

خاستگاه و تحولات ماگماهای بازالتی کواترنری شمال باختری آذربایجان (بورلان تا گنبد) با استفاده از بررسی‌های ایزوتوپی Sr- Nd

منیره خیرخواه* و محمدحاشم امامی^۱

^۱ پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، تهران، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۲/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۹/۲۸

چکیده

در منتهی‌الیه شمال باختری ایران، در منطقه آذربایجان غربی سنگ‌های آتشفشانی بازیک در طی کواترنری گسترش وسیعی یافته‌اند. این منطقه در بخش میانی کوهزاد آلپ- هیمالیا و در فلات مرتفع ایران - ترکیه در آناتولی خاوری واقع شده است. گدازه‌های بازیک کواترنری با طیف ترکیبی متنوعی از بازالت قلیایی، بازالت آندزیتی، تراکی بازالت آندزیتی تا تراکیت و با گستره وسیع بر روی نهشته‌های رسوبی قرار گرفته‌اند. این سنگ‌ها که از مراکز آتشفشانی، شکستگی‌های ژرف، گسل‌های امتدادلغز در حوضه‌های فراکشی برون ریزی داشته‌اند، از ویژگی‌های ساختاری و سنگ‌شناختی متفاوتی برخوردارند. در راستای پژوهش بر روند تکامل و منشأ ماگماهای بازالتی منطقه و بر اساس بررسی‌های صحرایی، سنگ‌نگاری و سنگ‌شناسی، ده نمونه از منطقه برای بررسی‌های ایزوتوپی نسبت‌های $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ، $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ انتخاب شد که حاصل آن مقایسه با داده‌های ایزوتوپی سنگ‌های بازالتی مشابه در ترکیه است. تفسیر بررسی‌های ایزوتوپی بر روی نمونه‌های بازیک آذربایجان گویای آن است که منشأ ماگماهای بازالتی در شمال باختری آذربایجان، گوشته‌ای و در محدوده ترکیب کلی زمین (Bulk Earth) واقع شده‌اند. ترکیب سنگ‌های بازالتی شمال منطقه گوشته تا حدودی تهی شده (depleted mantle) است که در مناطق جنوبی همراه با آرایش پوسته‌ای می‌باشند.

کلیدواژه‌ها: آذربایجان غربی، گدازه‌های بازیک کواترنری، بررسی‌های ایزوتوپی، ماگماهای اولیه، گوشته تهی شده، آرایش پوسته‌ای.

E_mail: Kheirkhah.monireh@gmail.com

* نویسنده مسئول: منیره خیرخواه

۱- مقدمه

گستره وسیع بازالت‌های کواترنری آذربایجان غربی در شناخت ماهیت ماگمای اولیه منطقه و فرایندهای مؤثر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دارد که در شناخت سرگذشت بخش مهمی از ماگماتیسیم جوان ایران و تحولات ماگمایی احتمالی، حائز اهمیت است. منطقه مورد مطالعه در طول‌های جغرافیایی ۰۵' و ۴۴' تا ۱۰' و ۴۵' خاوری و ۴۷' و ۳۷' تا ۴۷' عرض شمالی در استان آذربایجان غربی واقع شده است. روانه‌های بازالتی آرات در شمال منطقه از حوالی مرز ترکیه تا حواشی رودخانه ارس بر روی آبرفت‌های کواترنری و نهشته‌های رسوبی قدیمی‌تر با گسترش وسیعی قرار گرفته‌اند که زیباترین و متنوع‌ترین ساخت‌های آتشفشانی را در منطقه به وجود آورده‌اند. گدازه‌های بازالتی در منطقه به شکل آتشفشان‌های نوع هاوایی، استرومبولی در محدوده‌های بورلان (شمال ماکو)، بازرگان - ماکو - پلدشت، چالدران - سیه چشمه، سلماس و گنبد (باختر ارومیه) گسترش یافته‌اند. گدازه‌های نواحی شمالی منطقه (بورلان، بازرگان - ماکو - پلدشت) در ارتباط با گدازه‌های آرات و گدازه‌های مناطق جنوبی (چالدران، سلماس و باختر ارومیه) با گدازه‌های تندورک در ترکیه مشابهت دارند. ریخت‌شناسی گدازه‌های بازالتی کواترنری منطقه دارای ساخت‌های سطحی از نوع پاهوو (شکل ۱- الف)، آآ، تومولوس (شکل ۱- ب)، شکاف‌های فشاری، حفره‌دار، گدازه‌های گل کلمی و همچنین ساخت‌های درونی شامل انواع ساخت‌های منشوری (شکل ۱- ج)، لایه‌بندی گدازه‌ای، غارها (شکل ۱- د) و کانال‌های گدازه‌ای هستند.

۲- روش‌های پژوهش

اساس این پژوهش بر ژئوشیمی عناصر اصلی و کمیاب در سنگ‌های مختلف استوار است. در طی پنج مرحله عملیات صحرایی بیش از ۳۰۰ نمونه سنگ‌نگاری برداشت شده است و ۱۷۰ نمونه تحت تجزیه‌های XRF و ICP در آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی ایران و دانشگاه دورهام انگلستان قرار گرفته‌اند. افزون بر این ده نمونه بازالتی از منطقه انتخاب و در دانشگاه Leicester انگلستان مورد تجزیه ایزوتوپی نسبت‌های عناصر Sr و Nd قرار گرفته‌اند.

