



## ژئوشیمی، سنگ‌شناسی و الگوی تکتونوماگمایی پیشنهادی برای تشکیل سنگ‌های بازی قلیایی در قاعده‌ی سازند شمشک، زون البرز شرقی

حبیب ا. قاسمی\*، خدیجه جمشیدی

دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود

(دریافت مقاله: ۸۹/۵/۲۶، نسخه نهایی: ۸۹/۱۰/۲۷)

**چکیده:** در برخی از نواحی زون البرز، در قاعده‌ی سازند شمشک، یک سری گدازه‌ی بازالتی گزارش شده است. بررسی دقیق برونزدهای زمین‌شناسی این سنگ‌ها در نواحی مختلف البرز شرقی نشان می‌دهد که رخداد این سنگ‌ها در اغلب مناطق اطراف شاهرود (قشلاق در خوش‌بیلاق) و دامغان (طرز، تالو و کلاته رودبار) از نوع نفوذی و به شکل سیل، دایک و استوک‌های کوچک و در برخی مناطق دامغان (چشمه‌علی و تویه‌دروار) و سمنان (شهمیرزاد) به صورت روانه بازالتی است. حضور آپاتیت، اسفن‌های اولیه و ثانویه و فلوگوپیت در نمونه‌های این مناطق، بیانگر بالا بودن میزان P و Ti و سرشت قلیایی ماگمای سازنده‌ی این سنگ‌هاست. نمودارهای تعیین سری ماگمایی و تکتونوماگمایی نیز، سرشت قلیایی و جایگاه درون ورقه‌ی قاره‌ای این سنگ‌های بازی را تأیید می‌کنند. نمودارهای چند عنصری بهنجار شده به کندریت و گوشته‌ی اولیه، غنی‌شدگی از LREE و عناصر شدیداً ناسازگار و تهی‌شدگی از HREE را نشان می‌دهند. روند موازی طرح‌های تغییرات عناصر نادر خاکی نمونه‌ها، بیهنجاری مثبت سرب همراه با طرح‌های موجود در نمودارهای تغییرات عناصر ناسازگار و سازگار نسبت به یکدیگر، بیانگر خاستگاه واحد و نقش تبلور تفریقی همراه با هضم و آلیش پوسته‌ای، در شکل‌گیری ماگمای سازنده این سنگ‌هاست. بررسی‌های ژئوشیمیایی نشان می‌دهند که این ماگمای قلیایی، از ذوب بخشی با درجه‌ی پایین (۱۵٪-۱۰٪) یک گوشته گارنت‌لرزلولیتی غنی شده زیر لیتوسفر قاره‌ای، در یک محیط کششی درون ورقه-ی قاره‌ای تشکیل شده است. این محیط، از نوع حوضه‌های کششی پشت کمان اولیه، در حاشیه‌ی قاره‌ای غیر فعال البرز در طول تریاس پایانی - ژوراسیک آغازین بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** ژئوشیمی، سنگ‌شناسی، سنگ‌های بازی، شمشک، البرز.

### مقدمه

مناطق مختلف ایران از جمله البرز شد [۱، ۲]. تغییرات رخساره‌ای حاصل از این برخورد، منجر به تشکیل حوضه‌های رسوبی از نوع مخروط‌افکنه‌های رودخانه‌ای و دشت سیلابی، محیط‌های مردابی و سکوی قاره‌ای تا دریایی عمیق، و رسوبگذاری سیلیکات‌های آواری ریز تا درشت‌دانه همراه با آهک‌های آمونیت‌دار تحت عنوان سازند شمشک با ضخامت

رخداد فشارشی سیمیرین پیشین در تریاس میانی- پایانی که با برخورد حاشیه‌ی غیر فعال البرز با حاشیه‌ی فعال توران و بسته شدن کامل حوضه‌ی اقیانوسی پالئوتتیس همراه بوده است، باعث ضخیم‌شدگی پوسته، ایجاد گسل‌های رورانده، بالاآمدگی-های عمومی و تغییرات رخساره‌ای قابل توجه در

پردازش و مورد بررسی قرار گرفتند.

### زمین‌شناسی

مناطق مورد بررسی در این پژوهش، در تقسیم‌بندی واحدهای ساختاری - رسوبی ایران، در زون البرز شرقی قرار دارند. توده‌ی آذرین موجود در منطقه‌ی قشلاق (گردنه‌ی خوش‌بیلان در شمال شاهرود) با مختصات جغرافیایی  $19^{\circ} 55'$  شرقی و  $58^{\circ} 36'$  شمالی، یک سیل جدایشی، با ضخامت در حدود ۱۰۰ متر است که از پایین به بالا، ترکیب آن از الیوین گابرو تا مونزونیت تغییر می‌کند. این سیل به موازات شیل و ماسه-سنگ‌های بخش قاعده‌ای سازند شمشک برنزد یافته است. ماگمای ایجاد کننده‌ی این سیل، ظاهراً در راستای یک زون گسلی که سنگ‌های آهکی و دولومیتی ژئیس‌دار سازندهای پادها و بازالت‌های سلطان میدان را نیز بالا آورده و به صورت نابرجا در کنار واحدهای تخریبی سازند شمشک قرار داده است، بالا آمده و سپس در راستای لایه‌بندی لایه‌های شیلی-ماسه-سنگی سازند شمشک به صورت سیل ادامه یافته است (شکل ۱). آثار دگرگونی گرمایی ناشی از دمای این سیل، به صورت بروز پختگی در واحدهای رسوبی سازند شمشک و واحدهای آهکی - دولومیتی سازند پادها بخوبی مشهود است. نفوذ این سیل در واحدهای کربناتی سازند پادها، سبب ایجاد اسکارن‌زایی (گارت-ولاستونیت-منیتیت اسکارن) شده است (شکل ۲).

چند متر تا چند هزار متر روی سکوی کربناتی تریاس آگازین - میانی (سازند الیکا) شده است. در منطقه‌ی طزره، بخش بالایی این سازند به ضخامت ۱۶۰۰ متر، کاملاً دریایی و حاوی مجموعه‌ی جانوری از نوع آمونیت در چند افق است [۳]. سازند شمشک در بخش‌های مختلف زون البرز، از گسترش زیادی برخوردار است و در بخش قاعده‌ی آن، سنگ‌های آذرین بازی به صورت پراکنده قابل مشاهده‌اند. زمین‌شناسان مختلفی [۴-۸]، سنگ‌های آذرین بازی قاعده‌ی سازند شمشک را از نوع گدازه‌های بازالتی فرسوده و به نام سازند جابان گزارش کرده‌اند [۹]. اولین بار [۱۰، ۱۱]، با شواهد مستند صحرایی و سنگ‌شناسی، اغلب این سنگ‌ها را از نوع نفوذی تشخیص داده‌اند. سنگ‌های آذرین بازی مورد بحث در این پژوهش، در قاعده یا درون بخش قاعده‌ای سازند شمشک و به شکل‌های مختلف از جمله سیل، دایک و استوک‌های کوچک در مناطق قشلاق، طزره، تالو و کلاته‌رودبار و یا به صورت گدازه‌ی بازالتی در مناطق چشمه‌علی، توبه‌دروار و شه‌میرزاد حضور دارند [۱۲]. به منظور بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی، سنگ‌شناختی و روند شکل‌گیری ماگمای سازنده‌ی سنگ‌های آذرین مورد بحث، تعداد ۱۹ نمونه سنگی کمتر دگرسان شده از نواحی مختلف برنزد آن‌ها، انتخاب و برای تعیین میزان عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی در آزمایشگاه ژئوشیمی ACME کانادا به روش ICP-MS تجزیه شدند و نتایج حاصل با نرم‌افزارهای مختلف



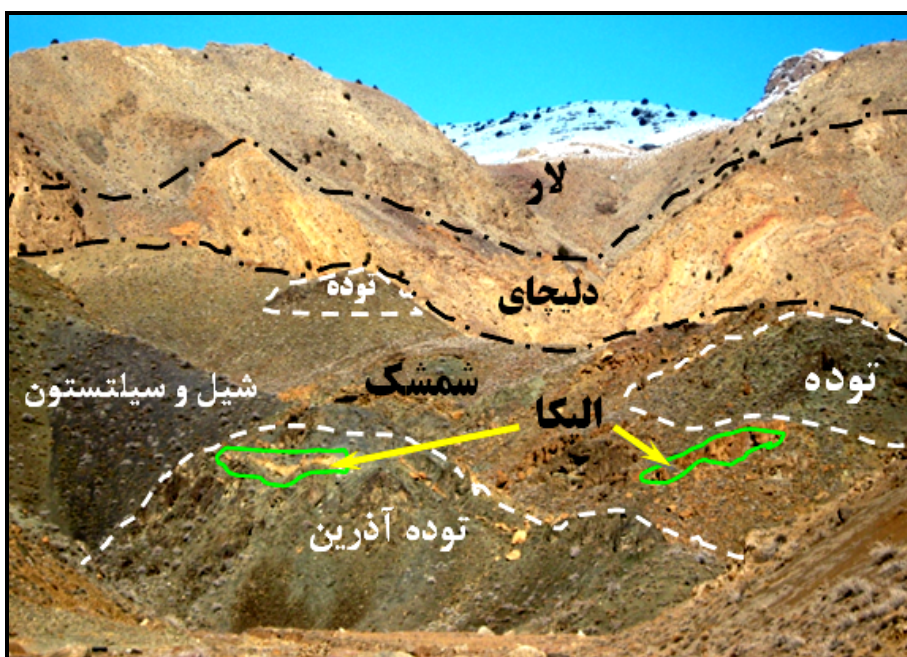
شکل ۱ تصویری از توده‌ی آذرین قشلاق و ارتباط آن با واحدهای سنگی منطقه (نگاه به سمت جنوب).



