

ژئوشیمی و پتروژنز گندهای ساب‌ولکانیک دامنه شمالی نوار افیولیتی سبزوار، شمال شرق ایران

ابراهیم محمدی گورجی^۱، قاسم قربانی^(۱و۲) و هادی شفایی مقدم^۲

۱. کارشناسی ارشد پترولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

۲. دانشیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲

چکیده

گندهای ساب‌ولکانیک آندزیتی-داسیتی نوده انقلاب و کوه کمرتنگ در دامنه شمالی نوار افیولیتی سبزوار و در بخش شمال شرقی زون ساختاری ایران مرکزی واقع شده است. از نظر ژئوشیمیایی سنگ‌های مورد مطالعه دارای ماهیت متآلومین، کالک-آلکان تا کالک-آلکانل پتاسیم بالا، غنی‌شدگی از عناصر LREE و LILE و تهی‌شدگی در HREE و HFSE و آنومالی منفی در عناصر TNT (Ta-Nb-Ti) نشان می‌دهند و در یک محیط مرتبط با فرورانش تشکیل شده‌اند. با توجه به سایر ویژگی‌های ژئوشیمیایی آنها همچون میزان $Al_2O_3 > 15wt\%$ ، $SiO_2 > 62wt\%$ ، $Na_2O > 3.3wt\%$ ، $MgO < 2.2$ ، $Sr/Y > 24$ ، $La/Yb > 8$ ، می‌توان این سنگ‌ها را به عنوان آداکیت‌های غنی از سیلیس طبقه‌بندی کرد. ویژگی‌های پتروگرافی، ژئوشیمیایی و ایزوتوپی $Rb-Sr$ و $Sm-Nd$ ($\epsilon_{Ndi} = 6.02 - 6.10$)، $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7047 - 0.7045$ آداکیت‌های غنی از سیلیس مورد مطالعه نشان‌دهنده آن است که آنها از ذوب بخشی ورقه اقیانوسی فرورانده شده نئوتتیس (زیر شاخه دریا/ اقیانوس سبزوار) به زیر توران در رخساره آمفیبولیت تا گارنت آمفیبولیت تشکیل شده‌اند و طی صعود به سطوح بالا هضم و آغشتگی خیلی کمی با پوسته قاره‌ای نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: آندزیت-داسیت، آداکیت‌های غنی از سیلیس، ایزوتوپ‌های Sr-Nd، فرورانش.

مقدمه

در اثر همگرایی رو به شمال بلوک لوت با البرز شرقی و در نتیجه فرورانش پوسته اقیانوسی جایگزین و بر جای مانده‌اند (Shojaat et al., 2003; Jafari and Ghasemi, 2023). گندهای ساب‌ولکانیک زیادی در بخش‌های مختلف کمرند افیولیتی سبزوار وجود دارد که تاکنون توسط محققین مختلف مطالعه شده و ترکیب سنگ‌شناسی آنها متشکل از آندزیت، داسیت و ریولیت است و ویژگی

پهنه مورد مطالعه در حدود ۸۰ کیلومتری شمال غرب سبزوار و در کمرند ساختاری ایران مرکزی (کمرند افیولیتی سبزوار) واقع شده است (Stocklin, 1968) (شکل ۱). بیشترین افیولیت‌های ایران (شکل ۱) از جمله افیولیت‌های کمرند سبزوار بقایایی از پوسته اقیانوسی نئوتتیس در شمال شرق ایران هستند که در کرتاسه بالایی

* نویسنده مرتبط: ghorbani@du.ac.ir

آداکیتی نشان می‌دهند. اسپایس و همکاران (۱۹۸۳) (Spies et al., 1983) پیدایش نوار آتشفشانی بعد از افیولیت بین سبزوار و قوچان را ناشی از فرورانش با شیب به سمت شمال لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس حوضه سبزوار، از زمان ائوسن میانی به بعد می‌دانند. صالحی‌نژاد (۱۳۸۷) گنبد‌های شمال باشتین را به صورت گنبد‌های نیمه عمیق با ترکیب آندزیت، داسیت و ریولیت، با ماهیت متآلومین تا پرآلومین ضعیف و کالک‌آلکان و در گروه آداکیت‌های پرسیلیس می‌داند. قاسمی و همکاران (۱۳۸۹) نیز گنبد‌های آداکیتی پرسیلیس جنوب قوچان-اسفراین را ناشی از مذاب‌های حاصل از ذوب بخشی پوسته اقیانوسی فرورانده و دگرگون شده‌ی نئوتتیس سبزوار در گستره پایداری گارنت و گوه گوشته‌ای روی آن در یک پهنه فرورانش حاشیه‌ی قاره‌ای در پلیو-پلئیتوسن می‌دانند. محمدی گورجی و همکاران (۱۳۹۴) ایجاد گنبد‌های ریولیتی جنوب نوار افیولیتی شمال سبزوار را حاصل ذوب بخشی ورقه اقیانوسی فرورانده شده نئوتتیس در رخساره گارنت‌آمفیبولیت می‌دانند که از طریق تبلور تفریقی تحول یافته است. جمشیدی (۱۳۹۴) و جمشیدی و همکاران (۱۳۹۳، ۱۳۹۴) نیز ماگمای اولیه سازنده سنگ‌های آداکیتی کمر بند سبزوار را از ذوب بخشی یک منبع گارنت‌آمفیبولیتی یا اکلوزیتی حاصل از دگرگونی لیتوسفر اقیانوسی فرورانده شده سبزوار در ائوسن آغازین در نظر گرفته است. قاسمی و رضایی کهخایی (۲۰۱۵) (Ghasemi and Rezaei Kahkhaei, 2015) سنگ‌های آتشفشانی ائوسن عباس‌آباد را مورد مطالعه قرار دادند. گردیده و همکاران (۱۳۹۷) سن‌سنجی U-Pb زیرکن، نسبت‌های ایزوتوپی Sr-Nd و زمین‌شیمی گنبد‌های آداکیتی نئوزن کمان ماگمایی قوچان-اسفراین را بررسی کردند. رضایی کهخایی و همکاران (۱۳۹۷) زمین‌شیمی و زمین‌شناسی ایزوتوپی گنبد‌های آداکیتی پهنه چکنه در جنوب قوچان (شمال غربی ایران) را مطالعه کردند و بر اساس این مطالعه گنبد‌های آداکیتی چکنه، مقدار نسبت‌های ایزوتوپی

اولیه $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ برابر با 0.7043 و $\epsilon\text{Nd}_{10\text{Ma}}$ برابر با $2/9$ تا $4/98$ دارند و این مقادیر با ویژگی‌های ایزوتوپی در ترکیب‌های آداکیتی پدید آمده از ذوب سنگ‌کره اقیانوسی فرورونده سنوزوئیک به طور کامل همخوانی دارند. به نظر شفایی مقدم و همکاران (2016, 2021) (Shafaii Moghadam et al., 2016, 2021) تکتونیک کششی ناشی از نازک شدگی لیتوسفری و شاید همراه با شکستن ورقه فرورونده سبزوار و متعاقب آن ذوب بخشی، منجر به تشکیل سنگ‌های ماگمایی ائوسن سبزوار شده است. موقعیت گنبد‌های مورد مطالعه در نقشه زمین‌شناسی (شکل ۲) مشخص شده است. این گنبد‌ها (شامل گنبد نوده انقلاب و کوه کمر تنگ) هستند و در صحرا به رنگ خاکستری روشن تا تیره و دارای ترکیب آندزیتی و داسیتی می‌باشند (شکل ۳). در این مقاله داده‌های ژئوشیمیایی عناصر اصلی، کمیاب و ایزوتوپی جدید از برخی از گنبد‌های موجود (نوده انقلاب و کوه کمر تنگ) در بخش دامنه شمالی مجموعه افیولیتی سبزوار، شاید از ذوب ورقه فرورانده اقیانوس سبزوار به زیر البرز به وجود آمده‌اند و ویژگی‌های آداکیتی نشان می‌دهند ارائه می‌شود.