۳- بررسی‌های سنگ‌شناسی سنگ‌های بازی کواترنری منطقه

سنگ‌های آتشفشانی کواترنری به رنگ‌های تیره (خاکستری، قهوه‌ای) در منطقه گسترده شده‌اند. بر اساس بررسی‌های صحرایی، سنگ‌نگاری و سنگ‌شناسی، بازالت‌های کواترنری در ۵ محدوده آتشفشانی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (شکل ۲). با مطالعات صحرایی و بررسی‌های سنگ‌نگاری، سنگ‌های بازالتی به طور عمده آفانیتیک و گاه دارای درشت بلورهای الیون، پلاژیوکلاز و پیروکسن هستند که در رده‌بندی بافتی، طیف تدریجی از هیالوپورفیریک (شکل ۳- الف)، هیالومیکرولیتی پورفیریک (شکل ۳- ب)، تراکیتی تا اینترسرتال (شکل ۳- ج) و اینترگرانولار را شامل می‌شوند. با بررسی‌های کانی‌شناسی و شیمی کانی‌های منطقه، این سنگ‌ها به طور عمده دارای کانی‌های پلاژیوکلاز، پیروکسن و اولیون هستند که واحدهای میانه (آندزی - بازالتی) حاوی آمفیبول و بیوتیت و بیگانه‌بلور کوارتز و فلدسپار قلیایی هستند. در شیشه اپاستیتی شده خمیره بیشتر سنگ‌های منطقه، آپاتیت و کانی‌های کدر (تیتانومگنتیت) پراکنده‌اند. در بازالت‌های مناطق جنوبی وجود بیگانه‌بلور کوارتز با حاشیه واکنشی در مجاورت الیون (شکل ۳- د) و همچنین حضور فلدسپار قلیایی در خمیره ناشی از آلودگی پوسته‌ای است. بافت‌های غربالی (شکل ۳- و)، اسکلتی، منطقه‌بندی عادی و معکوس درشت‌بلورها و شکل‌های دندرتی، دم چلچله‌ای و اسپاکی میکرولیت‌ها در سنگ‌های منطقه قابل مشاهده است که ناشی از سرد شدگی سریع گدازه‌های منطقه است. حاشیه اپاستیتی شده بلورها وجود بیگانه‌بلورهای کوارتز در مجاورت الیون در خمیره سنگ‌های قلیایی حاوی الیون و پلاژیوکلازهای بازیک و انواع بافت‌های دانه‌ریز و دانه‌درشت و یا انواع شیشه‌های میانه و بازیک در مجاورت هم (شکل ۳- ه)، از مهم‌ترین شواهد عدم تعادل و آمیختگی و آرایش ماگمایی در سنگ‌های منطقه است که با مشاهدات سنگ‌نگاری نتیجه شده است (خیرخواه، ۱۳۸۵).

بر اساس طبقه‌بندی‌های شیمیایی در نمودار Floyd and Winchester (1976) و Cox et al. (1979) این سنگ‌ها در محدوده‌های قلیایی، بازالت قلیایی، آندزی - بازالت، تراکی نفلیتیت، تراکیت و فنولیت واقع شده‌اند (شکل‌های ۴ - الف و ب). بر اساس نمودار Irvine and Baragar (1971) نمونه‌های مناطق چالدران، بازرگان

ماکو- پلدشت و برخی از نمونه‌های سلماس در محدوده قلیایی و نمونه‌های شمال ماکو، سلماس و باختر ارومیه در محدوده نیمه قلیایی قرار دارند.

۴- مروری بر فعالیت‌های آتشفشانی آزارات و تندورک در طی کواترنری

با توجه به نزدیکی آتشفشان‌های آزارات و تندورک، با فعالیت آتشفشانی کواترنری آذربایجان غربی ایران و جاری شدن روانه‌های بازالتی در شمال منطقه (ماکو) در طی کواترنری، این دو منطقه (شکل ۵) مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته‌اند. گدازه‌های آندزی بازالتی آزارات از دهانه‌های آتشفشانی (کراترها) در امتداد دامنه‌ها به شکل جریان‌های طنابی و گدازه‌های آبرروی آبرفت‌های جوان کواترنری آذربایجان غربی تشکیل روانه‌های بازالتی و گاه فوران‌های انفجاری (خاکستر و روانه‌های گلی) داده‌اند. آتشفشان تندورک که در ۵۰ کیلومتری جنوب آزارات، در نزدیکی مرز ایران (چالدران)، در امتداد گسل امتدادلغز Bulik Golu با محوری طویل و روندی شمالی- جنوبی واقع شده است و متشکل از گدازه‌های بازالتی، گدازه‌های تراکیتی و لایه‌های متوالی از سنگ‌های آذرآواری است. در زمانی که آزارات دوره خاموشی را آغاز کرده، تندورک هنوز فعال (حدود ۲۵۰۰ سال پیش) بوده است. گدازه‌های آزارات (بر اساس نمودار Le Bas et al., 1986) در محدوده‌های فقیر و غنی از سیلیس قرار گرفته‌اند و گدازه‌های تندورک در محدوده فقیر از سیلیس واقع شده‌اند. در نمودار ترکیبی Irvine and Baragar (1971) گدازه‌های آزارات در محدوده نیمه قلیایی و گدازه‌های تندورک در محدوده قلیایی قرار دارند (شکل ۶).

۵- مطالعه نسبت‌های ایزوتوپی Sr و Nd نمونه‌های بازالتی منطقه

با توجه به اهمیت سنگ‌شناسی و سنگ‌زادی منشأ بازالت‌های منطقه، آزمایشات نسبت‌های ایزوتوپی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ برای شناخت منشأ ماگمای اولیه و آرایش‌های ماگمایی تأثیرگذار انجام شده است. نتایج تجزیه‌ها در جدول ۱ آورده شده است. همان‌گونه که در این جدول دیده می‌شود، طیف ترکیبی نسبت‌های ایزوتوپی استرانسیم ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) نمونه‌های انتخابی این منطقه از ۰/۷۰۴۴۵۲ تا ۰/۷۰۵۷۰۵ متغیر است. در بازالت‌های منطقه چالدران (در جنوب کشمش تپه)، بیشینه این نسبت و در نمونه‌های بورلان (شمال ماکو) در مرز ترکیه، کمینه این نسبت دیده می‌شود. نسبت ایزوتوپی عنصر نئودیمیم ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) از ۰/۵۱۲۶۲۷ تا ۰/۵۱۲۹۲۳ متغیر است، که بیشترین نسبت ایزوتوپی این عنصر در بازالت‌های مسیر رودخانه زنگمار در شمال روستای قله تپه و کمترین آن مربوط به بازالت‌های دهانه آتشفشانی (کراتر) سلماس است. در نمودار همبستگی ایزوتوپی Sr, Nd، نمونه‌های منطقه در نزدیکی محدوده ترکیب اصلی زمین (BSE)، نمونه‌های مناطق شمالی در محدوده گوشه تپه‌ای شده و نمونه‌های مناطق جنوبی در محدوده ترکیب اصلی زمین و در برخی مناطق (چالدران- سلماس) با غنی‌شدگی بیشتری از نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ قرار گرفته‌اند (شکل ۷). پوسته قاره‌ای بیشتر دارای نسبت ایزوتوپی پایین‌تری از Nd و نسبت ایزوتوپی بالاتری از Sr است، در حالی که ماگمای گوشه‌ای رابطه‌ای معکوس را نشان می‌دهد (Best, 2001; Rollinson, 1993).

