاً از ذوب بخشی لیتوسفر اقیانوسی فرورونده با ترکیب مورب در رخساره‌های اکلوزیت یا آمفیبولیت بالایی در فشار معادل با محدوده پایداری گارنت به وجود آمده که در طی صعود، با پریدوتیت گوه گشته‌ای نیز واکنش داده است (Martin et al., 2005).

شکل ۱۰-الف) جایگیری نمونه‌های سنگ‌های آداکیتی کالدرای قره‌چای و گنبد‌های نیمه‌عمیق آداکیتی شمال شرق سبزوار در نمودار Y در مقابل Zr/Sm (Deng et al., 2017). اعداد مجاور سیمبل‌ها، فاصله نقاط نمونه‌برداری شده از محل افیولیت‌های سبزوار را نشان می‌دهند. ب) موقعیت نمونه‌های گنبد‌های آداکیتی کالدرای قره‌چای در نمودار Mg# در برابر  $SiO_2$  که در محدوده آداکیت‌های پدیدآمده از ذوب لیتوسفر اقیانوسی فرورونده (Wang et al., 2006) قرار می‌گیرند. برای توضیحات بیشتر به متن مقاله مراجعه شود.



نئوتتیس با ترکیب گارنت آمفیبولیت سرچشمه گرفته‌اند. این در حالی است که گنبد‌های دور از زون فرورانش نظیر نمونه‌های کالدرای قره‌چای و گنبد‌های آداکیتی همجوار آن (منطقه چکنه، رضایی کهخانی و همکاران، ۱۳۹۷) از ذوب بخشی لیتوسفر اقیانوسی در اعماق بیشتر در رخساره اکلوزیت به وجود آمده‌اند (شکل ۱۰-الف). همچنین بر اساس تعیین سن‌های انجام شده بر روی سنگ‌های آداکیتی زون سبزوار مشخص شده است که سن این سنگ‌ها با فاصله گرفتن از زون افیولیتی سبزوار کاهش می‌یابد. به طوری که آداکیت‌های نزدیک به سنگ‌های افیولیتی سبزوار دارای سن‌های ۴۴ تا ۴۹ میلیون سال هستند (Jamshidi et al., 2015) اما با دور شدن از محل فرورانش به سمت شمال خاوری، سن این گنبد‌های آداکیتی کاهش می‌یابد و به کمتر از ۲ میلیون سال میرسد (شکل ۱۲) (قاسمی و همکاران، ۱۳۸۹؛ گردیده و همکاران، ۱۳۹۷؛ Omrani, 2018). لذا به نظر می‌رسد که احتمالاً بر اثر فرورانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس حوضه سبزوار به زیر لبه جنوبی پهنه البرز خاوری، ذوب بخشی این لیتوسفر در اعماق کمتر در رخساره آمفیبولیت بالایی منجر به تشکیل ماگمای سازنده سنگ‌های آداکیتی درون و نزدیک به

این موضوع همچنین با یافته‌های دیگر پژوهشگران (از قبیل رضایی کهخانی و همکاران، ۱۳۹۷) نیز سازگار است که گنبد‌های آداکیتی نیمه‌عمیق مناطق مجاور کالدرای قره‌چای با سن میوسن را مطالعه کرده و آنها را به ذوب بخشی لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس حوضه سبزوار در طی فرورانش به سمت شمال خاور به زیر لبه جنوبی پهنه البرز خاوری نسبت داده‌اند. همچنین واقع شدن سنگ‌های مورد مطالعه در دیاگرام‌های دو متغیره  $Nb+Y$  در برابر Rb و Ta در مقابل Th تشکیل سنگ‌های کالدرای قره‌چای را در حاشیه فعال قاره‌ای تأیید می‌کند (شکل ۱۱).