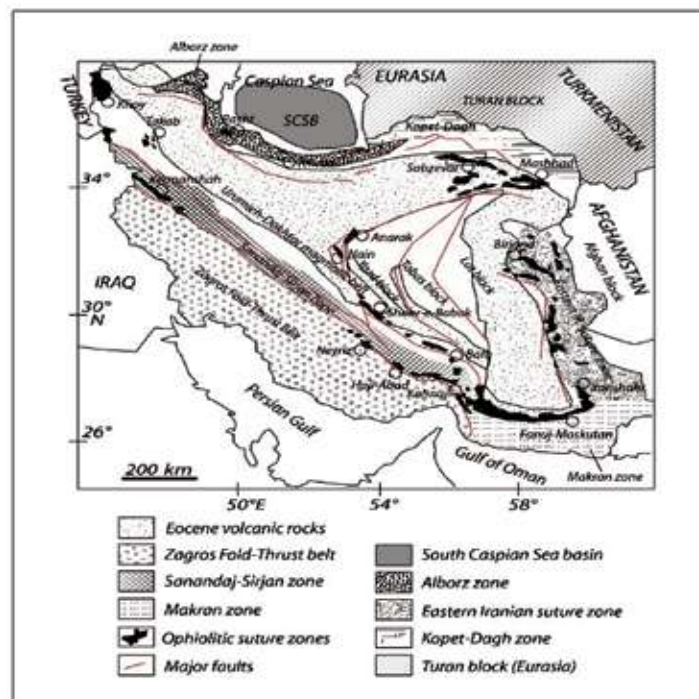
زمین‌شناسی عمومی پهنه مورد مطالعه

سنگ‌های ساب‌ولکانیک مورد مطالعه کمر تنگ و نوده انقلاب بخش کوچکی از مجموعه افیولیتی واقع در شمال سبزوار محسوب می‌شوند (شکل ۲). به‌طور کلی واحدهای سنگی پهنه مورد مطالعه شامل واحدهای دگرگونی، واحدهای سنگی افیولیتی، واحدهای آتشفشانی-رسوبی می‌باشند. قدیمی‌ترین واحدهای سنگی موجود در پهنه، واحدهای دگرگونی و افیولیتی است و سنی معادل کرتاسه فوقانی-پالئوسن دارند (Shojaat et al., 2003). افیولیت‌های سبزوار در بخش شمالی کمر بند افیولیتی پیرامون خرد قاره ایران مرکزی واقع است. به‌طور کلی توالی افیولیتی سبزوار را می‌توان به صورت مجموعه‌ای متشکل از توالی‌های گوشته‌ای مشتمل بر هارزبورژیت‌ها، لرزولیت‌ها،

روش تجزیه نمونه‌ها

به منظور تعیین خصوصیات ژئوشیمیایی سنگ‌های مورد مطالعه، تعداد هشت نمونه سنگی به نسبت تازه برای سنجش کل سنگ به روش ICP-AES و ICP-MS برای عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی در آزمایشگاه ALS کانادا انتخاب شدند (جدول ۱). تعداد دو نمونه سنگی نیز برای سنجش ایزوتوپی Sr-Nd سنگ کل به آزمایشگاه ایزوتوپی دانشگاه ژنو سوئیس فرستاده شده‌اند. نتیجه‌های سنجش ژئوشیمیایی در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

دونیت‌ها و کرومیتیت‌ها به همراه سرپانتینیت‌ها و نیز توالی‌های پوسته‌ای شامل کومولاهای اولترامافیکی به همراه پگماتیت گابروها، گابروها، گابرونوریت‌ها، دیوریت‌ها و کمپلکس دایک‌های صفحه‌ای تا انبوهه‌های دایکی مافیک تا فلسیک، پیلولاواها و گدازه‌های جریان‌ی به همراه رسوبات کرتاسه فوقانی-پالئوسن زیرین معرفی کرد. واحدهای آشفشانی-رسوبی شامل سنگ‌های آشفشانی و آذرآواری ائوسن تا پلیو-کواترنری و سنگ‌های رسوبی میوسن تا پلیو-کواترنری می‌باشند (حیدری و همکاران، ۱۳۹۸).



شکل ۱. نقشه پهنه‌های رسوبی-ساختاری عمده ایران (با تغییرات از Stocklin, 1968) گستره پهنه مورد مطالعه با کادر نشان داده شده است

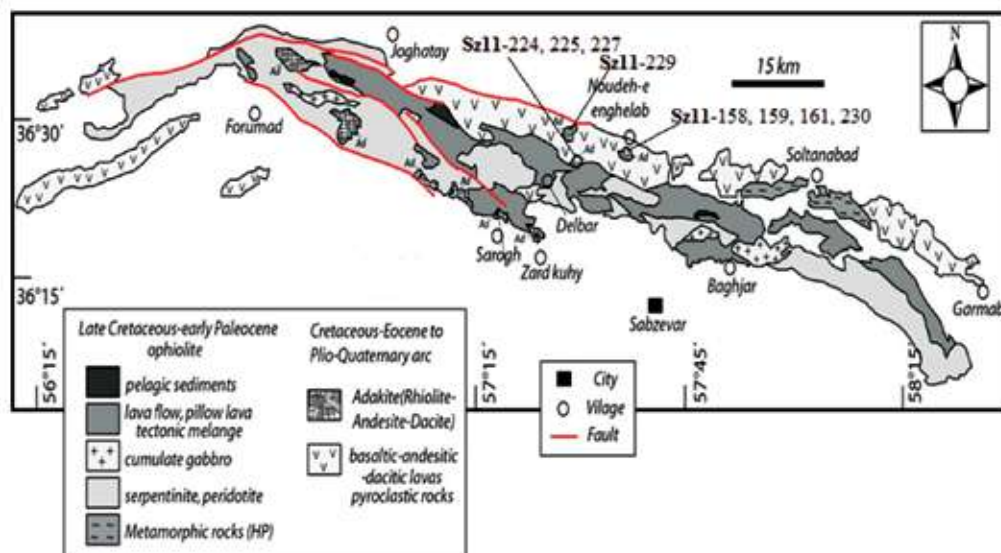
مشخصات صحرایی و پتروگرافی نمونه‌های مورد مطالعه

ترکیب آندزیت و داسیت می‌باشند و نمونه‌های داسیتی در سطح، دگرسانی شدیدی به کانی‌های رسی نشان می‌دهند. بافت‌های پورفیریتیک و گلوپورفیریتیک با خمیره میکرولیتی و میکرولیتی جریان‌ی از مهم‌ترین بافت‌های مشاهده شده در سنگ‌های ساب‌ولکانیک مورد مطالعه می‌باشند. فنوکریست‌ها و میکروفنوکریست‌های پلاژیوکلاز دارای پهنه‌بندی و ماکل تکراری در سنگ‌های

رخمون گندهای مورد مطالعه در صحرا برخلاف گندهای مرتفع و مخروطی شکل دامنه جنوبی، به صورت توده‌ها و گندهای به نسبت کم ارتفاع و با توپوگرافی پست دامنه شمالی کمر بند افیولیتی سبزوار را نمایش می‌دهند (شکل ۳) و دارای رنگ خاکستری روشن در نمونه‌های داسیتی، تا خاکستری متمایل به سبز در نمونه‌های آندزیتی هستند. سنگ‌های مورد بررسی از نظر پتروگرافی دارای

این، حضور کوارتزهای ریزدانه و پلی‌کریستالین در خمیره سنگ نشان‌دهنده پدیده شیشه‌زدایی (دیوتریفیکاسیون) خمیره شیشه‌ای این سنگ‌ها می‌باشند. همچنین کانی بیوتیت (E, D, B, ۴) و آمفیبول (شکل ۴-A) به مقدار کم در سنگ‌های داسیتی و آندزیتی یافت شده و بیشتر در اثر دگرسانی به کلریت و کانی‌های کدر، تبدیل‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۴-D). کانی‌های فرعی مانند زیرکن به صورت انکلوژیون در داخل بیوتیت و کانی‌های کدر به‌ویژه در سنگ‌های آندزیتی دیده می‌شوند. (شکل ۴-E-F). از مهم‌ترین کانی‌های ثانویه می‌توان به کلریت، کانی‌های اکسیدی، سربسیت و کانی‌های رسی اشاره کرد.

