

ژئوشیمی و پتروژنز ولکانیک‌های شمال منطقه لاهرود- اردبیل: مثالی از پیدایش سری‌های شوشونیتی در شمال غرب ایران

هادی شفایی مقدم^{۱*} و حبیب شهبازی شیران^۲

^۱ دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

^۲ بخش باستان‌شناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

بازالت‌ها، آندزیت‌ها، تراکی آندزیت‌ها، تفریت‌ها و لاتیت‌ها با گرایش شوشونیتی از مهم‌ترین توالی‌های ولکانیکی ائوسن منطقه لاهرود (اردبیل) هستند. پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم، بیوتیت و آمفیبول همراه با کلینوپیروکسن از مهم‌ترین تشکیل‌دهندگان تراکی آندزیت‌ها (شوشونیت‌ها) هستند، در حالی که کلینوپیروکسن، پلاژیوکلاز و بیوتیت از کانی‌های تشکیل‌دهنده بازالت‌های شوشونیتی (آبساروکیت‌ها) هستند. ولکانیک‌های منطقه لاهرود دارای غنی‌شدگی در عناصر نادر خاکی سبک بوده و با غنی‌شدگی در LILE و تهی‌شدگی در HFSE مشخص می‌شوند. خصوصیات پتروگرافی به همراه ژئوشیمی عناصر نادر خاکی و عناصر کمیاب نشان‌دهنده گرایش شوشونیتی آنها و اشتقاق از یک محیط مرتبط با فروورانش است. نقش رسوبات ورقه فروورانش شده در ناحیه منشأ گدازه‌های لاهرود با توجه به خصوصیات ژئوشیمیایی این گدازه‌ها محرز است. ولکانیک‌های مورد مطالعه از ذوب‌بخشی اندک ($0.1 >$ تا $3 <$) یک منشأ لرزولیتی گارنت-اسپینل دار حاصل شده‌اند. مقایسه ولکانیک‌های منطقه لاهرود با گدازه‌های پلیوکواترنری سیلان و ولکانیک‌های ائوسن منطقه هشتجین نشان‌دهنده گرایش ژئوشیمیایی منشأ گوشته‌ای و درجه ذوب‌بخشی متفاوت است. تشکیل این سری‌های آتشفشانی می‌تواند در ارتباط با پرشیب شدن و گسستگی صفحه فروورانش در یک زون برخوردی پس از فروورانش در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: ائوسن، تهی‌شدگی در عناصر با قدرت میدانی بالا، زون فروورانش، سنگ‌های ولکانیکی منطقه لاهرود، شوشونیت، غنی‌شدگی در عناصر نادر خاکی سبک

مقدمه

شمال غرب ایران تا ناحیه بزمان در جنوب شرق ایران امتداد دارد (Schroder, 1944) (شکل ۱). در انتها الیه شمال غربی ایران، این نوار با زون ولکانیک ترشیاری تا کواترنری البرز تداخل پیدا می‌کند. به‌طور کلی، نوار

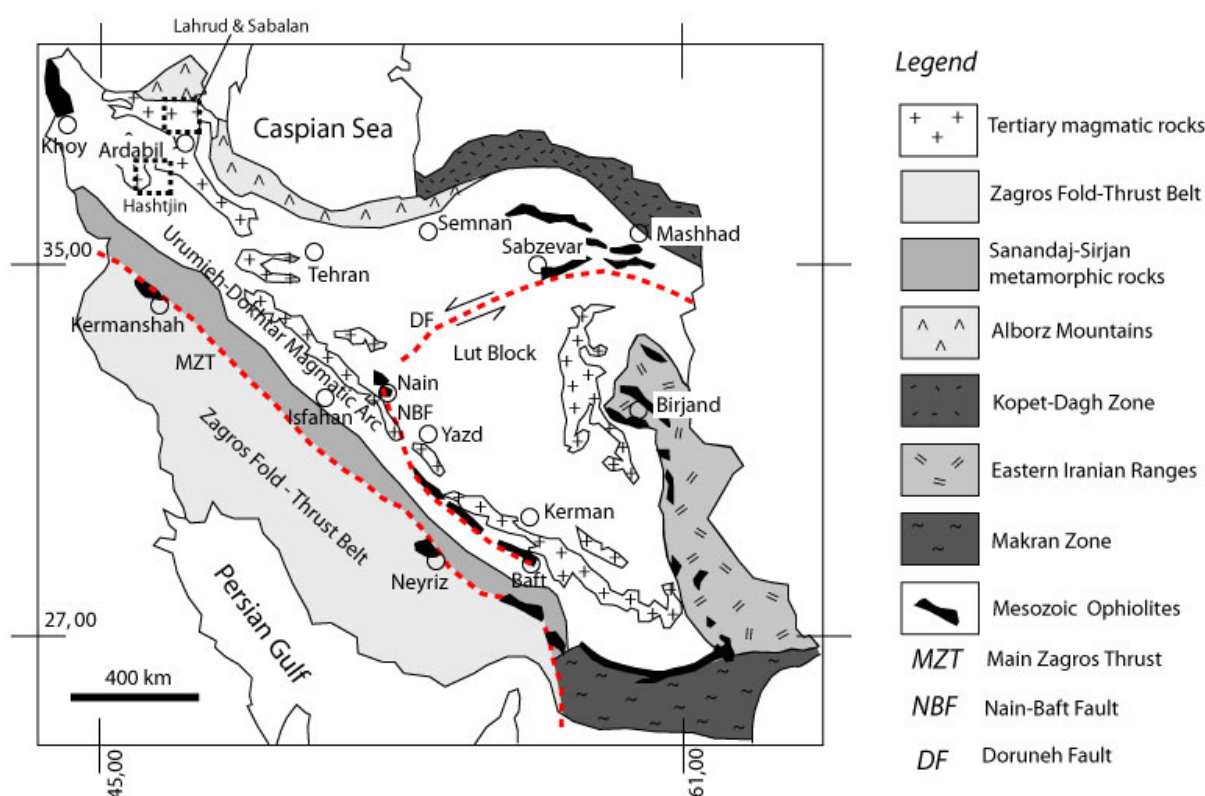
نوار ولکانیکی ایران مرکزی (نوار ارومیه-دختر) شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های ولکانیکی-پلوتونیک است که به‌طول تقریبی ۱۸۰۰ کیلومتر از ماکو در

مثال: Stocklin, 1960, 1968, 1974a,b; Assereto, 1966a,b; Stampfli, 1978; Alavi, 1996; Alberti *et al.*, 1976; Bailey *et al.*, 1948; Gansser and Huber, 1962; Dostal and Zebri, 1978; Riou *et al.*, 1981; Kazmin *et al.*, 1986; Innocenti *et al.*, 1982).

طیفی از سنگ‌های ولکانیک و پلوتونیک با ترکیبات و سن‌های متفاوت در بخش شمال غرب و غرب این نوار کوهزایی؛ یعنی ایالت سنگ‌شناسی آذربایجان رخنمون دارند. به‌طور کلی، می‌توان بخش شمال غربی ایران را در سه حوضه رسوبی و کمربند تکتونوماگمایی بررسی کرد: (۱) کمربند البرز غربی و یا رشته کوه‌های تالش؛ (۲) کمربند ماگمایی ارومیه-دختر و (۳) حوضه رسوبی جنوب دریای خزر.

کوهزایی البرز به شکل یک نوار سینوسی شکل و متأثر از حرکات کوهزایی سیمین و آلی از شمال غرب کشور تا شمال شرق کشیده شده است. این نوار کوهزایی در شمال غرب به رشته کوه‌های قفقاز کوچک (Lesser Caucasus) و در شمال شرق به رشته کوه‌های Parapamirus یا فیروزکوه افغانستان می‌پیوندد. از طرف دیگر، یک ایالت ماگمایی جوان و بزرگ در بین دریای خزر و دریای سیاه قرار گرفته و به طرف غرب به داخل آناتولی مرکزی کشیده شده است و با عنوان ایالت ماگمایی آذربایجان شناخته می‌شود (Alberti *et al.*, 1980).

زمین‌شناسان بسیاری در دهه‌های اخیر کوشیده‌اند مسائل زمین شناختی نوار کوهزایی آذربایجان را حل کرده، با نوارهای ولکانیکی دیگر مقایسه نمایند (برای



شکل ۱- نمایش زون‌های ساختاری ایران با تکیه بر پراکندگی سنگ‌های آذرین ترشیری (نوار ماگمایی ارومیه-دختر) و موقعیت منطقه مورد مطالعه (با تغییرات از Berberian, ۱۹۸۳)

امتداد بخش شمالی این حوضه وجود یک فروانش یا به زیر تراست شدن (Underthrusting) را به زیر بخش میانی این حوضه محرز می‌سازد (Allen et al., 2003b). در نتیجه این فروانش بخش شمال غربی این حوضه دچار یک سوبسیدانس تکتونیکی (به میزان $2/4$ کیلومتر) در زمان پلیوسن و کواترنری شده است (Allen et al., 2002). از طرف دیگر، زون تالش بخشی از البرز بوده، اما به سبب ویژگی‌های منحصر به فرد خود به صورت یک زون جداگانه تقسیم‌بندی می‌شود. این کمر بند به عنوان یک کمر بند چین خورده و تراستی هلالی شکل در نظر گرفته شده که شامل ولکانیک‌ها و رسوبات تخریبی دریایی عمیق به سن پالئوژن و همچنین توالی‌های رسوبی نئوژن است که رسوبات اخیر (توالی نئوژن) به سمت بالای توالی، خصوصیات آب‌های کم عمق را نشان می‌دهد (Allen et al., 2003b).

میزان کوتاه‌شدگی در شمال شرق این کمر بند در حدود ۳۰ کیلومتر است (Jackson et al., 2002). توالی‌های میوسن میانی- بالایی در این زون شواهدی از فرآیندهای جریان ثقلی نشان می‌دهند که به حرکات تغییر شکلی فشارشی در این زمان نسبت داده می‌شود (Vincent et al., 2002).

همانند کمر بند ماگمایی ارومیه- دختر، اوج ماگماتیسم در ایالت ماگمایی آذربایجان و یا بخش شرقی آن؛ یعنی زون تالش در زمان ائوسن- الیگومیوسن بوده است. در این مطالعه سعی شده تا به بررسی خواص ژئوشیمیایی و پترولوژیک سری‌های سنگی منطقه لاهرود (شمال- شمال شرق اردبیل) پرداخته و محیط ژئودینامیک تشکیل آنها بررسی شود. علاوه بر این، سعی شده تا به بررسی ارتباط و مقایسه بین سری‌های سنگی منطقه لاهرود با گدازه‌های کواترنری سبلان و ولکانیک‌های ائوسن منطقه هشتجین (جنوب غرب اردبیل) نیز پرداخته شود.

زون البرز در شمال ایران دارای پیچیدگی‌های زمین‌شناسی خاص خود بوده، کوتاه‌شدگی شمالی - جنوبی در این زون از طریق یک سری تراست‌هایی که در دو طرف این زون گسترش داشته، دارای شیب به سمت داخل زون است، صورت گرفته است (Alavi, 1996). سنگ‌های رسوبی و ولکانیکی به سن پرکامبرین پسین تا کواترنری در تغییر شکل این زون درگیر هستند (Allen et al., 2004).

داده‌های پالئومغناطیس برای این زون (بر روی بازالت‌های سازند جیرود به سن دونین بالایی تا کربونیفر زیرین) نشان می‌دهد که در طی این زمان این زون بخشی از گندوانا بوده است (Wensink and Stampfli, 1980). از طرف دیگر، بنا به نظر (Varekamp, 1980) و همکاران (۱۹۹۱) بلوک البرز از گندوانا در طی اردوویسین- سیلورین جدا شده است. این بلوک سپس در طی اواخر تریاس با بلوک اوراسیا برخورد کرده است (Sengor et al., 1988).

