

مقایسه زمین‌شناسی، پتروگرافی، زمین‌شیمی و منشأ ایگنیمبریت در آتشفشان‌های سبلان و سهند

جلیل قلمقاش

پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

زهرا کتابی

پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

الهام اصفهانی

پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

سید زاهد موسوی

دانشگاه آزاد اسلامی مشکین شهر

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۱۹

ghalamghash@yahoo.com

چکیده

در مطالعه حاضر نهشته‌های ایگنیمبریتی سبلان و سهند مورد مطالعه و نمونه برداری قرار گرفته‌اند. هدف از این مطالعه بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی، پتروگرافی و زمین‌شیمیایی این ایگنیمبریت‌ها است. ایگنیمبریت‌های سبلان دارای درشت بلورهای پلاژیوکلاز، آمفیبول، پیروکسن، بیوتیت و قطعات سنگی از نوع پومیس و اسیدین هستند. در صورتی که قطعاتی از درشت بلورهای پلاژیوکلاز، ساندین، کوارتز، هورنبلند و بیوتیت در متن ایگنیمبریت‌های سهند به همراه شیشه وجود دارد. بافت غربالی در بلورهای پلاژیوکلاز و خوردگی حاشیه برخی از کانی‌ها در ایگنیمبریت‌های سبلان و سهند نشان می‌دهد که ماگمای اولیه تحت‌تأثیر فرایندهای ماگمایی از جمله آلودگی و اختلاط ماگمایی قرار گرفته است. از نظر زمین‌شیمیایی ایگنیمبریت‌های سبلان و سهند به ترتیب ترکیب تراکی‌داسیتی - ریولیتی و داسیتی - ریولیتی دارند. این سنگ‌ها در نمودارهای عناصر کمیاب به‌هنگار شده، دارای غنی‌شدگی از LREE و LILE به ترتیب نسبت به HREE و HFSE هستند. مقادیر بالای Sr/Y-Y و La/Yb-Yb نشان می‌دهد که این سنگ‌ها ماهیت آداکیتی سیلیس بالا دارند. با توجه به این ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و بر اساس نمودار Sm/Yb در برابر La/Yb ایگنیمبریت‌های سبلان و سهند از ذوب‌بخشی پوسته قاره‌ای پایینی با ترکیب آمفیبولیت گارنت‌دار ایجاد شده‌اند.

کلمات کلیدی: ایگنیمبریت، سبلان، سهند، آداکیت.

مقدمه

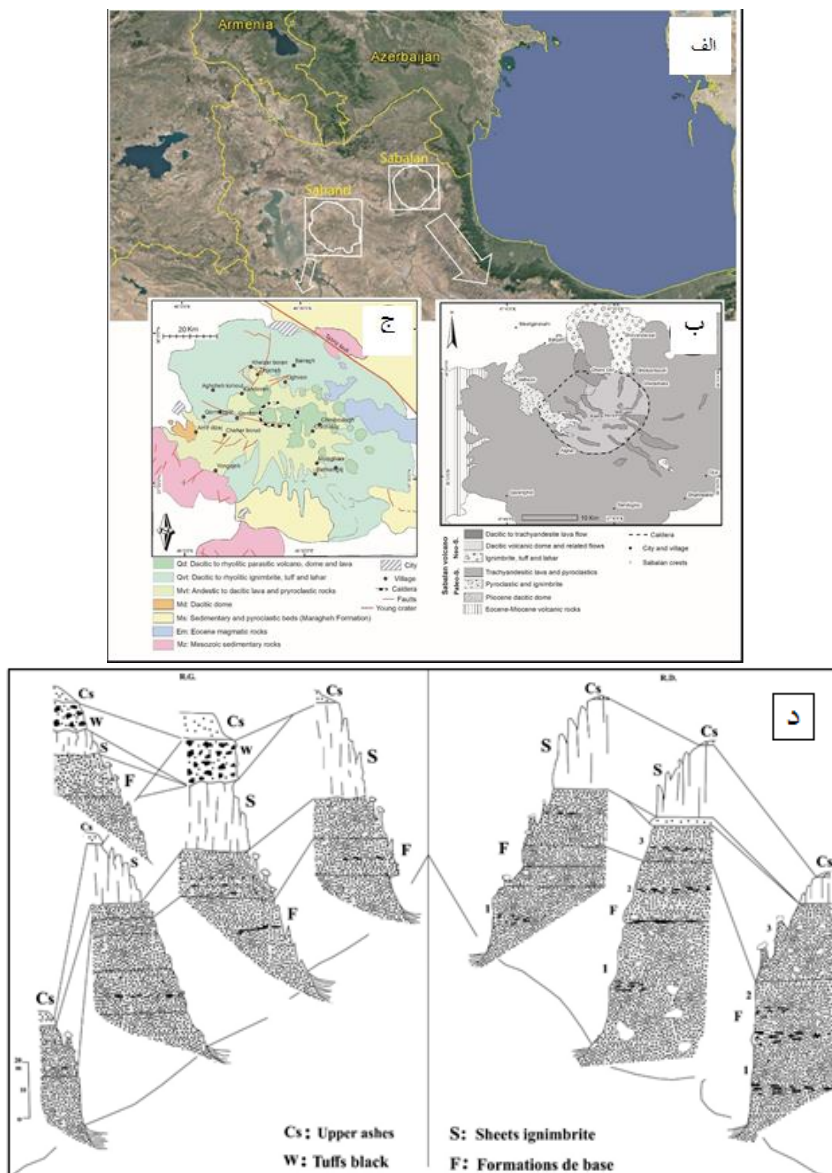
براساس مطالعات انجام شده توسط معین‌وزیری و امین‌سحابی (۱۳۵۶) آتشفشان سهند از میوسن فوقانی تا اواخر پلیستوسن به‌صورت متناوب فوران - های انفجاری و غیرانفجاری داشته است. غیوری خسرقی (۱۳۸۱) با مطالعات چینه‌شناسی نهشته‌های آذرآواری سهند، دو مرحله مهم و گسترده‌ی انتشار و تشکیل پهنه‌های ایگنیمبریتی را در سهند گزارش نموده است. طبق مطالعات ایشان سه افق ایگنیمبریتی در مواد آتشفشانی سهند وجود دارد که منشأ آنها سه مخزن ماگمایی جدا از هم بوده است. چهارلنگ (۱۳۹۱) معتقد است که ایگنیمبریت‌های سهند بیشتر در کنار رودها دیده می‌شوند و از لحاظ جوش - خوردگی از جوش‌نخورده و تا اندازه‌ای جوش‌خورده در سهند پراکنده هستند. فوران‌های ایگنیمبریتی یا ابرهای سوزان به لحاظ دمای بالا، سرعت فوران و گسترش زیاد بسیار خطرناک هستند. آتشفشان‌های سهند و سبلان به دلیل داشتن چنین فوران‌هایی در گذشته و فعال بودن منطقه احتمال فوران دوباره را دارند. در این مقاله تلاش شده خصوصیات زمین‌شناسی، پتروگرافی، زمین‌شیمی و منشأ سنگ‌های ایگنیمبریتی آتشفشان‌های سهند و سبلان با نگاه دقیق‌تر، مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد. نتایج این مطالعه برای ارزیابی خطر فوران‌های ایگنیمبریتی در مناطق سهند و سبلان کاربرد دارد.