آندزیتی و داسیتی از فراوان‌ترین کانی‌ها هستند (شکل ۴-A) این کانی در سنگ‌های داسیتی به صورت فنوکریست به اندازه‌های حداکثر تا پنج میلی‌متر به صورت خودشکل تا نیمه‌شکل دار دیده می‌شود (شکل ۴-B). فلدسپارهای آلکالن موجود در داسیت‌ها از نوع سانیدین است و به صورت فنوکریست‌های خودشکل تا نیمه‌شکل دار لوح‌های دیده می‌شوند. میزان فنوکریست‌ها به نسبت کم است و بیشتر پلاژیوکلاز، فلدسپار آلکالن به همراه کوارتز خمیره سنگ را تشکیل می‌دهند (شکل ۴-C). کانی کوارتز در داسیت‌ها به صورت میکروفنوکریست و بلورهای ریز و بیشتر بی‌شکل در خمیره سنگ یافت می‌شود. علاوه بر



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی کمربند افیولیتی شمال سبزوار و موقعیت پهنه مورد مطالعه در دامنه شمالی آن (ساده شده از نقشه زمین‌شناسی ۱۰۰۰۰/۱ سبزوار و باشتین، بهرودی، ۱۳۷۸؛ اقتباس از محمدی گورچی و همکاران، ۱۳۹۴). موقعیت رخنمون‌ها و نمونه‌های آنالیز شده نیز در نقشه مشخص شده‌اند



شکل ۳. نمایی دور و نزدیک از گنبد‌های آندزیتی، الف) و داسیتی، ب) کم ارتفاع واقع در شمال کمربند افیولیتی شمال سبزوار. دید به سمت شمال، شمال شرق



شکل ۴. تصویر میکروسکوپی از بافت جریان‌ی و حضور فنوکریست پلاژیوکلاز نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل با ماکل پلی‌سینتتیک و آمفیبول در سنگ‌های آندزیتی روستای نوده انقلاب، (B) فنوکریست‌های پلاژیوکلاز دارای ماکل‌های کارلسباد و پلی‌سینتتیک در سنگ‌های داسیتی کوه کمرتنگ، (C) بلور درشت سانیدین در سنگ‌های داسیتی، (D) بافت پورفیریتیک متشکل از فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و بیوتیت در سنگ‌های داسیتی کوه کمرتنگ. خمیره سنگ بافت جریان‌ی نشان می‌دهد، (E) وجود کانی زیرکن به صورت ادخال در داخل کانی بیوتیت در سنگ‌های داسیتی، (F) تصویر میکروسکوپی از بافت دانه ریز و جریان‌ی و حضور کانی اپک در سنگ‌های آندزیتی روستای نوده انقلاب (Amp: آمفیبول، داسیتی، Plg: پلاژیوکلاز، Bt: بیوتیت، Zrn: زیرکن) (White, 2024)

جدول ۱. نتیجه های سنجش شیمیایی عناصر اصلی (بر حسب درصد وزنی)، عناصر کمیاب و نادر خاکی (ppm) سنگ های مورد مطالعه

منطقه	نوده انقلاب	نوده انقلاب	نوده انقلاب	نوده انقلاب	کمر تنگ	کمر تنگ	کمر تنگ	کمر تنگ
شماره نمونه	SZ11-158	SZ11-159	SZ11-161	SZ11-230	SZ11-224	SZ11-225	SZ11-227	SZ11-229
نوع سنگ	آندزیت	آندزیت	آندزیت	آندزیت	داسیت	داسیت	داسیت	داسیت
SiO ₂	۶۲	۶۱/۹۶	۶۱/۱	۶۳/۱	۶۵/۵۲	۶۴/۷	۶۷/۲	۶۳/۲
Al ₂ O ₃	۱۷/۲	۱۷/۱۱	۱۶/۶	۱۵/۱۵	۱۶/۲۰	۱۶/۲۵	۱۵/۹۵	۱۶/۶۵
MgO	۰/۹۷	۲/۱۵	۱/۶۲	۲/۸۹	۰/۷۸	۰/۴۴	۰/۶۴	۰/۸۵
CaO	۴/۱۳	۵/۰۲	۵/۴۴	۶/۱۹	۲/۳۲	۲/۱۸	۲/۱۹	۲/۲۸
Feo(t)	۴/۲۴	۴/۲۵	۴/۱۴	۵/۶۲	۳/۰۹	۳/۳۵	۲/۵۶	۳/۴۱
MnO	۰/۱	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۵
TiO ₂	۰/۳۷	۰/۴۳	۰/۷۱	۰/۷۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۹
Na ₂ O	۴/۵۵	۴/۳۳	۴/۲۴	۳/۳۵	۵/۰۱	۵/۳	۵/۲	۵/۴
K ₂ O	۲/۲۳	۱/۷۲	۲/۰۳	۰/۷۶	۲/۹۸	۳/۳۹	۳/۰	۳/۰۳
P ₂ O ₅	۰/۵۹	۲/۷۲	۲/۶۹	۰/۱	۲/۲۲	۱/۷	۲/۱	۲/۵
L.O.I.	۶۲	۶۱/۹۶	۶۱/۱	۱/۸۰	۶۵/۵۲	۶۴/۷	۶۷/۲	۶۳/۲
Total	۹۸/۷	۹۹/۹۲	۹۸/۹	۹۹/۷۹	۹۸/۶۴	۹۷/۹	۹۹/۴	۹۷/۹
Rb	۳۵/۴	۳۴/۲۱	۷۴/۱	۱۰/۸	۵۵/۶۹	۷۲/۱	۵۳/۱	۷۰/۰
Ba	۲۴۲	۱۹۶/۲	۲۱۴	۱۳۰	۲۶۹	۳۱۰	۳۰۶	۳۰۸
Sr	۳۷۳	۴۰۹/۷	۵۵۷	۵۸۵	۳۱۲/۳	۳۵۳	۳۸۳	۳۷۴
Pb	۵/۰	۵/۰۲۳	۶/۰	۵	۹/۷۹	۱۲/۰	۹/۰	۱۰/۰
U	۰/۶۷	۰/۸۴	۰/۹۳	۰/۳۷	۱/۶۹	۱/۴۶	۲/۰۲	۱/۷۳
Th	۲/۶۶	۲/۴۲۶	۲/۲	۰/۹۴	۴/۴۹۷	۴/۶۹	۴/۷۹	۵/۰
Y	۱۴/۲	۱۰/۸۱	۱۰/۹	۷/۱	۱۲/۰۱	۱۳/۷	۱۴/۴	۱۵/۳
Zr	۱۴۱	۱۱۳/۷	۱۰۱	۵۵	۲۲۷/۷	۲۴۰	۲۶۱	۲۶۸
Hf	۳/۱	۲/۷۶۵	۲/۴	۱/۷	۴/۶۷	۴/۹	۵/۰	۵/۳
Nb	۶/۰	۴/۲۵	۳/۹	۲/۱	۱۲/۳۱	۱۳/۷	۱۴/۳	۱۴/۹
Ta	۰/۴	۰/۳۹۹	۰/۳	۰/۱	۱/۰۷۶	۱/۰	۱/۱	۱/۱
La	۱۳/۷	۱۰/۲۹	۹/۱	۳/۵	۲۰/۳	۲۲/۹	۲۳/۲	۲۴/۶
Ce	۲۷/۸	۱۹/۴۹	۱۸	۷/۳	۳۵/۵۸	۴۱/۷	۴۳/۶	۴۵/۲
Pr	۳/۳۴	۳/۳۲۴	۲/۲۱	۱/۰۳	۳/۷۲۱	۴/۳۴	۴/۴۹	۴/۷۵
Nd	۱۴/۱	۱۰/۰۲	۹/۴	۴/۷	۱۴/۲۷	۱۵/۷	۱۶/۶	۱۷/۶
Sm	۲/۶۹	۲/۱	۲/۲۶	۱/۳۷	۲/۴۵۷	۱۵/۷	۱۶/۶	۱۷/۶
Eu	۰/۹۵	۰/۷۲۳	۰/۸	۰/۵۷	۰/۷۱۴	۲/۵۳	۲/۶۶	۲/۸۵
Gd	۲/۳۱	۱/۹۹	۲/۰۵	۱/۳۱	۱/۹۵	۰/۸	۰/۷۸	۰/۸۸
Tb	۰/۳۷	۰/۲۹	۰/۳۲	۰/۲۲	۰/۳۱	۲/۱۴	۲/۲۴	۲/۳۶
Dy	۲/۲۵	۱/۷۹	۱/۸	۱/۴۵	۱/۸۶	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۳۸
Ho	۰/۴۸	۰/۳۵۱	۰/۳۹	۰/۲۸	۰/۳۸۹	۲/۰۹	۲/۰۸	۲/۳۳
Er	۱/۳۹	۱/۰۳۲	۱/۰۲	۰/۷۸	۱/۱۷۸	۰/۴۳	۰/۴۵	۰/۴۹
Tm	۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱	۰/۱۹۴	۱/۳۶	۱/۲۶	۱/۵۲
Yb	۱/۴۷	۱/۱۴۷	۰/۹۲	۰/۶۸	۱/۴۸۱	۱/۵۷	۱/۵۸	۱/۷۲
Lu	۰/۲۴	۰/۱۸۸	۰/۱۴	۰/۱	۰/۲۴۹	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۵

جدول ۲. داده‌های ایزوتوپ Sr و Nd نمونه‌های مورد مطالعه

Location	نوده انقلاب	کمرتنگ
Rock type	Andesite	Dacite
Samples	SZ11-159	SZ11-224
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_s$	۰/۷۰۴۰۸	۰/۷۰۴۰۷
$(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_i$	۰/۲۴۱۵۰	۰/۵۱۵۴۷
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	۰/۷۰۴۰۷	۰/۷۰۴۰۵
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s$	۰/۵۱۲۹۵	۰/۵۱۲۹۴
$(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_i$	۰/۱۲۶۷۰	۰/۱۰۴۰۹
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	۰/۵۱۲۹۵	۰/۵۱۲۹۵
ϵ_{Nd_i}	۶/۱۰	۶/۰۲
t_{DM} (Ma)	۲۵۹	۲۱۵