شکل ۲ ولاستونیت - منیتیت اسکارن در سنگ‌های کربناتی سازند پادها در مجاورت توده‌ی آذرین قشلاق.

شدن و اسکارن‌زایی (منیتیت - ولاستونیت اسکارن) است. در مناطق طزره در شمال دامغان به مختصات جغرافیایی  $56^{\circ} 54'$  شرقی و  $36^{\circ} 24'$  شمالی و کلاته رودبار در شمال غربی دامغان به مختصات جغرافیایی  $08^{\circ} 54'$  شرقی و  $36^{\circ} 21'$  شمالی، این سنگ‌ها به شکل سیل دیابازی به موازات طبقه‌های تخریبی بخش قاعده‌ای سازند شمشک نفوذ کرده‌اند (شکل‌های ۴ و ۵).

سنگ‌های آذرین مورد بررسی در منطقه‌ی تالو (شمال دامغان)، در مختصات جغرافیایی  $26^{\circ} 54'$  شرقی و  $36^{\circ} 21'$  شمالی، به صورت استوک، دایک و گاهی سیل جدایش یافته‌ی اولیوین‌گابرویی تا دیوریتی در قاعده‌ی سازند شمشک حضور دارند (شکل ۳). آثار دگرگونی گرمایی ناشی از نفوذ ماگما، در واحدهای رسوبی سازند شمشک به صورت تبلور دوباره‌ی ماسه-سنگ‌ها، ولی در سازند آهکی-دولومیتی الیکا به شکل مرمری



شکل ۳ برونزد توده‌ی نفوذی تالو به صورت پراکنده و استوک‌مانند در واحدهای تخریبی بخش قاعده‌ای سازند شمشک (نگاه به سمت شمال شرق).



شکل ۴ نمایی از سیل دیابازی منطقه‌ی طزره که به موازات طبقات شیلی سازند شمشک برنزد یافته است (نگاه به سمت شمال).



شکل ۵ تصویری از نفوذ توده آذرین کلاته رودبار درون بخش قاعده‌ای سازند شمشک (نگاه به سمت شمال).

گابرو، دیوریت تا مونزونیت را تشکیل می‌دهند و از لحاظ سرشت سنگ‌شناسی شباهت زیادی با این سنگ‌ها در منطقه‌ی تالو دارند. حضور اسفن، فلوگوپیت و آپاتیت به خصوص در ترکیب‌های گابرو/دیوریتی و دیوریتی، بیانگر بالا بودن میزان Ti و P و ماهیت ماگمای قلیایی سازنده آن‌هاست. نمونه‌های دیابازی منطقه‌ی طزره دارای بافت افیتیک و حاوی درشت بلورهای پلاژیوکلاز و اوزییت هستند. آثار کانه‌زایی اولیه‌یست به صورت بلورهای تیغه‌ای شکل در نمونه‌های گابرویی و دیوریتی مناطق قشلاق و کلاته رودبار مشاهده می‌شود. نمونه‌های بازالتی مناطق چشمه‌علی و تویه‌دروار دارای بافت‌های پورفیری و گلوپورفیری و حاوی فنوکریست‌های الیوین و پلاژیوکلاز

برخلاف مناطق یادشده، در مناطق چشمه‌علی، تویه‌دروار و شه‌میرزا، این سنگ‌ها از نوع روانه‌های بازالتی هستند و روی افق‌های لاتریتی-بوکسیتی قرمز رنگ موجود در مرز بین سازنده‌های کربناتی الیکا و تخریبی شمشک مشاهده می‌شوند (شکل ۶). در این مناطق، حداقل دو روانه‌گدازه دیده می‌شوند که در زیر و روی آن‌ها، افق‌های لاتریتی-بوکسیتی قرمز رنگ، حاوی گلوله‌های آهنی و ناشی از هوازدگی همین روانه‌ها، قرار دارند.

#### سنگ نگاری

سنگ‌های آذرین موجود در قاعده‌ی سازند شمشک در منطقه‌ی قشلاق، یک رشته سنگ‌های جدایشی از الیوین‌گابرو،

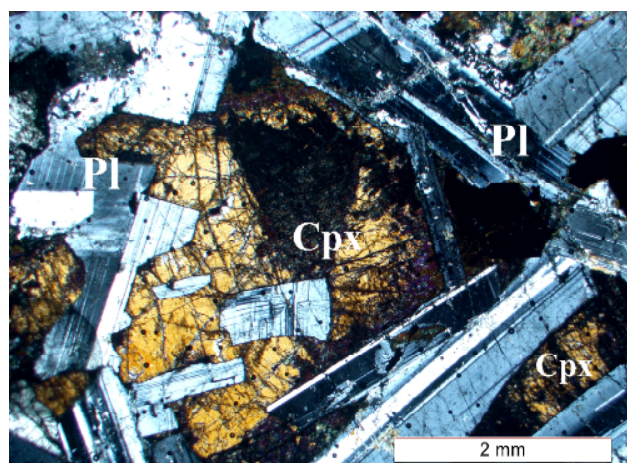
هستند. در جدول ۱ خلاصه‌ای از ویژگی‌های سنگ‌نگاری سنگ - های میکروسکوپی بعضی از این سنگ‌ها را نشان می‌دهد. های مناطق مورد بررسی آورده شده است. شکل ۷ نیز ویژگی -



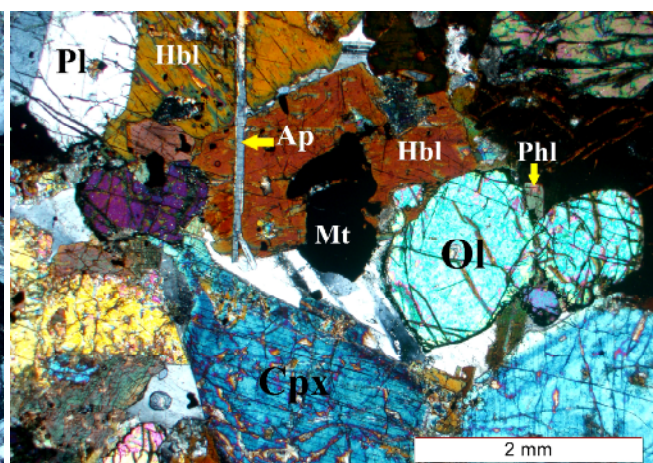
شکل ۶ حضور گذاره بازالتی تیره رنگ بر روی افق بوکسیتی موجود در مرز سازندهای الیکا و شمشک در منطقه چشمه‌علی (دید به سمت شمال).

جدول ۱ خلاصه‌ی سنگ‌نگاری سنگ‌های آذرین قاعده سازند شمشک.

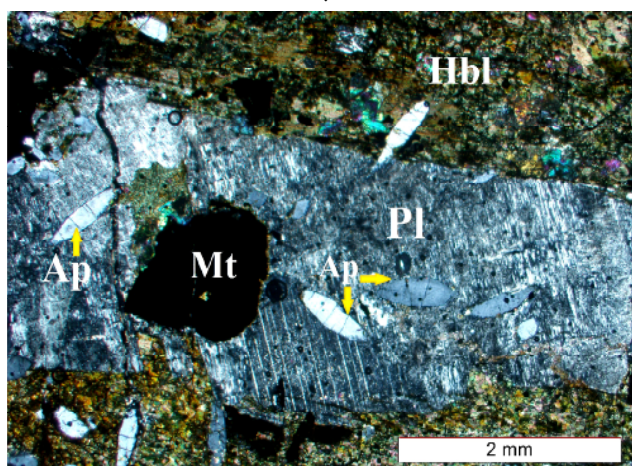
منطقه	نامگذاری بر مبنای سنگ‌نگاری	ویژگی‌های میکروسکوپی			ویژگی‌های ماکروسکوپی
		بافت	کانی‌های اصلی	کانی‌های فرعی، عارضه‌ای و ثانویه	
قشلاق و تالو	الیوین‌گابرو	انباشتی، دانه‌ای	درشت‌بلورهای الیوین، پلاژیوکلاز، پیروکسن	فلوگوپیت، آمفیبول منیتیت، آپاتیت، اپیدوت، اسفن کلریت، پرهنیت، کلسیت	هولاملانوکرات، سطح براق (به دلیل حضورفلوگوپیت)
	گابرو	میان دانه ای، افیتیک	درشت‌بلورهای دگرسان شده پلاژیوکلاز، پیروکسن	هورنبلند، بیوتیت، منیتیت اسکلتی و نردبانی، اسفن اولیه و ثانویه، اپیدوت، کلریت، پرهنیت	ملانوکرات تا مزوکرات
	دیوریت	دانه ای، ریز دانه ای	پلاژیوکلاز، پیروکسن، هورنبلند، بیوتیت، فلدسپات قلیایی	آپاتیت، اسفن، منیتیت، اپیدوت، سرسیت، کلسیت، کلریت	مزوکرات تا لوکوکرات، رنگ سبز مایل به خاکستری
	مونزونیت (فقط در قشلاق)	دانه ای، پوئی‌کیلیتیک	پلاژیوکلاز و فلدسپات آلکالن به مقدار تقریباً مساوی، هورنبلند	آپاتیت، سرسیت	لوکوکرات
طرزه	دیاباز	افیتیک	پلاژیوکلاز، اوژیت	منیتیت، هماتیت، سرسیت، کلریت، کلسیت، اپیدوت	ملانوکرات
کلاته رودبار	گابرو	میان دانه ای	پلاژیوکلاز، اوژیت، الیوین به مقدار خیلی کم	آپاتیت، اولیژیست، کلریت، اپیدوت	ملانوکرات
چشمه‌علی و نوبه‌رور	الیوین بازالت	پورفیری، گلومروپورفیری، اینترسرتال	فنوکریست‌های الیوین و پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن به مقدار کم	منیتیت، اشکال کاذبی از کلریت و کلسیت در قالب الیوین، سرسیت	ملانوکرات، سبز تیره تا سیاه