آتشفشان‌های سبلان و سهند از مخروط‌های آتشفشانی پلیوسن - کواترنری در منطقه مرزی ایران، ترکیه، آذربایجان و ارمنستان هستند که براساس تقسیم‌بندی واحدهای ساختاری - رسوبی، در پهنه البرز - آذربایجان، در شمال - غرب ایران قرار گرفته‌اند (نبوی، ۱۳۵۵). به باور Didon and Germain (1976) آتشفشان سبلان در مراحل، قبل از تشکیل کالدرا (سبلان قدیمی)، هم‌زمان با تشکیل کالدرا و پس از تشکیل کالدرا (سبلان جوان) فوران داشته است. طبق گزارش موسوی (۱۳۹۲) با توجه شواهد چینه‌شناسی و سنگ - شناسی در سبلان، مرحله اول آتشفشانی سبلان در پلیوسن رخ داده است. سن این فوران‌ها ۲/۸ میلیون سال گزارش شده است. پس از فرونشست کالدرا سبلان، ماگماتیسیم بعدی سبب خروج گنبدها و گدازه‌های اسیدی تا حدواسط شده است. طبق مطالعات موسوی (۱۳۹۲) جوان‌ترین فوران در سبلان ۱/۳ میلیون سال پیش رخ داده است. (Ghalamghash et al., 2013) با سن - سنجی زیرکن به روش U-Pb زمان فوران سنگ‌های آتشفشانی قدیمی سبلان را ۴/۵ تا ۱/۳ میلیون سال و زمان تشکیل بخش جوان آن را ۰/۴۸۱ تا ۰/۱۸۸ میلیون سال تعیین نموده است.

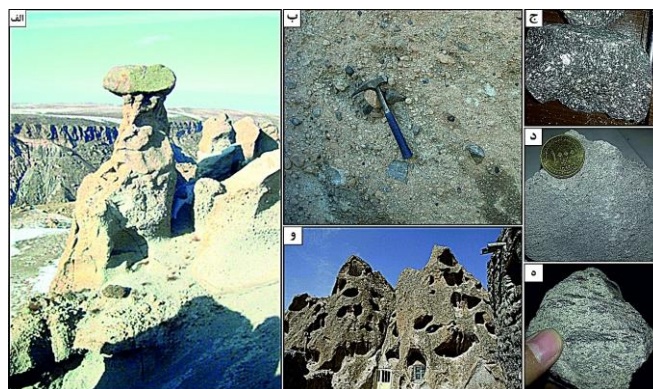
زمین شناسی

جریان‌های ایگنیمبریتی و پومیس در شمال آتشفشان سبلان، در محل شیروان دره و روستای قطورسویی با ضخامت زیاد رخنمون دارند که نشانگر انفجارهای شدید در فرآیند تشکیل سبلان است (شکل ۱ الف و ب). افزون بر آن رخنمون‌های کم حجم‌تری از سنگ‌های پیروکلاستیک، ایگنیمبریت و پومیس در غرب (اطراف روستای موئیل) و جنوب (جاده نیر- تله کابین) آتشفشان وجود دارند. (Didon and Germain, 1976) سنگ‌های پیروکلاستیک و ایگنیمبریتی سبلان را با عنوان سازند میور (موئیل) و سازند قطورسویی (نام روستایی در شرق شیروان دره) معرفی نموده‌اند. به باور ایشان حجم کل مواد پیروکلاستیک در دره قطورسویی یا شیروان دره ۵ تا ۶ کیلومتر مکعب است که از چند نقطه فوران نموده‌اند. سازند قطورسویی را از سه بخش شامل (۱) بخش قاعده‌ای، (۲) بخش توف‌های جوش‌خورده سفید و (۳) بخش توف‌های جوش‌خورده سیاه و خاکسترهای فوقانی تقسیم‌بندی کرده‌اند که در (شکل ۱) می‌توان تشکیلات مختلف قطورسویی را مشاهده نمود. سازند قاعده‌ای با ضخامت حدود ۱۰۰ متر، گسترش وسیعی در منطقه دارد و نهشته‌های آن تا مشکین‌شهر و لاهرود نیز کشیده می‌شود. طبق گزارش (Didon and Germain, 1976) بخش قاعده‌ای در سه مرحله مختلف فوران نموده است: اولین مرحله با ضخامت حدود ۵۰ متر و لایه‌بندی ضعیف به طور گسترده‌ای در پی سازند رخنمون دارد. در این نهشته‌ها قطعات بزرگ (تا چندین ده متر مکعب) گرد شده در زمینه دانه‌ریز قرار دارند. رنگ زمینه سفید متمایل به زرد است. جایگزینی داغ این نهشته‌ها موجب جوش خوردن ذرات ریز زمینه شده است به گونه‌ای که این نهشته‌ها دیواره‌های قائم به ارتفاع بیش از ۵۰ متر پدید می‌آورند. نهشته‌های دومین مرحله به چهار بخش به تقریب ۱۰ متری قابل تقسیم هستند. مواد سازنده مرحله دوم شبیه مرحله قبلی است با این تفاوت که درصد قطعات این مرحله بیشتر (حدود ۲۰ درصد) و در عین حال کمی کوچکتر از مرحله قبل هستند. نسبت به مرحله قبل، در هر لایه می‌توان جورشدگی بسیار مشخصی را مشاهده کرد. سومین مرحله از یک لایه به ضخامت حدود ۱۰ متری تشکیل شده و بسیار شبیه به مرحله دوم است ولی درصد قطعات درشت بسیار زیادتر (حدود ۵۰ درصد) بوده و فاقد لایه‌بندی و جورشدگی است. بر اثر فرسایش و با توجه به حضور قطعه‌سنگ‌های درشت، تعدادی "دودکش جن" بسیار زیبا در دامنه دره‌ها بوجود آمده. بخش توف‌های جوش‌خورده سفید به ضخامت تقریبی ۳۰ متر با گسترش طولی کم‌تر بر روی سازند قاعده‌ای قرار دارد. طبق گزارش (Didon and Germain, 1976) این توف‌ها ایگنیمبریت هستند و از سه جزء اصلی شامل (۱) پونس‌های سفید، (۲) قطعه سنگ‌های هیالوفیری و (۳) زمینه متشکل از پلاژیوکلاز، پیروکسن، هورنبلند، بیوتیت، آپاتیت و قطعات پونس و شیشه) با بافت جریان‌ی پدید آمده‌اند. (Didon and Germain, 1976) ترکیب شیشه‌های زمینه را ریوداسیتی- ریولیتی گزارش نموده‌اند. بخش توف‌های جوش‌خورده تیره و خاکسترهای فوقانی که در بخش شرقی دره قطورسویی با گسترش کمتر از توف‌های قبلی نمایان هستند. ضخامت آنها از ۱۰ متر تجاوز نمی‌کند. این توف‌ها در بعضی نقاط بروی لایه‌ای از قله‌سنگ‌های رودخانه‌ای تن‌نشین شده و حاکی از عملکرد فرسایش سیلابی بروی لایه‌های ایگنیمبریتی تحتانی است. سازند توف‌های جوش‌خورده تیره خیلی سست بوده و از قطعات سنگ‌های هیالوفیری بسیاری تیره در زمینه‌ای از خاکستری روشن تشکیل شده و درصد قطعات سنگی بیش از ۵۰ درصد و ابعاد متوسط آن حدود ۱۰ تا ۴۰ سانتی‌متر و گاهی بسیار بزرگتر است. این قطعات از شیشه اسیدینی تشکیل شده‌اند که در آن قطعاتی از پلاژیوکلاز غالباً بزرگ اندازه (۰/۵ تا ۱/۵ سانتی‌متر) دیده می‌شود. قطعات حالتی زاویه‌دار دارند ولی دارای پوسته‌ای کاملاً شیشه‌ای به ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر می‌باشند زمینه این