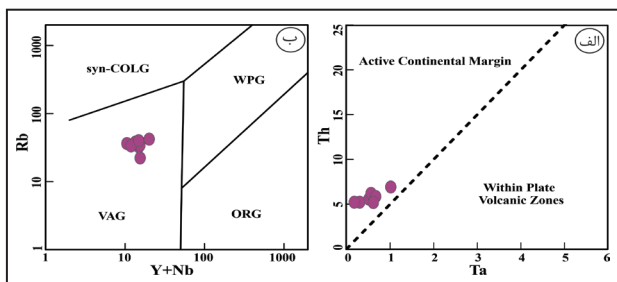
نکته جالب در مورد فرایند فرورانش و ذوب بخشی لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس حوضه سبزوار این است که با افزایش فاصله از زون فرورانش به سمت شمال خاور (که اکنون محل فرورانش با موقعیت فعلی افیولیت‌های سبزوار به عنوان زون بخیه مشخص می‌شود)، ذوب این لیتوسفر در اعماق بیشتری اتفاق افتاده است. به طوری که اکثر گنبد‌های آداکیتی مناطق نزدیک به زون فرورانش (همکاریان، ۱۳۹۳؛ ۱۳۹۴؛ Jamshidi et al., 2015) در نزدیکی و داخل افیولیت‌های سبزوار، در اعماق کمتر و از ذوب بخشی لیتوسفر اقیانوسی

ناشی از صعود ماگمای داغ با ایجاد رفتار شکل‌پذیر در سنگ‌ها سبب کنترل ساختار گنبدی شد و ریخت دایره‌های شکلی را در منطقه به وجود آورد. سپس سنگ‌های موجود در برآمدگی گنبد، قطعه قطعه شده و در پاسخ به بالا آمدن گنبد به‌طور نامنظم چرخیده و شکستگی‌های دندرتی و شعاعی متفاوت با ساختارهای همجوار تشکیل داده‌اند (شکل ۱۲).

#### ۶-۲. مرحله فروریزش کالدرا

در این مرحله، خروج ماگمای داسیتی گازدار به‌صورت فعالیت انفجاری شدید سبب خالی شدن آشیانه ماگمایی زیر کالدرا و فروریزش بخش مرکزی کالدرا گردید. فوران انفجاری ماگمای گازدار داسیتی سبب تشکیل روانه‌های ایگنمبریتی شده است. در ادامه، باقی‌مانده ماگمای داسیتی غلیظ با گرانروی بالای موجود در آشیانه از دهانه آتشفشان خارج شده که فقط در بخش کوچکی از جنوب غرب این کالدرا قابل مشاهده است (شکل ۱۲).

این مدل بر نقش مهم کنترل‌های ساختاری و فشار ماگمای اسیدی گازدار در تشکیل ساختار کالدراي قوه‌چای تأکید دارد. در این مدل، شکستگی‌های ناشی از گسلش و گنبدی شدن پوسته سبب صعود ماگما و خروج انفجاری آن به‌صورت روانه‌های خاکستر جریانی (ایگنمبریت) شده است. سپس خالی شدن آشیانه ماگمایی زیر کالدرا نیز در نهایت باعث فروریزش دهانه شد (شکل ۳).



افیولیت‌های سبزوار در زمان ائوسن شده و در ادامه فرورانش در اعماق بیشتر و دور از افیولیت‌های سبزوار در جنوب قوچان، ذوب بخشی در رخساره اکلوزیت منجر به تشکیل ماگمای سازنده سنگ‌های آتشفشانی آداکیتی کالدراي قوه‌چای و گنبد‌های مجاور آن شده است (شکل ۱۲).