تمامی نمونه‌های مورد بررسی، از عناصر لیتوفیل بزرگ یون (LILE) غنی‌شدگی و در عناصر با میدان مقاومت بالا (HFSE) به‌خصوص Nb، Ta و Ti تهی‌شدگی نشان می‌دهند که از ویژگی‌های سنگ‌های کمان‌های آتشفشانی می‌باشند (Pearce et al., 1984). در این نمودارها تمامی نمونه‌ها در عناصر Sr، Pb، K و Rb آنومالی مثبت نشان می‌دهند، شاید نشان‌دهنده‌ی منشأ گرفتن ماگمای مادر سنگ‌های مورد مطالعه از یک کمربند مرتبط با فرورانش می‌باشند. همچنین، آنومالی مثبت در عناصر U، Pb، Zr و Hf می‌تواند در اثر آلودگی با مواد پوسته‌ای در ضمن جابجیری ماگمای آنها حاصل شود (Wilson, 1989). رولینسون (۱۹۹۳) (Rollinson, 1993) بیان می‌کند، آنومالی منفی Nb و غنی‌شدگی خیلی زیاد عناصر Sr، K و همچنین غنی‌شدگی عناصر Ba، Rb و CS در ارتباط با اختلاط ماگمایی با پوسته قاره‌ای هستند. نسبت Eu/Eu^* در تمام نمونه‌های مورد مطالعه در حدود یک (۰/۹۵ تا ۱/۲۷) است و این مسئله نشان می‌دهد، تبلور تفریقی عمده پلاژیوکلاز در طی ژنز آنها رخ نداده است (Rollinson, 1993). به‌علاوه، نمونه‌های هر دو پهنه با مقادیر پایین عناصر نادر خاکی سنگین (برای مثال، Yb = 0.68-1.47 ppm و Y = 7.1-14.2 ppm برای نمونه‌های نوده انقلاب و Yb = 1.48-1.72 ppm و Y = 12.01-15.3 ppm برای نمونه‌های کوه کمرتنگ) مشخص می‌شوند

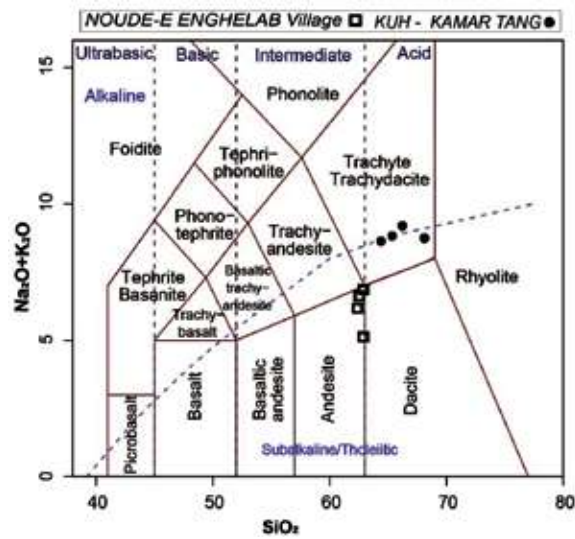
پتروژنز و موقعیت تکتونیکی نمونه‌های مورد مطالعه

مقدار سیلیس سنگ‌های مورد مطالعه بین ۶۱ تا ۶۷ درصد وزنی در تغییر است. الگوی فراوانی عناصر نادر خاکی و کمیاب آنها نسبت به کندریت و گوشته اولیه دارای غنی‌شدگی در عناصر LILE و LREE نسبت به HFSE و HREE و دارای آنومالی منفی از عناصر TNT (Ta، Nb) و (Ti) می‌باشند (شکل ۸). آنومالی منفی عناصر با میدان مقاومت بالا همچون نیوبوم، تیتانیم و تانتالیم توسط فرآیندهای فرورانش کنترل می‌شوند (Wilson, 2011; Jhon et al., 1989). همان‌طور که در شکل ۹

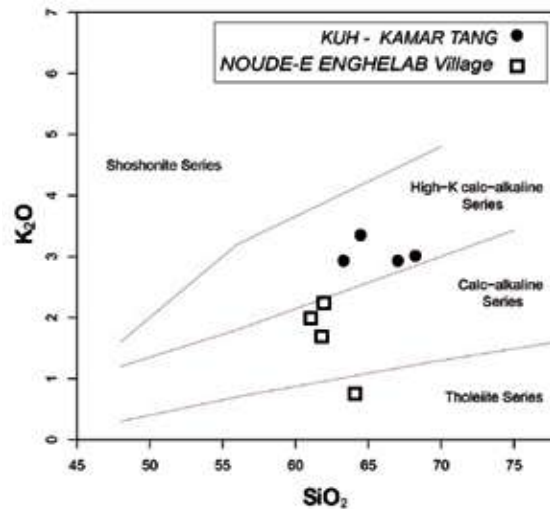
ژئوشیمی

ترکیب کانی‌شناسی سنگ‌های مورد مطالعه از آندزیت تا داسیت تغییر می‌کند (شکل ۴). در تقسیم‌بندی شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی بر اساس $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ در مقابل SiO_2 (Le Bas et al., 1986)، نمونه‌های نوده انقلاب در قلمرو آندزیت و نمونه‌های کوه کمرتنگ در قلمرو تراکی داسیت واقع می‌شوند و هر دو گروه، سرشت ماگمایی ساب‌آلکالن نشان می‌دهند (شکل ۵) و با پتروگرافی آنها سازگار هستند. فراوانی‌های عناصر اصلی و کمیاب و داده‌های ایزوتوپی Sr و Nd سنگ‌های مورد مطالعه به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. برای تعیین سری ماگمایی در نمودار K_2O در مقابل SiO_2 (Peccerillo and Taylor, 1976)، نمونه‌های نوده انقلاب در گستره کالک‌آلکالن (یک نمونه در سری تولیتی قرار می‌گیرد) و نمونه‌های کوه کمرتنگ در گستره کالک‌آلکالن پتاسیم بالا واقع می‌شوند (شکل ۶). ضریب اشباع از آلومینیم نمونه‌های مورد مطالعه بر اساس نمودار مانیار و پیکولی (۱۹۸۹) (Maniar and Piccoli, 1989)، نمونه‌های نوده انقلاب در گستره متاآلومین و نمونه‌های کوه کمرتنگ در محدوده متاآلومین و متمایل به مرز پراآلومین قرار می‌گیرند (شکل ۷). الگوی فراوانی عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت (Sun and McDonough, 1989) در نمونه‌های هر دو پهنه دارای غنی‌شدگی در عناصر نادر خاکی سبک (LREE) نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین (HREE) می‌باشد (شکل ۸-الف). در نمودار عنکبوتی چند عنصری بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه

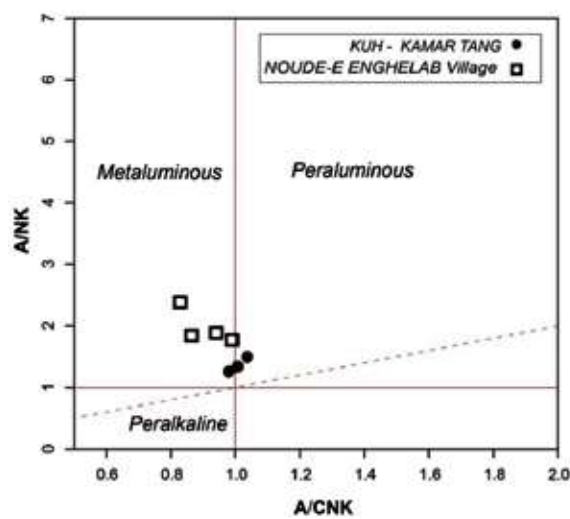
ژئوشیمی و پتروژن گنبد‌های ساب‌ولکانیک دامنه شمالی نوار افیولیتی سبزوار، شمال شرق ایران