سنگ‌ها توفی بسیار دانه‌ریز به شدت جوش‌خورده و از ذرات شیشه قهوه‌ای رنگ خردشده (تراکش شیشه‌ای) و مجدداً جوش‌خورده تشکیل شده است. بعضی از بلورها بخصوص از نوع کانی‌های آهن - منیزیم‌دار (بیوتیت و آمفیبول) قطعه-قطعه شده در این توف‌ها به حالت پراکنده وجود دارند. بخش خاکسترهای فوقانی یک لایه ۲ یا ۳ متری سست حاوی تعدادی بمب‌های قشرانی به رنگ سفید است که در بخش فوقانی قرار دارد. بر اساس مطالعات حاضر در شیروان- دره و اطراف روستای قطورسویی لایه‌های متعددی از سنگ‌های پیروکلاستیک و ایگنیمبریت وجود دارد که در (شکل ۲- الف) بخشی از لایه اصلی نهشته جریانی ایگنیمبریتی همراه با نهشته‌های خاکستر آتشفشانی نمایش داده شده است. برخی از افق‌های ایگنیمبریتی شیروان دره دارای لایه‌بندی و جورشدگی ضعیفی هستند (شکل ۲- ب) اینگونه ایگنیمبریت‌ها به رنگ خاکستری روشن تا سفید، حاوی قطعه‌سنگ، بلور و شیشه می‌باشند. اندازه قطعات چند میلی‌متر تا چند ده سانتی‌متر متغیر است، هرچند اندازه بیشتر قطعات سنگی در حد ۱ تا ۵ سانتی‌متر است. از نظر اندازه قطعات سنگی، ایگنیمبریت‌ها را می‌توان برش‌توف تا لاپیلی توف و از نظر اجزاء تشکیل دهنده، لیتیک کریستال و بتریک توف نامگذاری نمود. قطعات سنگی به اشکال بمب و بلوک از جنس پرلیت، پومیس و اسکوری در متن ایگنیمبریت‌ها حضور دارند، قطعات جورشدگی خوبی ندارند و لایه‌بندی ایگنیمبریت‌ها دیده نمی‌شود (شکل‌های ۲ ج، د، و). معین‌وزیری و امین‌سحابی (۱۳۵۶) فعالیت آتشفشانی سهند را سه مرحله عنوان کردند: (۱) مرحله خروج گدازه‌های آندزیتی که قطعات تخریبی آن در ساختمان کنگلومرای شرکت نموده‌اند (اولین مرحله فعالیت آتشفشانی سهند). (۲) انتشار متناوب ایگنیمبریت با ترکیب داسیتی و گدازه‌های آندزیتی. (۳) خروج گدازه‌های داسیتی و ریوداسیتی که آخرین مرحله فعالیت آتشفشانی سهند است (شکل ۱ الف و ج). بر اساس مطالعات غیوری‌خسرقی (۱۳۸۱)، ایگنیمبریت‌های سهند، نهشته‌هایی به رنگ سفید تا صورتی و متشکل از خرد سنگ‌های مختلف، کانی‌های مجزا و پومیس هستند. اغلب خرده سنگ‌های این نهشته‌ها را داسیت‌ها تشکیل می‌دهند. منشأ خرده‌سنگ‌ها به احتمال از متلاشی شدن سنگ‌های دودکش و دیواره مخزن ماگمایی در هنگام فوران و حمل سنگ‌های سطح زمین در حین جریان است. طبق مطالعات غیوری‌خسرقی (۱۳۸۱) سنگ‌های آذرآواری ریزشی و جریانی سهند از سه مخزن جداگانه و در زمان‌های مختلف بیرون ریخته‌اند. پیرمحمدی (۱۳۹۰) عنوان کردند که مواد پیروکلاستیک سهند از ماسه‌های آتشفشانی، رس‌های پامیس‌دار، پامیس، کنگلومرا با قطعات سنگ‌های آتشفشانی سخت نشده، لاپیلی‌های هسته‌دار، آگلومرا، ایگنیمبریت و لاهار تشکیل شده‌اند. چهارلنگ (۱۳۹۱) واحدهای آتشفشانی سهند را به سه گروه سنگ‌های آتشفشانی سهند قدیمی، میانی و سهند جوان تقسیم نموده‌اند. سنگ‌های سهند قدیمی و میانی حجم اصلی مخروط آتشفشان سهند را تشکیل می‌دهند. سهند جوان به‌صورت گنبدی در داخل و اطراف کالدرای قدیمی رخنمون دارند. واحدهای سنگی سهند به صورت تناوب پیروکلاستیک‌ها (آذرآواری) و گدازه است. مواد پیروکلاستیک سهند از نهشته‌های آتشفشانی ریزشی شامل توف‌برش و نهشته‌های جریانی به صورت ایگنیمبریت می‌باشند. ایگنیمبریت‌های سهند در منطقه دره‌ی آی‌قیر، ليقوان- آبگرم، شرق نوجده و کندوان گسترش دارند. چهارلنگ و همکاران (۱۳۹۴) اظهار داشته‌اند که ایگنیمبریت‌های کندوان با رنگ روشن دارای قطعات سنگی (پومیس و گدازه) با اندازه چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر هستند. برپایه مطالعه سنگ‌نگاری اجزای سازنده ایگنیمبریت با جوش‌خوردگی متوسط تا بالا در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، که به احتمال زیاد در اثر تحمل دیاژنز بوده است و در زمان حاضر به گونه‌ای کاملاً متراکم نمایان هستند به‌نحوی که روستاییان آنها را حفاری نموده و درون آنها زندگی می‌کنند (شکل ۲- ه).



شکل ۱- الف) موقعیت آتشفشانهای سیلان و سهند بر روی تصویر ماهواره ای شمال غرب ایران، ب و ج) به ترتیب نقشه زمین شناسی آتشفشانهای سیلان و سهند و د) مقاطع سازند قطورسویی، برگرفته از (Didon and Germain, 1976). Cs: خاکسترهای فوقانی، W: توفهای سیاه، S: لایه ایگنیمبریتی یا توفهای جوش خورده سفید و F: تشکیلات قاعده‌ای.



شکل ۲- تصویر الف) نمایی از لایه اصلی نهشته جریان ایگنیمبریتی همراه با نهشته‌های خاکستر آتشفشانی، دید به سمت غرب در شیروان‌دزه. ب) دورنمایی ایگنیمبریت سیلان در شیروان‌دزه فاقد لایه‌بندی و جورشدگی، با خاکستری روشن تا سفید، حاوی قطعه‌سنگ، بلور و شیشه، اندازه قطعات از میلی‌متری تا ۲۰ سانتی‌متر، بیشتر آنها در حد ۵-۱ سانتی‌متری هستند. جنس قطعات سنگی از نوع پومیس، پرلیت و اسکوری می‌باشد. از نظر شکل قطعات سنگی به صورت بمب و بلوک در متن سنگ وجود دارد. جورشدگی خوبی ندارند و لایه‌بندی دیده نمی‌شود. از نظر اندازه قطعات سنگی این ایگنیمبریت‌ها برش توف - لاپیلی توف هستند. از لحاظ اجزاء تشکیل لیتیک کریستال ویتریک توف می‌باشند. ج) قطعه‌سنگ پرلیتی از شمال آتشفشان سیلان. د) قطعه‌سنگ پومیس از شمال آتشفشان سیلان. ه) قطعه‌سنگ اسکوری از شمال آتشفشان سیلان. و) تصویر ایگنیمبریت‌های سهند در کندوان را نشان می‌دهد.