به طور کلی، فعالیت ماگماتیک ائوسن پایانی - الیگوسن در البرز غربی در امتداد کمر بند محوری حوضه در حال فرونشست (که این فرونشست با حرکات گسل‌ها در ارتباط بوده است) ائوسن، گسترش یافته است (Berberian and Berberian, 1981). این فرونشست در حوضه ذکر شده به تشکیل سکانس ضخیمی از رسوبات آتشفشانی- تخریبی منجر شده است.

در مقابل، حوضه جنوب دریای خزر دارای سنگ بستری با خواص یک پوسته اقیانوسی ضخیم است (Berberian, 1983; Mangino and Priestley, 1998). به طور کلی، خاستگاه تکتونیکی این سنگ بستر مشخص نبوده اما گمان برده می‌شود که این حوضه به عنوان یک حوضه پشت قوس در زمان ژوراسیک- پالئوژن عمل کرده است (Allen et al., 2004). فعالیت‌های لرزه‌ای در عمق حدود ۸۰ کیلومتری، در

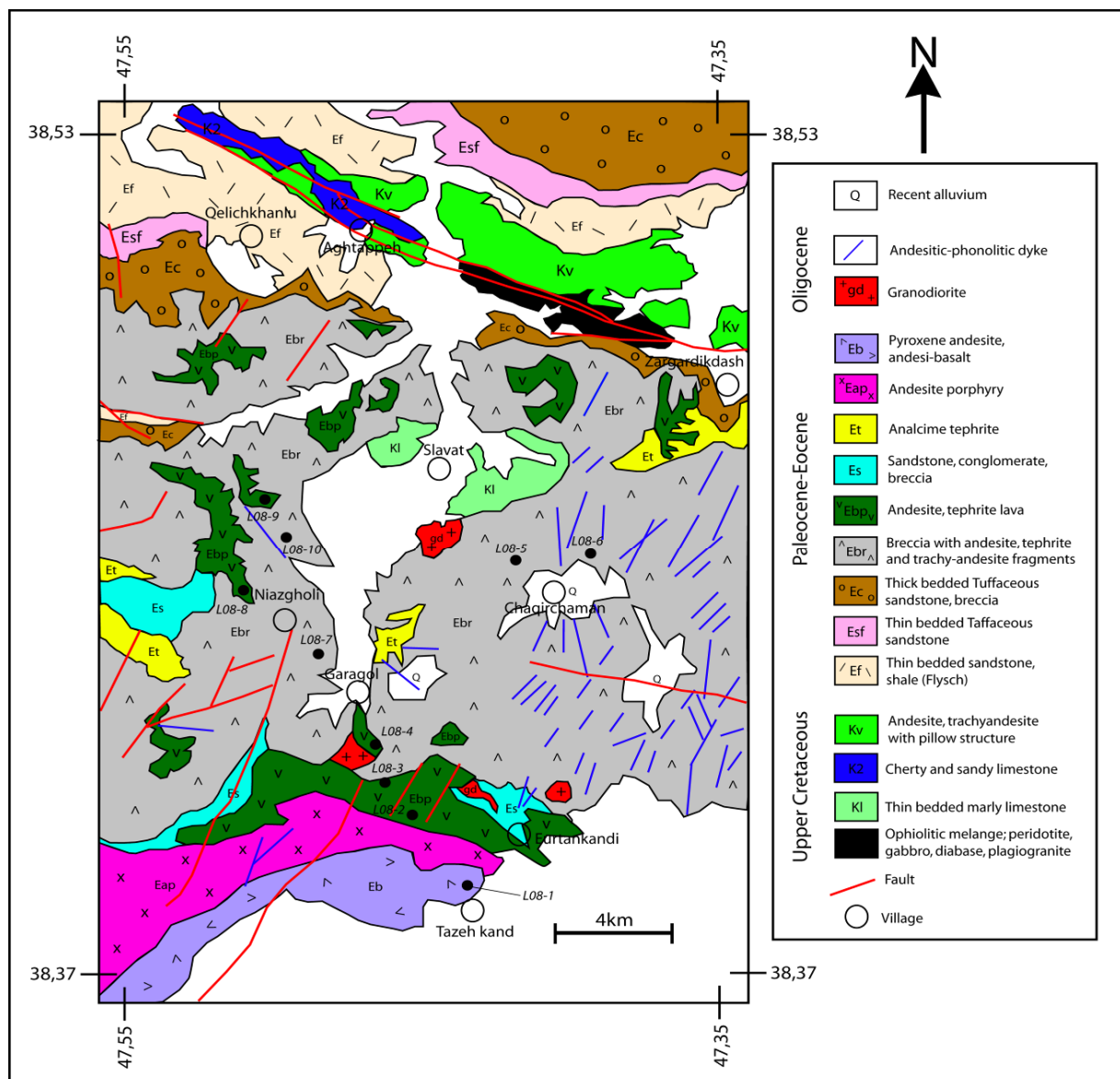
زمین‌شناسی منطقه

حاشیه حوضه رسوبی جنوب دریای خزر توسط گسل معکوس تالش از مناطق مجاور (ایالت آذربایجان یا زون تالش) جدا می‌شود. در رشته کوه‌های تالش و شمال منطقه مورد مطالعه (لاهرود) توالی‌های ولکانو-سیدیمنت مزوزوییک رخنمون داشته که در شمال خط درز قره‌داغ-سوان-آکرا (Sevan-Akera Qaradagh geosuture) پراکندگی دارند. در شمال منطقه لاهرود نیز بقایایی از افیولیت‌های کرتاسه پایانی دیده می‌شوند که شامل پریدوتیت‌ها، سرپانتینیت‌ها، گابروها، متابازیت‌ها، پلاژیوگرانیت‌ها و پیلولاوهای با ترکیب آندزیتی هستند (شکل ۲). آهک‌های ریفی کرتاسه پایانی همراه با آهک‌های ماسه‌ای (خاص آب‌های کم‌عمق) این افیولیت‌ها را با ناپیوستگی پوشانیده، به‌نظر می‌رسد که زمان جایگیری این افیولیت‌ها قبل از کرتاسه پایانی و ته‌نشست این آهک‌ها باشد. این افیولیت‌ها بقایایی از افیولیت‌های خط درز قره‌داغ (Berberian, 1983) و سوان-آکرا (Galoyan *et al.*, 2009) هستند. توالی‌های پالئوسن (و ائوسن زیرین) در این منطقه شامل ماسه سنگ‌ها، برش‌ها، ماسه سنگ‌های توفی و شیل‌ها (سری‌های فلیش مانند) است (شکل ۲) که با ناپیوستگی بر روی افیولیت‌ها قرار گرفته‌اند. به‌نظر می‌رسد وجود چنین سری‌های فلیش‌مانندی با بسته شدن حوضه اقیانوسی مابین بلوک ایران مرکزی و قفقاز بزرگ (Great Caucasus) و در نتیجه، جایگیری نهایی افیولیت‌ها بر روی حاشیه فعال قاره‌ای قفقاز بزرگ (صفحه اوراسیا) در ارتباط باشد. پراکندگی ولکانیک‌های مزوزوییک در شمال این خط درز (شکل ۱) نشان از فروانش پوسته اقیانوسی مذکور به زیر بلوک اوراسیا در زمان مزوزوییک دارد (Berberian, 1983). توالی‌های ائوسن در منطقه شمال

لاهرود شامل برش‌های ولکانیکی با قطعات آندزیتی، تفریتی و تراکی آندزیتی است (واحد Ebr) که دایک‌های آندزیتی-فونولیتی آنها را قطع می‌کنند (شکل ۲). علاوه بر این، توده‌های نیمه‌عمیق با ترکیب گرانودیوریتی (به سن الیگوسن؟) نیز این توالی‌ها سنگی را قطع می‌نماید. از طرف دیگر گدازه‌هایی با ترکیب آندزیتی، آندزی-بازالتی، تفریتی و لایتیتی نیز به‌صورت استراتیگرافی بر روی برش‌های واحد Ebr قرار می‌گیرند. حضور گدازه‌هایی با ترکیب تفریتی و با فنوکریست‌های درشت آنالسیم نیز در این منطقه دارای اهمیت هستند که بر روی برش‌های واحد Ebr قرار گرفته‌اند. هر چند ولکانیک‌هایی به سن میوسن در منطقه لاهرود ذکر نشده است (باباخانی و ناظر، ۱۳۷۰) که این امر می‌تواند به سبب نبود رسوبات همراه این ولکانیک‌ها و بنابراین، تعیین سن و تطابق استراتیگرافی آنها باشد، اما وجود سری‌های ولکانیکی به سن میوسن زیرین تا بالایی در ناحیه میانه تا هشتجین (جنوب غرب اردبیل) ذکر شده است (Lescuyer *et al.*, 1976). بیشتر گدازه‌های میوسن این مناطق دارای ترکیب کالک‌آلکانل (تا کالک‌آلکانل غنی از پتاسیم) و یا شوشونیتی هستند (Innocenti *et al.*, 1982). علاوه بر گدازه‌های کالک‌آلکانل تا شوشونیتی، ولکانیک‌هایی با ترکیب آلکانل سدیک و به سن میوسن بالایی نیز در جنوب سبلان در منطقه نیز گزارش شده‌اند (Comin-Chiaromonti *et al.*, 1978). همان‌گونه که قبلاً گفته شد، بیشتر گدازه‌های ائوسن منطقه لاهرود دارای طیف ترکیبی از آندزیت، آندزی بازالت، بازالت، لایتیت و گاه تفریت هستند که در اکثر موارد این گدازه‌ها بافت پورفیری نشان می‌دهند. عمده نمونه‌برداری‌ها صورت گرفته در این مطالعه بر روی واحدهای Eb، Ebp و Ebr (شکل ۲) بوده است. واحد Ebr شامل برش‌های

لاتیت‌ها و تراکی‌آندزیت‌ها از دیگر گدازه‌هایی هستند که بر روی واحد Ebr قرار گرفته، به رنگ خاکستری روشن تا خاکستری متمایل به صورتی دیده می‌شوند. این گدازه‌ها حالت نیمه‌خروجی داشته، به شدت بافت پورفیری نشان می‌دهند. فنوکریست‌های (به‌ترتیب فراوانی) آلکالی‌فلدسپار، پلاژیوکلاز، آمفیبول و بیوتیت، بافت پورفیری این گدازه‌ها را تشکیل می‌دهند.

ولکانیکی با قطعات آندزیتی-تفریتی است که دایک‌های آندزیتی، تفریتی و حتی بازالتی آنها را قطع می‌نمایند. این دایک‌های بازالتی دارای حداقل دگرسانی و آفیریک هستند. از طرف دیگر، بازالت‌ها و آندزیت‌هایی با ساخت منشوری از تشکیل‌دهندگان واحدهای Eb و Ebp، و پورفیری بوده، که با حضور فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن (به‌ترتیب فراوانی) مشخص می‌شوند.



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه شمال لاهرود (با تغییرات از باباخانی و ناظر، ۱۳۷۰). سنگ‌های مورد بررسی در این پژوهش متعلق به واحدهای Eb، Ebp و Ebr هستند.