#### ۶-۱. نحوه تشکیل کالدرا قوه‌چای

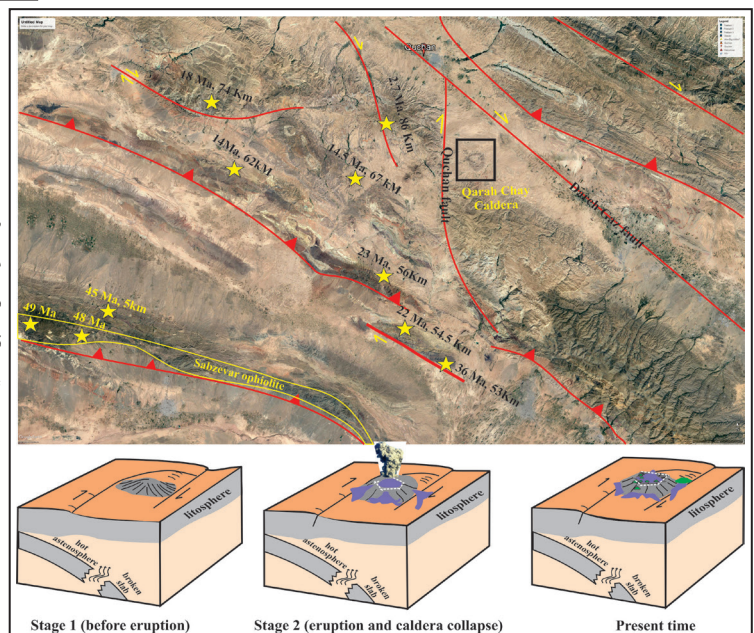
کالدراي قوه‌چای در فروافتادگی بین رشته کوه بینالود در جنوب و زون کپه‌داغ در شمال واقع شده است. این کالدرا در محل تقاطع دو دسته گسل اصلی امتدادلغز با روند شمالی-جنوبی (گسل قوچان) و شمال-باختر-جنوب خاور (گسل دره گز) قرار دارد (شکل ۱۲). در ادامه نقش گسل‌ها در نحوه تشکیل کالدراي قوه‌چای بررسی شده است. مدل ارائه شده شامل دو بخش قبل از فروریزش کالدرا و تشکیل آتشفشان و بعد از فروریزش کالدراست.

#### ۶-۱. مرحله قبل از فروریزش کالدرا و تشکیل آتشفشان

در منطقه قوه‌چای، جابه‌جایی‌های افقی و عمودی توسط گسل‌های بزرگ تراکشنی شکان-شکل‌پذیر قوچان و دره گز به ترتیب با راستای شمالی-جنوبی و شمال-باختر-جنوب خاور سبب ایجاد بازشدگی‌های محلی، کشیدگی و نازک‌شدگی پوسته و کاهش فشار بر گوشته بالایی شده است. این امر منجر به صعود ماگما به زیر پوسته نازک شده گردید و بالاآمدگی گنبدی شکل آن را ایجاد کرد. گرمای

شکل ۱۱- الف) محل قرارگیری نمونه‌های کالدراي قوه‌چای در نمودار متمایز کننده محیط تکتونیکی که در محدوده حاشیه فعال قاره‌ای قرار می‌گیرند (Schandi and Gorton, 2002)؛ ب) این نمونه‌ها همچنین در نمودار Rb در مقابل Y+Nb نیز در محدوده حاشیه فعال قاره‌ای واقع می‌شوند (Pearce et al., 1984).

شکل ۱۲- محل گنبد‌های نیمه‌عمیق و سنگ‌های آتشفشانی کالدراي قوه‌چای با ماهیت آداکیتی نسبت به افیولیت‌های سبزوار. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از افیولیت‌ها، سن سنگ‌های آداکیتی کاهش می‌یابد. نحوه تشکیل کالدراي قوه‌چای: Stage 1) قبل از فروریزش کالدرا و تشکیل آتشفشان؛ Stage 2) فروریزش کالدرا؛ Present time) وضعیت کنونی این کالدراي آتشفشانی. گسل‌های موجود در شکل‌ها از Shabanian et al. (2012) اقتباس شده‌اند.



#### ۷- نتیجه‌گیری

نمونه‌های کالدراي قوه‌چای در نمودار بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه دارای آنومالی مثبت Pb و آنومالی‌های منفی از Ti، Nb، و P می‌باشند. آنومالی مثبت Pb این نمونه‌ها به خاطر متاسوماتیسم گوه گوشته‌ای و آلیش ماگما با مواد پوسته‌ای است. آنومالی منفی Nb نیز حکایت از تشکیل سنگ‌های مورد مطالعه در حاشیه فعال قاره‌ای و در طی فرورانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس به زیر لبه جنوبی پهنه البرز خاوری دارد که این موضوع با واقع شدن نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده حاشیه فعال قاره‌ای در نمودارهای تفکیک محیط تکتونیکی نیز تأیید می‌شود.