روش انجام پژوهش

برای مطالعه زمین‌شیمی سنگ‌های ایگنیمبریتی آتشفشان‌های سیلان و سهند به ترتیب شش و پنج نمونه برداشت شد. تمام مراحل خرید و پودر کردن نمونه‌های سنگی منتخب به وسیله آسیاب‌های تنگستن در کارگاه خریداری سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور صورت گرفته است. تجزیه شیمیایی نمونه‌های سیلان به روش‌های XRF و ICP-MS در آزمایشگاه ACME کانادا انجام شده است. تجزیه شیمیایی اکسیدهای اصلی نمونه‌های سهند به روش XRF در آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و عناصر کمیاب به روش ICP-MS در آزمایشگاه مرکز پژوهش‌های کاربردی کرج انجام شده است.

پتروگرافی

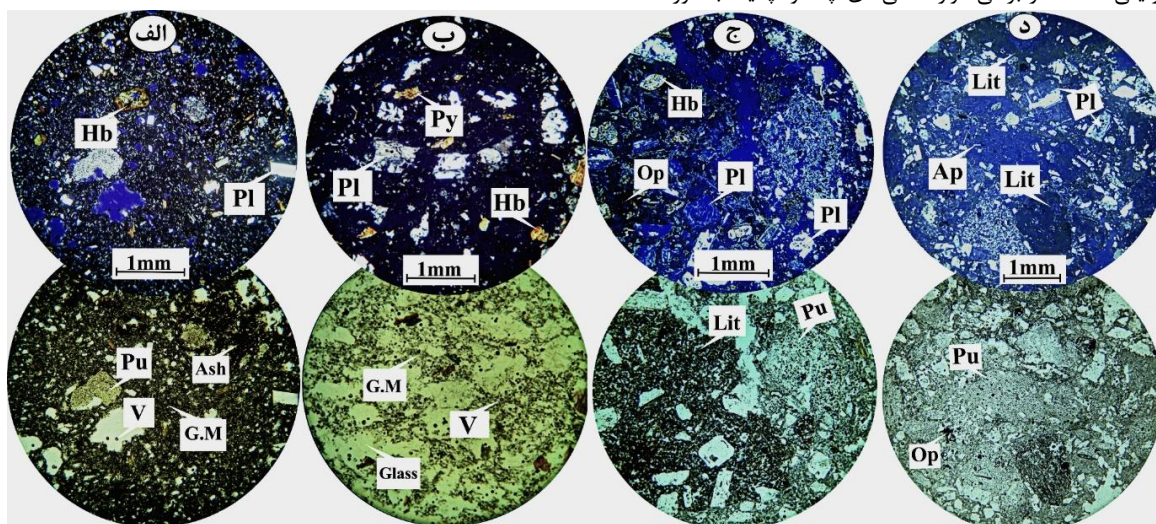
سنگ‌های ایگنیمبریتی آتشفشان سیلان، دارای بافت پورفیروکلاستیک و هیالوپورفیروکلاستیک هستند. در متن آنها قطعات درشت تا ریز به صورت شکسته تا سالم بلورهای پلاژیوکلاز، آمفیبول، پیروکسن، بیوتیت و قطعات سنگی وجود دارد. قطعات سنگی بیشتر از نوع پومیس هستند. بلورها معمولاً به صورت شکسته و نیمه شکل‌دار نمایانند. بیشتر بلورهای پلاژیوکلاز بی‌شکل و از حاشیه خورده شده‌اند و گاهی در آنها زونینگ عادی و بافت غربالی مشاهده می‌شود. بلورهای پلاژیوکلاز با اندازه‌گیری زاویه خاموشی به روش میشل‌لوی دارای ترکیب الیگوکلاز - آلبیت هستند. در بلورهای آمفیبول (هورنبلند) و پیروکسن (اوژیت) بافت غربالی دیده می‌شود و بعضی از آنها از حاشیه اکسیده شده‌اند (شکل ۳-ا). بافت غربالی در بلورهای پلاژیوکلاز و خوردگی حاشیه برخی از کانی‌ها، به عنوان مثال هورنبلندها نشان می‌دهد که ماگماهای اولیه تحت تأثیر فرایندهای ماگمایی از جمله تبلور جزء به جزء، آلودگی پوسته و اختلاط ماگما در طول صعود مواد مذاب به سمت بالا، ایجاد شده باشند (Mousavi et al., 2014). در این سنگ‌ها قطعات سنگی پومیس با ابعاد ۲،۵ تا ۰،۸ میلی‌متر نمایان است (شکل ۳-الف). در واقع بلورها و قطعات پومیس در این مقاطع با خمیره جوش خورده‌اند. طبق مطالعات (Didon and Germain, 1976) ترکیب تراشه‌های شیشه در ایگنیمبریت‌های سیلان ریوداسیتی - ریولیتی است. در برخی موارد کانی‌های اپک و آپاتیت به صورت

جزئی دیده می‌شود. با توجه به ترکیب کانی‌شناسی و جنس قطعات سنگی ایگنیمبریت‌های در حد داسیت تا آندزیت می‌باشند و از نظر اجزای تشکیل دهنده لیتیک کریستال ویتریک توف می‌باشند (شکل ۳-ب).

ایگنیمبریت‌های سهند دارای قطعات سنگی، بلور، پومیس و تراشه‌های شیشه‌ای به صورت جوش نخورده و تا اندازه‌ای جوش خورده دیده می‌شوند. در صورتی که ایگنیمبریت‌های جوش نخورده با پومیس‌ها بدون تغییر شکل و تراشه‌های شیشه‌ای جوش نخورده دیده می‌شوند و ایگنیمبریت‌های تا اندازه جوش خورده با پومیس‌های تغییر شکل یافته، کشیده و پهن شده (فیام) و تراشه‌های شیشه‌ای جوش خورده در متن سنگ نمایان هستند (شکل ۳-ج).

فلدسپار (پلاژیوکلاز و سانیدین)، کوارتز، آمفیبول، بیوتیت درشت بلورهای موجود در متن ایگنیمبریت‌های سهند هستند. ترکیب بلورهای پلاژیوکلاز با اندازه‌گیری زاویه خاموشی در حد الیگوکلاز - آلبیت است. بلورهای پلاژیوکلاز با اندازه‌گیری زاویه خاموشی به روش میشل‌لوی دارای ترکیب الیگوکلاز - آلبیت هستند. زونینگ و بافت غربالی در برخی از پلاژیوکلازها قابل مشاهده است. آمفیبول‌ها از نوع هورنبلند هستند و در مقاطع عرضی و طولی به صورت شکل-دار و کشیده دیده می‌شوند (شکل ۳-ج). بعضی از بلورهای آمفیبول دارای دگرسانی هستند و در حال تبدیل شدن به کانی‌های اپک می‌باشند، کانی اپک به صورت کانی فرعی و کانی ثانویه در خمیره ایگنیمبریت دیده می‌شوند.