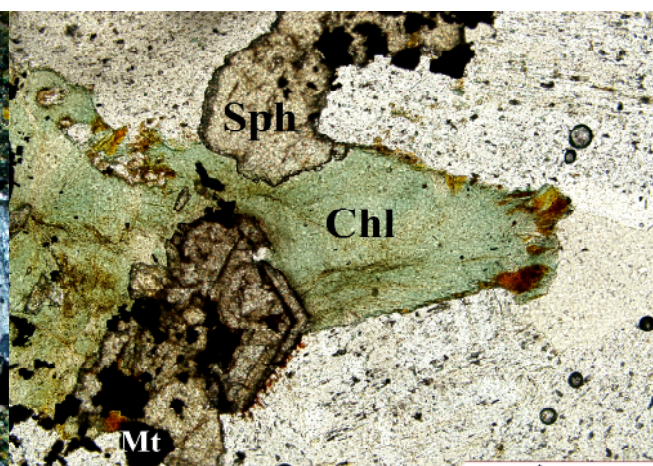
ب



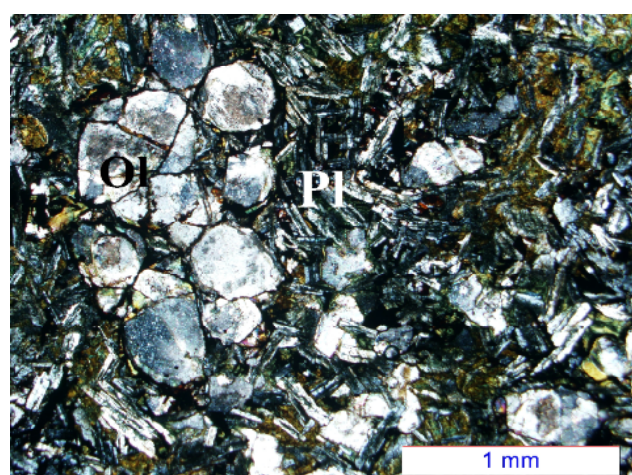
الف



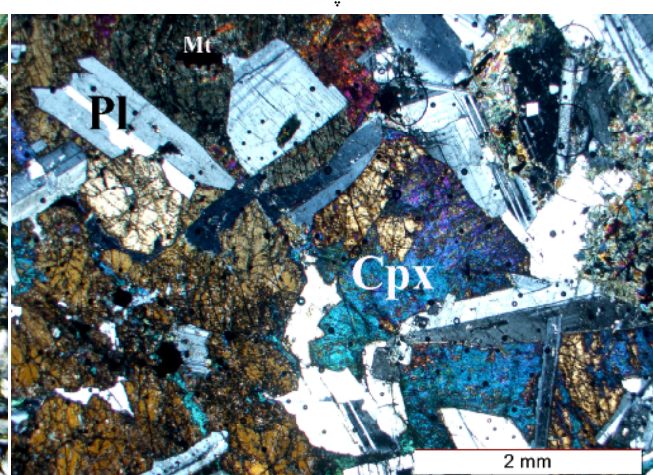
ت



پ



ج



ث

شکل ۷ تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌های آذرین مناطق مورد بررسی، الف- بافت انباشتی و کانی‌های اصلی و فرعی در الیون گابروی منطقه‌ی قشلاق، ب- بافت افیتیک در گابروی قشلاق، پ- حضور اسفن اولیه، منیتیت و کلریت در گابروی تالو، ت- حضور آپاتیت به صورت ادخال در پلاژیوکلاز و هورنبلند در دیوریت قشلاق، ث- بافت افیتیک به همراه پلاژیوکلاز و اوژیت در سیل دیابازی طزره، ج- بافت گلوپورفیری، میکروولیت‌های پلاژیوکلاز و انباشت موضعی بلورهای الیون که قالب آن‌ها با کلسیت پر شده است در الیون بازالت چشمه‌علی. علائم اختصاری مورد استفاده در این شکل‌ها عبارتند از: الیون = Ol، کلینوپیروکسن = Cpx، پلاژیوکلاز = Pl، هورنبلند = Hbl، فلگوپیت = Phl، اسفن = Sph، آپاتیت = Ap، منیتیت = Mt و کلریت = Chl.

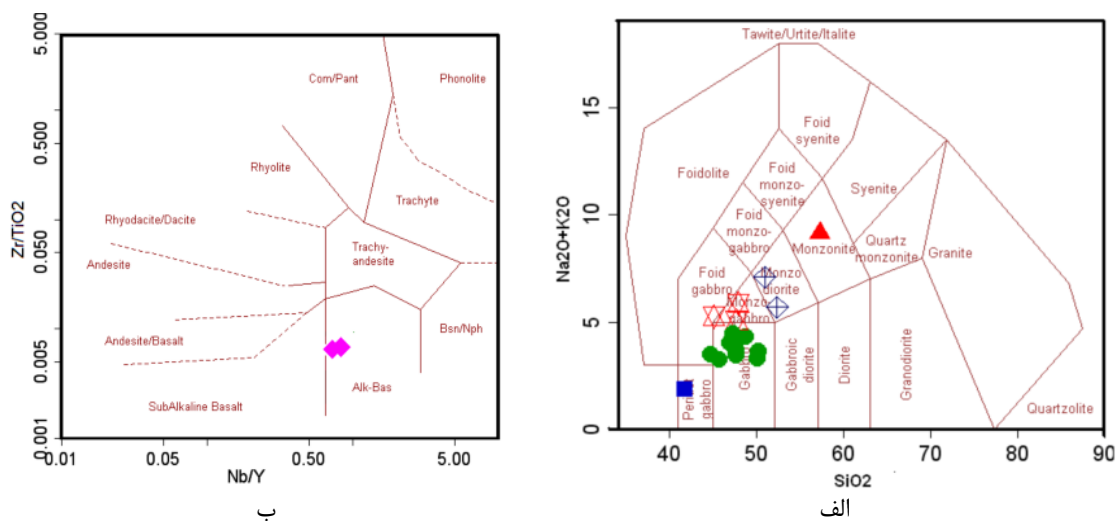
**ژئوشیمی**

به منظور بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی و فرایندهای سنگ-شناسی مربوط به سنگ‌های آذرین قاعده‌ی سازند شمشک، از داده‌های عناصر اصلی، فرعی و کمیاب استفاده شد. نمونه‌های نفوذی مورد بررسی، در نمودار قلیایی‌ها نسبت به  $SiO_2$  [۱۳]، در گستره‌ی الیوین‌گابرو، گابرو، مونزودیوریت و مونزونیت قرار می‌گیرند (شکل ۸-الف). نظر به دگرسان بودن سنگ‌های آتشفشانی منطقه‌ی چشمه‌علی، استفاده از نمودارهای عناصر کمیاب نامتحرک که در درجات کم دگرسانی نامتحرک باقی می‌مانند (مانند Zr, Ti, Nb و Y)، مفیدتر است. از جمله این نمودارها می‌توان به نمودار Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> [۱۴] اشاره کرد. نمونه‌های منطقه‌ی چشمه‌علی در این نمودار، در قلمرو بازالت-های قلیایی قرار می‌گیرند (شکل ۸-ب).

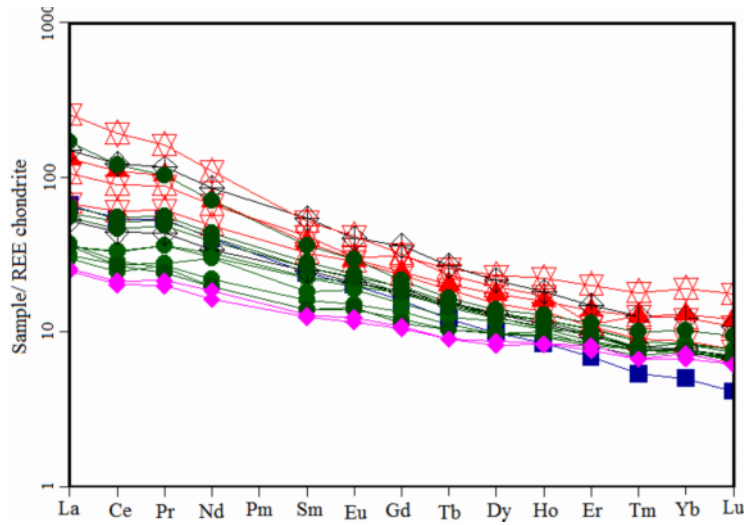
سنگ‌های مورد بررسی، در نمودارهای بهنجار شده به کندریت [۱۵] و گوشته‌ی اولیه [۱۶]، از عناصر نادر خاکی سبک (LREE) و عناصر لیتوفیل بزرگ یون (LILE)، غنی-شدگی و از عناصر نادر خاکی سنگین (HREE)، تهی‌شدگی نسبی نشان می‌دهند. به علاوه، هیچ تهی‌شدگی که از ویژگی‌های بارز ماگماهای کمانی است، در آن‌ها دیده نمی‌شود (شکل ۹-الف و ب). غنی‌شدگی از LREE را می‌توان به درجه‌های پایین ذوب بخشی یک خاستگاه گوشته‌ای غنی‌شده که ماگماهای قلیایی ایجاد می‌کنند، نسبت داد. مقادیر کمتر عناصر نادر و نادر خاکی در نمونه‌های بازالتی چشمه‌علی در مقایسه با سنگ‌های نفوذی مناطق دیگر، می‌تواند بیانگر جدایش کمتر این بازالت‌ها و یا درجه ذوب بخشی بیشتر محل خاستگاه آن‌ها