سنگ‌های آتشفشانی کالدراي قوه‌چای به عنوان بخشی از نوار ماگمایی قوچان-اسفراین، دارای ترکیب داسیتی، ماهیت کالک‌آلکان پتاسیم متوسط و ویژگی‌های ماگماهای کمان‌های آتشفشانی حاشیه فعال قاره‌ای و آداکیتی پرسلیس هستند. این ویژگی‌ها بیانگر تشکیل ماگمای والد این سنگ‌ها بر اثر ذوب بخشی یک سنگ منشأ اکلوزیتی حاصل از دگرگونی ورقه اقیانوسی فرورانده شده نئوتتیس حوضه سبزوار می‌باشد. متاسوماتیسم گوه گوشته‌ای بالایی زون فرورانش و باقی ماندن گارنت در سنگ منشأ، سبب ایجاد شیب منفی زیاد در نمودارهای بهنجار شده و عنکبوتی شده است.



**کتابنگاری**

- امینی، ب. و خان‌ناظر، ن.، ۱۳۸۰- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چهارگوش مشکان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- آق‌باز، ف.، ۱۳۹۱- پتروژنز سنگ‌های آتشفشانی آداکیتی و کالک‌آلکانل شمال فیروزه، خاور نیشابور، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس تهران <https://ganj-old.irandoc.ac.ir/articles/577254>
- پورلطفی، ا.، ۱۳۸۵- نقشه زمین‌شناسی چهارگوش ۱:۱۰۰۰۰۰ اخلمد. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- تنها، ا.، ۱۳۸۸- پتروژنز سنگ‌های آتشفشانی نوژن، شمال عنبرآباد (مشکان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود. <https://ganj-old.irandoc.ac.ir/articles/497687>
- جمشیدی، خ.، قاسمی، ح. و صادقیان، م.، ۱۳۹۳- سنگ‌های زمین‌شناسی آداکیتی پرسیلیس پسا‌فیولیتی سبزوار. پتروژنی، ۱۷ (۵)، ص. ۵۱ تا ۶۸. [http://ijp.ui.ac.ir/article\\_16159.html](http://ijp.ui.ac.ir/article_16159.html)
- جمشیدی، خ.، قاسمی، ح. و میانو، ل.، ۱۳۹۴- سن‌سنجی U-Pb و تعیین ترکیب محل منشأ گنبد‌های آداکیتی پسا‌فیولیتی سبزوار. پتروژنی ۶ (۲۳)، ص. ۱۲۱ تا ۱۳۸. [http://ijp.ui.ac.ir/article\\_16224.html](http://ijp.ui.ac.ir/article_16224.html)
- رضایی کهخایی، م.، طاهری سرتشیزی، ا.، قاسمی، ح. و گردیده، س.، ۱۳۹۷- زمین‌شناسی و زمین‌شناسی ایزوتوپی گنبد‌های آداکیتی منطقه چکنه جنوب غرب قوچان (شمال خاوری ایران). پتروژنی، ۹ (۳۶)، ص. ۲۵ تا ۴۸. [http://ijp.ui.ac.ir/article\\_22973.html](http://ijp.ui.ac.ir/article_22973.html)
- فتاحی، ا.، ۱۳۸۲- پتروژنز، رخساره‌ها و مکانیسم فوران آتشفشان مارکوه، جنوب غرب قوچان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود <https://ganj-old.irandoc.ac.ir/articles/106595>
- فتح‌آبادی، ف.، ۱۳۹۳- زمین‌شناسی، پتروژنی و ژئوشیمی گنبد‌های ساپولکانیک منطقه مقیسه، جنوب غرب سبزوار. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود. [695165/https://ganj-old.irandoc.ac.ir/articles](https://ganj-old.irandoc.ac.ir/articles/695165)
- قاسمی، ح.، تنها، ع.، صادقیان، م. و خانعلی‌زاده، ع.، ۱۳۸۹- سنگ‌شناسی، ژئوشیمی و سن تابش سنجی گنبد‌های آداکیتی پرسیلیس کمان قاره‌ای نوژن، جنوب قوچان. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۱۸ (۳)، ص. ۳۴۷ تا ۳۷۰. <http://ijcm.ir/article-1-505-fa.html>
- قاسمی، ح.، رستمی حصوری، م. و صادقیان، م.، ۱۳۹۷الف- ماگماتیسزم بازی در حوضه کشتی پشت‌کمانی ژوراسیک زیرین- میانی در لبه شمالی پهنه‌های ایران مرکزی- جنوب البرزشرقی، شاهرود - دامغان. فصلنامه علوم زمین ۲۷ (۱۰۷): ص. ۱۲۳ تا ۱۳۶. [http://www.gsjournal.ir/article\\_63800\\_25e2c2f9651f31c3978e2343167ff7a9.pdf](http://www.gsjournal.ir/article_63800_25e2c2f9651f31c3978e2343167ff7a9.pdf)
- قاسمی، ح.، رستمی حصوری، م.، صادقیان، م. و کدخدای عرب، ف.، ۱۳۹۵- ماگماتیسزم کشتی پشت‌کمانی در حوضه الیگومیوسن لبه شمالی ایران مرکزی، فصلنامه علوم زمین ۲۵ (۹۹): ص. ۲۵۲ تا ۲۵۹. [http://www.gsjournal.ir/article\\_40915\\_db9486e4c3d37f7432c096bc9bf29131.pdf](http://www.gsjournal.ir/article_40915_db9486e4c3d37f7432c096bc9bf29131.pdf)
- قاسمی، ح.، کاظمی، ز.، موسیوند، ف. و گریفین، و.، ۱۳۹۷ب- شیمی سنگ‌کل و شیمی کانی داسیت‌های کرتاسه پسین جنوب غرب سبزوار: رهیافتی بر منشأ و جایگاه زمین‌ساختی آنها. پتروژنی [http://ijp.ui.ac.ir/article\\_22428.html](http://ijp.ui.ac.ir/article_22428.html). ص. ۷۹ تا ۱۰۰.
- گردیده، س.، قاسمی، ح. و صادقیان، م.، ۱۳۹۷- سن‌سنجی U-Pb بر بلورهای زیرکن، نسبت‌های ایزوتوپی Sr-Nd و زمین‌شیمی گنبد‌های آداکیتی نوژن کمان ماگمایی قوچان- اسفراین، شمال شرق ایران، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۲۶ (۲)، صص. ۴۵۵ تا ۴۷۸. <http://ijcm.ir/article-1-1110-fa.html>