بلورهای بیوتیت در ایگنیمبریت‌ها تا اندازه‌ای دگرسان وجود دارند. بافت غربالی در بلورهای پلاژیوکلاز و خوردگی حاشیه برخی از کانی‌ها، به عنوان مثال هورنبلندها نشان می‌دهد که ماگمای اولیه تحت تأثیر فرایندهای ماگمایی از جمله آلودگی و اختلاط ماگمایی در پوسته قرار گرفته است. کانی‌های اپک، آپاتیت و زیرکن به مقدار جزئی وجود دارند. بلورهای بیوتیت در ایگنیمبریت‌ها تا اندازه‌ای دگرسان وجود دارند. کانی‌های اپک، آپاتیت و زیرکن به مقدار جزئی در متن سنگ‌های ایگنیمبریتی وجود دارند. کانی‌های اپک به صورت اولیه و ثانویه (در اثر اکسیدگی کانی‌های مافیک مانند هورنبلند) می‌باشند (شکل ۳-د). از نظر اجزای تشکیل دهنده، ایگنیمبریت‌های سهند لیتیک کریستال ویتریک توف با ترکیب سنگی داسیت تا ریولیت می‌باشند (شکل ۳-ج).



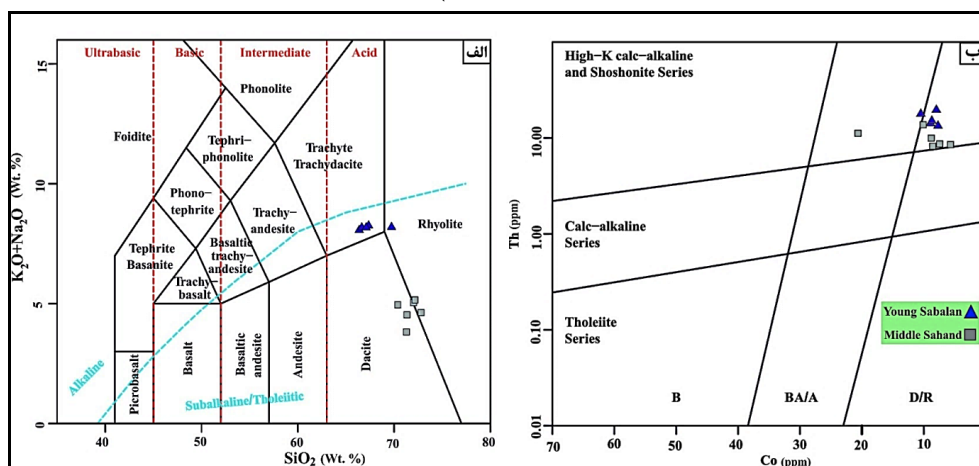
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی سنگ‌های ایگنیمبریتی سیلان و سهند. (الف) ایگنیمبریت سیلان از بلور، شیشه، قطعات سنگی (قطعات سنگی از پومیس هستند) و حفره تشکیل شده است. (ب) سنگ ایگنیمبریتی سیلان دارای بلور، حفره و شیشه که بلورها شکسته شده است و از حاشیه خورده شده و بهم جوش خورده‌اند. در خمیره شیشه حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد سنگ را تشکیل می‌دهد. (ج) سنگ ایگنیمبریتی سهند دارای قطعات سنگی، شیشه، پلاژیوکلاز و هورنبلند می‌باشد. عکس‌برداری در دو نور عادی (Plane-Polarized Light) (PPL) و پلاریزه (Cross-Polarized Light) (XPL) انجام شده است. علائم: Pl - پلاژیوکلاز، Hb - هورنبلند (آمفیبول)، Py - پیروکسن، V - حفره، Pu - پومیس، Op - اپک، Lit - لیتیک، Glass - شیشه و G.M - خمیره.

زمین‌شیمی

در (جدول ۱) نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی و فرعی ایگنیمبریت‌های سبلان و سهند ارائه شده است. براساس نمودار $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ بر گرفته از Le Bas et al., (1986) سنگ‌های ایگنیمبریت آتشفشان سبلان در محدوده اسیدی با ترکیب تراکی داسیت (به مقدار کمتر ریولیت) قرار گرفته‌اند. سنگ‌های ایگنیمبریت آتشفشان سهند نیز در محدوده اسیدی با ترکیب داسیت تا ریولیت قرار گرفته‌اند (شکل ۴). به این ترتیب ایگنیمبریت‌های سهند نسبت به ایگنیمبریت‌های سبلان اسیدی‌تر هستند. از نظر ماهیت ماگمایی و براساس نمودار (Le Bas et al., 1979) سنگ‌های ایگنیمبریتی سبلان و سهند ساب آکالن دارند (شکل ۴-الف). با توجه به نمودار (Hastie et al., 2007) ایگنیمبریت‌های سبلان و سهند در محدوده داسیت تا ریولیت و سری-های کالک‌آکالن پتاسیم بالا و شوشونیتی قرار گرفته‌اند. هرچند در این نمودار ایگنیمبریت‌های سبلان، نسبت به ایگنیمبریت‌های سهند دارای پتاسیم بالاتری هستند (شکل ۴-ب).

زمین‌شیمی عناصر کمیاب

برای ترسیم الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی سنگ‌های ایگنیمبریتی سبلان و سهند بر اساس ترکیب کندریت با استفاده از داده‌های (Sun and McDonough, 1989) به‌هنگار شده‌اند (شکل ۵-ا). در این نمودار، سنگ‌های ایگنیمبریتی سبلان و سهند در عناصر کمیاب خاکی سبک (LREE) غنی‌شدگی بیشتری نسبت به عناصر کمیاب خاکی سنگین (HREE) نشان می‌دهد. همان‌طوری که در الگوهای توزیع عناصر کمیاب‌خاکی نمایان است ایگنیمبریت‌های هر دو آتشفشان دارای ویژگی‌های مشابهی از نظر مقدار و نحوه توزیع این عناصر هستند (شکل ۵-الف). سنگ‌های هر دو آتشفشان غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE را دارند. مقایسه مقادیر میانگین نسبت La/Yb برای ایگنیمبریت‌های سبلان ($\text{La/Yb} = 39.7$) و ایگنیمبریت‌های سهند ($\text{La/Yb} = 24.8$) نشان می‌دهد که ایگنیمبریت‌های آتشفشان سبلان به طور نسبی دارای غنی‌شدگی بالاتری از LREE نسبت به HREE هستند. همچنین مقادیر بالای نسبت La/Yb سنگ‌ها و شیب زیاد در این نمودار نشان‌دهنده‌ی این است که گارنت در سنگ منشأ باقی مانده و از ویژگی‌های ماگماهای آداکیتی نزدیک به پوسته می‌باشد (Kay et al., 2005) (شکل ۵-الف).



شکل ۴-الف) نامگذاری شیمیایی ایگنیمبریت‌های سبلان و سهند بر اساس نمودار $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ Le Bas et al., (1979). تعیین ماهیت ماگمایی ایگنیمبریت‌های سبلان و سهند بر اساس نمودار Th-Co برگرفته از Hastie et al., (2007). در این نمودار حروف B، BA/A و D/R به ترتیب نشانگر محدوده بازالت، آندزیت بازالتی/آندزیت و داسیت/ریولیت هستند.

در (شکل ۵-ب) نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب نمونه‌های ایگنیمبریتی آتشفشان‌های سبلان و سهند، به‌هنگار شده بر پایه داده‌های گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) نمایش داده شده است. نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب سنگ‌های ایگنیمبریتی سبلان و سهند دارای ویژگی‌های مشابه شامل غنی‌شدگی نسبی عناصر LILE نسبت به عناصر HFSE هستند. در این نمودار عناصر Ta، Nb، Ti مقادیر پایین‌تری را نشان می‌دهند. نکته قابل توجه دیگر اینکه ایگنیمبریت‌های سبلان نسبت به ایگنیمبریت‌های سهند در عناصر ذکر شده دارای مقادیر بالاتری هستند (شکل ۵-ب).