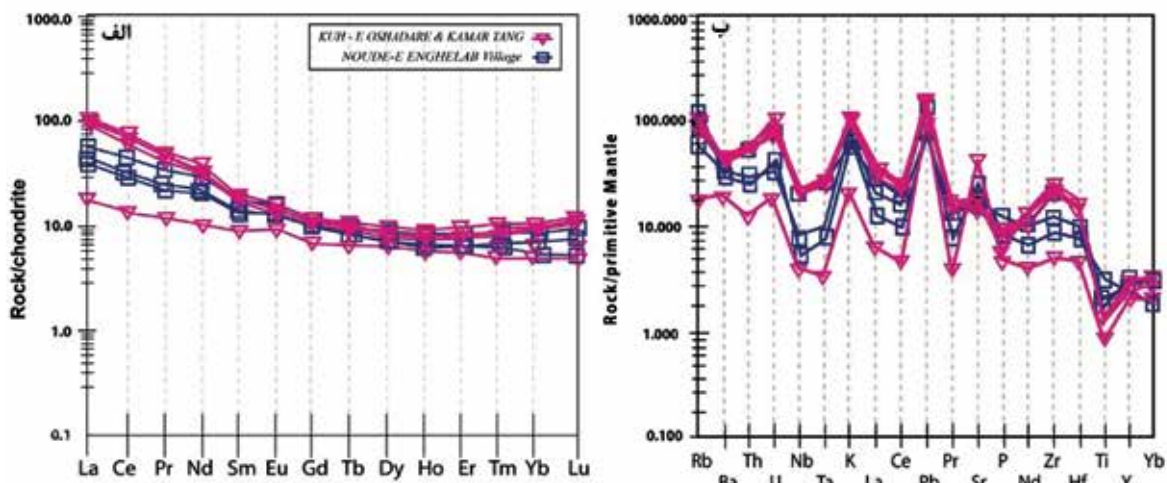
شکل ۵. نام‌گذاری سنگ‌های آذرین مورد بررسی در نمودار $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ در مقابل SiO_2 (Le Bas et al., 1986). نمونه‌های مورد مطالعه در قلمرو آندزیت و تراکی‌داسیت قرار می‌گیرند



شکل ۶. نمودار K_2O در مقابل SiO_2 برای نمونه‌های مورد مطالعه (Peccerillo and Taylor, 1976)



شکل ۷. نمودار A/NK در مقابل A/CNK برای نمونه‌های مورد مطالعه (Maniar and Piccoli, 1989)



شکل ۸. الف و ب) نمودار عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت (Sun and McDonough, 1989)، الف) و عناصر کمیاب بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)، ب) برای نمونه‌های مورد مطالعه

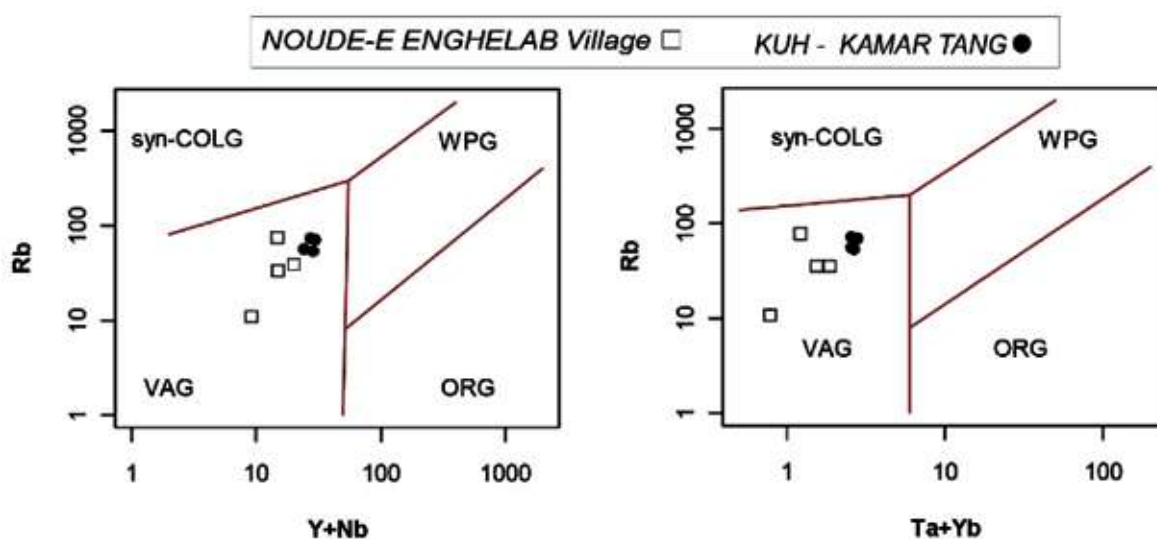
ماگماهای بازالتی، تفریق بلورین فشار بالای ماگمای بازالتی، تفریق بلورین فشار پایین ماگمای بازالتی غنی از آب، به علاوه فرایندهای اختلاط ماگمایی در محیط‌های قوس و غیر قوس به وجود می‌آیند (Castillo, 2012). موین (2009) نیز مدلی برای ژنر آداکیت‌ها ارائه کرده است. بر اساس این مدل ماگمای آداکیتی غنی از سیلیس در اثر ذوب ورقه اقیانوسی در اعماق حدود ۷۰ کیلومتری در رخساره آمفیبولیت تا اکلوتیت به وجود می‌آید. ماگمای به وجود آمده به سطوح بالاتر صعود کرده و با سنگ‌های میزبان پوسته‌ای آغشته شده و سرانجام در پوسته بالایی جامد می‌شود.

نمونه‌های مورد مطالعه در نمودار $(La/Yb)_N$ در مقابل $(Yb)_N$ (Drummond and Defant, 1990) بیانگر ذوب بخشی از یک منشأ آمفیبولیت تا گارنت آمفیبولیتی هستند (شکل ۱۰). در نمودار Zr/Sm در مقابل Y (Foley et al., 2002) نیز بیانگر منشأ گارنت آمفیبولیتی هستند (شکل ۱۱). نقش آمفیبول در تکامل و تبلور تفریقی بعدی در ماگمای تشکیل دهنده سنگ‌های مورد مطالعه، همچنین توسط مطالعات محققین قبلی بیان و اثبات شده است (Jamshidi et al., 2015b; Jamshidi et al., 2018). آداکیت‌ها بر اساس میزان سیلیس، به دو دسته سیلیس بالا و سیلیس پایین تقسیم می‌شوند (Moyen, 2009)

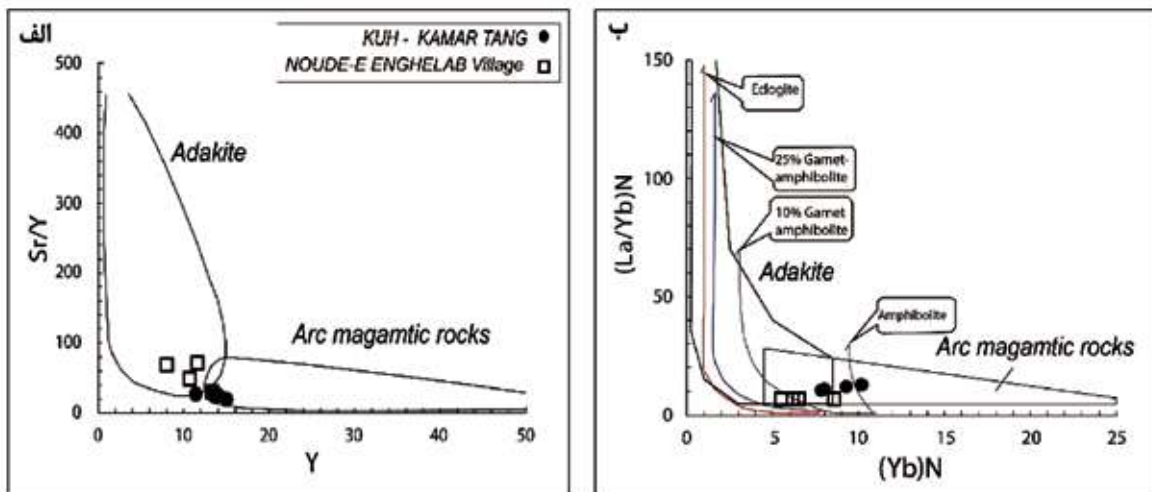
مشاهده می‌شود سنگ‌های مورد مطالعه در نمودارهای Rb در مقابل $Y+Nb$ و $Ta+Yb$ (Pearce et al., 1984). در قلمرو قوس‌های آتشفشانی قرار می‌گیرند. نمونه‌های مورد مطالعه دارای مقادیر Y و Yb به نسبت پایینی هستند و از این رو برای تمایز بین سنگ‌های معمول در قوس آتشفشانی از سنگ‌های آداکیتی، از نمودارهای Sr/Y در مقابل Y و $(La/Yb)_N$ در مقابل $(Yb)_N$ (Drummond and Defant, 1990) استفاده کرده‌ایم. بر اساس این نمودارها، همگی نمونه‌های پهنه نوده انقلاب در گستره آداکیت و نمونه‌های پهنه کوه کمرتنگ در گستره کمان آتشفشانی و در مرز آداکیت و سنگ‌های قوس ماگمایی واقع شده‌اند (شکل ۱۰). در جدول ۳ سایر ویژگی‌های ژئوشیمیایی نمونه‌های مورد مطالعه با آداکیت‌ها (Defant and Drummond, 1990) مقایسه شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود قرابت خیلی نزدیکی بین آنها مشاهده می‌شود. ترکیب کانی‌شناسی آداکیت‌ها بین سنگ‌های حدواسط تا اسیدی (آندزیت، داسیت، ریولیت و معادل‌های درونی آنها) بوده و به‌طور معمول از آمفیبول غنی هستند (Defant and Drummond, 1990). نمونه‌های مورد مطالعه نیز ترکیب آندزیت و داسیت دارند و آمفیبول یکی از کانی‌های مافیک آنها است. مطالعات نشان داده است که سنگ‌های آداکیتی از طریق ذوب پوسته تحتانی توسط