باشد. تهی‌شدگی در U, K, Rb و Ba در این بازالت‌ها را می‌توان به فرسوده بودن آن‌ها و تحرک این عناصر و خروج آن‌ها طی دگرسانی نسبت داد. غنی‌شدگی از Pb به خصوص در ترکیب‌های گابرویی، می‌تواند به آرایش پوسته‌ای ماگما در خلال صعود وابسته باشد. خصوصاً می‌توان به واکنش ماگما با سنگ‌های کربناتی مسیر و میزبان (نظیر آهک‌های الیکا که غالباً حاوی کانسار سرب نیز هستند) و جایگزینی این عنصر در ساختار آمفیبول اشاره کرد. به علاوه، ناپهنجاری‌های مثبت Pb و Ba، تهی‌شدگی نسبی از U و Th و نبود ناپهنجاری منفی در عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) که از ویژگی معمول سنگ‌های بازی درون ورقه‌ای است [۱۷] در طرح نمودار عنکبوتی این سنگ‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۹-ب). تهی-شدگی نسبی از HREE بیانگر حضور گارنت در محل خاستگاه و سرچشمه گرفتن ماگمای سازنده‌ی این سنگ‌ها از گستره‌ی پایداری گارنت در گوشته است. عدم وجود ناپهنجاری Eu در نمونه‌ها به حضور معمول پلاژیوکلاز در آن‌ها وابسته است. الگوی موازی روند تغییرات عناصر کمیاب و کمیاب خاکی نمونه‌ها در طرح‌های نمودارهای عنکبوتی آن‌ها، نشان‌دهنده‌ی خاستگاه مشترک نمونه‌ها و نقش برجسته‌ی تبلور جدایشی در شکل‌گیری ماگمای سازنده آن‌هاست [۱۸، ۱۹].

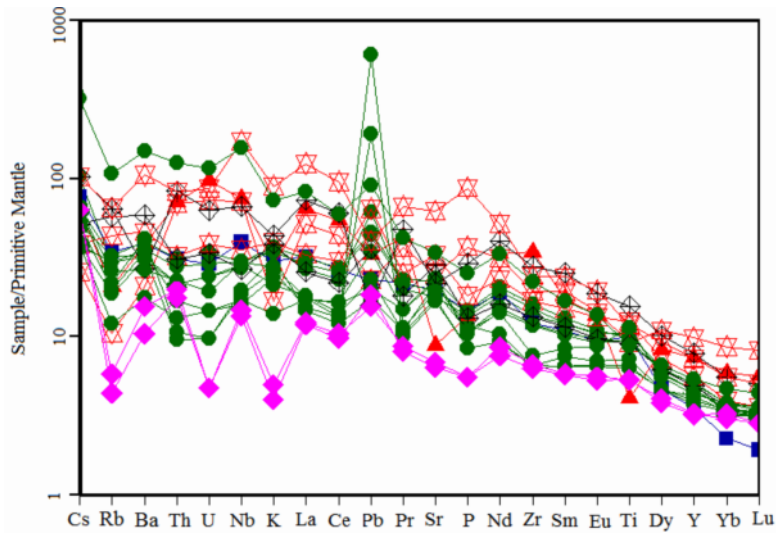
نمودارهای مجموع درصد وزنی  $Na_2O + K_2O$  نسبت به درصد وزنی  $SiO_2$  [۲۰] و Zr نسبت به  $P_2O_5$  [۲۱]، ماهیت ماگمای قلیایی سازنده سنگ‌های مورد بحث را به اثبات می‌رسانند (شکل ۱۰-الف و ب).



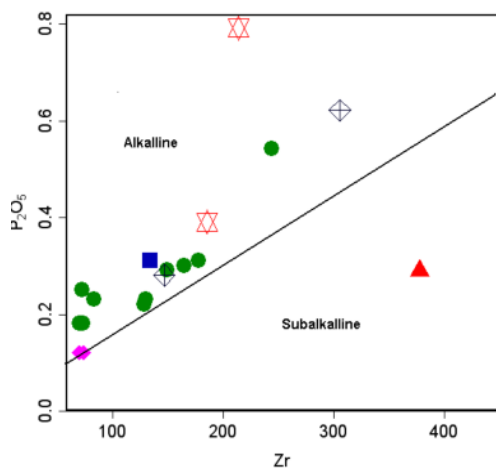
**شکل ۸** موقعیت نمونه‌های مورد بررسی بر روی نمودارهای رده‌بندی سنگ‌های آذرین، الف- نمودار مجموع قلیایی نسبت به  $SiO_2$  [۱۳] برای نمونه‌های نفوذی ب- نمودار  $Zr/TiO_2$  نسبت به  $Nb/Y$  [۱۴] برای نمونه‌های خروجی. علائم به کار رفته در این نمودارها عبارتند از: ■ الیوین-گابرو، ● گابرو، ⊠ مونزوگابرو، ◇ دیوریت، ▲ مونزونیت، ◆ بازالت.



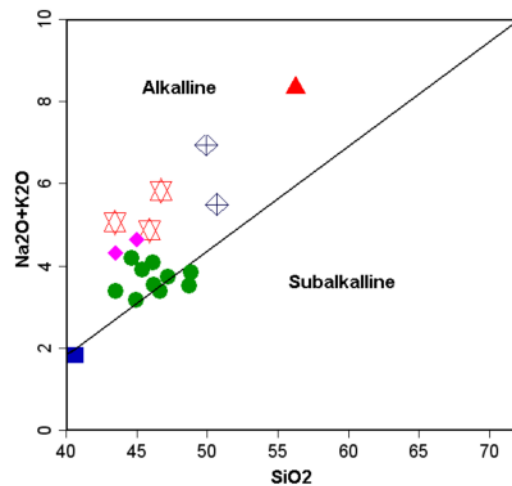
شکل ۹ الف- نمودار بهنجار شده به کندریت [۱۵].



شکل ۹ ب- نمودار چند عنصری بهنجار شده به گوشته‌ی اولیه [۱۶].



ب



الف

شکل ۱۰ نمودارهای تعیین سری ماگمایی الف-  $Na_2O + K_2O$  نسبت به  $SiO_2$  [۲۰] و  $P_2O_5$  در برابر  $Zr$  [۲۱].



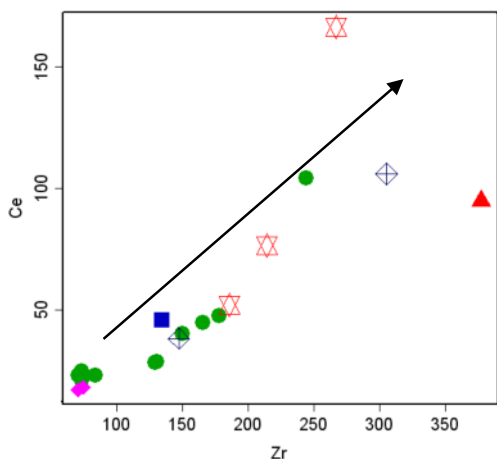
## بحث و بررسی

نتایج حاصل از بررسی ویژگی‌های صحرایی، سنگ نگاری و ژئوشیمیایی سنگ‌های آذرین مناطق مورد بررسی، نشان دهنده‌ی حضور یک رشته سنگ‌های جدایشی از الیون‌گابرو تا مونزونیت در منطقه قشلاق، و از الیون‌گابرو تا دیوریت در منطقه‌ی تالو و سنگ‌هایی با ترکیب گابرو و گابرودیوریت در مناطق طزره و کلاته رودبار در قاعده سازند شمشک است. سنگ‌های آذرین منطقه‌ی چشمه علی نیز دارای ترکیب الیون‌بازالتی بوده و به صورت گدازه در قاعده‌ی سازند شمشک مشاهده می‌شوند. براساس شواهد چینه‌شناسی و بررسی‌های صحرایی، تمامی سنگ‌های مورد بررسی دارای سنی در گستره‌ی تریاس پایانی - ژوراسیک آغازین هستند و شاهده‌ی مبنی بر نفوذ این سنگ‌ها در واحدهای جوان‌تر از ژوراسیک آغازین دیده نشده است. براساس نمودارهای تغییرات شیمیایی، مهم‌ترین عامل درگیر در شکل‌گیری ماگمایی نمونه‌ها، از ترکیب‌های مافیک به سمت ترکیب‌های فلسیک، در مناطق قشلاق و تالو، فرایند تبلور جدایشی بوده است. همچنین، روند خطی و مثبت مشاهده شده در نمودارهای تغییرات عناصر ناسازگار در مقابل یکدیگر (نظیر Ce و Th در برابر Zr، در شکل ۱۱- الف و ب) بیانگر نقش تبلور جدایشی در شکل‌گیری ماگمای بازی سنگ‌های مورد بررسی است [۲۲]. در نمودار تغییرات La/Sm به La [۲۳]، Ba/Y نسبت به Ba و Rb/Th نسبت به Rb [۲۴]، روندهای خطی با شیب مثبت، نشان دهنده‌ی نقش فرایند تبلور جدایشی همراه با کمی هضم و آلاینش (AFC) در شکل‌گیری ماگمایی سنگ‌های قلیایی مورد بررسی است (شکل ۱۱- پ تا ت).