بحث

سنگ منشأ ایگنیمبریت‌ها

سنگ‌های ایگنیمبریت آتشفشان سبلان دارای ترکیب تراکی داسیت تا ریولیت و ایگنیمبریت‌های سهند داسیت تا ریولیت با ماهیت کالک‌آکالن پتاسیم بالا هستند (شکل ۴). در نمودارهای چند عنصری هر دو آتشفشان غنی‌شدگی LILE نسبت به HFSE (به‌هنگار شده نسبت به گوشته اولیه) و LREE نسبت به HREE (به‌هنگار شده نسبت به کندریت) نمایان است (شکل ۵-الف). همچنین در نمودارهای عنکبوتی عناصر Ta، Nb، Ti، P،

سنگ‌های آداکیتی قرار گرفته‌اند. به گفته پیرمحمدی (۱۳۹۰) سنگ‌های آتشفشانی سهند ماهیت آداکیتی دارند و از ذوب‌بخشی ورقه‌ی اقیانوسی و تقابل آن با گوه‌ی گوشته‌ای شکل گرفته‌اند. چهارلنگ و همکاران (۱۳۹۴) با بررسی منشأ سنگ‌های آتشفشانی کندوان عنوان نموده‌اند که سنگ‌های آتشفشانی کندوان، از نوع آداکیت‌های سیلیس بالا هستند. طبق نظر (Martin 2005) et al., آداکیت‌ها به دو گروه آداکیت‌های سیلیس پایین ($SiO_2 < 60/wt$) و منیزیم بالا ($MgO = 4.9/wt$) و آداکیت‌های سیلیس بالا ($SiO_2 > 60/wt$) و منیزیم پایین ($0.5 < MgO < 4/wt$) تقسیم می‌شوند. به عقیده (Castillo, 2012) آداکیت‌های پرسیلیس از ذوب ورقه‌های اقیانوسی فرورو و دگرگون‌شده پدید آمده‌اند.

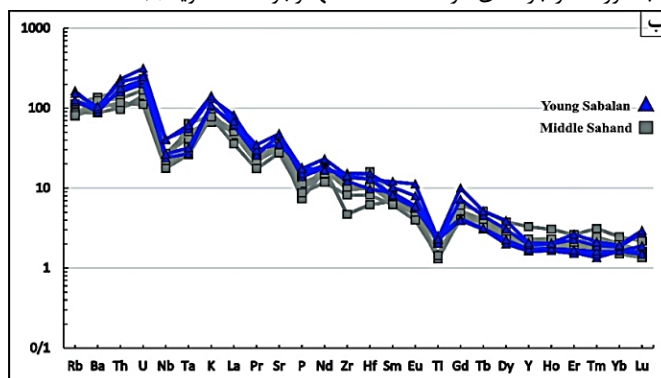
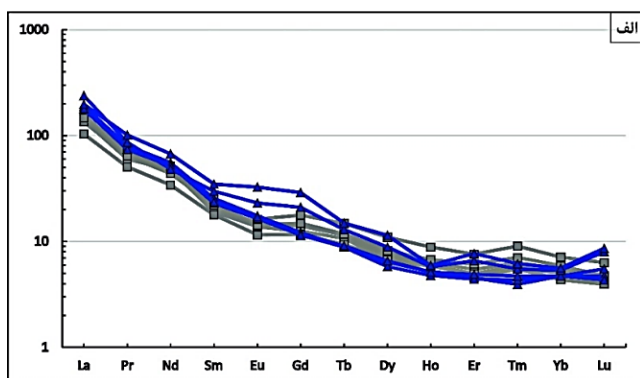
آداکیت‌های کم‌سیلیس نیز از تبلور مذاب‌های پدید آمده از ذوب گوه‌ی گوشته‌ای پریدوتیت متاسوماتیسم‌شده پدید آمده‌اند. به عقیده (Martin et al., 2005) آداکیت‌هایی با سیلیس بالا نشان‌دهنده ذوب ورقه اقیانوسی فرورونده است. به عقیده (Bourdon et al., 2002) و (Whattan et al., 2012) آداکیت‌هایی با منشأ ذوب ورقه‌ی اقیانوسی دارای MgO بالایی هستند که به دلیل وجود فعل و انفعالات زمین‌شیمیایی با گوشته بالایی است. در نمودار $MgO-SiO_2$ (شکل ۷) برگرفته از (Martin et al., 2005) سنگ‌های ایگنیمبریت سبلان و سهند با توجه به مقادیر ($SiO_2=64.7$) ($MgO=1.13$) سبلان و ($SiO_2=68.64$) ($MgO=0.72$) سهند، در محدوده‌ای آداکیت‌های سیلیس بالا و MgO پایین قرار گرفته‌اند.

با توجه به خصوصیات شاخص و مشترکی از جمله غنی‌شدگی LREE و تهی‌شدگی HREE و Y در ایگنیمبریت‌های سبلان و سهند به نظر می‌رسد گارنت به صورت فاز بازماندی در سنگ منشأ آنها وجود داشته و یا (winter,

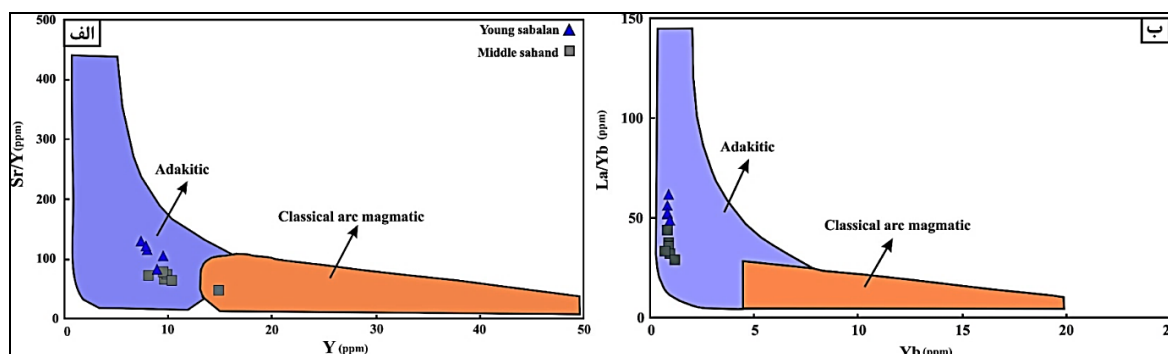
سنگ‌های آداکیتی قرار گرفته‌اند. به گفته پیرمحمدی (۱۳۹۰) سنگ‌های آتشفشانی سهند ماهیت آداکیتی دارند و از ذوب‌بخشی ورقه‌ی اقیانوسی و تقابل آن با گوه‌ی گوشته‌ای شکل گرفته‌اند. چهارلنگ و همکاران (۱۳۹۴) با بررسی منشأ سنگ‌های آتشفشانی کندوان عنوان نموده‌اند که سنگ‌های آتشفشانی کندوان، از نوع آداکیت‌های سیلیس بالا هستند. طبق نظر (Martin 2005) et al., آداکیت‌ها به دو گروه آداکیت‌های سیلیس پایین ($SiO_2 < 60/wt$) و منیزیم بالا ($MgO = 4.9/wt$) و آداکیت‌های سیلیس بالا ($SiO_2 > 60/wt$) و منیزیم پایین ($0.5 < MgO < 4/wt$) تقسیم می‌شوند. به عقیده (Castillo, 2012) آداکیت‌های پرسیلیس از ذوب ورقه‌های اقیانوسی فرورو و دگرگون‌شده پدید آمده‌اند.