**References**

- Baumann, A., Spies, O. and Lensch, G., 1983- Strontium Isotopic Composition of Post-Ophiolitic Tertiary Volcanics between Kashmar, Sabzevar and Quchan/NE Iran. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 168, 409- 416. [https://www.schweizerbart.de/papers/njgpa/detail/168/89375/Strontium Isotopic Composition of Post Ophiolitic Tertiary Volcanics between Kashmar Sabzevar and Quchan NE Iran](https://www.schweizerbart.de/papers/njgpa/detail/168/89375/Strontium+Isotopic+Composition+of+Post+Ophiolitic+Tertiary+Volcanics+between+Kashmar+Sabzevar+and+Quchan+NE+Iran).
- Baker, D. R., 1998- Granitic melt viscosity and dike formation. *Journal of Structural Geology*, 20, 1395- 1404. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191814198000571>.
- Best, G., 2003- *Igneous and metamorphic petrology*. Blackwell Science, 729 pp. <http://www.fc.up.pt/DocsOnLine/Temp/43742/PROGRAMA.PDF>.
- Boynton, W. V., 1984- Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies, in Henderson, P., ed., *Rare earth element geochemistry: Henderson, P. (Ed), Rare Earth Element Geochemistry*, Elsevier, 63- 114. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444421487500083>.
- Castillo, P. R., 2006- An overview of adakite petrogenesis *Chin. Sci. Bull*, 51, 257- 268. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11434-006-0257-7>.
- Castillo, P. R., 2012- Adakite petrogenesis *Lithos*, 134, 304- 316. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002449371100274X>.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Sussman, J. Z., 1986- *An Introduction to the Rock Forming Minerals*. Longman Ltd, 528pp. <https://pubs.geoscienceworld.org/books/book/952/an-introduction-to-the-rock-forming-minerals>.
- Defant, M. J. and Drummond, M. S., 1990- Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347, 662- 665. <https://www.nature.com/articles/347662a0>.
- 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. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136816308435>.
- 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, 1- 42. <https://academic.oup.com/petrology/article/54/4/703/1547259>.
- Gaetani, G. A., 2004- the influence of melt structure on trace element partitioning near the peridotite solidus. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147, 511- 527. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00410-004-0575-1>.
- Ghasemi, H. and Rezaei-Kahkhaei, M., 2015- Petrochemistry and Tectonic Setting of the Davarzan-Abbasabad Eocene Volcanic (DAEV) rocks, NE Iran. *Mineralogy and Petrology*, 109, 235- 252. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00710-014-0353-3>.