می باشد و این نسبت بیانگر جایگاه کمر بندهای فرورانش است (Pearce, 1983). نمودار Rb/Th در مقابل Th (Pearce, 1983) برای تمایز نقش تبلور تفریقی به علاوه هضم (AFC) در مقایسه با تبلور تفریقی (FC) است. این نمودار بیانگر نقش اصلی تبلور تفریقی به اضافه مقادیر کمی از آغستگی و هضم برای نمونه های مورد مطالعه می باشد (شکل ۱۵). به منظور بررسی دقیق تر و تحول ماگمای آداکیتی پهنه، از نمودار $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ در مقابل $i(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ (Zindler and Hart, 1986) استفاده شد. همان طور که در نمودار شکل ۱۶ دیده می شود نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ نمونه های پهنه مورد مطالعه بین 0.70405 تا 0.70407 و مقدار متوسط $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ مقدار 0.51295 و مقدار $\epsilon_{\text{Nd}} = 6/10 - 6/02$ (جدول ۲) می باشند که در ناحیه آداکیتی های مرتبط با فرورانش قرار گرفته است و بیانگر آن است که از ورقه اقیانوسی فرورانده شده سبزوار نشأت گرفته است. بنابراین، بر اساس مشخصات پتروگرافی و ژئوشیمیایی و ایزوتوپی چنین نتیجه می شود که سنگ های آداکیتی پرسیلیس مورد مطالعه شاید از ذوب بخشی ورقه اقیانوسی فرورانده نئوتتیس (زیر شاخه دریا/اقیانوس سبزوار، دور خرد قاره شرق ایران مرکزی) به زیر البرز (توران) در تحت شرایط ترمودینامیکی رخساره آمفیبولیت تا کارنت آمفیبولیت ایجاد شده اند.

(Martin et al., 2005). با توجه به میزان سیلیس، نمونه های مورد مطالعه، متعلق به آداکیت های غنی از سیلیس، $\text{SiO}_2 \geq 69.2 \text{ wt}\%$ ، $\text{MgO} = 0.19-0.31 \text{ wt}\%$ ، $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} < 7.62 \text{ wt}\%$ (Sr = 273-936) است و در نتیجه از ذوب بخشی ورقه اقیانوسی فرورانده شده که با گوه گوشته ای نیز واکنش کرده به وجود آمده اند (Martin et al., 2005; Moyen, 2009). (شکل ۱۲). آداکیت ها نه فقط در جایگاه های تکتونیکی جلوقوس، کمان آتشفشانی اصلی، پشت قوس (Castillo, 2012; Drummond et al., 1996; Defant and Drummond, 1990)، همراه با فرورانش پوسته اقیانوسی به عنوان یک جزء ضروری، یافت می شوند، بلکه همچنین در پهنه های درون صفحه ای، ذوب بخشی پوسته قاره ای لایه لایه و ضخیم شده اتفاق می افتد، نیز یافت می شوند (Castillo, 2012). در نمودارهای $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ در مقابل درصد وزنی Al_2O_3 و Sr در مقابل $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (kamei et al., 2009)، همان طور که دیده می شود نمونه های مورد مطالعه در گستره آداکیت های مشتق شده از پوسته اقیانوسی قرار گرفته اند (شکل ۱۳). استفاده از نمودار Nb/Y در مقابل Rb/Y (Pearce, 1983) برای سنگ های مورد مطالعه، نقش غنی شدگی کمر بند فرورانش و یا آغستگی پوسته ای در ژن آنهارا نشان می دهد (شکل ۱۴). نسبت Rb/Nb در نمونه های مورد مطالعه بالا و بین ۵/۵ تا ۳۷



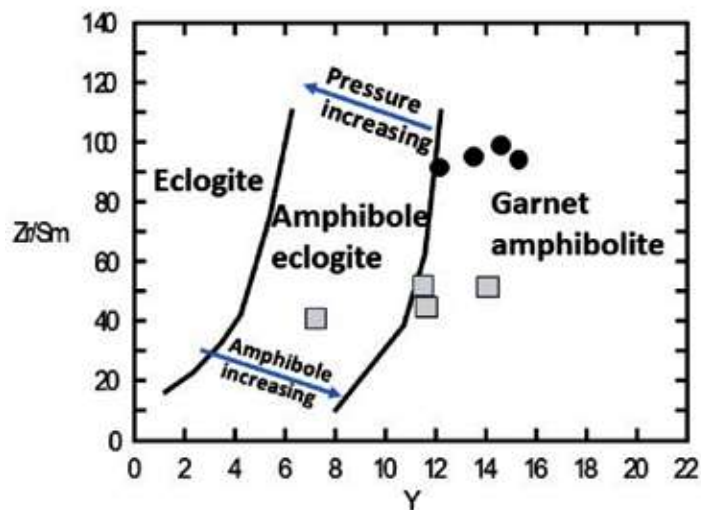
شکل ۹. نمودارهای تکتونوماگمایی برای تعیین جایگاه تکتونیکی سنگ های مورد مطالعه (Pearce, 1984)، همان طور که مشاهده می شود نمونه های مورد مطالعه در قلمرو گرانیت های کمان آتشفشانی واقع می شوند



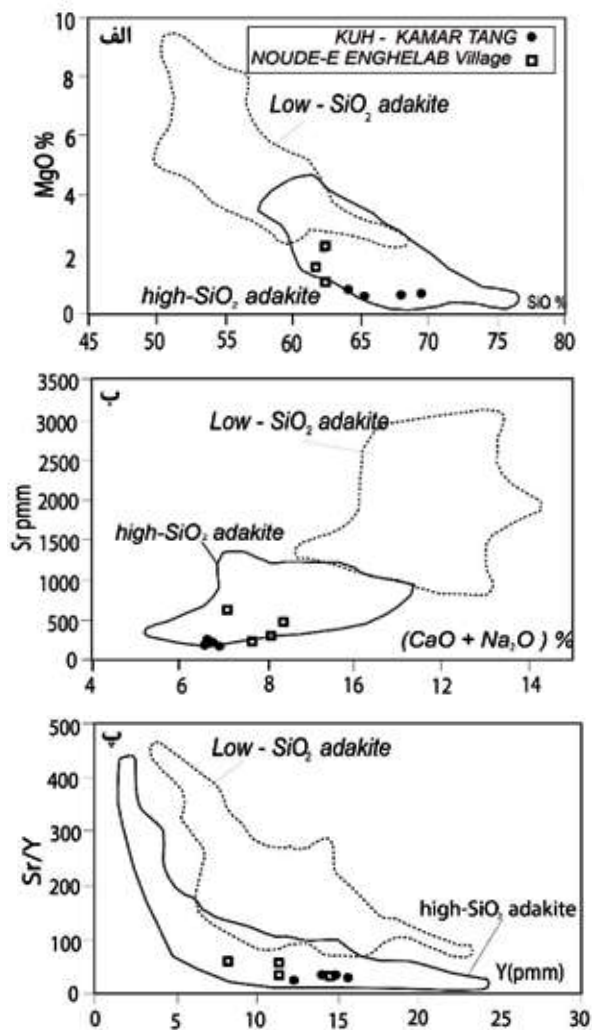
شکل ۱۰. الف) نمودار Sr/Y در مقابل Y، ب) نمودار $(La/Yb)_N$ در مقابل $(Yb)_N$ (Drummond and Defant, 1990) و قرارگیری نمونه‌های مورد مطالعه در قلمرو آداکیتی و با منشأ آمفیبولیت تا گارنت آمفیبولیت

جدول ۳. مقایسه ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های مورد مطالعه با ویژگی‌های ژئوشیمیایی آداکیت‌ها (Defant and Drummond, 1990)