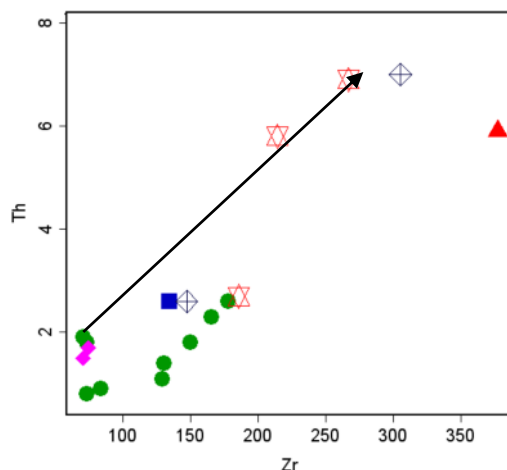
سنگ‌های قلیایی می‌توانند در همه‌ی محیط‌های زمین-ساختی جز پشته‌های میان اقیانوسی، تشکیل شوند [۲۵]. این سنگ‌ها معمولاً در محیط‌های کششی نظیر نقاط داغ درون ورقه‌ای و در مراحل آغازین کافت‌زایی درون قاره‌ای، از ذوب درجه‌ی پایین گوشته‌ی زیر لیتوسفر قاره‌ای (SCLM) تشکیل می‌شوند [۲۶، ۲۷]. سنگ‌های قلیایی قاره‌ای در مقایسه با ترکیب‌های مورب، دارای غنی‌شدگی از LREE، MREE، LILE و HFSE و تهی‌شدگی از HREE هستند [۲۸]. این ویژگی‌ها در نمونه‌های مورد بررسی دیده می‌شوند (شکل ۹- الف و ب) و در نتیجه، طبیعت قلیایی درون قاره‌ای سنگ‌های مورد بررسی را به اثبات می‌رسانند. به‌منظور تشخیص جایگاه

زمین‌ساختی و خاستگاه احتمالی تشکیل ماگمای سازنده‌ی این سنگ‌ها، از نمودارهای تمایز محیط زمین‌ساختی استفاده شده است. نمودار Ti-Zr-Y که توسط [۲۹] ارائه شده است، بازالت-های درون ورقه‌ای را از دیگر انواع بازالت‌ها متمایز می‌کند. نمونه‌های گابرویی و بازالتی دارای ترکیب اولیه‌تر، روی این نمودار، در گستره‌ی بازالت‌های درون ورقه‌ای (میدان D) قرار می‌گیرند (شکل ۱۲- الف). بالا بودن نسبت Ti/Y در بازالت-های درون ورقه‌ای در مقایسه با بازالت‌های دیگر، بیانگر یک خاستگاه گوشته‌ای غنی‌شده برای آن‌هاست. نمونه‌های مورد بررسی، در نمودارهای Zr/4-Nb×2-Y [۳۰]، V نسبت به Ti/1000 [۳۱] و Ti نسبت به Zr [۳۲]، در جایگاه درون ورقه قاره‌ای قرار می‌گیرد (شکل ۱۲- ب، پ و ت).

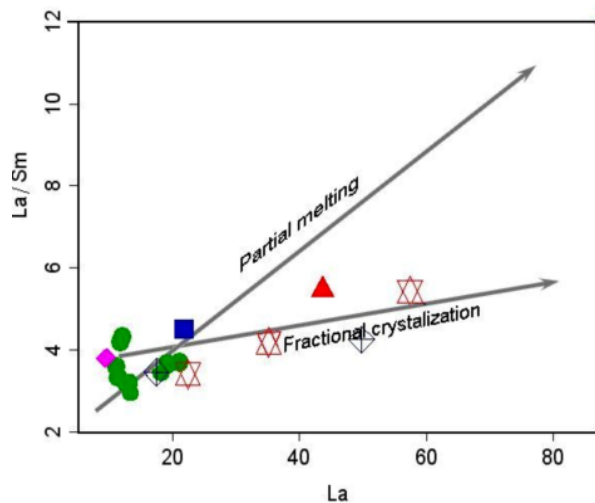
از ژئوشیمی عناصر کمیاب خاکی، به‌طور گسترده برای تعیین ترکیب، درجه‌ی ذوب و عمق خاستگاه گوشته‌ای ماگماهای اولیه استفاده می‌شود [۳۳، ۱۹، ۳۴]. نمودار Dy/Yb نسبت به La/Yb [۳۵]، بیانگر تغییرات درجه‌ی ذوب بخشی در دو خاستگاه اسپینل پریدوتیتی و گارنت پریدوتیتی است. Yb از ضریب توزیع بالایی در گارنت برخوردار است، لذا پائین بودن مقادیر نسبی این عنصر در نمونه‌های مافیک مورد بررسی، می‌تواند شاهده‌ی بر حضور گارنت در مکان خاستگاه ماگمای تشکیل دهنده‌ی این سنگ‌ها باشد. مقادیر نسبت‌های Dy/Yb و La/Yb، با افزایش درجه‌ی ذوب کاهش می‌یابند (شکل ۱۳). این امر به معنی کاهش میزان تمایل قلیایی سنگ-ها نیز هست. محل قرارگیری نمونه‌های گابرویی مورد بررسی روی این نمودار، منعکس کننده مذاب‌های متعادل با یک خاستگاه گارنت پریدوتیتی با درجه‌ی ذوب ۱۲ تا ۱۵ درصدی است. ترکیب‌های بازالتی منطقه‌ی چشمه‌علی نیز با یک خاستگاه گارنت پریدوتیتی و درجه‌ی ذوب بالاتر نسبت به نمونه‌های گابرویی، همخوانی دارند که با مقادیر پایین‌تر عناصر نادر خاکی آن‌ها (شکل ۹) نیز کاملاً سازگار است. این درجه‌های مختلف ذوب بخشی را می‌توان به میزان فعالیت کششی گسل‌های عمیق نرمال حوضه‌ی کافتی منطقه ارتباط داد، به-طوری که فعالیت بیشتر، منجر به بالآمدگی سریع‌تر، ذوب بیشتر و قلیایی شدن کمتر، و برعکس، فعالیت کمتر، منجر به بالآمدگی کندتر، درجه‌ی ذوب بخشی پایین‌تر خاستگاه گوشته‌ای، و قلیایی شدن بیشتر شده است.



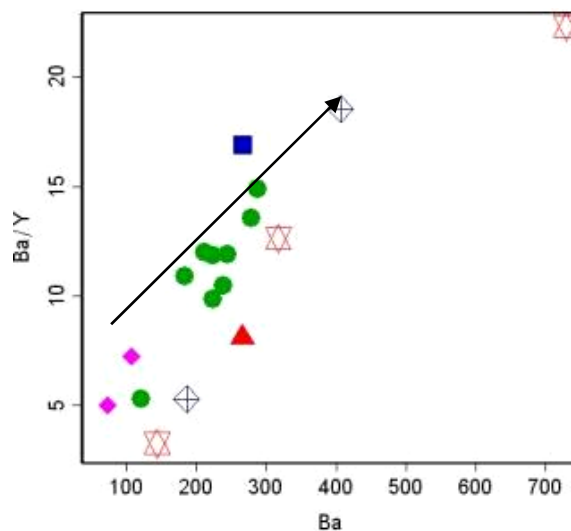
ب- Ce نسبت به Zr



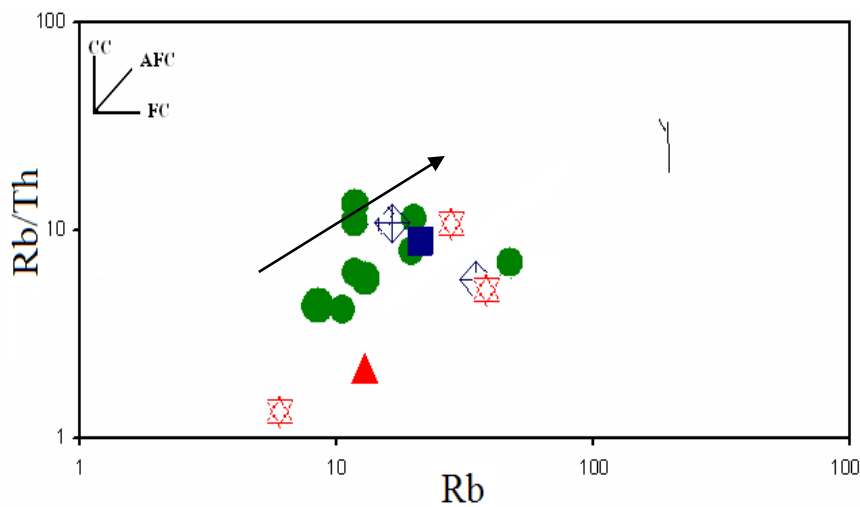
الف- Th نسبت به Zr



ت- La/Sm نسبت به La [۲۳]