آداکیت‌های کم‌سیلیس نیز از تبلور مذاب‌های پدید آمده از ذوب گوه‌ی گوشته‌ای پریدوتیت متاسوماتیسم‌شده پدید آمده‌اند. به عقیده (Martin et al., 2005) آداکیت‌هایی با سیلیس بالا نشان‌دهنده ذوب ورقه اقیانوسی فرورونده است. به عقیده (Bourdon et al., 2002) و (Whattan et al., 2012) آداکیت‌هایی با منشأ ذوب ورقه‌ی اقیانوسی دارای MgO بالایی هستند که به دلیل وجود فعل و انفعالات زمین‌شیمیایی با گوشته بالایی است. در نمودار $MgO-SiO_2$ (شکل ۷) برگرفته از (Martin et al., 2005) سنگ‌های ایگنیمبریت سبلان و سهند با توجه به مقادیر ($SiO_2=64.7$) ($MgO=1.13$) سبلان و ($SiO_2=68.64$) ($MgO=0.72$) سهند، در محدوده‌ای آداکیت‌های سیلیس بالا و MgO پایین قرار گرفته‌اند.

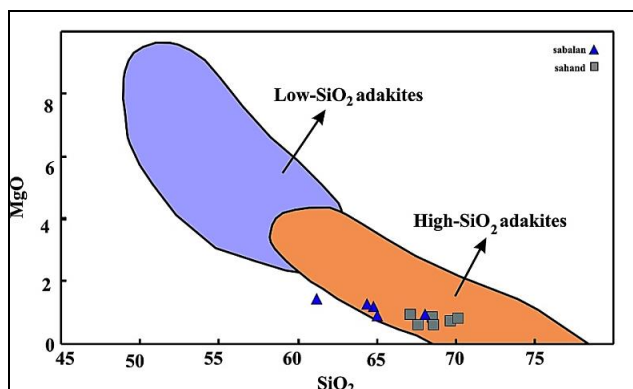
با توجه به خصوصیات شاخص و مشترکی از جمله غنی‌شدگی LREE و تهی‌شدگی HREE و Y در ایگنیمبریت‌های سبلان و سهند به نظر می‌رسد گارنت به صورت فاز بازماندی در سنگ منشأ آنها وجود داشته و یا (winter,



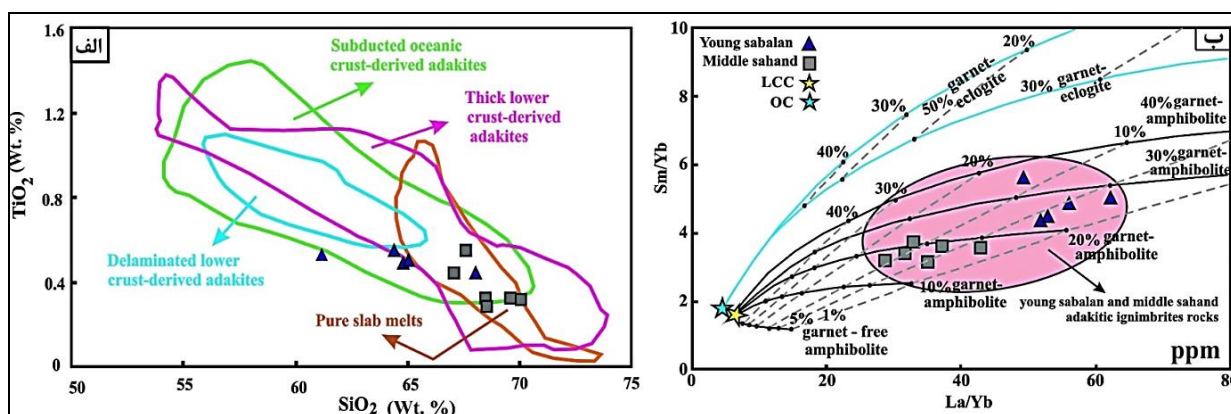
شکل ۵- (الف) الگوی توزیع عناصر کمیاب‌خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت با استفاده از داده‌های (Sun and McDonough (1989) برای سنگ‌های ایگنیمبریتی آتشفشان سبلان و سهند. (ب) نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب بهنجار شده نسبت به ترکیب گوشته اولیه با استفاده از داده‌های (Sun and McDonough (1989) برای سنگ‌های ایگنیمبریت آتشفشان سبلان و سهند.



شکل ۶- (a) نمودار $Sr/Y-Y$ و (b) نمودار $La/Yb-Yb$ برای تفکیک سنگ‌های آداکیتی و غیرآداکیتی برگرفته از (Defant and Drummond, 1990)



شکل ۷- نمودار MgO-SiO₂ برگرفته از (Martin et al., 2005). سنگ‌های ایگنیمبریت آتشفشان سلان و سهند در محدوده آداکیت‌های سیلیس بالا و MgO پایین قرار گرفته‌اند.



شکل ۸- (الف) نمودار TiO₂ در برابر SiO₂ برگرفته از (Eyuboglu et al., 2013). (ب) نمودار Sm/Yb-La/Yb برگرفته از (Karsli et al., 2013).

ترکیب داسیتی-ریولیتی از نوع آداکیت‌های سیلیس بالا هستند. سنگ‌های ایگنیمبریتی سلان و سهند از ذوب‌بخشی سنگ‌های آمفیبولیت-گارت‌دار پوسته‌ی قاره‌ای پایینی ایجاد شده‌اند. بر پایه زمین‌شناسی منطقه به نظر می‌رسد که گارت در اثر ضخیم‌شدگی و فشارش پوسته پایینی طی مراحل انتهایی فروانش-برخورد بوجود آمده و پس از ذوب بخشی به صورت فاز بازماندی (Restite) در منشاء بوده است. مدل سازی زمین‌شیمیایی بر اساس نمودار Sm/Yb در برابر La/Yb نشان می‌دهد که سنگ‌های ایگنیمبریتی سلان و سهند به ترتیب از ذوب بخشی حدود ۲۰-۳۰ تا ۱۵-۲۰ درصدی آمفیبولیت‌گارت‌دار در پوسته قاره‌ای پایینی پدید آمده‌اند. این مطالعات نشان می‌دهد که درجه ذوب‌بخشی سنگهای منشاء برای تشکیل ماگمای اولیه ایگنیمبریتی‌های سهند پایین‌تر از ایگنیمبریتی‌های سلان بوده است.