۶- نمودارهای مقایسه‌ای

با توجه به همجواری دو آتشفشان عمده تندورک و آزارات در ترکیه با گستره بازالتی منطقه آذربایجان غربی در ایران، جاری شدن روانه‌های بازالتی آزارات در شمال این منطقه در طی کواترنری و شباهت ویژگی‌های سنگ‌شناسی، ژئودینامیکی و ژئوشیمیایی سنگ‌های دو منطقه، داده‌های ایزوتوپی آنها با یکدیگر مقایسه شده‌اند (شکل‌های ۸ و ۹). با رسم نسبت‌های ایزوتوپی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ بازالت‌های نواحی مختلف

آذربایجان غربی در برابر فاصله فرضی از یکدیگر (نمودارهای ۹ و ۸) و با مقایسه با بازالت‌های آزارات و تندورک (Pearce et al., 1990)، از سمت شمال باختری تا جنوب خاوری منطقه از نسبت‌های ایزوتوپی Nd بازالت‌ها کاسته و بر نسبت‌های ایزوتوپی Sr آنها افزوده می‌شود. بازالت‌های آزارات هم‌روند با بازالت‌های مناطق شمالی و تراکی بازالت‌های تندورک هم‌روند با نمونه‌های چالدران قرار گرفته‌اند. در نمودار همبستگی ایزوتوپی $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ در برابر $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Rollinson, 1993)، گرچه منشأ بازالت‌ها، گوشه‌ای و در محدوده آرایه گوشه واقع شده‌اند، نمونه‌های شمالی منطقه و نمونه‌های آزارات و تندورک در محدوده گوشه نسبتاً تپه‌ای شده با نسبت Rb/Sr پایین و Sm/Nd بالاتر (از عناصر REE سبک تپه‌ای شده‌اند) قرار گرفته‌اند، (نمودار ۱۰) در حالی که نمونه‌های مناطق دیگر آذربایجان غربی عموماً در محدوده ترکیب اصلی زمین (BSE) واقع شده و در نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ غنی‌شدگی دارند. برای بررسی بازالت‌های قاره‌ای در آرایه گوشه‌ای از نمودار تغییرات نسبت‌های ایزوتوپی $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ در برابر $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ برای نمونه‌های منطقه استفاده شده است (نمودار ۱۱)، که بر پایه نسبت‌های ایزوتوپی Nd در CHUR و Sr در UR است. نمودار (بر اساس Faure, 1986)، برای سادگی در تفسیر داده‌ها به چهار بخش تقسیم شده است، بازالت‌های آذربایجان غربی در محدوده بخش‌های اول و دوم و چهارم واقع شده‌اند. بازالت‌های شمالی منطقه، در محدوده بخش دوم (آرایه گوشه‌ای) با نسبت‌های Sm/Nd بالاتر ($f_{\text{Sm}} > 0$) نسبت به CHUR و نسبت‌های پایین‌تر Rb/Sr ($f_{\text{Rb}} < 0$) در مقایسه با UR، واقع شده‌اند، ویژگی یاد شده ناشی از مواد جامد برجای مانده از ذوب بخشی گوشه تفریق نیافته است (Faure, 1986). در زیر قاره‌ها، ماگمایی تپه‌ای شده، متشکل از جامدات باقی مانده با نسبت Sm/Nd بالا و نسبت Rb/Sr پایین است (Ajlegre et al., 1982). نمونه‌های چالدران در بخش اول واقع شده‌اند که دارای نسبت‌های Sm/Nd ($f_{\text{Sm}} > 0$) و Rb/Sr ($f_{\text{Rb}} > 0$) بزرگ‌تر از مقادیر موجود در UR و CHUR هستند که ناشی از منشأ غنی از Rb این سنگ‌ها است.

نمونه‌های مناطق جنوبی (بوژه سلماس) با نسبت‌های پایین Sm/Nd ($f_{\text{Sm}} < 0$)، تپه‌ای از Sm و نسبت‌های بالا Rb/Sr ($f_{\text{Rb}} > 0$) غنی از Rb هستند، به احتمال، از منابع غنی از Rb و تپه‌ای از Sm مشتق شده‌اند و یا می‌تواند بر اثر آرایش ماگمای مشتق از مواد برجای مانده از سنگ‌های آذرین و دگرگونی پوسته قاره‌ای، تشکیل شده و فرآورده نهایی تفریق ژئوشیمیایی گوشه باشد که گویای آلودگی پوسته‌ای و آرایش ماگمای اولیه این سنگ‌ها هستند. سنگ‌هایی که در این بخش واقع می‌شوند غنی از Rb و تپه‌ای از Sm هستند (Faure, 1986). تفاوت، در ویژگی‌های ژئوشیمیایی Sr- Rb و Sm- Nd ناشی از تفاوت مؤلفه‌های ایزوتوپی Nd و Sr در پوسته و گوشه زمین است که برای برآورد منشأ سنگ‌های آذرین استفاده می‌شود (Faure, 1986)، سنگ‌های پوسته‌ای نسبت‌های بالاتری از Rb/Sr و نسبت‌های پایین‌تری از Sm/Nd نسبت به منشأ ماگماهای گوشه‌ای دارند. در راستای مطالعه آلودگی منشأ ماگمای اولیه بازالت‌های منطقه از نمودارهای آلودگی ماگمایی برای نسبت‌های ایزوتوپی استفاده شده است. از تغییرات نسبت ایزوتوپی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ در برابر اکسیدهای عناصر اصلی می‌توان، تغییرات درجه ذوب بخشی یک منشأ همگن یا تبلور بخشی از ماگمای والد و آرایش پوسته قاره‌ای را تعیین نمود (Pearce et al., 1990).

در شکل ۱۲ بازالت‌های مناطق جنوبی (با درصد وزنی SiO_2 از ۴۶ تا ۵۲/۲۳ و با نسبت ایزوتوپی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ از ۰/۷۰۴۹۷۹ تا ۰/۷۰۵۷۰۵) در روند فرایند آرایش، هضم و تفریق واقع شده‌اند که تأثیر آلودگی پوسته‌ای را در سنگ‌های منشأ نشان می‌دهند. بازالت‌های مناطق شمالی از بورلان به سمت ماکو در روند فرایند افزایش تبلور بخشی و کاهش ذوب بخشی قرار دارند. در شکل ۱۳، بازالت‌های مناطق جنوبی (با درصد وزنی MgO از ۳/۸۵ تا ۱۱/۴۶

و با نسبت ایزوتوپی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ از 0.704979 تا 0.705050 در روند آرایش پوسته‌ای قرار دارند و بازالت‌های مناطق شمالی از بورلان (شمال ماکو) به سمت ماکو در روند فرایند تبلور بخشی (FC) واقع شده‌اند.

