



ژئوشیمی و سنگ‌شناسی سنگ‌های آتشفشانی کانسار مس مهور، شمال غرب نهبندان (شرق ایران)

مرتضی اسفرم^{۱*}، حبیب بیابانگرد^۱، محمد بومری^۱، محمد حسین زرین کوب^۲، محمد مهران^۱، وحید ابراهیمی^۳

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند

۳- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله: ۸۹/۱۱/۵، نسخه نهایی: ۹۰/۳/۱۰)

چکیده: منطقه‌ی مورد بررسی در استان خراسان جنوبی در ۱۳۰ کیلومتری شمال‌غربی نهبندان واقع شده است و بخشی از چهارگوش چاهوک (دهسلم) است. از نظر سنگ‌شناسی، شامل داسیت، ریوداسیت، آندزیت، ریولیت، توف و لیتیک توف با سن ائوسن شناسایی شد. از نظر کانی‌شناسی سنگ‌های یاد شده دارای پلاژیوکلاز، کوارتز، پیروکسن، آمفیبول، بیوتیت و فلدسپات قلیایی هستند. پلاژیوکلازها دارای ساخت منطقه‌ای و آمفیبول‌ها دارای حاشیه‌ی سوخته اند که این پدیده نشانه دمای زیاد ماگمای سازنده‌ی آنها است. بر اساس رده‌بندی شیمیایی، سنگ‌های مورد بررسی از آندزیت، تراکی آندزیت، آندزیت‌بازالت، ریولیت، داسیت و ریوداسیت تشکیل شده‌اند. بر اساس نمودارهای سنگ‌شناسی، سری ماگمایی سنگ‌های مورد بررسی دارای ماهیت آهکی-قلیایی پرتاسیم است، نیز با استفاده از نمودارهای جداکننده‌ی محیط زمین‌ساختی، سنگ‌های آتشفشانی مورد نظر در نواحی فرورانشی قرار گرفته‌اند. بیهنجاری منفی عناصر Nb، P و Ti و بیهنجاری مثبت K و Pb در این سنگ‌ها نشان دهنده‌ی تشابه سرشتی‌های شیمیایی این سنگ-ها با ماگماتیسم قوس‌های آتشفشانی است.

واژه‌های کلیدی: نهبندان، کانسار مس مهور، آهکی-قلیایی، فرورانش، قوس آتشفشانی.

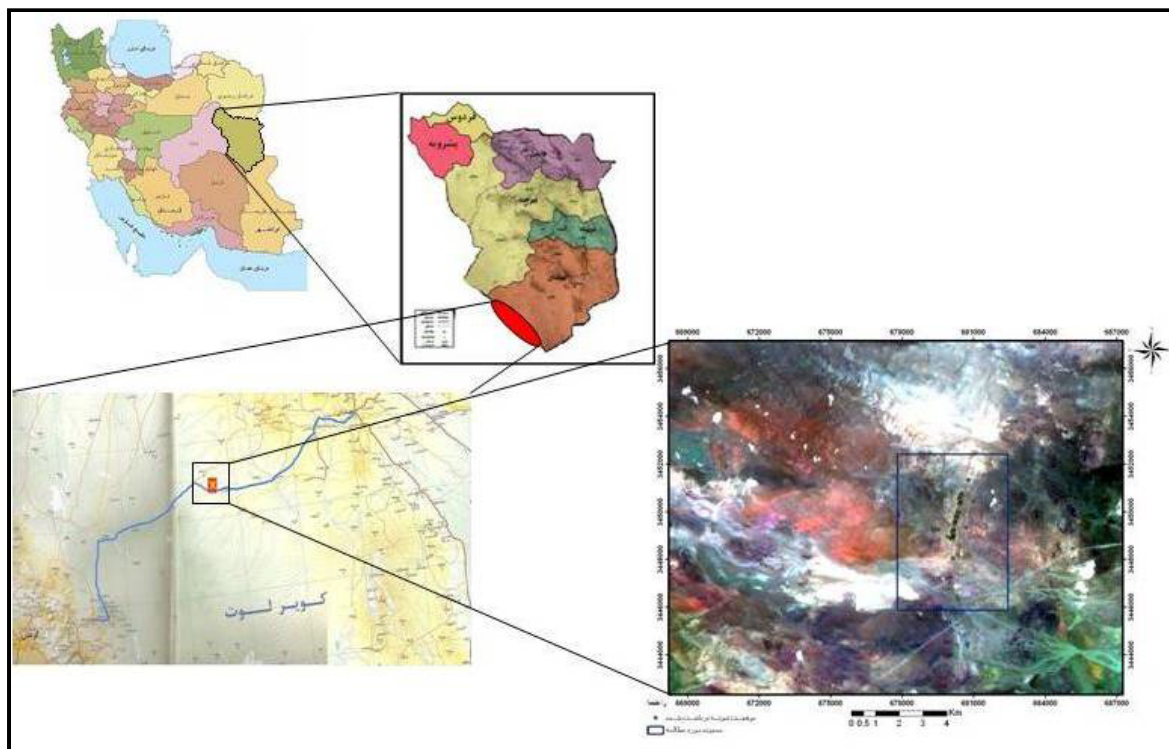
مقدمه

درون زون آتشفشانی ترشیری آن قرار دارد. فعالیت‌های ماگمایی لوت از ژوراسیک آغاز شده و در کرتاسه ادامه داشته و در ترشیری به اوج خود رسیده است، به طوریکه سنگ‌های آتشفشانی ترشیری، به ویژه ائوسن با ضخامت حدود ۲۰۰۰ متر، بیش از نیمی از بلوک لوت را می‌پوشانند [۳]. هدف از این پژوهش تعیین ژئوشیمی، سری ماگمایی و موقعیت زمین‌ساختی سنگ‌های آذرین میزبان کانسار مس مهور است.