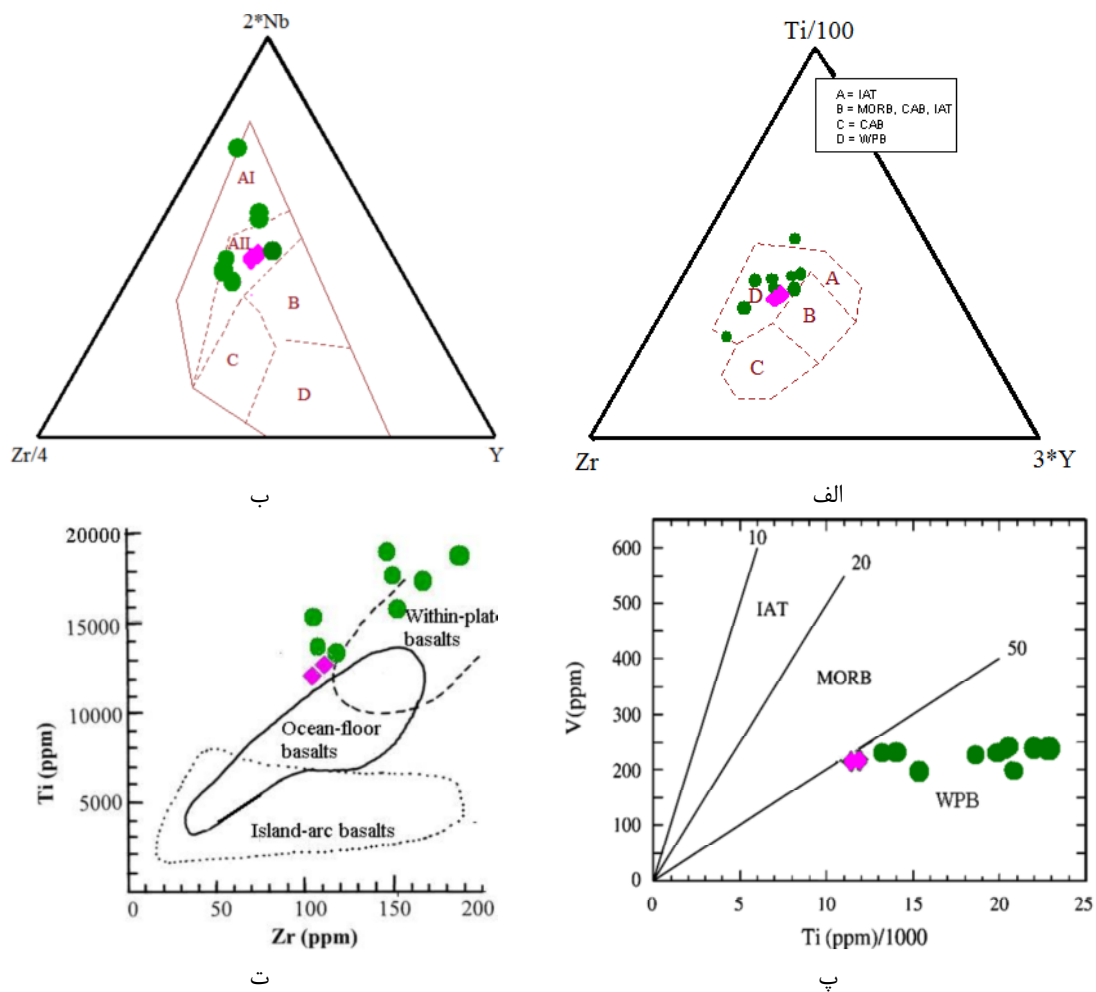


پ- Ba/Y نسبت به Ba

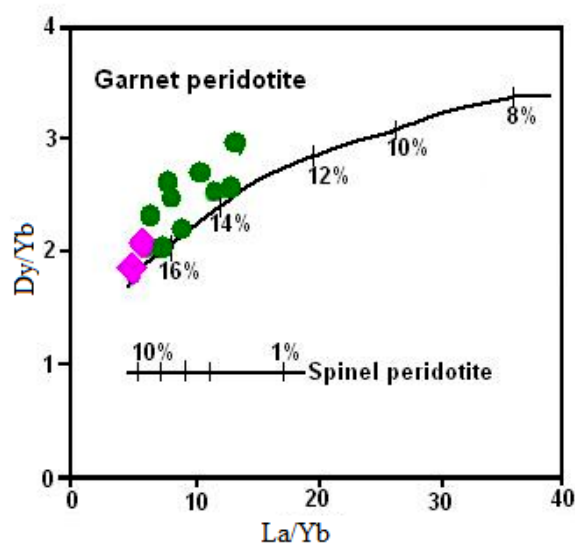


ث- تغییرات Rb/Th در مقابل Rb [۲۴]

شکل ۱۱ نمودارهای تغییرات عناصر ناسازگار نسبت به یکدیگر برای نمونه‌های مورد بررسی.



شکل ۱۲ نمودارهای جدایش محیط زمین ساختی برای نمونه‌های بازی مورد بررسی. الف- نمودار [۲۹] Ti-Zr-Y، ب- نمودار Zr-Nb-Y [۳۰]، پ نمودار V نسبت به Ti/1000 [۳۱] و ت- نمودار Ti نسبت به Zr [۳۲].

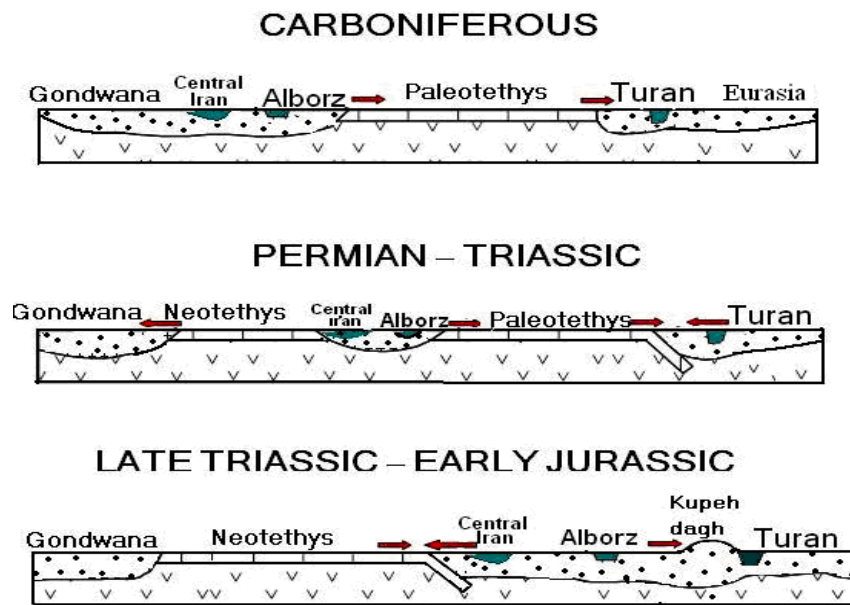


شکل ۱۳ نمودار Dy/Yb نسبت به La/Yb [۳۵] برای تعیین درجه‌ی ذوب بخشی سنگ خاستگاه ماگماهای بازالتی و موقعیت نمونه‌های بازی اولیه‌تر منطقه روی آن.

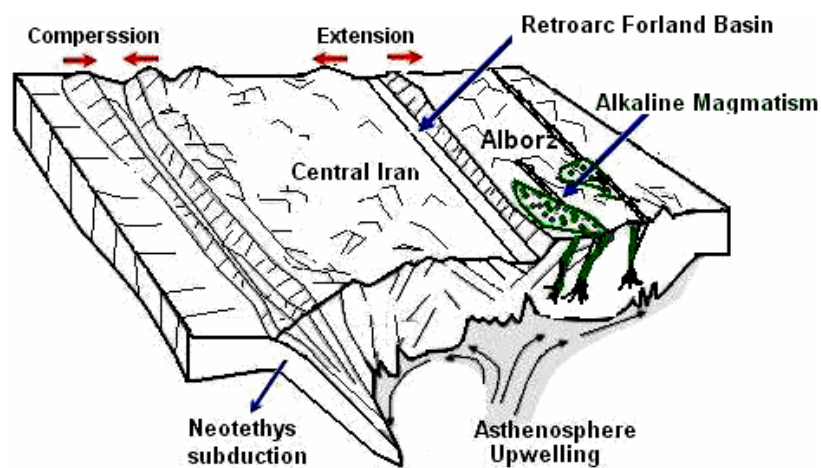
### الگوی تکتونوماگمایی تشکیل سنگ‌های آذرین مافیک در قاعده‌ی سازند شمشک