روش انجام پژوهش

در این مطالعه از تعداد حدود ۲۰۰ نمونه سنگی معرف واحدهای سنگی منطقه لاهرود و همچنین مناطق سبلان و هشتجین برای مقایسه (مقطع نازک برای مطالعات میکروسکوپی تهیه شد. پس از مطالعات میکروسکوپی تعداد ۱۰ نمونه سنگی از واحدهای سنگی منطقه لاهرود و همچنین برای مقایسه ۱۰ نمونه از واحدهای سنگی مناطق سبلان و هشتجین، به منظور آنالیز ژئوشیمیایی توسط آگات پودر شدند. عناصر اصلی توسط ICP-AES و عناصر نادر خاکی و کمیاب توسط ICP-MS در ALS کانادا و به روش ذوب لیتیم برات (Lithium Borate Fusion)، برای عناصر دیرگداز اندازه گیری شدند. تعیین ترکیب شیمیایی کانی‌ها توسط الکترون مایکروپروب در دانشگاه پاریس صورت گرفته که در این مطالعه تنها برای نامگذاری دقیق تر کانی‌ها از این داده‌ها استفاده شده است و در مطالعه دیگری به طور کامل ارائه خواهند شد.

پتروگرافی سری‌های ولکانیکی مورد مطالعه

(الف) تراکی آندزیت‌ها (یا شوشونیت‌ها): عمده کانی تشکیل دهنده این سنگ‌ها پلاژیوکلاز است که به دو صورت در این سنگ‌ها دیده می‌شود: (۱) به صورت شکل دار تا نیمه شکل دار همراه با زوناسیون عادی تا معکوس و با انکلوzyon‌هایی از بیوتیت؛ (۲) به صورت بی شکل با حاشیه تحلیل رفته و دگرسان شده به کانی‌های رسی، کلسیت، سریسیت و کوارتزهای دانه ریز. این پلاژیوکلازها (تیپ ۲) دارای حاشیه واکنشی با مذاب بوده، بافت غربالی در امتداد حاشیه نشان می‌دهند. علاوه بر این، دارای انکلوzyon‌هایی از آمفیبول نیز هستند. فنوکریست‌های درشت فلدسپار پتاسیم (< ۱ سانتی متر) نیز از دیگر کانی‌های تشکیل دهنده این سنگ‌ها بوده که عمدتاً به کانی‌های رسی دگرسان

شده‌اند. بیوتیت در این سنگ‌ها به صورت نیمه شکل دار تا بی شکل دیده شده و به بخشی در امتداد حاشیه کلریتی شده‌اند. فنوکریست‌های آمفیبول با چند رنگی شدید (سدیک-کلسیک) به صورت بی شکل همراه با کلینوپیروکسن (کمتر از ۲ درصد حجمی) به صورت دانه ریز تا دانه درشت (> ۰.۵ میلی متر تا < ۱ میلی متر) نیز از کانی‌های فرومنیزین این سنگ‌ها هستند. این کانی‌ها دارای زوناسیون بوده، در برخی موارد کلینوپیروکسن دارای ماکل نیز هستند. نفلین نیز در برخی نمونه‌ها به صورت بی شکل همراه با آلکالی فلدسپار دیده می‌شود. آپاتیت، زیرکن و اسفن از کانی‌های فرعی این گدازه‌ها هستند. در برخی موارد رشد پلاژیوکلاز در اطراف فنوکریست‌های درشت فلدسپار پتاسیم به صورت بافت راپاکیوی نیز دیده می‌شود. میکرولیت‌های پلاژیوکلاز به همراه کلسیت، کانی‌های کدر، کوارتزهای دانه ریز و کانی‌های رسی از عمده تشکیل دهندگان خمیره این سنگ‌ها هستند. بافت این سنگ‌ها به طور عمده پورفیری با خمیره میکرولیتی تا هیالوپورفیریتیک است.

(ب) آندزی بازالت‌ها (یا باناکیت‌ها): فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در آندزی بازالت‌ها به کانی‌های رسی و سریسیت دگرسان شده، و در برخی موارد حاشیه پلاژیوکلازها حفظ شده است. فنوکریست‌های تحلیل رفته، شکل دار تا نیمه شکل دار کلینوپیروکسن (شکل ۳- A) از دیگر کانی‌های تشکیل دهنده این سنگ‌ها است. بیوتیت در این سنگ‌ها با حاشیه‌های غنی از اکسید آهن (واکنش با مذاب) مشخص می‌شوند. خمیره شیشه‌ای این سنگ‌ها به کانی‌های رسی دگرسان شده است. علاوه بر این، در این خمیره شیشه‌ای فنوکریست‌های تیتانومگنتیت و میکرولیت‌های فلدسپار پتاسیم نیز حضور دارند. بافت این سنگ‌ها عمدتاً هیالوپورفیریتیک است.

اصلی پیروکسن و پلاژیوکلاز مشخص شده، معمولاً بافت میکروولیتی، پورفیری با خمیره میکروولیتی و یا شیشه‌ای دارند (شکل ۳- C). فنوکریست‌های این بازالت‌ها شامل پیروکسن، پلاژیوکلاز والیون بوده و کانی‌های زمینه شامل پیروکسن و پلاژیوکلاز به اضافه کانی‌های فرعی و کدر هستند. آندزیت‌ها، قسمت اعظم سنگ‌های موجود در منطقه هشتجین را تشکیل می‌دهند. کانی‌های تشکیل‌دهنده آندزیت‌ها شامل پلاژیوکلاز، هورنبلند، بیوتیت، پیروکسن و همچنین، کانی‌های ثانویه کلسیت، کلریت و کانی‌های رسی هستند. داسیت‌ها از دیگر واحدهای سنگی هستند که در برخی موارد همراه آندزیت‌ها دیده می‌شوند. بنا به مطالعات رهگشای و همکاران (۱۳۸۵) بر روی بخشی از ولکانیک‌های منطقه هشتجین، ترکیب این گدازه‌ها کالک‌آلکالن (و حتی تا اندکی آلکالن) برآورد شده است.

(ب) ولکانیک‌های پلیوکواترنر منطقه سبلان (سبلان جدید): منطقه سبلان شامل طیفی از گدازه‌های قدیمی به سن میوسن بالایی و گدازه‌های جدید پلیوکواترنری بوده که شامل مجموعه از ولکانیک‌هایی با ترکیب آندزیتی تا داسیتی و حجم زیاد ایگنیمبریت‌ها هستند (Alberti et al., 1980). به‌طور کلی، می‌توان فعالیت سبلان را در دو مرحله خلاصه نمود:

۱- در مرحله اول حجم زیادی از ایگنیمبریت و خاکستر آتشفشانی همراه با گدازه‌های آندزیتی و داسیتی فوران نموده است. پس از چندین فاز انفجاری، بخش مرکزی این آتشفشان فرونشست نموده و یک کالداری آتشفشانی را تشکیل داده است؛

۲- در مرحله دوم گنبد‌های آتشفشانی با ترکیب داسیتی و آندزیتی در محل کالداری قدیمی شروع به بالا آمدن کرده‌اند. ترکیب گدازه‌های پلیوکواترنری سبلان (سبلان جدید) کالک‌آلکالن غنی از پتاسیم تا شوشونیتی بوده (Innocenti et al., 1982)؛ هر چند

(پ) بازالت‌ها (یا آبساروکیت‌ها): فنوکریست‌های کلینوپیروکسن همراه با میکرو فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در این بازالت‌ها بافت پورفیری را تشکیل می‌دهند (شکل ۳- B). فنوکریست‌های پلاژیوکلاز با درجات مختلفی سریسیتی و کمتر سوسوریتی شده‌اند. فنوکریست‌های دانه‌ریز بیوتیت که کاملاً سوخته شده‌اند نیز در خمیره این سنگ‌ها به‌همراه میکروولیت‌های دانه‌ریز فلدسپار پتاسیم دیده می‌شوند. آپاتیت از دیگر کانی‌هایی است که به‌صورت انکلوژیون در داخل کلینوپیروکسن حضور دارد. خمیره شیشه‌ای این سنگ‌ها کاملاً به کانی‌های رسی دگرسان شده است. بافت این سنگ‌ها عمدتاً هیالوپورفیری با پورفیرهای کلینوپیروکسن است.

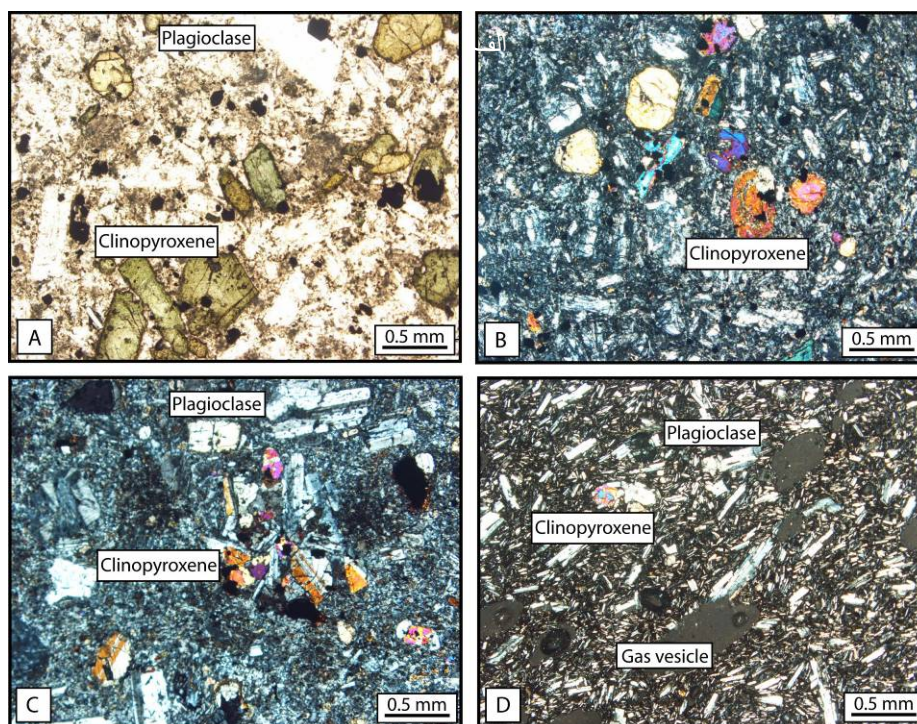
زمین‌شناسی و پتروگرافی (گدازه‌های هشتجین و سبلان و مقایسه با ولکانیک‌های لاهرود)

در این بخش خلاصه‌ای از خصوصیات زمین‌شناسی مناطق هشتجین (جنوب غرب اردبیل) و سبلان (مجاور محدوده لاهرود) و پتروگرافی گدازه‌های این مناطق آورده شده تا بتوان در بخش ژئوشیمی بین این سه تیپ سری ولکانیکی مقایسه‌ای انجام داد.

(الف) ولکانیک‌های منطقه هشتجین: همانند منطقه لاهرود، سن گدازه‌های منطقه هشتجین نیز در طیفی مابین پالئوسن بالایی تا عمدتاً ائوسن در تغییر است. سنگ‌های آذرین موجود در منطقه هشتجین، شامل واحدهای بازیک-حدواسط آتشفشانی همراه با برش‌ها و توف‌ها هستند. سنگ‌های بازیک منطقه شامل بازالت‌ها، آندزیت‌ها (آندزیت، هورنبلند آندزیت و آندزیت بازالت) هستند. دلریت‌ها و بازالت‌ها گاهی به‌صورت دایک و یا سیل در داخل برش‌های موجود در منطقه ظاهر شده‌اند. جنس قطعات سنگی موجود در برش‌ها شامل قطعات بازالتی، الیون بازالتی آندزیتی و داسیتی هستند. بازالت‌های مورد مطالعه با کانی‌های

در نمونه‌های آندزیتی فنوکریست‌های پلاژیوکلاز به همراه فنوکریست‌های کلینوپیروکسن در خمیره‌ای متشکل از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن قرار دارند، اما حجم اعظم خمیره سنگ را مواد شیشه‌ای در بر می‌گیرد. نمونه‌های داسیتی عموماً آفیریک بوده، در برخی موارد فنوکریست‌های پلاژیوکلاز (و گاهی فلدسپار پتاسیم) در سنگ دیده می‌شوند. در خمیره شیشه‌ای این سنگ‌ها علاوه بر فاز شیشه، میکروولیت‌های پلاژیوکلاز همراه با میکروولیت‌های کلینوپیروکسن پراکنده شده‌اند.