نسبت‌های بالای SiO_2 و پایین MgO در برابر نسبت ایزوتوپی Sr تحولات ماگماهای منشأ گوشته‌ای را نشان می‌دهد (Alici et al., 1998). بازالت‌های دهانه‌های آتشفشانی (کراتر) سلماس با $\text{MgO} = 11/46$ و $\text{SiO}_2 = 48/11$ آرایش نیافته‌ترین بازالت‌های منطقه و تراکی بازالت‌های منشوری چالدران با $\text{MgO} = 3/85$ ، $\text{SiO}_2 = 50/43$ آرایش یافته‌ترین بازالت‌های منطقه است. تغییرات نسبت ایزوتوپی $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ در برابر اندیس مولی $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ (Thirlwall & Jones, 1983) آلودگی پوسته‌ای را نشان می‌دهد (شکل ۱۴).

تطابق تغییرات ایزوتوپی Nd در برابر اندیس تفریق عناصر اصلی (F/M)، ناشی از فرایندهای متوالی آرایش ماگمایی با پوسته است از این رو بازالت‌های اولیه با کمترین نسبت F/M و با مؤلفه‌های پایین تری از Nd، حساسیت بیشتری به آرایش دارند (Dickin, 2005). در این نمودار با بررسی نمونه‌های بازالتی منطقه آذربایجان غربی مشخص می‌شود که در نمونه‌های شمالی، نسبت‌های ایزوتوپی Nd بالا که از ویژگی‌های ماگماهای گوشته‌ای است و با کاهش اندیس F/M از نمونه‌های شمالی منطقه به سمت سلماس و با افزایش اندیس F/M به سمت چالدران، کاهش می‌یابد. بازالت‌های شمالی آرایش پوسته‌ای اندکی دارند. تراکی بازالت‌های منطقه چالدران با اندیس F/M بالا بیانگر بازالت‌هایی آرایش یافته در منطقه، با بیشترین تفریق یافتگی هستند، در حالی که بازالت‌های منطقه سلماس با بیشترین اندیس F/M و نسبت‌های ایزوتوپی $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ، بیانگر سنگ‌هایی با تفریق محدودتر در پوسته و ظاهراً با آلودگی پوسته‌ای هستند. تشکیل زاویه مایل در محدوده ترکیبی گدازه، مبتنی بر سازوکار آلودگی متأثر از تفریق یافتگی‌های وابسته است. نمودار روند‌های صعودی مایل نمونه‌ها از سلماس تا شمال منطقه می‌تواند ناشی از تأثیر سازوکار آرایش بر سنگ‌های با ماگماهای همزاد تفریق یافته باشد. بر اساس شکل ۱۴، نمونه‌ای از دهانه آتشفشانی (کراتر) سلماس در تعادل با الیون بازالت‌های منیزیم‌دار گوشته‌ای با فورستریت بالا ($\text{Fo} = 88\%$) دیده می‌شود که با نسبت F/M و $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ تا حدودی پایین، تفریق یافتگی کمتری را نشان می‌دهد. نظر به این که بیشتر بازالت‌های اولیه (با کمترین نسبت‌های F/M) با مقادیر پایین تر از Nd حساسیت بیشتری نسبت به آرایش دارند (Thirlwall and Jones, 1983)، منطقه بازرگان - ماکو - پلدشت ظاهراً با نسبت $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ بالا، دارای کمترین آلودگی پوسته‌ای و به طور محدود تفریق یافته‌اند و نمونه‌های بازیک چالدران، تفریق یافته‌ترین سنگ‌های بازیک منطقه و با آلودگی مواد پوسته‌ای هستند.

به این علت که ایزوتوپ‌های رادیوژنیک به تنهایی توان جداسازی منشأ سنگ‌ها از گوشته غنی شده و یا پوسته را ندارند، می‌توان از نسبت‌های عناصر ناسازگار و داده‌های ایزوتوپی پایدار استفاده نمود.

از نسبت $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ ، در برابر نسبت‌های ایزوتوپی Sr، به عنوان یک اندیس آلودگی پوسته‌ای استفاده شده است (Carlson & Hart, 1988)، از این رو در نمونه‌های منطقه از این نمودار برای این جداسازی استفاده شده است (شکل ۱۵) و این الگو را با آلودگی ماگماها از یک منبع گوشته‌ای شده (۱) ناشی از واحدهای پوسته‌ای در ارتباط می‌دانند و در این نمودار، مدل‌های آمیختگی بین ماگماهای با منشأ (۱) (به عنوان گوشته‌بالایی سست کره) و آرایش‌های پوسته‌ای با نسبت‌های ایزوتوپی متفاوت نشان داده شده است که بازالت‌های بورلان و دهانه آتشفشانی سلماس در این محدوده قرار گرفته‌اند، در این نمودار، نمونه‌ای از منطقه سلماس که نسبت $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ و $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ بالایی دارد، بیانگر بازالت‌های آلوده و سنگ‌های بازالتی نواحی شمالی که از نسبت $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ کم تا متوسط و نسبت ایزوتوپی Sr کمی برخوردارند، بازالت‌هایی از منبع گوشته‌ای شده با آرایش اندک پوسته‌ای هستند، این سنگ‌ها نشان از

منشأ ماگماهای تهی شده گوشته‌بالایی دارند. بازالت‌های مناطق جنوبی (سلماس)، باختر ارومیه و چالدران) از نسبت $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ کم تا متوسط و نسبت Sr بالاتری برخوردارند، بازالت‌هایی گوشته‌ای و با آرایش پوسته‌ای شدیدتری هستند. دیگر بازالت‌ها با نسبت ایزوتوپی Sr بیش از 0.708 و $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ کم، منشأ سنگ کره گوشته‌ای (۳) را نشان می‌دهند که سنگ‌های بازالتی منطقه مورد مطالعه در این محدوده قرار ندارند و منشأ آنها از سنگ کره گوشته‌ای نمی‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