در پایان تریاس میانی- آغاز تریاس پایانی، خرده قاره‌ی سیمیرین که سرزمین البرز را دربر می‌گرفت، با ورقه توران به عنوان بخشی از ابرقاره‌ی اوراسیا، برخورد کرد (شکل ۱۴) و اقیانوس پالئوتتیس بین آن‌ها به‌طور کامل بسته شد [۳۷،۳۶،۲]. برخورد حاشیه‌ی غیر فعال البرز با حاشیه‌ی فعال توران، باعث ضخیم‌شدگی پوسته، ایجاد گسل‌های تراستی، دگرشکلی‌های بزرگ مقیاس در رسوب‌های پرمین - تریاس، بالا آمدگی‌های عمومی و تغییرات رخساره‌ای در مناطق مختلف ایران مانند البرز شد [۳۷،۳۶،۳]. تغییرات رخساره‌ای حاصل از این برخورد، منجر به تشکیل حوضه‌های رسوبی بین کوهستانی (شکل ۱۵) و ته‌نشست رسوب‌های مولاس حاصل از فرسایش برآمدگی‌های سیمیرین، تحت عنوان سازند شمشک، به صورت دگرشیب روی دنباله‌ی کربناتی سکوی قاره‌ای سازند الیکا در طول نورین - باژوسین شده است [۳۷،۳۶،۳،۱]. الگوی رخساره‌ای سازند شمشک به‌طور چشمگیری متغیر است و از رسوبهای مخروط‌افکنه‌ای، رودخانه‌ای انشعابی، دشت سیلابی، مردابی، دلتایی، دریاچه‌ای و سکوی دریایی کم‌عمق تا پهنه‌ی عمیق دریایی، تغییر می‌کند. بیشتر واحدهای سازند شمشک را رسوب‌های غیردریایی تشکیل می‌دهند، ولی بخش فوقانی آن، بیشتر از میان‌لایه‌های کاملاً دریایی حاوی فسیل آمونیت تشکیل شده است که برای این واحدها، سن نورین - باژوسین را نشان می‌دهند [۳]. فرورانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس با شیب رو به شمال به زیر ایران مرکزی، در خلال رویداد زمین-ساختی سیمیرین پیشین در تریاس پایانی- ژوراسیک آغازین (شکل ۱۴)، باعث ایجاد حرکت‌های کششی در پشت کمان ماگمایی ایران مرکزی در حوضه‌ی البرز و تشکیل یک حوضه‌ی کششی کافتی بازشدگی پشت کمانی در این زمان در منطقه بین البرز- ایران مرکزی (شکل ۱۵) و رسوب‌گذاری سازند شمشک در لبه‌ی جنوبی البرز و حاشیه‌ی شمالی ایران مرکزی (نواحی کرمان و طبس) شده است [۳۷،۳۶،۲]. همزمان با رسوبگذاری سازند شمشک، به‌دلیل عملکرد گسل‌های عمیق، فعالیت فازهای کششی و بالاآمدگی ستون گوشته‌ی عمیق آستوسفری و ذوب بخش بالای آن، ماگمای بازی با ویژگی ماگماهای محیط کششی کافتی، تشکیل شده و در راستای گسل‌های کششی نرمال، در بسیاری از مناطق زون البرز، بالا آمده است (شکل ۱۶). فعالیت این گسل‌های نرمال، باعث تغییرات زیادی در ضخامت سازند شمشک و حتی نوع رخساره-

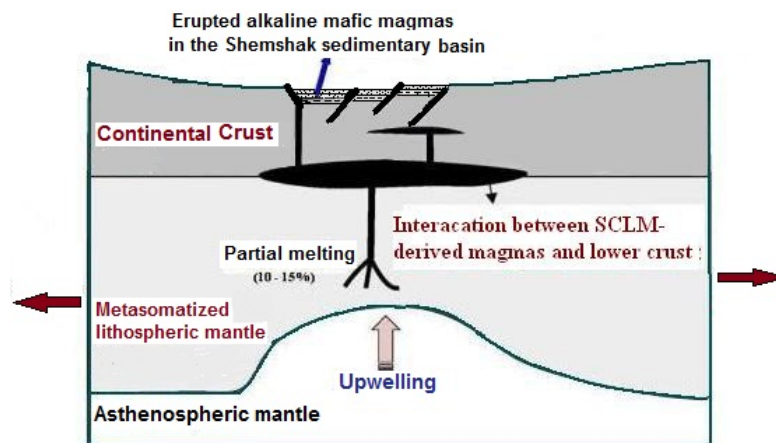
ها و جنس رسوب‌های آن در مناطق مختلف البرز شده است. کاهش فشار ناشی از کشیدگی و نازک‌شدگی پوسته قاره‌ای روی گوشته و صعود آرام ستون گوشته‌ی آستوسفری، بدون از دست دادن گرما (صعود آدیاباتیک)، سبب ذوب بخشی منطقه سر ستون گوشته زیر لیتوسفر قاره‌ای (SCLM) و تشکیل گدازه‌ی بازالتی قلیایی شده است. تاکنون، پژوهشگران مختلفی به حضور این حوضه‌های کششی کافتی پشت کمانی در بخش-های گسترده‌ای از قلمرو تیتیس، از اروپا تا چین اشاره کرده‌اند [۳۸،۳۷،۳۶،۲]. بنابر نظر [۳۶]، در ژوراسیک زیرین (باژوسین- باتونین)، در نوار ماگمایی قره‌باغ، فعالیت آتشفشانی وجود داشته است. وی نیز به تشکیل حوضه‌های پشت کمان در ژوراسیک میانی در نواحی دریای سیاه- پونتید از حوضه‌ی گسترده‌ی پشت کمان قفقاز بزرگ- البرز اشاره می‌کند. بنابر نظر [۳۸] تغییرات شدید جانبی در رخساره‌ها و ضخامت واحدهای سنگی سازندهای شمشک و کشف‌رود در فواصل کوتاه، وجود یک روند عمیق‌شدن وابسته به کافت در واحدهای سنگی ژوراسیک میانی - بالایی (سازندهای دلچای و چمن بید)، وجود دایک‌ها و سیل‌های دیابازی در سازندهای شمشک و کشف رود و آهنگ بالای فرونشست و تغییر شدید عمق حوضه، همگی بیانگر وجود فعالیت‌های زمین‌ساختی شدید همراه با رسوب‌گذاری و حمایت از یک الگوی کافتی برای محیط رسوب‌گذاری این سازندهاست. [۳۹] نیز، بازشدن حوضه‌های رسوبی پشت کمان ناشی از بسته شدن پالئوتتیس در راستای حاشیه اورازیایی، از اتریش تا چین را در ژوراسیک میانی اعلام می‌کند. به اعتقاد [۲] با بسته شدن حوضه اقیانوسی پالئوتتیس در تریاس میانی- ژوراسیک آغازین، کافت‌زایی و تشکیل حوضه‌های پشت کمان نظیر دریای خزر جنوبی و قفقاز بزرگ در این زمان، آغاز و در ژوراسیک- کرتاسه به حداکثر گسترش خود می‌رسند. با جمع‌بندی نتایج به دست آمده از این پژوهش و یافته‌های دیگر پژوهشگران بر روی قلمروهای پالئوتتیس و نئوتتیس در اورازیا، می‌توان گفت که سازند شمشک در مراحل آغازین تشکیل یک محیط کششی کافتی پشت کمانی، نهشته شده و همزمان، فعالیت ماگمایی بازی قلیایی نیز در آن رخ می‌داده است. این حوضه، در خلال ژوراسیک- کرتاسه به یک حوضه‌ی دریایی گسترده تبدیل شده و رسوب‌های دریایی عمیق‌تر همراه با ماگماهای بازالتی قلیایی در ژوراسیک و کرتاسه (گدازه‌ها و سنگ‌های نفوذی موجود در اطراف رشت، قزوین، انزلی، لاهیجان، املش، چالوس، رامسر، آمل، اطراف تهران و دماوند) در آن نهشته شده‌اند [۴۰].



شکل ۱۴ تصویر نمایشی از شکل گیری زمین ساختی زون البرز از کربونیفر تا ژوراسیک زیرین با الهام از طرح [۲].



شکل ۱۵ تصویر نمایشی از تشکیل حوضه بازشدگی پشت کمان و تشکیل سازند شمشک در این حوضه همراه با عملکرد فاز کششی محلی و فعالیت ماگماتیسم درون صفحه‌ای در تریاس پایانی - ژوراسیک زیرین در البرز [۱۲].



شکل ۱۶ الگوی تکتونوماگمایی برای تشکیل ماگمای قلیایی سنگ‌های آذرین قاعده‌ی سازند شمشک در البرز [۱۲].

## برداشت

بررسی‌های صحرایی و سنگ نگاری نشان می‌دهند که سنگ‌های آذرین مورد بررسی در مناطق قشلاق، تالو، طزره و کلاته-رودبار به شکل‌های سیل، دایک و استوک‌های کوچک، در بخش قاعده‌ای سازند شمشک بروزند دارند، ولی در مناطق چشمه‌علی و تویه‌دروار به شکل گدازه‌های الیوین‌بازالتی در مرز بین سازندهای الیکا و شمشک در زیر و روی افق‌های لاتریتی-بوکسیتی قرمز رنگ دیده می‌شوند.

- حضور فراوان آپاتیت، اسفن و فلوگوپیت در سنگ‌های آذرین مورد بررسی، نشان دهنده‌ی بالا بودن مقادیر P و Ti و سرشت قلیایی ماگمای سازنده‌ی این سنگ‌هاست.

- غنی‌شدگی از LREE و عناصر شدیداً ناسازگار، تهی‌شدگی از HREE و عدم تهی‌شدگی از HFSE در نمودارهای چند عنصری بهنجار شده به کندریت و گوشته‌ی اولیه، با تشکیل ماگمای قلیایی سازنده‌ی این سنگ‌ها از ذوب بخشی با درجه‌ی پائین یک خاستگاه گوشته‌ای غنی شده زیر لیتوسفر قاره‌ای در یک محیط کشتی درون قاره‌ای همخوانی دارد.

- ناهنجاری مثبت سرب و بالا بودن مقادیر LILE خصوصاً در ترکیب‌های گابرویی، نشان‌دهنده‌ی آرایش پوسته‌ای ماگمای بازی با سنگ‌های مسیر و میزبان ضمن صعود و جایگزینی نهایی ماگماست.

- الگوی موازی طرح‌های تغییرات عناصر کمیاب در نمودارهای عنکبوتی و نمودارهای عناصر ناسازگار در مقابل همدیگر، نشان‌دهنده‌ی خاستگاه واحد و نقش تبلور جدایشی، همراه با هضم و آرایش با سنگ‌های پوسته‌ای، در روند شکل‌گیری ماگمای قلیایی سازنده‌ی سنگ‌های مورد بررسی است.