نمونه‌های مورد مطالعه توسط Dostal و Zerbi (۱۹۷۸) دارای روند تفریق یافته، هم در عناصر نادر خاکی سبک و هم در عناصر نادر خاکی سنگین هستند (مشابه روند آداکیتی). مطالعات Didon و Gemain (۱۹۷۶) نیز نشان می‌دهد که ترکیب گدازه‌های پلیوکواترنر سبلان دارای ترکیب لاتیتی و غنی از پتاسیم است. نمونه‌های برداشت شده در این مطالعه از گدازه‌های پلیوکواترنری بوده که دارای طیف ترکیبی آندزیت تا داسیت، بدون حفره تا به شدت حفره‌دار (اسکوری آندزیت) هستند. این سنگ‌ها آفیریک تا به طور ضعیفی فیریک هستند (شکل ۳- D).



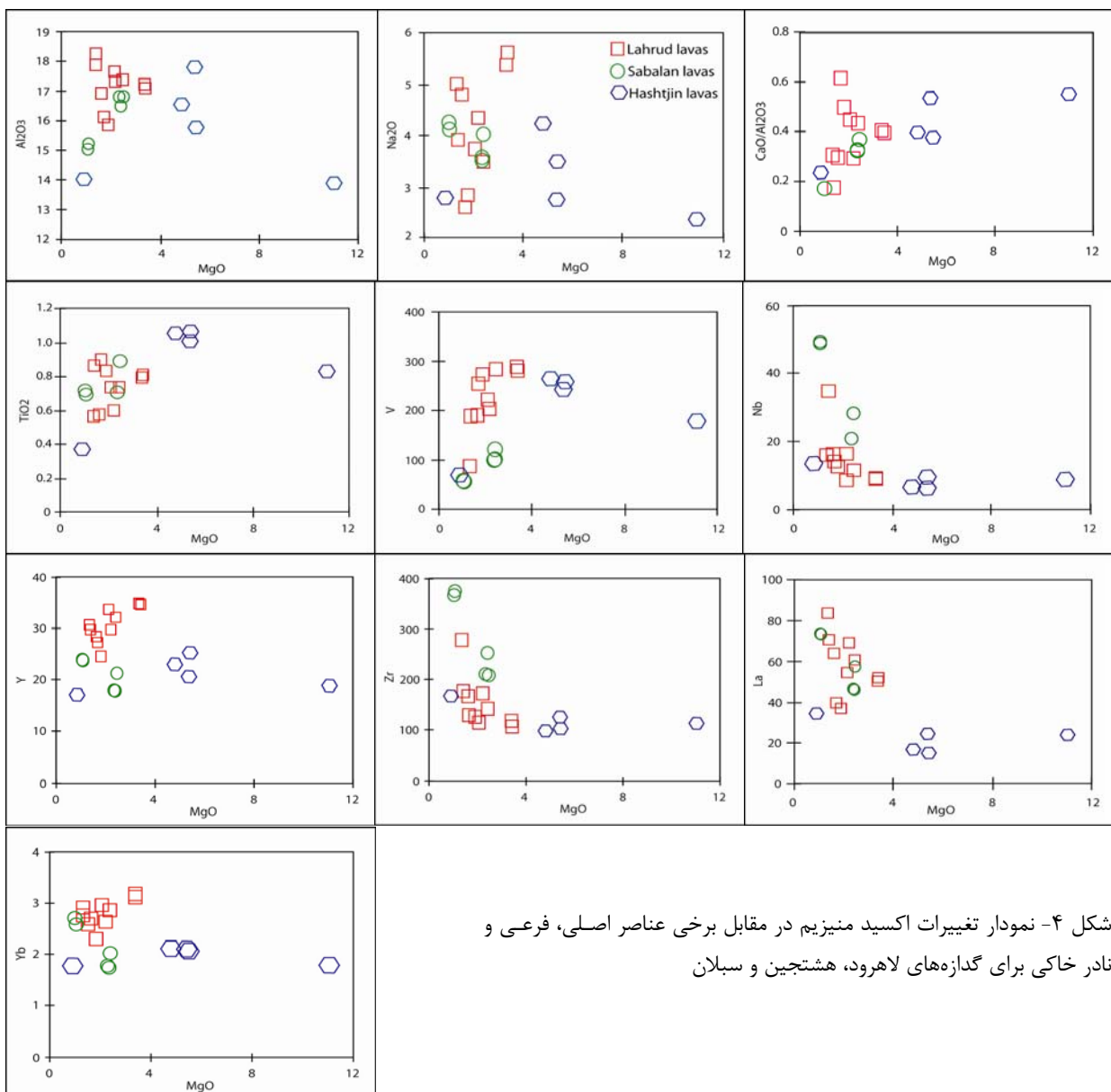
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های ولکانیکی مورد مطالعه مناطق لاهرود، سبلان و هشتجین (تمامی تصاویر به جز A در نور XPL). (A) همراهی فنوکریست‌های کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز در باناکیت‌های منطقه لاهرود، (B) فنوکریست‌های کلینوپیروکسن به همراه میکروفنوکریست‌های پلاژیوکلاز در آبساروکیت‌های لاهرود، (C) فنوکریست‌های کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز به صورت تجمعات گلوبروپورفیریتیک در خمیره شیشه‌ای-میکروولیتی در گدازه‌های منطقه هشتجین، (D) ولکانیک‌های (اسکوری آندزیت) آفیریک سبلان با حفره‌های خروج گاز

ژئوشیمی ولکانیک‌های مورد مطالعه

عناصر اصلی

ولکانیک‌های منطقه لاهرود با مقدار اکسید سیلیس برابر ۴۶ تا ۵۶ درصد وزنی مشخص شده در حالی که میزان L.O.I. گدازه‌ها در طیفی بین ۱/۵ تا ۸ درصد

وزنی در تغییر است (جدول ۱). میزان اکسید آلومینیم و پتاسیم این گدازه‌ها نیز بالا بوده، مقداری به ترتیب بین ۱۶ تا ۱۸ و ۳ تا ۶ درصد وزنی را نشان می‌دهند. دی‌گرام اکسید منیزیم در مقابل اکسیدهای اصلی و فرعی در شکل ۴ نشان داده شده است.

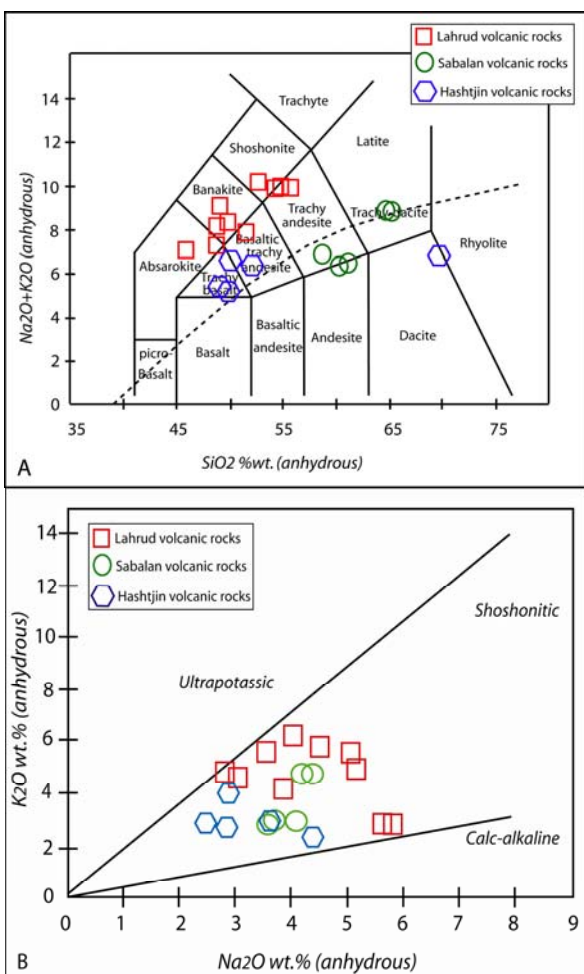


شکل ۴- نمودار تغییرات اکسید منیزیم در مقابل برخی عناصر اصلی، فرعی و نادر خاکی برای گدازه‌های لاهرود، هشتجین و سبلان

منطبق است، در حالی که اکسید آلومینیم تقریباً ثابت بوده، تغییرات چندانی نشان نمی‌دهد. این امر نشان

کاهش میزان اکسید منیزیم، با کاهش محسوس در اکسید سدیم، اکسید تیتان و میزان نسبت $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$

تفریق جزیی تیتانومگنتیت نیز باشد. میزان توریم نمونه‌های سنگی لاهرود بالا بوده و بنابراین، در دیاگرام توریم در مقابل کبالت (Hastie *et al.*, 2007) نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده سری‌های شوشونیتی واقع می‌شوند (شکل ۶). در مقابل، نمونه‌های سبلان نیز دارای گرایش شوشونیتی است، در حالی‌که نمونه‌های هشتجین بیشتر گرایش کالک‌آلکان نشان می‌دهند.



شکل ۵- ترکیب ولکانیک‌های مورد مطالعه (محدوده‌های لاهرود، سبلان و هشتجین) در: (A) دیاگرام مجموع آلکالی‌ها در مقابل اکسید سیلیس (LeBas *et al.*, 1986) (B) دیاگرام اکسید پتاسیم در مقابل اکسید سدیم (Chung *et al.*, 1998) (مقادیر اکسید سیلیسیم، اکسید پتاسیم و اکسید سدیم بر حسب مقادیر خشک و بی‌آب محاسبه شده است)

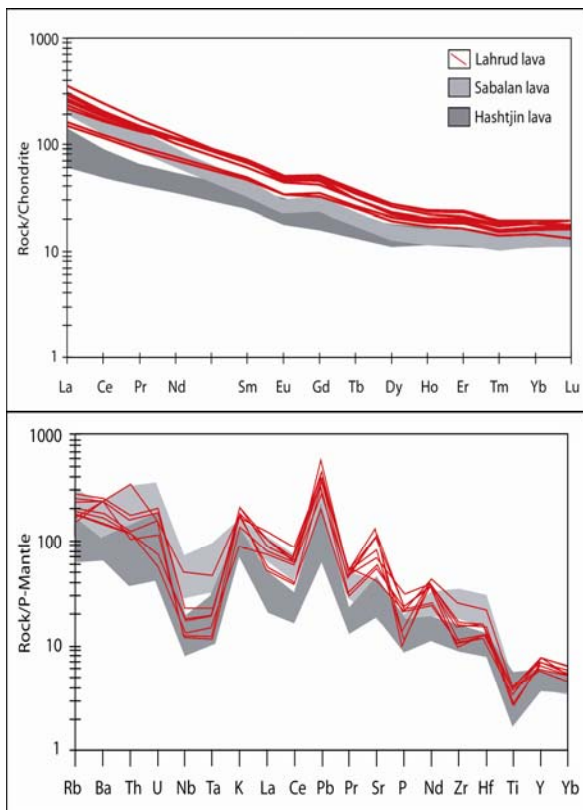
می‌دهد که ترکیب گدازه‌های مورد مطالعه تقریباً در عناصر اصلی ثابت بوده است؛ هر چند کاهش نسبت $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ می‌تواند به تغییرات ناشی از تفریق پلاژیوکلاز نسبت داده شود. در دیاگرام مجموع آلکالی‌ها در مقابل اکسید سیلیسیم (محاسبه شده بر اساس مقادیر بی‌آب یا خشک) یا دیاگرام TAS (LeBas *et al.*, 1986) سری‌های ولکانیکی منطقه لاهرود دارای طیف ترکیبی تراکی‌آندزیت تا تراکی‌آندزیت بازالتی و نمونه‌های با گرایش آلکان دارای ترکیب آبساروکیتی تا شوشونیتی هستند (شکل ۵- A).