- سنگ‌های آتشفشانی کوآترنری در منطقه آذربایجان غربی در شمال باختر ایران ایالت آتشفشانی قاره‌ای گسترده‌ای را در فلات مرتفع ایران- ترکیه در آناتولی خاوری و در کمربند آلپ - هیمالیا تشکیل داده‌اند که در بررسی‌های سنگ‌شناسی دارای طیف ترکیبی، بازالت تا موژه آریب هستند. با توجه به ویژگی‌های صحرایی و سنگ‌شناسی سنگ‌های بازیک کوآترنری در ۵ محدوده شمال ماکو، بازرگان - ماکو - پلدشت، چالدران، سلماس و باختر ارومیه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. گدازه‌های بازالتی آرات بخش وسیعی از شمال ماکو را پوشانیده و در منطقه چالدران خروج ماگمای بازالتی از محل شکستگی‌های ژرف با ترکیب تراکی بازالت تا تراکیت، مشابه با فعالیت آتشفشان تندروک در ترکیه است. - با مطالعه نسبت‌های ایزوتوپی $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ و $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ نمونه بازالت‌های منطقه عموماً در محدوده ترکیب کلی زمین (Bulk Earth) و برخی (شمال آذربایجان) در محدوده ترکیب گوشته‌ای به نسبت تهی شده، در محدوده آرایه گوشته‌ای قرار گرفته‌اند. - تراکی بازالت‌های چالدران از بیشترین نسبت ایزوتوپی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و بازالت‌های شمال ماکو از کمترین این نسبت برخوردار است. بازالت‌های منطقه سلماس دارای کمترین نسبت $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ و سنگ‌های بازالتی مسیر رودخانه زنگمار بیشترین این نسبت را دارا هستند. بازالت‌های شمالی منطقه (با مقادیر کمتر $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) منشأ گوشته‌ای و تراکی بازالت‌های چالدران و سلماس (مقادیر بیشتر $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) منشأ گوشته‌ای با آرایش پوسته‌ای را نشان می‌دهند. - از سمت شمال باختری تا جنوب خاوری منطقه از نسبت‌های ایزوتوپی Nd کاسته و بر نسبت‌های ایزوتوپی Sr افزوده می‌شود که روند افزایش آرایش پوسته‌ای به طور کامل محسوس است.

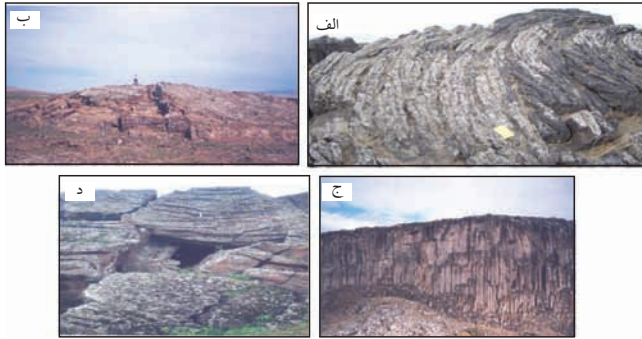
- بازالت‌های نواحی شمال منطقه دارای نسبت‌های Sm/Nd بالا و Rb/Sr کم هستند که مشابه جامدهای باقی مانده از ذوب بخشی گوشته تفریق یافته و به نسبت تهی شده با اندکی آرایش پوسته‌ای هستند.

- بازالت‌های چالدران از نسبت‌های Sm/Nd پایین Rb/Sr بالایی برخوردارند و با اندیس تفریق (F/M) بالا، گویای بازالت‌های تفریق یافته همراه با آلودگی پوسته‌ای به نسبت بالا هستند.

- بازالت‌های سلماس و باختر ارومیه نیز دارای نسبت‌های Sm/Nd تا حدودی پایین هستند اما با توجه به کمترین اندیس تفریق F/M، نشان از بازالت‌های گوشته‌ای کمتر تفریق یافته ولی با آلودگی پوسته‌ای اساسی دارند. بازالت‌های دهانه آتشفشانی سلماس دارای الیون‌های غنی از منیزیم ($\text{Fo} = 88\%$) هستند و نسبت ایزوتوپی $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ پایین آنها نشان از آلودگی پوسته‌ای (شواهد سنگ‌نگاری نیز وجود بیگانه‌بلورهای کوآترنری را در سنگ‌های منطقه و در نتیجه آلودگی پوسته‌ای را تأیید نموده است) دارد.

- در مقایسه بازالت‌های منطقه مورد مطالعه با بازالت‌های کوآترنری آرات و تندروک در ترکیه، بازالت‌های این مناطق به طور معمول در محدوده ترکیب اصلی زمین و با منشأ گوشته‌ای هستند. بازالت‌های شمال منطقه آذربایجان تشابه بسیاری با بازالت‌های همجوار یعنی آرات داشته و از گوشته به نسبت تهی شده ناشی شده‌اند.

- بازالت‌های منطقه افزون بر متأثر بودن از منشأ تحت تأثیر دو فرایند تفریق ماگمایی در پوسته و آلودگی پوسته‌ای قرار گرفته‌اند. تراکی بازالت‌های چالدران قابل مقایسه با سنگ‌های بازیک منطقه تندروک ترکیه بوده و تفریق یافته‌ترین

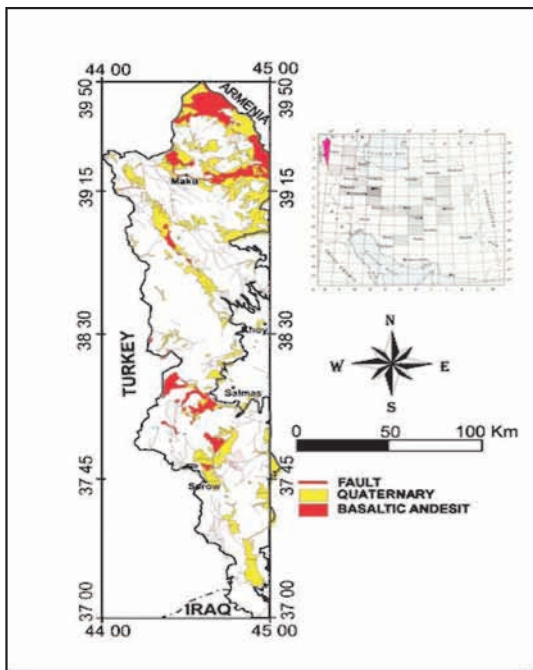


شکل ۱- الف) نمایی از گدازه‌های طنابی بورلیان. ب) نمایی از تومولوس‌های بازالتی پلدشت. ج) نمایی از بازالت‌های منشوری چالدران. د) نمایی از غارهای بازالتی بورلیان