- Hawkesworth, C. J., Gallagher, K. and Hergt, J. M., 1993- Mantle and slab contributions in arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 21, 175- 204. [https://risweb.st-andrews.ac.uk/portal/en/researchoutput/mantle-and-slab-contributions-in-arc-magmas\(8441d6d8-416f-47f1-b3bd-e796879a5a75\).html](https://risweb.st-andrews.ac.uk/portal/en/researchoutput/mantle-and-slab-contributions-in-arc-magmas(8441d6d8-416f-47f1-b3bd-e796879a5a75).html).
- Jamshidi, K., Ghasemi, H., Troll, V. R., Sadeghian, M. and Dahren, B., 2015- Magma storage and plumbing of adakite-type post-ophiolite intrusions in the Sabzevar ophiolitic zone, NE Iran. *Journal of Solid Earth*, 6, 49-72. doi:10.5194/se-6-49-2015. <https://www.solid-earth.net/6/49/2015/>.
- Jamshidi, Kh., Ghasemi, H., Laicheng, M. and Sadeghian, M., 2018- Adakite magmatism within the Sabzevar ophiolite zone, NE Iran: U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopic evidences. *Geopersia*, 8, 111- 130. [https://geopersia.ut.ac.ir/article\\_64220.html](https://geopersia.ut.ac.ir/article_64220.html).
- Kazemi, Z., Ghasemi, H., Tilhac, R., Griffin, W., Moghadam, H. S., O'Reilly, S. and Mousivand, F., 2019- Late Cretaceous subduction-related magmatism on the southern edge of Sabzevar basin, NE Iran. *Journal of the Geological Society*, doi.org/10.1144/jgs2018-076. <https://jgs.lyellcollection.org/content/early/2019/01/08/jgs2018-076>.
- 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. <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsabulletin/article-abstract/88/1/78/202102>
- Kumar, S. and Singh, R. N., 2014- Modelling of Magmatic and Allied Processes. Springer, 240pp. <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-06471-0>.
- Martin, H., 1999- Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 3, 411- 429. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0024493798000760>.
- 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. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002449370400266X>.
- Middlemost, E. A., 1994- Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37, 215- 224. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0012825294900299>.
- Omrani, H., 2018- Island-arc and Active Continental Margin Adakites from the Sabzevar Zone, Iran. *Petrology*, 26, 96- 113. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0869591118010058>.
- 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- 983. <https://academic.oup.com/petrology/article-abstract/25/4/956/1386972>.
- Peccerillo, A. and Taylor, S. R., 1976- Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to mineralogy and petrology*, 58, 63- 81. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00384745>.
- Rapp, R. P., Shimizu, N., Norman, M. D. and Applegate, G. S., 2006- Reaction between slabs derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160, 335- 356. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10017398985/>.
- Rollinson, H., 1993- Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Published by Routledge. New York, USA, 352pp. <https://www.taylorfrancis.com/books/9781420004755>.
- Schandi, E. S. and Gorton, M. P., 2002- Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology*, 97, 629- 642. <https://pubs.geoscienceworld.org/segweb/economicgeology/article-abstract/97/3/629/22213>.
- Shabanian, E., Acocella, V., Gioncada, A., Ghasemi, H., Bellier, O., 2012- Structural control on volcanism in intraplate post collisional settings: Late Cenozoic to Quaternary examples of Iran and Eastern Turkey. *Tectonics*. 31: Tc3013, doi:10.1029/2011TC003042. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011TC003042>.
- Shand, S. J., 1943- Eruptive rocks: their genesis, composition, and classification, with a chapter on meteorites. John Wiley & sons, inc., Nature, 444 pp. <https://www.amazon.com/Eruptive-rocks-composition-classification-meteorites/dp/B0006AQ8BE>.
- Spies, O., Lensch, G. and Mihem, A., 1983- Petrology and Geochemistry of the Post-Ophiolitic Tertiary Volcanics between Sabzevar and Quchan/ NE Iran. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Abhandlungen Band*, 168, 389- 408. [https://www.schweizerbart.de/papers/njgpa/detail/168/89382/Petrology\\_and\\_Geochemistry\\_of\\_the\\_Post\\_Ophiolitic\\_Tertiary\\_Volcanics\\_between\\_Sabzevar\\_and\\_Quchan\\_NE\\_Iran](https://www.schweizerbart.de/papers/njgpa/detail/168/89382/Petrology_and_Geochemistry_of_the_Post_Ophiolitic_Tertiary_Volcanics_between_Sabzevar_and_Quchan_NE_Iran)
- Stewart, M. L. and Pearce, T. H., 2004- Sive-textured plagioclase in dacitic magma: Interference imaging results. *American Mineralogist*, 89, 348- 351. <https://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article-abstract/89/2-3/348/44150>.
- 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, 313- 345. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10004643736/>.
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J. F., Zhao, Z. H., Jian, P., Xiong, X. L., Baoa, Z. W., Lid, C. F. and Bai, Z. H., 2006- 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, 424- 446. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0024493706000302>.
- Wang, X. L., Shu, X. J., Xu, X., Tang, M. and Gaschnig, R., 2012- Petrogenesis of the Early Cretaceous adakite-like porphyries and associated basaltic andesites in the eastern Jiangnan orogen, southern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61, 243- 256. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367912012004361>.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W., 2010- Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185- 187. [http://minsoc.ru/FilesBase/Whitney\\_p185\\_10.pdf](http://minsoc.ru/FilesBase/Whitney_p185_10.pdf).
- 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. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0009254177900572>.
- Wood, D. A., Joron, J. L., Treuil, M., Norry, M. and Tarney, J., 1979- Elemental and Sr isotope variations in basic lavas from Iceland and the surrounding ocean floor. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70, 319- 339. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00375360>.