در مقابل گدازه‌های سبلان دارای ترکیب تراکی‌آندزیت تا تراکی‌داسیت بوده، ولکانیک‌های هشتجین به تراکی‌بازالت تا تراکی‌آندزیت بازالتی گرایش دارد و یک نمونه نیز دارای ترکیب ریوداسیتی است (شکل ۵- A). مقادیر اکسید پتاسیم نمونه‌های مورد مطالعه نسبت به اکسید سدیم بالا بوده و بنابراین، خصوصیات شوشونیتی نشان می‌دهند (شکل ۵- B). به دلیل اینکه برخی نمونه‌های سنگی دارای آلتراسیون بوده، مقادیر L.O.I. بالا نشان می‌دهند، لذا مقادیر اکسیدهای سدیم، پتاسیم و سیلیسیم بر حسب خشک یا بی‌آب محاسبه شده‌اند.

عناصر کمیاب و نادر خاکی

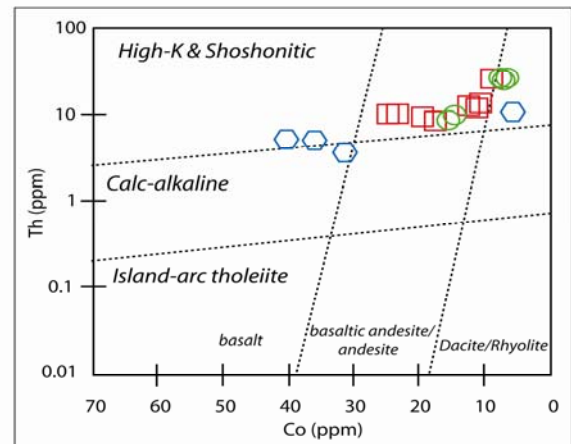
تغییرات عناصر فرعی و نادر خاکی در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل همراه با کاهش اکسید منیزیم: ۱- بر میزان لانتانیم، نیوبیم و زیرکونیم افزوده شده، در حالی‌که: ۲- از میزان وانادیم، ایتربیم و ایتیریم کاسته می‌شود. کاهش عناصر اخیر همراه با کاهش عدد منیزیم می‌تواند به تفریق کلینوپیروکسن نسبت داده شود؛ هر چند تغییرات و کاهش محسوس اکسید تیتان و وانادیم همراه با کاهش اکسید منیزیم می‌تواند ناشی از

La (N) / Yb (N) برابر ۵ تا ۱۳ مشخص هستند. روند عناصر نادر خاکی ولکانیک‌های منطقه هشتجین دارای الگویی مشابه و موازی گدازه‌های منطقه لاهرود بوده به نظر می‌رسد که دارای یک منشأ گوشته بوده است، اما فرآیندهای تفریق و غنی‌شدگی منشأ گوشته‌ای در مورد گدازه‌های لاهرود شدیدتر بوده است.



شکل ۷- دیاگرام عناصر نادر خاکی نرمالیز شده نسبت به کندریت و دیاگرام عناصر کمیاب نرمالیز شده نسبت به گوشته اولیه برای سری‌های ولکانیکی منطقه لاهرود، سبلان و هشتجین

در دیاگرام عناصر کمیاب نرمالیز شده نسبت به گوشته اولیه (شکل ۷)، گدازه‌های منطقه لاهرود و همچنین ناحیه سبلان و هشتجین در روبیدیم، باریم، توریم، پتاسیم، سرب و استرانسیم غنی‌شدگی نشان داده، در مقابل دارای تهی‌شدگی در نیوبیم، تیتان و تانتال هستند. این ویژگی‌های عناصر کمیاب همراه با



شکل ۸- دیاگرام توریم در مقابل کبالت (Hastie et al., 2007) برای نمونه‌های مورد مطالعه منطقه لاهرود، سبلان و هشتجین

سنگ‌های ولکانیکی منطقه لاهرود با غنی‌شدگی در عناصر نادر خاکی سبک مشخص بوده (شکل ۷)، با نسبت La (N) / Yb (N) برابر ۱۰ تا ۲۰ مشخص هستند. میزان کل عناصر نادر خاکی، به‌ویژه عناصر نادر خاکی سبک در نمونه‌هایی با ترکیب بازالتی (آبساروکییتی) نسبت به دیگر نمونه‌ها پایین است. نمونه‌های ولکانیکی منطقه سبلان دارای میزان عناصر نادر خاکی سبک مشابه با گدازه‌های لاهرود بوده، اما از عناصر نادر خاکی میانه تا سنگین (از Nd تا Lu) تهی‌شده‌تر هستند. گدازه‌های سبلان نیز دارای یک روند تفریق یافته و دارای غنی‌شدگی در عناصر نادر خاکی سبک و با نسبت La (N) / Yb (N) برابر ۱۹ تا ۲۰ هستند. تهی‌شدگی در عناصر نادر خاکی سنگین در گدازه‌های سبلان نسبت به ولکانیک‌های لاهرود می‌تواند ناشی از درصد حجمی پایین کلینوپیروکسن و آمفیبول در این سنگ‌ها باشد (شکل ۷).

در مقابل، سری‌های ولکانیکی منطقه هشتجین دارای تمرکز پایین‌تری از کل عناصر نادر خاکی نسبت به گدازه‌های منطقه لاهرود و سبلان بوده، این گدازه‌ها نیز با غنی‌شدگی در عناصر نادر خاکی سبک و با نسبت

دهند. غنی‌شدگی گوشته‌ای توسط افزوده شدن درصد پایینی از مذابی که در اعماق بالا ایجاد شده، به غنی‌شدگی مذاب در روند درون صفحه‌ای همراه با افزایش توام نسبت‌های Th/Y و Nb/Y و یا Th/Yb و Nb/Yb منجر می‌شود. اما از طرف دیگر، غنی‌شدگی ناشی از سیالات زون فرورانش تنها به افزایش نسبت Th/Y و Th/Yb (به‌همراه کاهش نسبت Nb/Y و Nb/Yb) و یا افزایش نسبت Th/Nb منجر خواهد شد. همان‌گونه که در شکل ۸ مشخص است روند غنی‌شدگی ولکانیک‌های مورد مطالعه در جهت و همسو با روند غنی‌شدگی مرتبط با زون فرورانش است. بنابراین، آنچه که در این شکل نیز مشخص است، نقش رسوبات در منشأ ولکانیک‌های مورد مطالعه است. علاوه بر این، روند ولکانیک‌های مورد مطالعه نیز با یک حالت افزایش در نسبت Th/Y (و یا Th/Yb) در مقابل نسبت Nb/Y (و یا Nb/Yb) مشخص بوده، نشان‌دهنده عملکرد متفاوت تفریق بلورین و یا غنی‌شدگی با درجات متفاوت منشأ گوشته‌ای است. نسبت Nb/Y برای ولکانیک‌های لاهرود برابر $0/3$ تا $1/1$ بوده در حالی که این نسبت برای گدازه‌های سبلان و هشتجین به ترتیب برابر $1/2$ تا $2/1$ و $0/3$ تا $0/8$ در تغییر است. به‌طور کلی، نقش منشأ استئوسفری؛ یعنی یک منشأ غنی شده (در مقابل منشأ لیتوسفری) در پیدایش ولکانیک‌ها توسط نسبت $Nb/Y < 2$ مشخص می‌شود (Pearce and Cann, 1973). بنابراین، می‌توان بیان نمود که یک منشأ لیتوسفری (ورقه فرورانش شده) همراه با مشارکت بخشی یک منشأ استئوسفری (از طریق مذاب‌هایی که از استئوسفر منشأ می‌گیرند) باعث پیدایش گدازه‌های نسبتاً غنی شده سبلان (در مقابل دیگر گدازه‌های مورد مطالعه) شده است. این امر باعث غنی‌شدگی بخشی و ناچیز HFSE در گدازه‌های سبلان شده است.

غنی‌شدگی در عناصر نادر خاکی سبک برای گدازه‌های سبلان و لاهرود نشان‌دهنده گرایش شوشونیتی آنها بوده، در حالی که ولکانیک‌های منطقه هشتجین گرایش کالک‌آلکالن غنی از پتاسیم را نشان می‌دهند.

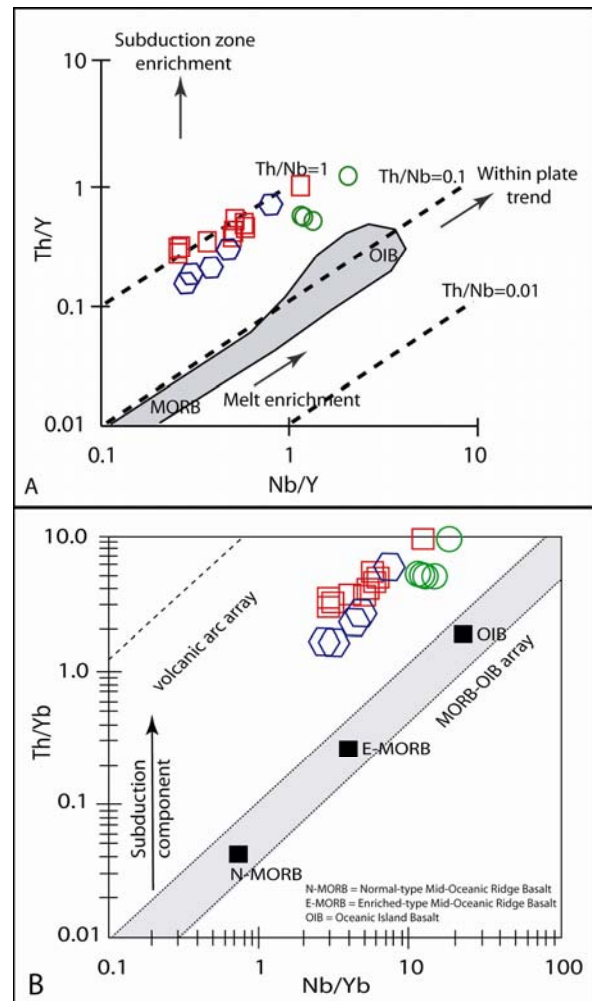
پتروژنز و محیط تشکیل سری‌های ولکانیکی مورد مطالعه

۱- فرآیند تبلور بخشی: به‌طور کلی، گدازه‌های منطقه لاهرود، سری‌های تفریق یافته‌ای هستند که این امر از میزان اکسید منیزیم پایین آنها ($1/4$ تا $3/4$ درصد وزنی) و همچنین فراوانی فنوکریست‌های موجود در این گدازه‌ها مشخص است. این امر نشان‌دهنده تفریق بلورین این گدازه‌ها در طی صعود ماگما به سطح زمین است. از طرف دیگر، همان‌گونه که از شکل ۴ مشخص است، ترکیب گدازه‌های مورد مطالعه نسبت به یکدیگر تقریباً ثابت بوده و نسبت به هم تفریق چندانی متحمل نشده‌اند. تنها می‌توان تفریق جزئی کلینوپروکسن و تیتانومگنتیت را برای ایجاد تغییرات ژئوشیمیایی این گدازه‌ها نسبت به یکدیگر برشمرد. این امر برای گدازه‌های سبلان نیز صادق بوده، در حالی که ولکانیک‌های مورد مطالعه در منطقه هشتجین دارای گدازه‌هایی با ترکیب اولیه با میزان اکسید منیزیم برای 11 درصد وزنی و گدازه‌هایی با ترکیب تفریق یافته و اکسید منیزیم برابر $0/9$ درصد وزنی هستند (جدول ۱).