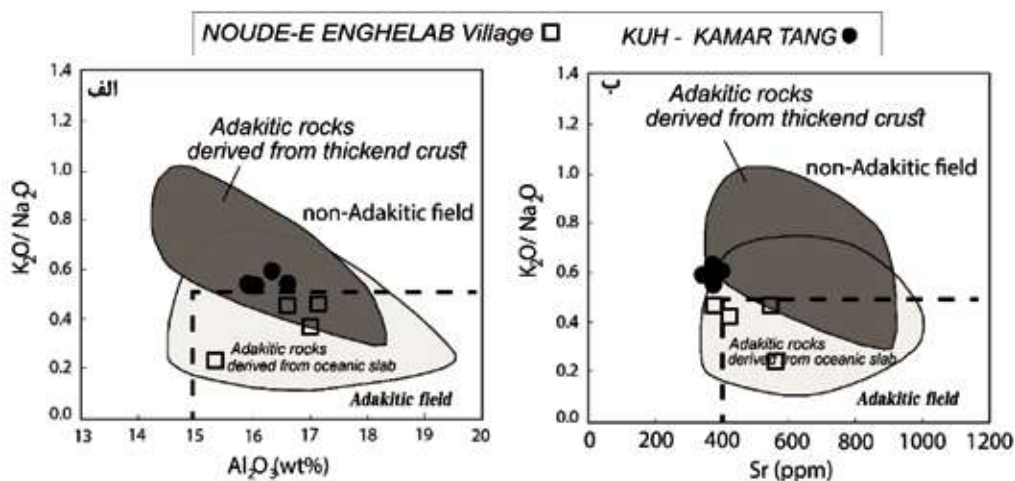
مقدار محاسبه شده برای نمونه‌های منطقه نوده کمرتنگ (شمال سبزوار)	مقدار محاسبه شده برای نمونه‌های منطقه نوده انقلاب (شمال سبزوار)	معیارهای شناخت آداکیت‌ها
$SiO_2 = 63.2-65.2$	$SiO_2 = 61.1-63.1$	$SiO_2 \geq 56 \text{ wt}\%$
$Al_2O_3 = 15.9-16.6$	$Al_2O_3 = 15.1-17.2$	$Al_2O_3 \geq 15$
$MgO = 0.44-0.85$	$MgO = 0.973-2.15$	$MgO < 3$
$Sr = 312-383$	$Sr = 373-585$	$Sr \geq 400 \text{ ppm}$
فقدان آنومالی منفی Eu $Y = 12.1-15.3$	فقدان آنومالی منفی Eu $Y = 7.1-14.2$	فقدان آنومالی منفی Eu $Y \leq 18$
$Sr/Y = 24.4-26.0$	$Sr/Y = 26.2-82.3$	$Sr/Y > 20$
$Yb = 1.4-1.7$	$Yb = 0.68-1.4$	$Yb \leq 1.9$
$La/Yb = 13.7-14.6$	$La/Yb = 5.1-9.8$	$La/Yb \geq 8$
Ta: 0.1, Nb: 13.8 (مقدار کم HFSE)	Ta: 0.2, Nb: 4.0 (مقدار کم HFSE)	مقدار کم HFSE (Nb, Ta)
$(^{87}Sr/^{86}Sr) = 0.70405$	$(^{87}Sr/^{86}Sr) = 0.70407$	$(^{87}Sr/^{86}Sr) \leq 0.7040$



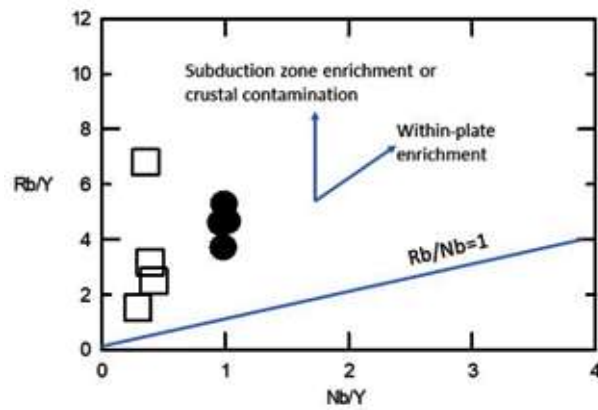
شکل ۱۱. نمودار Zr/Sm در مقابل Y (Foley et al., 2002) برای نمونه‌های مورد مطالعه



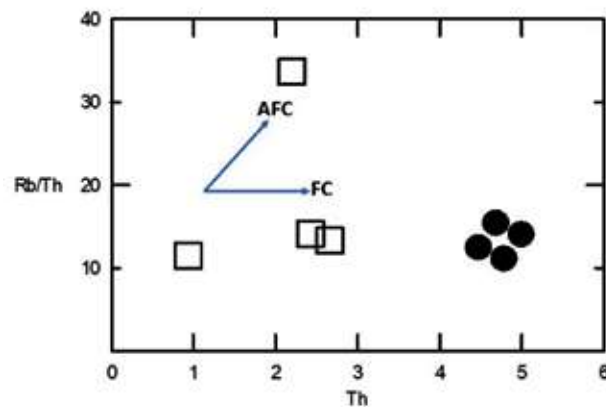
شکل ۱۲. الف) نمودار درصد وزنی MgO در مقابل SiO₂، ب) نمودار Sr در مقابل درصد وزنی K₂O+Na₂O، پ) نمودار Sr/Y در مقابل Y و قرارگیری نمونه های پهنه مورد مطالعه در گستره آداکیت های غنی از سیلیس (Martin et al., 2005; Moyen, 2009)



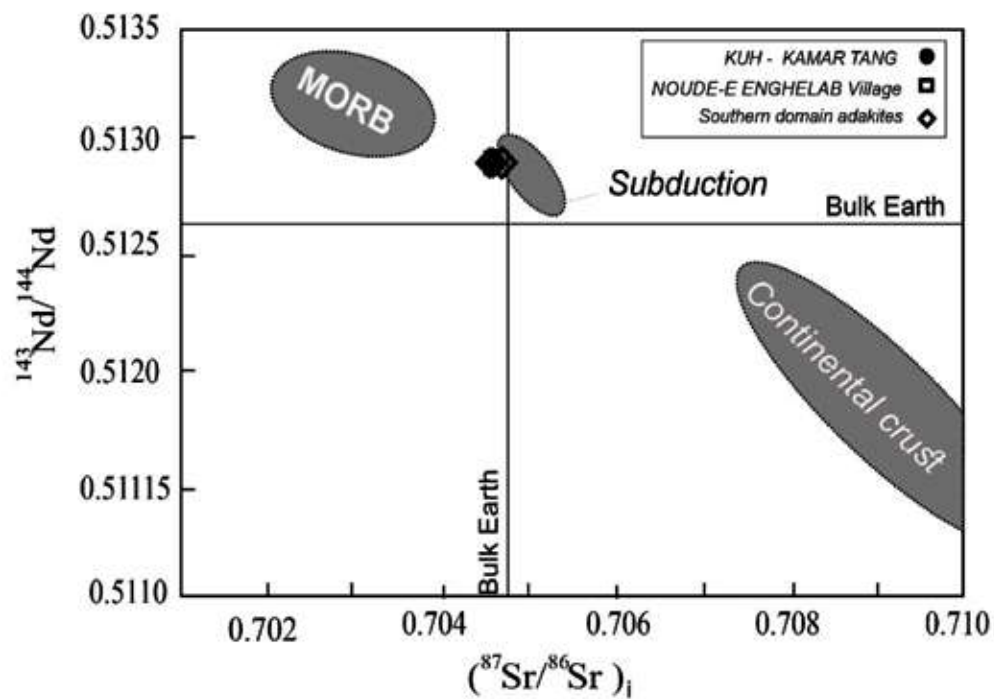
شکل ۱۳. الف) نمودار K₂O/Na₂O در مقابل درصد وزنی Al₂O₃، ب) نمودار Sr در مقابل K₂O/Na₂O (با تغییر از Kamei et al., 2009). همان طور که مشاهده می شود نمونه های مورد مطالعه در قلمرو آداکیت های مشتق شده از ورقه اقیانوسی در مرز مشترک با آداکیت های مشتق شده از پوسته ضخیم شده واقع می شوند



شکل ۱۴. نمودار Rb/Y در مقابل Nb/Y (Pearce, 1983). نمونه‌های مورد مطالعه در امتداد روند غنی‌شدگی از کمر بند فرورانش و یا آغستگی پوسته‌ای قرار می‌گیرند



شکل ۱۵. نمودار Rb/Th در مقابل Th (Pearce, 1983). نمونه‌ها از روند تبلور تفریقی تبعیت می‌کنند و اندکی هضم و آغستگی نشان می‌دهند



شکل ۱۶. نمودار همبستگی $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ در مقابل $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ برای نمونه‌های مورد مطالعه (Zindler and Hart, 1986)

نتیجه‌گیری

ژئوشیمی گنبد‌های ساب‌ولکانیک په‌نه باشتین (جنوب غربی سبزوار)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۲۱۰.