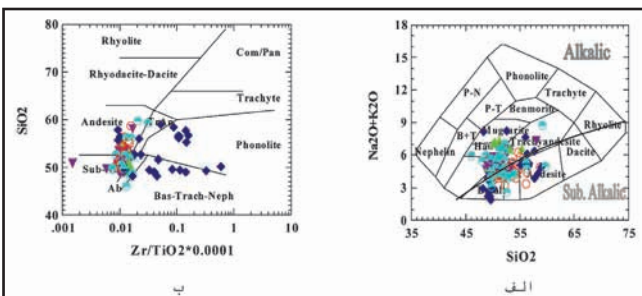
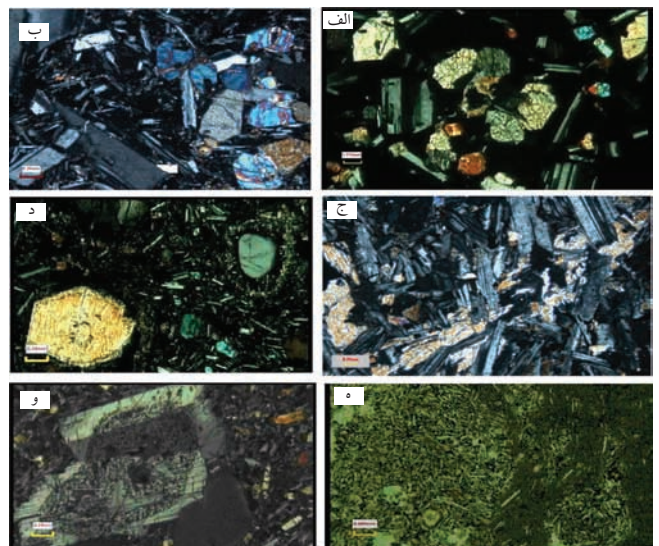
سنگ‌های آلوده با پوسته هستند. در حالی که بازالت‌های سلماس و باختر ارومیه کمتر تفریق یافته و با توجه به نسبت پایین $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ و دلایل سنگ‌نگاری (وجود بیگانه‌بلورهای کوارتز) آلودگی پوسته‌ای دارند. بازالت‌های شمال آذربایجان از گوشه تهنی شده منشأ شده‌اند و دارای تفریق ماگمایی محدود و آلودگی اندک هستند. - شواهدی مبنی بر منشأ گوشه غنی از Rb (گوشه متاسوماتیکی) در زون‌های فرورانش که موجب افزایش نسبت ایزوتوپی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ می‌شود، در بازالت‌های کواترنری آذربایجان دیده نمی‌شود و انواع غنی از نسبت ایزوتوپی Sr، در این بازالت‌ها دلایل سنگ‌نگاری و صحرایی روشنی مبنی بر آلودگی پوسته‌ای را در بر دارند.

جدول ۱- نتایج تجزیه‌های ایزوتوپی Sr و Nd نمونه‌های منطقه مورد مطالعه

Sample Name	Area	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_n$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_n$
Mu۶-۱۱	شمال ماکو	۰/۷۰۴۴۵۲	۰/۵۱۲۸۳۲
Mu۱۱-۱۶	چالدران	۰/۷۰۵۷۰۵	۰/۵۱۲۷۰۸
Mu۱۲-۱۷	چالدران	۰/۷۰۵۶۰۰	۰/۵۱۲۶۹۰
Mu۱۳-۱۸	چالدران	۰/۷۰۵۰۰۸	۰/۵۱۲۷۵۳
Mu۱۴-۱۹	سلماس	۰/۷۰۵۳۳۸	۰/۵۱۲۶۳۰
Mu۱۵-۲۰	سلماس	۰/۷۰۴۹۷۹	۰/۵۱۲۶۲۷
Mu۱۶-۲۳	سلماس	۰/۷۰۵۵۷۰	۰/۵۱۲۶۴۳
Mu۱۸-۲۵	بزرگان - ماکو - پلدشت	۰/۷۰۴۶۵۷	۰/۵۱۲۹۲۳
Mu۲۰-۲۶	بزرگان - ماکو - پلدشت	۰/۷۰۴۴۶۱	۰/۵۱۲۸۳۲
RK۴	باختر ارومیه	۰/۷۰۵۱۶۳	۰/۵۱۲۶۵۴

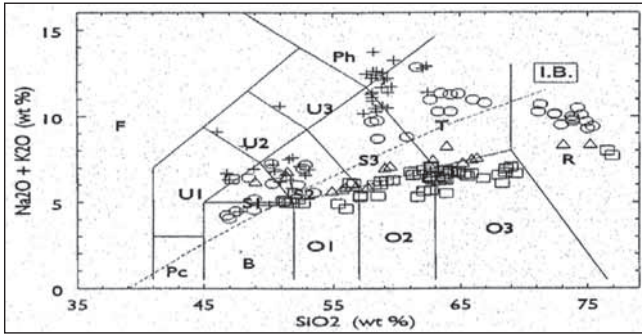


شکل ۲- نقشه ساده شده زمین‌شناسی نمایش بازالت‌های کواترنری، اقباس از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ سرو، خوی و ماکو

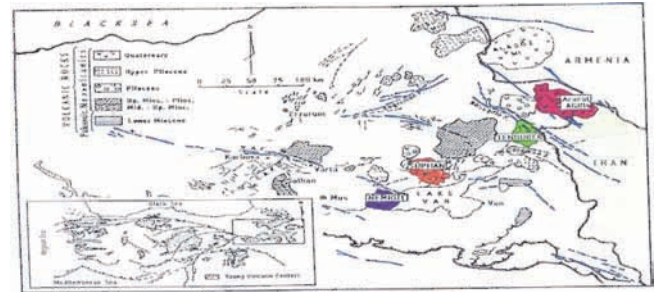


شکل ۴- الف) نمودار طبقه‌بندی سنگ‌های منطقه بر اساس عناصر اصلی (Cox et al., 1979) ب) نمودار طبقه‌بندی سنگ‌های منطقه بر اساس عناصر کمیاب (Winchester & Floyd, 1976) علائم: شمال ماکو (○)، بزرگان-ماکو-پلدشت (▽)، چالدران (▲)، سلماس (●)، باختر ارومیه (◆)

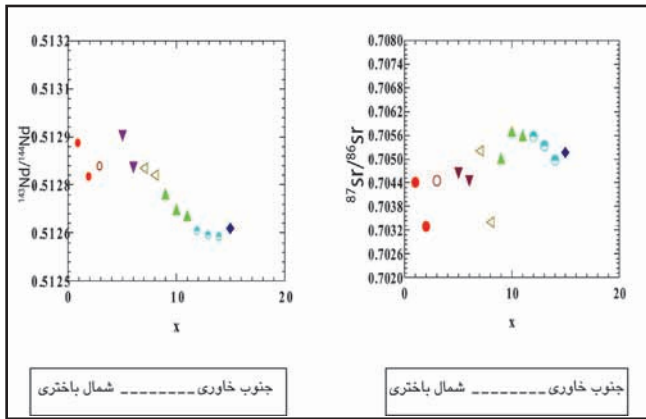
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی بازالت‌های منطقه در نور PPL، XPL الف) بافت هیالوپرفریک در بازالت‌های شمال ماکو، تصویر در PPL، ب) بافت هیالومیکرولیتی پرفریک در تراکی بازالت‌های چالدران، تصویر در PPL، ج) بافت اینترستال در بازالت‌های ماکو-پلدشت تصویر در PPL، د) کوارتز با حاشیه واکنشی در بازالت‌های سلماس تصویر در PPL، ه) تداخل دو نوع شیشه تیره و روشن در خمیره برخی از بازالت‌های مناطق جنوبی تصویر در XPL، و) فلدسپارهای منطقه سلماس با بافت غربالی، تصویر در PPL