۲- منشأ و محیط تشکیل ماگمای ولکانیک‌های مورد مطالعه: به‌طور کلی، نسبت‌های Th/Y در مقابل Nb/Y و Th/Yb در مقابل Nb/Yb می‌توانند اطلاعات جامعی درباره منشأ ولکانیک‌های مورد مطالعه به‌دست

تأثیر این رسوبات بر روی مذاب‌های ناشی شده از لیتوسفر اقیانوسی دگرگون شده در زون فرورانش، و متقابلاً تأثیر این مذاب‌ها بر روی گوه گوشته‌ای با استفاده از مطالعات ایزوتوپی B، Be و یا Pb قابل استنباط است. از طرف دیگر، برای پی بردن به نقش رسوبات در منشأ گوشته‌ای بازالت‌های قوس‌های آتشفشانی و یا پی بردن به نقش ذوب‌بخشی گوه گوشته‌ای به تنهایی و یا مشارکت رسوبات فرورانش شده در تشکیل مذاب‌های بازالتی قوس‌های آتشفشانی دیگرام Th/La در مقابل Sm/La نیز پیشنهاد شده است (Plank, 2005). به‌طور کلی، نسبت Th/La در بازالت‌های اقیانوسی پایین بوده (>0.2)، در حالی که در محیط‌های قاره‌ای این نسبت بالا (<0.25) و در بازالت‌های قوس‌های آتشفشانی و رسوبات دریایی این نسبت متغیر است (0.09 تا 0.34). سنگ‌های قوس‌های آتشفشانی روندی خطی را بین ترکیب رسوبات دراز گودال و ترکیب گوشته (تیپ مورب) در دیگرام Th/La در مقابل Sm/La تشکیل می‌دهند (شکل ۹). بنابراین، ماگماهای قوس‌های آتشفشانی میزان بالای نسبت Th/La خود را از رسوبات فرورانش شده به ارث می‌برند (Plank, 2005) و این نسبت در گوه گوشته‌ای و در طی فرورانش به تنهایی (بدون مشارکت رسوبات) نمی‌تواند مقادیر تفریق یافته و بالا نشان دهد.

نسبت Th/La برای گدازه‌های منطقه لاهرود در طیف 0.15 تا 0.33 در تغییر بوده، اکثر نمونه‌های مورد مطالعه تمایل به محدوده قوس آتشفشانی Honshu arc را نشان داده، روندی اختلاطی بین دو قطب گوشته و رسوبات نشان می‌دهند. به‌نظر می‌رسد که ترکیب قطب رسوبات برای سری‌های ولکانیکی مورد مطالعه، با ترکیب رسوبات دراز گودال Izu مشابه است. نسبت Th/La برای ولکانیک‌های سبلان و هشتجین نیز به

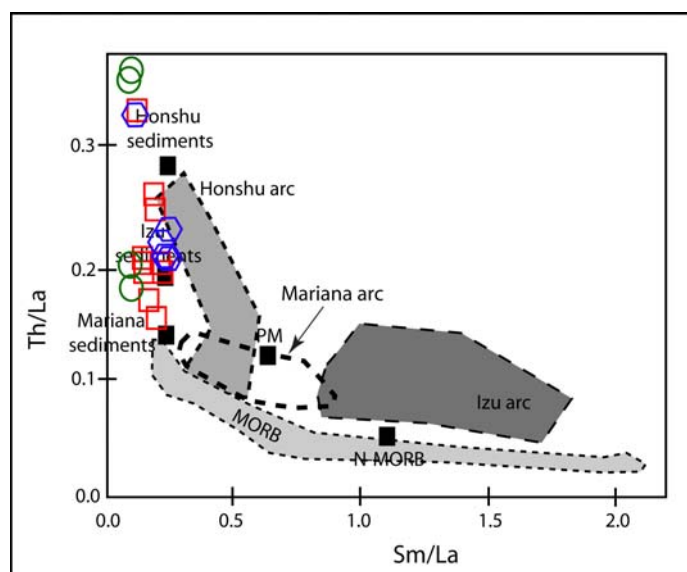


شکل ۸- ولکانیک‌های مورد مطالعه بر روی: (A) دیگرام Th/Y در مقابل Nb/Y (Alici et al., 2002)، (B) دیگرام Th/Yb در مقابل Nb/Yb (Leat et al., 2004) (با اندکی تغییرات).

۳- تأثیر رسوبات + ورقه فرورانش شده در ناحیه منشأ (Mantle wedge) سری‌های ولکانیکی مورد مطالعه: همان گونه که می‌دانیم، رسوبات اقیانوسی (دارای منشأ پلاژیک و یا منشأ تخریبی از محیط‌های قاره‌ای اطراف)، همراه با لیتوسفر اقیانوسی (با ترکیب بازالتی+سرپانتینیت‌ها) در ناحیه دراز گودال (Trench) به داخل گوشته فرورانش حاصل کرده، می‌توانند تأثیرات قابل ملاحظه‌ای بر روی سیالات و یا مذاب‌های ناشی از ورقه فرورانش شده (دگرگون شده در رخساره آمفیبولیت و یا اکلوژیت) اعمال نمایند.

بر این باید در نظر داشت که نسبت بالای Th/La برای گدازه‌هایی با سیلیس بالا (تفریق‌یافته و اسیدی با $\text{SiO}_2 > 53\%$) می‌تواند به تجمع عناصر نادر خاکی در فازهایی مانند آلانیت و یا آپاتیت و حضور آنها نیز در این سنگ‌ها نسبت داده شود (Plank, 2005).

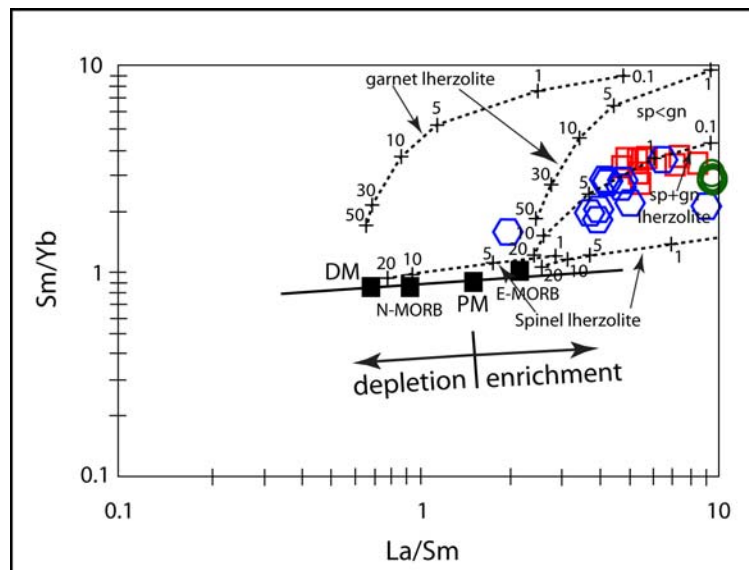
ترتیب برابر ۰/۱۸ تا ۰/۳۶ و ۰/۲۱ تا ۰/۳۳ است. بنابراین، همان‌گونه که در شکل ۹ مشخص است، اولاً نسبت Th/La در مقدار ثابتی از نسبت Sm/La در حال تغییر بوده، در ثانی نقش رسوبات در ناحیه منشأ گدازه‌های مورد مطالعه امری بدیهی است. البته، علاوه



شکل ۹- دیاگرام Th/La در مقابل Sm/La برای بازالت‌های قوس‌های آتشفشانی و سری‌های ولکانیکی منطقه مورد مطالعه (با تغییرات از Plank و همکاران، ۲۰۰۷). هر قوس آتشفشانی روندی اختلاطی (Mixing trend) بین یک ترکیب گوشته‌ای (در آرایش MORB در حوضه خاکستری رنگ) و یک ترکیب رسوبی (رسوبات دراز گودال) را تشکیل می‌دهد.

طرف دیگر، نسبت Sm/Yb ولکانیک‌های مورد مطالعه به ترکیب کانی‌شناسی ناحیه منشأ این سری‌های ولکانیکی وابسته است، زیرا که Yb به‌شدت در گارنت نسبت به کلینوپیروکسن و یا اسپینل سازگار است. بنابراین، می‌توان برای پی بردن به تغییرات در رژیم و درجه ذوب‌بخشی ناحیه منشأ سری‌های ولکانیکی لاهرود، هشتجین و سبلان از دیاگرام‌های La/Sm در مقابل La و یا نسبت‌های Sm/Yb در مقابل Sm و یا نسبت La/Sm استفاده نمود، لیکن چون اغلب واحدهای سنگی مورد مطالعه ترکیب اولیه نداشته، تفریق‌یافته هستند، بهترین دیاگرام نسبت Sm/Yb در مقابل La/Sm است (شکل ۱۰).

۴- تغییرات در رژیم و درجه ذوب‌بخشی: به‌طور کلی، تغییرات کانی‌شناسی دیرگداز (Residual mineralogy) و درجه ذوب‌بخشی در گوشته مرتبط با فرورائش (Sub-arc mantle) ولکانیک‌های مورد مطالعه را می‌توان توسط فراوانی عناصر نادر خاکی و از همه مهم‌تر نسبت‌های عناصر نادر خاکی این گدازه‌ها مدل‌بندی نمود. در این خصوص فراوانی عنصر به‌شدت ناسازگار La و کمتر ناسازگار Sm در ولکانیک‌های مورد مطالعه می‌تواند ترکیب کلی ناحیه منشأ آنها را توضیح دهد، زیرا تمرکز این دو عنصر به‌طور متفاوتی توسط منشأ (پری‌دوتیت‌های سکانس گوشته‌ای) اسپینل‌دار و/یا گارنت‌دار کنترل نمی‌شود (Aldanmaz et al., 2000). از



شکل ۱۰- تغییرات عناصر نادر خاکی در سری‌های ولکانیکی مورد مطالعه بر حسب دیاگرام Sm/Yb در مقابل La/Sm . روند گوشته‌ای (Mantle array) در این شکل (خط ضخیم) توسط ترکیب گوشته تهی شده تیپ مورب (DM) (McKenzie and O'Nions, 1991) و گوشته اولیه (PM) (Sun and McDonough, 1989) مشخص می‌شود. منحنی‌های ذوب‌بخشی برای منشأ گوشته‌ای اسپینل لروزولیت ($Ol_{53}+Opx_{27}+Cpx_{17}+Sp_{11}$) و گارنت لروزولیت ($Ol_{60}+Opx_{20}+Cpx_{10}+gt_{10}$) با ترکیبات گوشته تهی شده تیپ مورب و گوشته اولیه از Aldanmaz و همکاران (۲۰۰۰)، افزون بر این، خطوط و اعداد روی منحنی‌های ذوب نشان‌دهنده درجه ذوب‌بخشی برای یک منشأ گوشته‌ای باشد. علاوه بر این، در این دیاگرام ترکیب N-MORB و E-MORB از Sun و McDonough (۱۹۸۹) نیز آورده شده است.