- قاسمی، ح.، صادقیان، م.، خانعلیزاده ع. و تنها ع.، ۱۳۸۹. سنگ‌شناسی، ژئوشیمی و سن‌سنجی گنبد‌های آداکیتی پرسیلیس کمان قاره‌ای نئوژن جنوب قوچان، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۳، ۱۸، ۳۴۷-۳۷۰.

- گردیده، س.، قاسمی، ح. و صادقیان، م.، ۱۳۹۷. سن‌سنجی U-Pb بر بلورهای زیرکن، نسبت‌های ایزوتوپی Sr-Nd و زمین‌شیمی گنبد‌های آداکیتی نئوژن کمان ماگمایی قوچان-اسفراین، شمال شرق ایران. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۲۶، ۲، ۴۵۵-۴۷۸.

- محمدی گورجی، ا.، قربانی، ق. و شفایی مقدم، ه.، ۱۳۹۴. ژئوشیمی و پتروژنز آداکیت‌های دامنه جنوبی نوار افیولیتی شمال سبزوار با تکیه بر نتیجه‌های ایزوتوپی‌های Sr-Nd-Pb. فصلنامه علوم زمین، ۹۴، (۹۵)، ۵۱-۶۳.

- Castillo, P. R., 2012. Adakite petrogenesis. *Lithos*, 304-316.

- Drummond, M. S., Defant, M. J., 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *Journal Of Geophysical Research*, 95, 21503-21521.

- Defant, M. J. and Drummond, M. S., 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature* 347, 662-665.

- Foley, S., Tiepolo, M. and vanucci, R., 2002. Growth of the early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. *Nature* 417, 837-840.

- Ghasemi, H. and Rezaei Kahkhaei, M., 2015. Petrochemistry and tectonic setting of the Davarzan Abbas Abad Eocene Volcanic (DAEV) rocks, NE Iran. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 6, 235-252. <https://doi.org/>

- Jafari, A. and Ghasemi, H., 2023. Geological history of the Sabzevar oceanic Basin, NE Iran:

ترکیب سنگ‌شناسی نمونه‌ها با توجه به بررسی‌های پتروگرافی و ژئوشیمیایی، آندزیت و داسیت می‌باشند. طبق نمودارهای عناصر نادر خاکی و کمیاب بهنجار شده نسبت به کندریت و گوشته اولیه، نمونه‌های مورد بررسی، در عناصر نادر خاکی سبک و لیتوفیل بزرگ یون، غنی‌شدگی و در عناصر نادر خاکی سنگین و عناصر با شدت میدان بالا به خصوص Ta، Nb و Ti تهی‌شدگی نشان می‌دهند. بر این اساس متعلق به کمربند‌های فرورانش می‌باشند. با توجه به ویژگی‌های ژئوشیمیایی از جمله نمودار Sr/Y در مقابل Y، سیلیس و سدیم سنگ‌های ساب‌ولکانیک مورد مطالعه متعلق به آداکیت‌های پرسیلیس هستند و از ذوب بخشی ورقه اقیانوسی فرورانده شده سبزوار به زیر البرز (اوراسیا) نشأت گرفته‌اند.

منابع

- بهرودی، ا. و عمرانی ج.، ۱۳۷۸. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ باشتین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- جمشیدی، خ.، ۱۳۹۴. پترولوژی، ژئوشیمی و پتروژنز گنبد‌های آداکیتی شمال باشتین، سبزوار. پایان‌نامه دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۸۰.

- جمشیدی، خ.، قاسمی، ح. و صادقیان، م.، ۱۳۹۳. پترولوژی و ژئوشیمی سنگ‌های آداکیتی سیلیس بالای پساافیولیتی سبزوار. پترولوژی، ۵، ۱۷، ۵۱-۶۱.

- جمشیدی، خ.، قاسمی، ح. و میائو، ل.، ۱۳۹۴. سن‌سنجی U-Pb و تعیین ترکیب منشأ گنبد‌های آداکیتی پساافیولیتی سبزوار. پترولوژی، ۶، ۲۳، ۱۲۱-۱۳۸.

- حیدری، م.، قربانی، ق. و شفایی مقدم، ه.، ۱۳۹۸. ترکیب اسپینل به‌عنوان شاخص پتروژنتیکی بخش گوشته‌ای افیولیت فرومد، شمال باختر سبزوار، شمال خاور ایران. فصلنامه علوم زمین، ۱۱۲، ۵۹-۷۰.

- رضایی کهخایی، م.، طاهری، ا.، قاسمی، ح. و گردیده، س.، ۱۳۹۷. زمین‌شیمی و زمین‌شناسی ایزوتوپی گنبد‌های آداکیتی په‌نه چکنه در جنوب قوچان شمال خاوری ایران. پترولوژی، ۴، ۲۵-۴۸.

- صالحی نژاد، ح.، ۱۳۸۷. بررسی پترولوژی و

An overview from continental rifting to obduction in the NeoTethys oceanic system. *Journal of Asian Earth Sciences*, 245, <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2023.105559>

- Jamshidi, K., Ghasemi, H., Miao, L. and Sadeghian, M., 2018. Adakite magmatism within the Sabzevar ophiolite zone, NE Iran: U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopic evidences. *Geopersia* 8 (1), 2018, PP. 111-130. DOI: 10.22059/geope.2017.242944.648352

- Jamshidi, K., Ghasemi, H., Troll, V., Sadeghian, M. and Dahren, B., 2015b. Magma storage and plumbing of adakite-type post-ophiolite intrusions in the Sabzevar ophiolitic zone, northeast Iran. *Solid Earth* 6: 1-24.

- Jhon, T., Klemm, R., Klemme, S., Hoffmann, E., J. and Gao J., 2011. Nb-Ta fractionation by partial melting at the titanite-rutile transition. *Cont. Mineral. Petrol.*, 161, 35-45.

- Kamei, A., Miyake, Y., Owada, M. and Kimura, J.I., 2009. A pseudoadakite derived from partial melting of tonalitic to granodioritic crust, Kyushu, southwest japan arc. *Lithos* 112, 615-625.

- Le Bas, M. J., Le maitre, R. W., Streckeis, A. and Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, Part 3, 745-750.

- Maniar, P. D. and Piccoli, P. M., 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin* 101, 635-643.

- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., Moyen, J. F. and Champion, D., 2005. An overview of adakite, tonalite-trondjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos* 79, 1-24.

- Moyen J.F., 2009. High Sr/Y and La/Yb ratios: The meaning of the "adakitic signature". *Lithos* 112(3-4), 556-574.

- Pearce, J.A., 1983. Trace element charac-

teristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe, R.S (ed), *Andesites*. Wiley.

- Pearce J.A., Harris N.B.W. and Tindle A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25, 956-983.

- Peccerillo, A. and Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contribution to mineralogy and petrology* 58, 63-81.

- Rollinson, H.R., 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman, Singapore, 397.

- Shafaii Moghadam, H., Rossetti, F., Lucci, F., Chiaradia, M., Gerdes, A., Martinez, M.L., Ghorbani, G. and Nasrabad, M., 2016. The calc-alkaline and adakitic volcanism of the Sabzevar structural zone (NE Iran): Implications for the Eocene magmatic flare-up in Central Iran. *Lithos*, 248-251, 517-535.

- Shafaii Moghadam, H., Li, Q. L., Kirchenbaur, M., Garbe-Schönberg, D., Lucci, F., Griffin, W. L. and Ghorbani, G., 2021. Geochemical and isotopic evolution of late Oligocene magmatism in Quchan, NE Iran. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22, 1-40.

- Shojaat, B., Hassanipak, A.A., Mobasher, K. and Ghazi, A.M., 2003. Petrology, geochemistry and tectonics of the Sabzevar ophiolite, North Central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 21, 1053-1067.

- Spies, O., Lensch, G. and Mihem, A., 1983. Chemistry of the post ophiolitic Tertiary volcanics between Sabzevar and Quchan, NE Iran. Geodynamic project (Geotravers) in Iran, final report. *Geo. Sur. Of Iran. Report No. 3*.

- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran; a review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52, 1229-1285.

- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic ba-

- salts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A. D., Norry M. J., (Eds.) *Magmatism in the Oceanic Basins*. Geological Society Special Publication 42, Blackwell Scientific, Cambridge, 313-345.
- Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic*. Oxford University Press, 466.
 - White, S., 2024. Mineral names-abbreviations-GSWA standards/policy for publications and ENS.
 - Zindler, A. and Hart, S. R., 1986. Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 14, 493-571.