- ماگمای قلیایی سازنده‌ی سنگ‌های آذرین یاد شده، از ذوب بخشی با درجه‌ی پائین (۱۰ تا ۱۵ درصدی) یک ستون گوشته‌ای گارنت - لرزولیتی غنی شده زیر لیتوسفر قاره‌ای، در یک محیط کشتی درون قاره‌ای به وجود آمده است.

- وارفنگی و کشش پس از رخداد زمین‌ساختی برخوردی تریاس میانی- پایانی در شمال زون البرز، که با برخورد ورقه‌ی البرز با ورقه‌ی توران همراه بوده است، به همراه فرورانش همزمان لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس به زیر ورقه ایران مرکزی در جنوب، منجر به ایجاد حوضه‌های کشتی کافتی پشت کمانی در این زمان در البرز شده است. رسوب‌گذاری سازندهای شمشک و کشف‌رود که با ضخامت‌ها و رخساره‌های متغیر و با

گسل‌های عمیق نرمال اداره می‌شده‌اند، در این حوضه‌ی کشتی کافتی، در حاشیه قاره‌ای غیرفعال البرز در طول تریاس پایانی - ژوراسیک آغازین صورت گرفته است. فعالیت این گسل‌های نرمال عمیق، موجب بروز رخداد‌های ماگماتیسم قلیایی کافتی درون قاره‌ای شده است.

## قدردانی

نویسندگان مقاله از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود به خاطر حمایت از انجام این پژوهش سپاسگزارند.

## مراجع

- [1] Alavi M., *Tectonostratigraphy synthesis and structural style of the Alborz mountain system in northern Iran*, Journal of geodynamics 21 (1996) 125-134.
- [2] Golonka J., *Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic*, Tectonophysics 381 (2004) 235- 273.
- [3] Seyed-Emami K., Fursich F. T., Wilmsen M., Cecca F., Majidifard M. R., Schairer G., Shekarifard A. *Stratigraphy and ammonite of the upper Shemshak Formation (Toarcian-Aalenian) at Tazareh, eastern Alborz, Iran*, Journal of the Asian Earth Science 28 (2006) 259-275.
- [4] Furon R., *"Geologie du plateau Iranien. (Iran, Afghanistan- Belouchistan)"*, Memories du Museum national d'histoire naturelle (Paris) (1964).
- [5] Delenbach J., *Contribution a l'etude geologique de la region situee a l'est de Teheran (Iran)*, Faculte Science Universite de Strasbourg (France) (1964) 117p.
- [6] Glaus M., *Trias und oberperm im Centralen Elburs (Persien)*, Eclog. Geol. Helv. (1964) 2-57.
- [7] Allenbach P., *Geologie und petrography des Damavand und seiner Umgeburg (Zentral Elborz), Iran*, Mittlung Nr. 63, Geologisches Institut, EHT- Zurich (1966) 114p.
- [8] Annells R. N., Arthurton R. S., Bazely R. A., Davis R. G., *Explanatory text of the Qazvin and Rasht quadrangles map (1:250000)*, Geological Survey of Iran. Report No. E3, E4. (1975) 94 pp.
- [۹] آقاناتی ع. "زمین‌شناسی ایران"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، چاپ اول (۱۳۸۳) ۵۸۶ ص.

- and metamorphosed basic igneous rocks", Earth and Planetary Science Letters 28 (1976) 459-469.
- [22] Kumar K. V., Rathna K., *Geochemistry of the mafic dykes in the Prakasam Alkaline Province of Eastern Ghats Belt, India: Implications for the genesis of continental rift-zone magmatism*, Lithos 104 (2008) 306-326.
- [23] Zhang H. F., Sun M., Lu F. X., Zhou X. H., Zhou M. F., Liu Y. S., Zhang G. H., *Moderately depleted lithospheric mantle underneath the Yangtze Block: Evidence from a garnet lherzolite xenolith in the Dahongshan kimberlite*, Geochemical Journal 35 (2007) 315-331.
- [24] Tchameni R., Pouclet A., Penary J., Ganwa A., Toteu S. F., *Petrology and geochemistry of the Ndaoundere Pan-African granitoids in Central North Cameroon: Implications for their sources and geological setting*, Journal of African Earth Science 44 (2006) 511-529.
- [25] Upadhyay D., Raith M. M., Mezger K., Hammerschmidt K., *Mesoproterozoic rift-related alkaline magmatism at Elchuru, Prakasam Alkaline Province, SE India*, Lithos 89 (2006) 447-477.
- [26] Wilson M., *Igneous Petrogenesis*, Unwin Hyman, London (1989) 466pp.
- [27] Aldinucci M., Gandin A., Sandrelli F., *The Mesozoic continental rifting in the Mediterranean area: insights from the Verrucano tectofacies of southern Tuscany (Northern Apennines, Italy)*, Journal of Earth Science (Geol Rundsch) 97 (2008) 1247-1269.
- [28] Aldanmaz E., Pearce J. A., Thirwall M. F., Mitchell J. G., *Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey*, Journal of Volcanology and Geothermal Research 102 (2000) 67-95.
- [29] Pearce J. A., Cann J. R., *Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses*, Earth and Planetary Science Letters 19 (1973) 290-300.
- [30] Meschede M., *A method of discriminating between different type of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram*, Chemical Geology 56 (1986) 207-218.
- [۱۰] مقدسی ص. "پترولوژی، پتروژنز و جایگاه چینهننگاری سنگ‌های آتشفشانی ژوراسیک در زون البرز شرقی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، (۱۳۸۲) ۱۱۴ ص.
- [۱۱] مقدسی ص.، قاسمی ح.، "زمین شناسی و ژئوشیمی سنگهای آذرین قاعده سازند شمشک در البرز شرقی"، چکیده مقالات بیست و دومین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی کشور، تهران، (۱۳۸۲) صفحات ۲۷۲-۲۷۱.
- [۱۲] جمشیدی خ.، "مطالعه ماگماتیسم مافیک قاعده سازند شمشک در زون البرز شرقی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد"، دانشگاه صنعتی شاهرود، (۱۳۸۹) ۱۵۱ ص.
- [13] Cox K. G., Bell J. D., Pankhurst R. J., *"The interpretation of igneous rocks"*, George allen and uniwin, London (1979) 450p.
- [14] Winchester J. A., Floyd P. A., *"Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile element"*, Chemical Geology 20 (1977) 249-287.
- [15] Nakamura N., *"Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites"*, Geochemistry and Cosmochemistry Acta 38 (1974) 757-775.
- [16] Sun S. S., McDonough W. F., *"Chemical and isotopic systematics of oceanic of basalts: implication for mantle composition and processes"*, In: Magmatism in oceanic basins, (ed) Saunders A. D., Norry M. J., Geological Society of London, Special Publication 42 (1989) 313-345.
- [17] Wang Z., Zhao Y., Zou H., Li W., Liu X., Wu H., Xu G., Zhang S., *"Petrogenesis of the Early Jurassic Nandaling flood basalts in the Yanshan belt, North China Craton: A correlation between magmatic underplating and lithospheric thinning"*, Lithos 96 (2007) 543-566.
- [18] Henderson P., *"Rare Earth Element Geochemistry"*, Elsevier Science Publisher B. V. (1984) 510p.
- [19] Rollinson H. R., *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*, John Wiley and Sons (1993) 325p.
- [20] Irvin T., Baragar W. R. A., *"A guide to the Chemical classification of the common volcanic rocks"*, Canadian Journal of Earth Science Letters Vol. 8 (1971) 523-548.
- [21] Winchester J. A., Floyd P. A., *Geological magma type discrimination: application to altered*

- [37] Fursich F. T., Wilmsen M., Seyed-Emami K., Majidifard M. R., *The Mid-Cimmerian tectonic event (Bajocian) in the Alborz Mountains, Northern Iran: evidence of the break-up unconformity of the South Caspian Basin*, In: South Caspian to Central Iran Basins. (ed), Brunet M. F., Wilmsen M., Granath J. W., Geological Society Publication No. 312 (2009) 189-203.
- [38] Taheri J., Fursich F. T., Wilmsen M., *Stratigraphy, depositional environment and geodynamic significance of the Upper Bajocian-Bathonian Kashafrud Formation, NE Iran*, In: South Caspian to Central Iran Basins. (ed), Brunet M. F., Wilmsen M., Granath J. W., Geological Society Publication No. 312 (2009) 205-219.
- [39] Stampfli G. M., Borel G. D., *"A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrones"*, Earth and Planetary Science Letters 196 (2002) 17-33.
- [۴۰] امامی م. ه. "ماگماتیسم در ایران"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، (۱۳۷۹) ۶۲۲ ص.
- [31] Shervais J. W., *"Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas"*, Earth and Planetary Science Letters 59 (1982) 101-118.
- [32] Pearce J. A., *"Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries"*, In: Andesites, (ed), Thorpe R. S., Wiley Chichester (1982) 525-548.
- [33] Furman T., *"Geochemistry of East African Rift basalts: An overview"*, Journal of African Earth Sciences 48 (2007) 147-160.
- [34] Zhao J. H., Zhou M. F., *"Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): Implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle"*, Journal of Precambrian Research 152 (2007) 27-47.
- [35] Thriwall F. M., Upton B. J., Jenkins C., *"Interaction between continental lithosphere and Iceland plume, Sm-Nd-Pb isotope geochemistry of Tertiary basalts, Northeast Greenland"*, Journal of Petrology 35 (1994) 839-879.
- [36] Brunet M. F., Korotaev M., Ershov A., Nikishin A., *"The South Caspian Basin: a review of its evolution from subsidence modeling"*, Sedimentary Geology 156 (2003) 119-148.