اسپینل-گارنت لروزولیت (منشأ گوشته‌ای غنی شده) ایجاد شده‌اند. از طرف دیگر ولکانیک‌های منطقه هشتجین توسط درجه ذوب‌بخشی بالاتری حاصل شده‌اند (به جز یک نمونه که با مقدار بالاتری از نسبت La/Sm مشخص بوده که این امر با درجه تفریق بالاتر این نمونه، یعنی نمونه ریوداسیتی، در ارتباط است) و در مقابل گدازه‌های سبلان با درجه ذوب‌بخشی پایین تری ($>1/0$) مشخص هستند. به‌طور کلی، نسبت Sm/Yb گدازه‌های لاهرود نسبت به دیگر گدازه‌ها بالاتر بوده که این امر می‌تواند نشان‌دهنده درصد مدال بالاتر گارنت در ناحیه منشأ این گدازه‌ها و یا ناشی از وجود و تمرکز مدال فلدسپار پتاسیم در این ولکانیک‌ها باشد (بخش مطالعات پتروگرافی).

علاوه بر یک منشأ لروزولیت گارنت-اسپینل دار که برای ژنز گدازه‌های لاهرود در اینجا پیشنهاد شده،

به‌طور کلی، ذوب‌بخشی اسپینل لروزولیت ماگمایی با نسبت‌های Sm/Yb مشابه با مقدار این نسبت در ناحیه منشأ تولید نموده، در حالی که میزان نسبت La/Sm و میزان Sm با افزایش میزان ذوب‌بخشی کاهش نشان می‌دهند (Aldanmaz *et al.*, 2000). بنابراین، مذاب‌هایی که از ذوب‌بخشی منشأ اسپینل لروزولیت حاصل می‌شوند، دارای روند ذوب‌بخشی خواهند بود که این روند از روند گوشته‌ای یا Mantle array (خطی که در شکل ۱۰ از DM و PM عبور می‌نماید) پیروی می‌کند. از طرف دیگر، مذاب‌هایی که از ذوب کم تا متوسط گارنت لروزولیت‌ها ایجاد می‌شوند، دارای نسبت‌های Sm/Yb بسیار بالاتر از این نسبت در منشأ گوشته‌ای خود هستند. همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشخص است سری‌های ولکانیکی منطقه لاهرود توسط درجه ذوب‌بخشی $<1/0$ و >3 یک منشأ گوشته‌ای

داسیت است. برای این ولکانیک‌ها نیز ترکیب کالک‌آلکالن پیشنهاد شده است.

۴) ولکانیک‌های منطقه لاهرود دارای طیف ترکیبی از تراکی‌آندزیت تا تراکی‌آندزی بازالت (آبساروکیت تا شوشونیت) بوده، نسبت به گدازه‌های منطقه هشتجین و سبلان دارای مجموع آلکالی‌های بالاتری هستند.

۵) میزان کل عناصر نادر خاکی ولکانیک‌های منطقه لاهرود بالا بوده، با غنی‌شدگی در عناصر نادر خاکی سبک مشخص هستند. از طرف دیگر، نسبت به گوشته اولیه این ولکانیک‌ها در HFSE تهی‌شدگی و در LILE غنی‌شدگی بالایی نشان می‌دهند. خصوصیات عناصر نادر خاکی و عناصر کمیاب آنها نشان‌دهنده گرایش شوشونیتی این گدازه‌هاست. علاوه بر این، این خصوصیات ژئوشیمیایی با نشات گرفتن این گدازه‌ها از زون فرورانش سازگاری دارد. روند عناصر نادر خاکی ولکانیک‌های لاهرود تفاوت‌های چشمگیری را با گدازه‌های منطقه هشتجین و سبلان نشان می‌دهد، بنابراین، نشان‌دهنده منشأ گوشته‌ای متفاوت این گدازه‌ها نسبت به یکدیگر است.

۶) بالا بودن نسبت‌های Th/Yb و Th/Y و یا Th/Nb در گدازه‌های مورد مطالعه، نشان‌دهنده منشأ گرفتن ولکانیک‌های مورد نظر از یک زون مرتبط با فرورانش بوده، هر چند نسبت Nb/Y (و یا Nb/Yb) برای گدازه‌های سبلان نسبت به ولکانیک‌های منطقه هشتجین و لاهرود بالاتر بوده، نشان از سهم بودن درصد پایینی از مذاب استنوسفری در ایجاد ولکانیک‌های مذکور دارد. این مذاب‌های ناشی شده از منشأ استنوسفری باعث غنی‌شدگی نسبی منشأ

مطالعات تجربی Conceicao و Green (۲۰۰۴) نشان داده است که ذوب‌بخشی یک منشأ لرزولیتی فلوگوپیت- پارگازیت‌دار نیز می‌تواند عامل ایجاد یک ماگمایی با ترکیب تراکی‌آندزیتی و با گرایش شوشونیتی (مشابه با گدازه‌های لاهرود) باشد.

بحث و نتیجه‌گیری

۱) منطقه لاهرود بخشی از کمربند ولکانیکی شمال غرب ایران (ایالت آتشفشانی آذربایجان) است که در حد فاصل حوضه جنوب دریای خزر (از طرف شرق) و کمربند ماگمایی ارومیه-دختر (از سمت غرب) و خط درز قره داغ-سوان آکرا (از شمال) قرار گرفته است، این منطقه بخشی از کمربند ماگمایی البرز غربی یا تالش است.

۲) توالی‌های ائوسن در منطقه لاهرود شامل طیفی از سنگ‌های ولکانیکی با ترکیب آندزیت، آندزی بازالت، تفریت و لاتیت هستند که دایک‌های بازالتی، آندزیتی و تفریتی آنها را قطع می‌کنند. این توالی‌های ائوسن در نقشه لاهرود با عنوان واحدهای Ebr، Eb و Ebp شناخته می‌شوند.

۳) در غرب منطقه مورد مطالعه آتشفشان پلیوکواتر سبلان با گدازه‌هایی با ترکیب آندزیتی و داسیتی قرار گرفته‌اند که توسط Dostal و Zerbi (۱۹۷۸) و Innocenti و همکاران (۱۹۸۲) ترکیب کالک‌آلکالن غنی از پتاسیم تا شوشونیتی برای آنها در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، در جنوب غرب منطقه لاهرود گدازه‌هایی با سن ائوسن در منطقه هشتجین گزارش شده‌اند که شامل طیفی از ولکانیک‌هایی با ترکیب بازالت، آندزی بازالت و

گدازه‌های جوان‌تر از پالتوسن-ئوسن در کمر بند تالش-البرز غربی را می‌توان به ولکانیسم پس از برخورد (Post-collisional) نسبت داد؛ ۲- بنا به نظر Berberian (۱۹۸۳) در اواخر پالئوزویک-گندوانا جدا شده و با بسته شدن اقیانوس پالتوتیس به بلوک آسیا (اوراسیا) برخورد نموده‌اند. به دنبال فاز کوهزایی برخوردی و حرکات فشارشی تریاس میانی (۲۲۰ میلیون سال پیش)، شروع یک فاز کششی در البرز غربی-تالش با ولکانیسم کافت اواخر تریاس (Rhaetian) و نهشته شدن تشکیلات شمشک در ناحیه تالش و البرز مشخص است. این فاز کششی همراه با گسترش حوضه اقیانوسی سوان آکرا-قره‌داغ (و شمال لاهرود) همراه بوده که فروانش این پوسته اقیانوسی به زیر بلوک اوراسیا با پیدایش ولکانیسم کالک‌آلکان مزوزویک همراه بوده است. البته، این فروانش برای پیدایش سری‌های ولکانیکی مزوزویک صادق بوده، با ولکانیسم سنوزویک منطقه لاهرود سازگاری ندارد؛ ۳- طبق نظر Innocenti و همکاران (۱۹۸۲) کمر بند ولکانیکی تالش و البرز غربی توسط فروانش رو به شمال لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس تشکیل شده است. ایشان عقیده دارند که در نتیجه افزایش سرعت صفحه عربی، حداقل در میوسن میانی، کاهش درخور توجهی در شیب صفحه فروانش ایجاد شده که تشکیل ولکانیک‌های تالش و البرز غربی به تغییرات در ژئومتری فروانش نسبت داده می‌شود؛ ۴- به‌طور کلی، ولکانیسم شرق ترکیه و ایران (با زون برخوردی شرق آناتولی) به پرشیب شدن و گسستگی صفحه فروانش شده (Slab steepening and breakoff) در زیر یک کمپلکس

گدازه‌های سبلان در HFSE شده و گوشته‌ای نسبتاً غنی شده (تیپ OIB) را ایجاد نموده است. ۷) با توجه به ترکیب شیمیایی گدازه‌های لاهرود، یک منشأ غنی شده (گارنت به‌عنوان فاز باقی مانده و یا وجود فلوگوپیت) برای ایجاد این گدازه‌ها پیشنهاد شده است، از طرف دیگر، میزان ذوب‌بخشی برای گدازه‌های لاهرود بین ۰/۱ تا ۳٪ از یک گوشته لرزولیتی اسپینل-گارنت‌دار برآورد شده است. این در حالی است که گدازه‌های سبلان میزان ذوب‌بخشی پایین تری را نشان می‌دهند. ۸) با توجه به مطالعات حاضر، غنی‌شدگی از عناصر ناسازگار (نادر خاکی و کمیاب)، درجه تفریق بلورین، میزان مشارکت رسوبات در منشأ، نوع منشأ و درجه ذوب‌بخشی برای گدازه‌های لاهرود، سبلان و هشتجین متفاوت است، فرآیندهای ذکر شده در بالا می‌تواند عامل ایجاد تفاوت‌های ژئوشیمیایی در این گدازه‌ها باشد. ۹) مجموعه‌ای از نظریات مختلف برای پیدایش سری‌های ولکانیکی ایالت آذربایجان و زون تالش پیشنهاد شده است که به‌طور خلاصه شامل: ۱- طبق نظر Alavi (۱۹۹۶) مجموعه ماگمایی ارومیه-دختر یک کمپلکس آتشفشانی قوسی (Volcanic arc) بوده که با فروانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس در اواخر مزوزویک-سنوزویک در ارتباط است. در نتیجه این فروانش، یک حوضه پشت قوس در حد فاصل البرز و ارومیه-دختر به وجود آمده که فروانش (رو به شمال شرق) این پوسته اقیانوسی پشت قوس در زیر بخش غربی-جنوب غربی بلوک البرز باعث بسته شدن حوضه پشت قوس، ایجاد ماگماتیسم البرز غربی و برخورد قوس-قاره در اوائل سنوزویک شده است. بنابراین، وجود و پیدایش

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های مالی دانشگاه محقق اردبیلی سپاسگزاری نمایند. همچنین، از داوران محترم مجله پترولوژی که با پیشنهادهای سازنده خویش به بهتر شدن ساختار علمی مقاله کمک نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

فرورانش-منشور به هم افزوده (subduction-accretion complex) در یک رژیم برخوردی نسبت داده شده است (Sengor et al., 2003; Keskin, 2003). با توجه به مطالعات اخیر، این مدل در حقیقت مدل کامل‌تری برای تشکیل ولکانیسم سنوزویک (به‌خصوص ولکانیسم جوان) شرق ترکیه و شمال غرب ایران به‌شمار می‌رود.