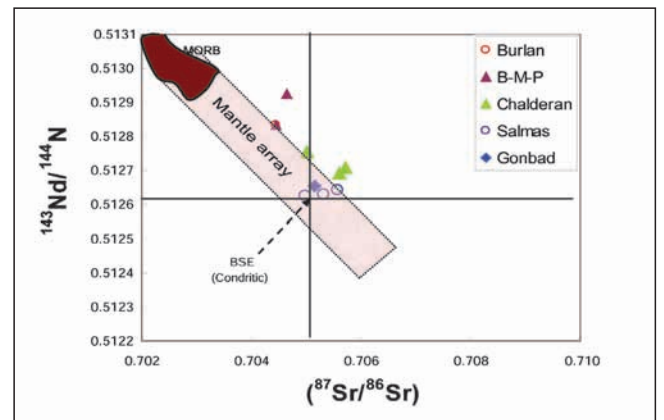
شکل ۶- نمودار مجموع قلیایی در برابر SiO_2 سنگ‌های آتشفشانی آناتولی خاوری از Irvine & Baragar (1971) و Le Bas et al. (1986) مرز بین قلیایی و نیمه‌قلیایی از (1971) Baragar & Irvine علامت: آارات (Δ), تندورک (+)



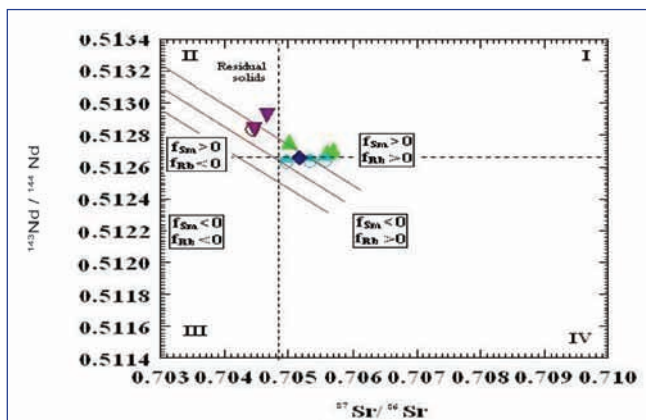
شکل ۵- مراکز آتشفشانی مهم و گسل‌های اصلی ترکیه در مجاورت مرز ایران (Yilmaz et al., 1998)



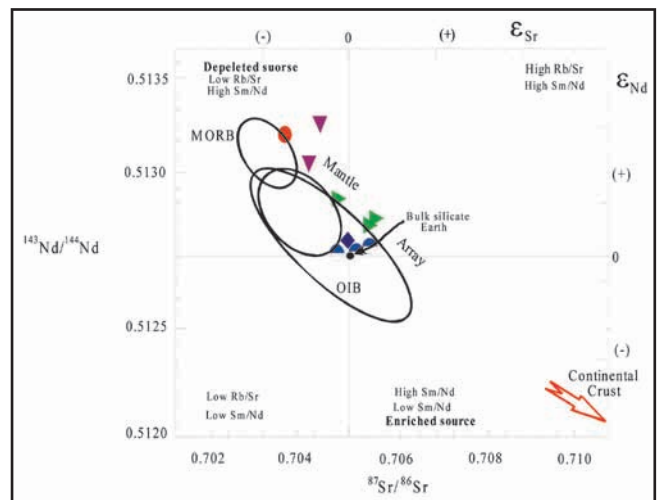
شکل ۷- نسبت‌های ایزوتوپی $^{143}Nd/^{144}Nd$ در برابر $^{87}Sr/^{86}Sr$ سنگ‌های منطقه و آارات و تندورک در برابر فاصله فرضی X از شمال باختری تا جنوب خاوری منطقه علامت: آارات (\bullet), تندورک (\blacktriangleleft), شمال ماکو (\circ), بازرگان-ماکو-پلدشت (\blacktriangledown), چالدران (\blacktriangle), سلماس (\circ), باختر ارومیه (\blacklozenge)



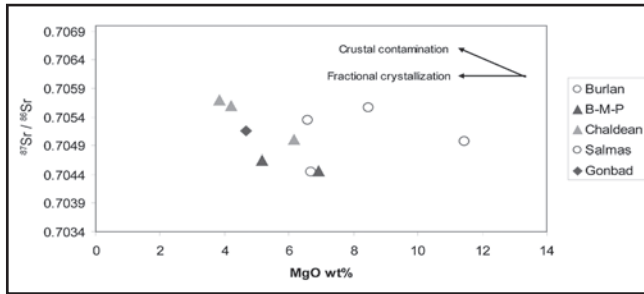
شکل ۸- تغییرات نسبت‌های ایزوتوپی $^{143}Nd/^{144}Nd$ و $^{87}Sr/^{86}Sr$ سنگ‌های منطقه و آارات و تندورک در برابر فاصله فرضی X از شمال باختری تا جنوب خاوری منطقه علامت: آارات (\bullet), تندورک (\blacktriangleleft), شمال ماکو (\circ), بازرگان-ماکو-پلدشت (\blacktriangledown), چالدران (\blacktriangle), سلماس (\circ), باختر ارومیه (\blacklozenge)



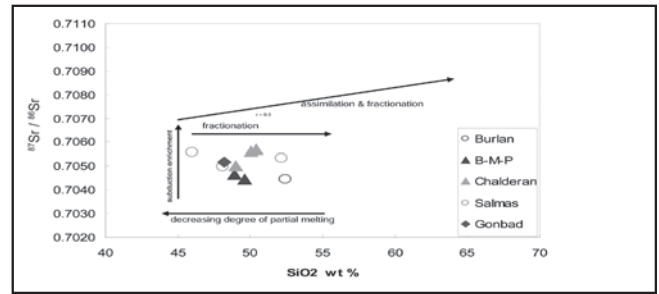
شکل ۹- توزیع نسبت‌های ایزوتوپی $^{143}Nd/^{144}Nd$ در برابر $^{87}Sr/^{86}Sr$ بازالت‌های منطقه در برابر آرایش گوشته‌ای علامت: شمال ماکو (\circ), بازرگان-ماکو-پلدشت (\blacktriangledown), چالدران (\blacktriangle), سلماس (\circ), باختر ارومیه (\blacklozenge)