## Petrology and geochemistry of adakitic dacites of the Qarah Chay Neogene caldera, SE Quchan

M. Asadi-Avargane<sup>1</sup>, M. Rezaei-Kahkhaei<sup>2\*</sup>, H. Ghasemi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M.Sc., Department of Petrology, Geochemistry and Economic Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Petrology, Geochemistry and Economic Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>3</sup>Professor, Department of Petrology, Geochemistry and Economic Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 2019 February 18

Accepted: 2019 May 21

### Abstract

The Qarah Chay Neogene caldera is located at 30 km SE Quchan in the Binalud Zone. The volcanic rocks of the caldera are mainly dacite in composition and composed of plagioclase and amphibole. The rocks present a variety of porphyry, microlitic porphyry, sieve, trachytic and glomeroporphyritic textures. Based on the spider diagrams normalized to chondrite and primitive mantle, the study rocks show enrichments in Large Ion Lithophile Elements (LILEs) and depletion in Heavy Rare Earth Elements (HREEs) and High Field Strength Elements (HFSEs). Their's calc-alkaline affinity and the obvious negative HFSE anomalies (such as Ti, Nb and P), and positive Pb anomaly are similar to those magmas related to active continental margin. Moreover, their high concentrations of Sr, Sr/Y, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O, and low concentrations of K and MgO are the same as high silica adakites. Considering the above points, the parental magma(s) of the Qarah Chay caldera formed from the partial melting of eclogite during the subduction of oceanic lithosphere of Sabzevar under the southern edge of the eastern Alborz zone in Neogene. It seems that the major Quchan and Dareh Gaz strike slip faults played a main role for the caldera formation.

**Keyword:** Dacite, Geochemistry, Adakite, Qarah Chay, Quchan.

For Persian Version see pages 241 to 250

\*Corresponding author: M. Rezaei-Kahkhaei; E-mail: Rezaei@shahroodut.ac.ir