نتیجه‌گیری

سنگ‌های ایگنیمبریت آتشفشان سلان ترکیب تراکی داسیت تا ریولیت و ایگنیمبریتی‌های آتشفشان سهند ترکیب داسیت تا ریولیت (نسبت به ایگنیمبریتی‌های سلان اسیدی‌تر) دارند. ایگنیمبریتی‌های سلان و سهند دارای ماهیت کالک‌آلکانل پتاسیم بالا تا شوشونیتی هستند. ایگنیمبریتی‌های سلان، نسبت به ایگنیمبریتی‌های سهند دارای پتاسیم بالاتری هستند. در نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب به‌هنجار شده سنگ‌های ایگنیمبریتی سلان و سهند دارای غنی‌شدگی LILE و LREE به ترتیب نسبت به HFSE و HREE هستند. در نمودارهای عنکبوتی به‌هنجار شده نسبت به گوشته اولیه عناصر Ta، Nb، Ti تهی‌شدگی نسبی نشان می‌دهند. مقادیر بالای Sr/Y-Y و La/Yb-Yb نشان می‌دهد که سنگ‌های ایگنیمبریتی سلان و سهند با

منابع

- پیرمحمدی، ف.، ۱۳۹۰، مطالعه پترولوژیکی، زمین‌شیمی و پتروژنز سنگ‌های آتشفشانی شرق و جنوب‌شرق آتشفشان سهند با نگرشی ویژه بر سنگ‌های آذرآواری، رساله دکتری، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
- نبوی، م.، ۱۳۵۵، دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۰۹ ص.
- غیوری‌خسرقی، ن.، ۱۳۸۱، مطالعه چینه‌شناسی، پتروگرافی و زمین‌شیمی افق‌های ایگنیمبریتی سهند. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تربیت معلم تهران، ایران، ۱۴۷ ص.
- معین‌وزیری، ج.، امین‌سحابی، الف.، ۱۳۵۶، سهند از نظر ولکانولوژی و ولکانوسدیمتری، انتشارات دانشگاه تربیت معلم، ۵۹ ص.
- موسوی، ز.، ۱۳۹۲، پترولوژی و آتشفشان‌شناسی آتشفشان سلان، پایان‌نامه دکتری، دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ایران.
- چهارلنگ، ر.، ۱۳۹۱، پتروژنز آتشفشان سهند و مقایسه آن با آتشفشان‌های کواترنری در قفقاز و شرق آناتولی، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، پژوهشکده علوم زمین و سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ایران، ۱۶۵ ص.
- چهارلنگ، ر.، قلمقاش، ج.، امامی، م.، عمرانی، ج.، ۱۳۹۴، منشأ سنگ‌های آتشفشانی کندوان (شمال غرب ایران): با استفاده از اطلاعات جدید زمین‌شناسی، پتروگرافی و زمین‌شیمی، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دانشگاه شهید چمران اهواز، شماره ۱۸، ص ۱-۱۰.

- Bourdon, E., Eissen, J. P., Monzier, M., Robin, C., Martin, H., Cotton, J., Hall, M. L., 2002, Adakite-like lavas from Antisano volcano (Ecuador): Evidence for slab melt metasomatism beneath the Andean volcanic zone, *Journal of Petrology*, Vol: 43, p: 199-217.
- Castillo, P. R., 2012, Adakite petrogenesis, *Lithos*, Vol: 134, p: 304-316.
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990, A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. In gao, Y., Hou, Z., Kamber, B.S., Wei, R., Meng, X., Zhao, R., 2007.: 153, 105-120.
- Didon, J., Germain, Y.M., 1976, Le Sabalan, Volcan Plio-Quaternaire de l'Azerbaïdjan oriental (Iran): Etude géologique et pétrographique de la difice et de son environnement régional [Ph.D. thesis], Docteur du 3^{ème} cycle, Université de Grenoble, France.
- Eyuboglu, Y., Santosh, M. O., Dudas, F., Akaryali, E., Chung, S.L., Akdag, K., Bektas, O., 2013, The nature of transition from adakitic to non-adakitic magmatism in a slab window setting: A synthesis from the eastern Pontides, NE Turkey, *Geoscience Frontiers*, Vol: 4, p: 353-375.
- Ghahamghash, J., Mousavi, Z., Hassanzadeh, J., Schmitt, A. K., 2013, Sabalan volcano, northwest Iran: Geochemistry and U-Pb zircon geochronology, GSA Annual Meeting in Denver: 125th Anniversary of GSA.
- Guo, Z., Wilson, M., Liu, J., 2007, Post-collision adakites in south Tibet: Products of partial melting of subductin0modified lower crust, *Lithos*, Vol: 96, p: 205-224.
- Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A., Mitchell, S.F., 2007, Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram, *Journal of Petrology*, Vol: 48, No:12, p: 2341-2357.
- John, T., Klemm, R., Klemme, S., Pfander, J.A., Hoffmann, J.E., Gao, J., 2011, Nb-Ta fractionation by partial melting at the titanite-rutile Transition, *Contrib Mineral Petrol*, Vol: 161, p: 35-45.
- Karsli, O., Dokuz, A., Uysal, I., Aydin, F., Kandemir, R., Wijbrans, J., 2010, Generation of the Early Cenozoic adakitic volcanism by partial melting of mafic lower crust, Eastern Turkey: implications for crustal thickening to delamination, *Lithos*, Vol: 114, p: 109-120.
- Karsli, O., Uysal, i., Uysal, I., Dilek, Y., Aydin, F., Kandemir, R., 2013, Geochemical modelling of early Eocene adakitic magmatism in the Eastern Pontides, NE Anatolia: continental crust or subducted oceanic slab origin?, *International Geology Review*, Vol: 55, No: 16, p: 2083-2095.
- Kay, S.M., Godoy, E., Kurtz, A., 2005, Magmatism in the south-central Andes: Episodic arc migration, crustal thickening, subduction erosion, and magmatism in the south-central Andes, *Geological Society of America Bulletin*, p: 67-88.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on total Alkali-Silica content, *Journal of petrology*, Vol: 27, 745-750.
- Liotard, J. M., Dautria, J.M., Bisch, D., Condomines, J., Mehdizadeh, H., Ritz, J. F., 2008, Origin of the absarokite-banakitite association of the Damavand volcano (Iran): trace elements and Sr, Nd, Pb isotope constraints, *International Journal of Earth Sciences*, Vol: 97, p: 89-102.
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., Moyen, J. F., Champion, D., 2005, An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution, *Lithos*, Vol: 79, p: 1-24.
- McKenzie, D. P., Onions, R. K., 1991, Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations, *Journal of petrology*, Vol: 32, p: 1021-1091.
- Mehdizadeh, H., Liotard, J.M., Dautria, J. M., 2002, Geochemical characteristics of an intracontinental shoshonitic association: the example of the Damavand volcano, Iran, *Comptes Rendus Geoscience*, Vol, 334, p: 111-117.
- Moyen, J. F., 2009, High Sr/Y and La/Yb ratios: The meaning of the adakitic signature, *Lithos*, Vol: 112, p: 556-574.
- Mousavi, Z., Darvishzadeh, A., Ghahamghash, J., Vosoughi Abedini, M., 2014, Volcanology and geochronology of Sabalan volcano, the highest stratovolcano in Azerbaijan region, NW Iran, Vol: 128, No: 1, p: 85-98.
- Pirmohammadi Alishah, F., 2015, Geochemistry and tectonics of the Formation of Sahand Dacitic Dome, Southeast of Tabriz (Northwest of Iran), *Journal of Tethys*, Vol: 3, No: 4, p: 327-339.
- Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Raziq, A., and Fletcher, T., 2012, High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu ± Mo ± Au potential: Examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan, *Economic Geology*, Vol: 107, p: 295-332.
- Rollinson, H.R., 1993, Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation, Longman Scientific & Technical, London.
- Sun, S.S., McDonough W.E., 1989, Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, *Magmatism in the ocean Basins* Ed. Sunders A.D., Norry M.J. Geological Society of London Special Publication, Vol: 42, p: 313-345.
- Whattan, S. A., Montes, C., McFadden, R. R., Cardona, A., Ramirez, D., Valencia, V., 2012, Age and origin of earliest adakitic-like magmatism in Panama: Implication for the tectonic evolution of the Panamanian magmatic arc system, *Lithos*, Vol: 142-143, p: 226-244.
- Winter, J.D., 2001, *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*, Prentice-hall Inc. upper Saddle River, New Jersey, p: 697.