منابع

- باباخانی، ع. ر. و ناظر، ح. ن. (۱۳۷۰) نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ منطقه لاهرود. سازمان زمین‌شناسی ایران.
- رهگشای، م.، شفایی مقدم، ه.، غفاری، ر. و کتابداری، م. ر. (۱۳۸۵) پترولوژی سری‌های مافیک شمال شرق هشتجین، جنوب اردبیل، ایران. فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۶: ۲-۲۷.
- Alavi, M. (1996) Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz Mountain system in Northern Iran. *Journal of Geodynamic* 21: 1-33.
- Alberti, A. A., Comin-Chiaramonti, P., Sinigoi, S., Trieste, M., Nicoletti, B. and Petrucciani, C. (1980) Neogene and Quaternary volcanism in Eastern Azerbaijan (Iran): some K-Ar age determinations and geodynamic implications. *Geologische Rundschau* 69: 216-225.
- Alberti, A. A., Comin-Chiaramonti, P., Dibattistini, G., Nicoletti, M., Petrucciani, C. and Sinigoi, S. (1976) Geochronology of the eastern Azarbaijan volcanic plateau (north- west Iran). *Rendiconti della Societa Italiana di Mineralogia e Petrologia* 32: 579-589.
- Aldanmaz, E., Pearce, J. A., Thirlwall, M. F. and Mitchell, J. G. (2000) Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 102: 67-95.
- Alici, P., Temel, A. and Gourgaud, A. (2002) Pb-Nd-Sr isotope and trace element geochemistry of Quaternary extension-related alkaline volcanism: A case study of Kula region (western Anatolia, Turkey). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 115: 487-510.
- Allen, M. B., Jackson, J. and Walker, R. (2004) Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics* 23: 1-16.
- Allen, M. B., Ghassemi, M. R., Shahrabi, M. and Qorashi, M. (2003a) Accomodation of the late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. *Journal of Structural Geology* 25: 659-672.
- Allen, M. B., Vincent, S. J., Alsop, G. I., Ismail-zadeh, A. and Flecker, R. (2003b) Late Cenozoic deformation in the south Caspian region: effects of a rigid basement block within a collision zone. *Tectonophysics* 366: 223-239.
- Allen, M. B., Jones, S., Ismail-Zadeh, A., Simmons, M. D. and Anderson, L. (2002) Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene-Quaternary subsidence in the South Caspian Basin. *Geology* 30: 775-778.
- Assereto, R. (1966a) Explanatory notes on the geological map of upper Djadgerud and Lar valleys (central Alburz, Iran). Series G. publication no. 232. Institute of geology of the University of Milan, Italy.
- Assereto, R. (1966b) The Jurassic shemshak formation in central Elburz (Iran). *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia* 1133-1182.

- Bailey, E. B., Jones, R. C. B. and Asfia, S. (1948) Notes on the geology of the Elborz Mountains, north-east of Tehran, Iran. *Quarterly Journal of the Geological Society of London* 104: 1-42.
- Berberian, M. (1983) The South Caspian: a compressional depression floored by a trapped, modified oceanic crust. *Canadian Journal of Earth Science* 20: 163-183.
- Berberian, F. and Berberian, M. (1981) Tectono-plutonic episodes in Iran. In: H.K., Gupta and F.M., Delany (Eds.): *Zagros, Hindukosh, Himalaya geodynamic evolution*. American Geophysical Union, Washington 5-32.
- Chung, S. L., Lo, C. H., Lee, T. Y., Zhang, Y., Xie, Y., Li, X., Wang, K. L. and Wang, P. L. (1998) Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting from 40 My ago. *Nature* 394: 769-773.
- Comin-Chiaromonti, P., Mosca, R., Sinigoi, S. and Battistini, G. (1978) Miocene volcanism in the Nir district (Eastern Azerbaijan, Iran). *Neues Jahrbuch für Mineralogie (Abhandlungen)* 133: 23-32.
- Conceicao, R. V. and Green, D. H. (2004) Derivation of potassic (shoshonitic) magmas by decompression melting of phlogopite-pargasite lherzolite. *Lithos* 72: 209-229.
- Didon, G. and Gemain, Y. M. (1976) Le Sabalan, volcano Plio-Quaternaire de l'Azerbaïdjan Oriental (Iran): Etude géologique et pétrographique de l'édifice et de son environnement régional. These 3 cycle, Grenoble, France.
- Dostal, J. and Zebri, M. (1978) Geochemistry of Savalan volcano (northwestern Iran). *Chemical Geology* 22: 31-42.
- Galoyan, G., Rolland, Y., Sosson, M., Corsini, M., Billo, S., Verati, C. and Melkonyan, R. (2009) Geology, geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Sevan ophiolites (Lesser Caucasus, Armenia): Evidence for Jurassic Back-arc opening and hot spot event between the South Armenian Block and Eurasia. *Journal of Asian Earth Sciences* 34: 135-153.
- Gansser, J. and Huber, H. (1962) Geological observations in the central Elburz. *Schweiz Mineral Petrograph Mitt* 42: 583-630.
- Hastie, A. R., Kerr, A. C., Pearce, J. A. and 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* 48: 2341-2357.
- Innocenti, F., Manetti, P., Mazzuoli, R., Pasquare, G. and Villari, L. (1982) Anatolia and north-western Iran. In: Thorpe R.S. (Ed.): *Andesites*, Wiley 327-349.
- Jackson, J. A., Priestley, K., Allen, M. B. and Berberian, M. (2002) Active tectonics of the South Caspian Basin. *Geophysical Journal International* 148: 214-245.
- Kazmin, V. G., Sbotshikov, J. M., Ricou, L., Zoneshain, L. P., Boulin, J. and Knipper, A. L. (1986) Volcanic belts as markers of the Mesozoic-Cenozoic active margin of Eurasia. *Tectonophysics* 123: 123-152.
- Keskin, M. (2003) Magma generation by slab steepening and breakoff beneath a subduction-accretion complex: An alternative model for collision-related volcanism in Eastern Anatolia, Turkey. *Geophysical Research Letters* 30(24): 8046.
- Leat, P. T., Pearce, J. A., Barker, P. F., Millar, I. L., Barry, T. L. and Larter, R. D. (2004) Magma genesis and mantle flow at a subducting slab edge: the South Sandwich arc-basin system. *Earth and Planetary Science Letters* 227: 17-35.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A. and Zanettin, B. (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology* 27: 745-750.
- Lescuyer, J. L., Michel, R., Riov, R. and Vivier, G. (1976) Etude géochimique du volcanisme tertiaire de la région de Mianeh (Azerbaijan, Iran). *Journal of Alpine Geology* 52: 85-98.
- Mangino, S. and Priestley, K. (1998) The crustal structure of the southern Caspian region. *Geophysical Research Letters* 133: 630-648.

- McKenzie, D. and O'Nions, R. K. (1991) Partial melt distribution from inversion of rare earth element concentrations. *Journal of Petrology* 32: 1021-1091.
- Pearce, J. A. and Cann, J. R. (1973) Tectonic Setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis. *Earth and Planetary Science Letter* 19: 290-300.
- Plank, T., Kelley, K. A., Murray, R. W. and Stern, L. Q. (2007) Chemical composition of sediments subducting at the Izu-Bonin trench. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 8: 4.
- Plank, T. (2005) Constraints from thorium/lanthanum on sediment recycling at subduction zones and the evolution of the continents. *Journal of Petrology* 4: 1-24.
- Riou, R., Dupuy, C. and Dostal, J. (1981) Geochemistry of coexisting alkaline and calc-alkaline volcanic rocks from northern Azarbaijan (N.W. Iran). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 11: 253-275.
- Schroeder, J. W. (1944) *Essai sur la structure de l'Iran*. Swiss Geological Society, *Eclogae Geologicae Helveticae* 37(1): 37-81.
- Sengor, A. M. C., Ozeren, S., Zor, E. and Genc, T. (2003) East Anatolian high plateau as a mantle supported, N-S shortened domal structure. *Geophysical Research Letters* 30(24): 8045.
- Sengor, A. M. C., Altiner, D., Cin, A., Ustaomer, T. and Hsu, K. J. (1988) The Tethyside orogenic collage. In: M. G., Audley-Charles and A., Hallam (Eds.): *Gondwana and Tethys*. Geological Society and Oxford University Press, Special Publication of the Geological Society 37: 119-181.
- Stampfli, G. M., Marcoux, J. and Baud, A. (1991) Tethyan margins in space and time. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 87: 373-409.
- Stampfli, G. M. (1978) *Etude geologique general de l'Elburz oriental au S de Gonbad-e Qabus (Iran, N-E)*. These de Doc. des Sciences. No. 1868, Universite de Geneva.
- Stocklin, J. (1960) Ein Querschnitt durch den ost Elburz. *Swiss Geological Society, Eclogae Geologicae Helveticae* 72: 681-694.
- Stocklin, J. (1968) Structural history and tectonics of Iran: A review. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists* 52: 1229-1258.
- Stocklin, J. (1974a) Northern Iran: Alborz Mountains. Geological Society of London, Special Publication 4: 213-234.
- Stocklin, J. (1974b) Possible ancient continental margins in Iran. In: C. A. Burke and C. L. Drake (Eds.): *The geology of continental margins*. Berlin, West-Germany, Springer-Verlag 873-884.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A. D., Saunders and M. J., Norry (Eds.): *Magmatism in Ocean Basins*. Geological Society of London, Special Publication 313-345.
- Vincent, S. J., M. B. Allen, A. Ismail-zadeh, and Flecker, R. (2002) The Paleogene evolution and sedimentary fill of the South Caspian Basin: Insights from the Talysh of southern Azerbaijan. Geological Society of London meeting on Petroleum Geology of the Caspian Basins, London, UK.
- Wensink, H. and Varekamp, J. C. (1980) Paleomagnetism of basalts from Alborz: Iran part of Asia in the Cretaceous. *Tectonophysics* 68: 113-129.

Geochemistry and petrogenesis of volcanic rocks from the northern part of the Lahrud region (Ardabil): An example of shoshonitic occurrence in northwestern Iran

Hadi Shafaii Moghadam ^{*1} and Habib Shahbazi Shiran ²

¹ School of Earth Sciences, University of Damghan, Damghan, Iran

² Department of Archaeology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Abstract

Basalts, andesites, trachyandesites and latites with shoshonitic affinity are the main volcanic rocks of Eocene age in the Lahrud region (Ardabil). Plagioclase, K-feldspar, biotite and amphibole associated with clinopyroxene are the main constituents of trachyandesites (shoshonites) while clinopyroxene, plagioclase and biotite are the rock-forming minerals of basalts (absarokites). The Lahrud volcanic rocks show enrichment in LREE and are characterized by enrichment in LILE and depletion in HFSE. Petrographical observations along with geochemistry of rare earth and trace elements of these lavas suggest shoshonitic affinity and derivation from a subduction zone. The geochemical behavior of the Lahrud lavas reveals the role of the trench sediments in the source region and genesis of these volcanic rocks. These lavas exhibit low degree of partial melting from a garnet-spinel lherzolite source. The comparison between the Lahrud volcanic rocks with Plio-Quaternary lavas of Sabalan and Eocene lavas of Hashtjin region highlights the different mantle source and degree of partial melting for the genesis of these volcanic rocks. The formation of these lavas is linked to slab steepening and breakoff in a post subduction collision zone.

Key words: Eocene, HFSE depletion, Subduction zone, Lahroud volcanic rocks, Shoshonite, LREE enrichment

* hadishafaii@du.ac.ir