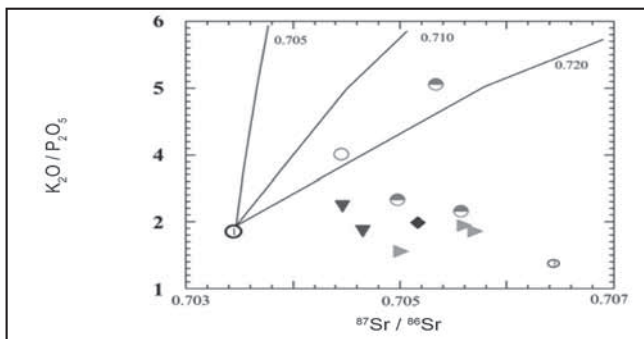
شکل ۱۰- نمودار همبستگی ایزوتوپی $^{143}Nd/^{144}Nd$ در برابر $^{87}Sr/^{86}Sr$ (Rollinson, 1993)، که تفاوت بین نسبت‌های اندازه گیری شده $^{87}Sr/^{86}Sr$ و $^{143}Nd/^{144}Nd$ در سنگ‌های منطقه نسبت به ترکیب اصلی زمین را نشان می‌دهد. علامت: آارات (\bullet), تندورک (\blacktriangleleft), شمال ماکو (\circ), بازرگان-ماکو-پلدشت (\blacktriangledown), چالدران (\blacktriangle), سلماس (\circ), گنبد (\blacklozenge)



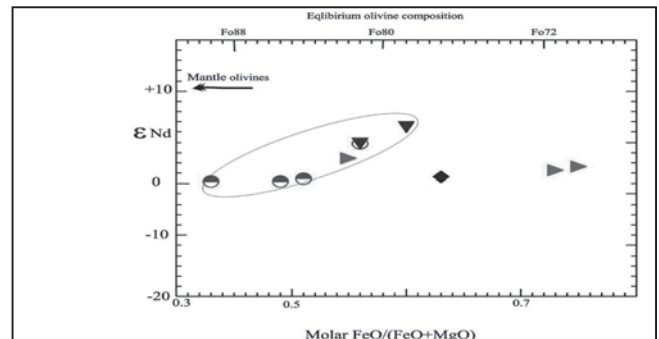
شکل ۱۳- نمودار نسبت ایزوتوپی Sr در برابر MgO (Alici et al., 1998) برای تأثیر فرایندهای AFC و FC در منشأ سنگ‌های بازالتی منطقه. علائم: شمال ماکو (○)، بازرگان-ماکو-پلدشت (▼)، چالدران (▲)، سلماس (●)، باختر ارومیه (◆)



شکل ۱۴- نمودار نسبت ایزوتوپی Sr در برابر SiO₂ (Pearce et al., 1990) برای تأثیر فرایندهای AFC و FC در منشأ سنگ‌های بازالتی منطقه. علائم: شمال ماکو (○)، بازرگان-ماکو-پلدشت (▼)، چالدران (▲)، سلماس (●)، باختر ارومیه (◆)



شکل ۱۵- اندیس آرایش پوسته‌ای K₂O/P₂O₅ در برابر نسبت‌های ایزوتوپی ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr برای بازالت‌های منطقه (Carlson & Hart, 1988). علائم: شمال ماکو (○)، بازرگان-ماکو-پلدشت (▼)، چالدران (▲)، سلماس (●)، باختر ارومیه (◆)



شکل ۱۶- تغییرات نسبت ایزوتوپی ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd در برابر اندیس F/M (Thirlwall and Jones, 1983) علائم: شمال ماکو (○)، بازرگان-ماکو-پلدشت (▼)، چالدران (▲)، سلماس (●)، باختر ارومیه (◆)

کتابنگاری

خیرخواه، م.، ۱۳۸۵- بررسی پترولوژی و ژئوشیمی بازالت‌های کواترنری ایران (آذربایجان) و تعیین موقعیت ژئودینامیکی آن، رساله دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.

References

Ajlegre, C. J., Dupre, B., Russeau, P. RD., 1982- Sub continental versus oceanic mantle, 11. Nd-Sr-Pb isotopic comparison of continental tholeiites with mid-ocean ridge tholeiites, and the structure of the continental lithosphere. *Earth Planet. Sci. Letters*, 57, 25-34

Alici, P., Temel, A., Gourgaud, A., Kieffer, G., Gundogdu, M. N., 1998- Petrology and geochemistry of potassic rocks in the Golcuk area (Isparta, SW Turkey): genesis of enriched alkaline magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 85(1998) 423-446.

Aldanmaz, E., Pearce, J. A., Thirlwall, M. F., Mitchell, J. G., 2000- Petrogenetic evolution of late Cenozoic, Post - Collision volcanism in western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 85(1998) 423-446.

Baragar, W. R. A., 1971- A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks *Can. J. Earth Sci.* 8, 523-548.

Best, M. G., Christiansen, E., 2001- *Igneous Petrology*.

Carlson, R. W. and Hart, W. K., 1988- Flood basalt volcanism in the northwestern United States. In: MacDougall, J.D. (Ed.), *Continental Flood basalts*. Kluwer, pp. 35-62.

Cox, K.G., Bell, J. D. and Pankhurst, R. J., 1979- *The interpretation of igneous rocks*, London, George Allen & Unwin, 450 PP.

Dickin, A. P., 2005- *Radiogenic Isotope Geology* pp.174-232

Irvine, T. N., 2005- *Radiogenic Isotope Geology* pp.174-232

Irvine, T. N. and Baragar W. R. A., 1971- A guide to chemical classification of the common volcanic rocks: *Can. J. Sci.* 8, 523-548

Pearce, J. A., Bender, J. F., De Long, S. E., Kidd, W. S. F., Low, P. J., Güner, Y., Saroglu, F., Yilmaz, Y., Moor bath, S. and Mitchell, J. G., 1990- Genesis of collision volcanism in eastern Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44: 189-229

Rollinson, H. R., 1993- *Using geochemical data: Evaluation presentation interpretation*, Longman Scientific & Technical. 352pp.

Thirlwall, M. F. and Jones, N. W., 1983- Isotope geochemistry and contamination mechanism of Tertiary lavas from Skye, northwest Scotland pp.186-208

Yilmas, Y., Guner, Y., Saroglu, F., 1998- Geology of the quaternary volcanic centers of the east Anatolia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 85 (1998) 173-210