روش بررسی

پس از جمع‌آوری و بررسی اطلاعات، گزارش‌ها و نقشه‌های مربوط به منطقه، بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی در غالب

دوران سنوزوئیک در ایران، دوران اوج فعالیت‌های ماگمایی به ویژه فعالیت‌های آتشفشانی بوده است که محصول این فعالیت‌ها سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری فراوان در مناطق مختلف ایران است [۱]. فعالیت آتشفشانی ائوسن، یکی از مهمترین پدیده‌های زمین‌شناسی ایران در زمان ائوسن است که آثار آن در اغلب مناطق ایران غیر از زاگرس چین‌خورده و کپه‌داغ، به چشم می‌خورد [۲]. منطقه‌ی مورد بررسی در استان خراسان جنوبی در ۱۳۰ کیلومتری شمال‌غربی نهبندان واقع شده است (شکل ۱). که در رده‌بندی‌های زمین‌شناسی در زون لوت و در



شکل ۱ موقعیت منطقه‌ی مورد بررسی.

موارد زیر انجام گرفت:

- ۱- بررسی‌های صحرایی برای نمونه‌برداری و جمع‌آوری شواهد زمین‌شناختی، به تعداد ۲۰۰ نمونه‌ی سنگی و کانسنگ از تمام گستره‌ی معدن مورد نظر.
- ۲- تهیه‌ی مقاطع نازک برای بررسی بافت‌ها و کانی‌ها.
- ۳- ارسال ۱۱ نمونه از نمونه‌های سنگی نادگرسان یا دارای دگرسانی کم برای تجزیه شیمیایی به روش XRF به مشهد و نیز آزمایشگاه شرکت کانساران بینالود.
- ۴- استفاده از نتایج آنالیز ICP-AES و ICP-MS انجام شده روی نمونه‌های مورد بررسی.
- ۵- ترسیم نمودارهای مختلف سنگ‌شناسی با استفاده از نرم-افزارهای Icpet، Minpet و GCDkit به منظور تعیین سری ماگمایی و محیط زمین‌ساختی منطقه‌ی مورد بررسی.

بحث و بررسی

زمین‌شناسی

منطقه‌ی مورد بررسی در گستره‌ی طول‌های جغرافیایی شرقی $۵۸^{\circ}۳۰'$ تا $۵۹^{\circ}۳۱'$ و عرض‌های جغرافیایی شمالی $۳۰^{\circ}۰۰'$ تا $۳۱^{\circ}۴۵'$ قرار گرفته و بخشی از چهارگوش چاهوک (دهسلم)

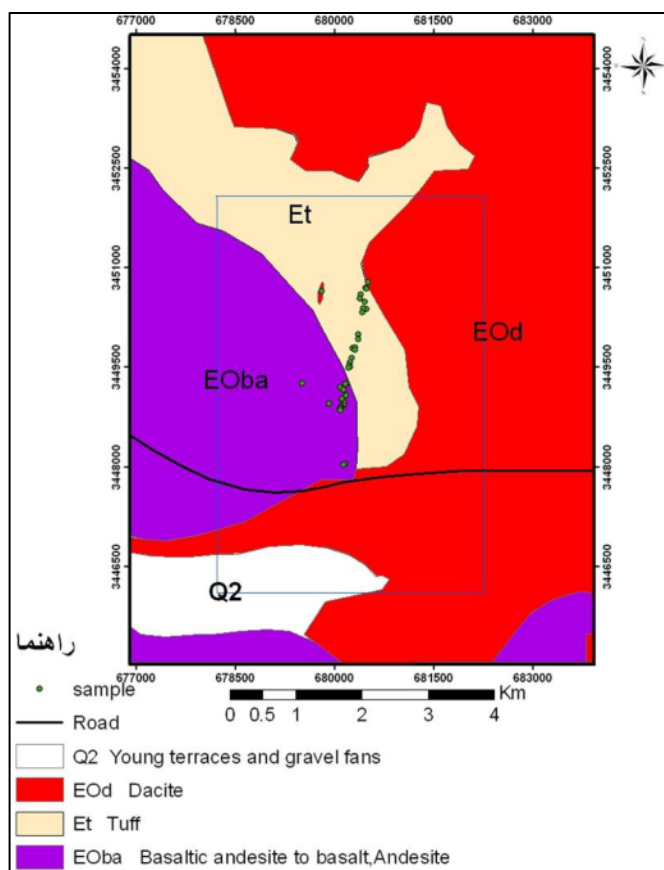
است. اولین بار اشتوکلین (۱۹۶۸) بلوک لوت را به عنوان یکی از ۹ زون ساختاری ایران در شرق ایران، معرفی کرد، و معتقد است که مرز شرقی لوت، گسل نهبندان، مرز غربی آن گسل نایبند، مرز شمالی آن گسل درونه و مرز جنوبی آن فروافتادگی جازموریان است [۴]. بلوک لوت با یک روند شمالی-جنوبی به درازای حدود ۹۰۰ کیلومتر و عرض حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر شرقی‌ترین بخش خرد قاره‌ی ایران مرکزی است [۳]. امامی (۱۳۷۹) در یک جمع‌بندی کلی سنگ‌های آتشفشانی بلوک لوت را به دو بخش کهن و جوان جدا کرد: الف) سنگ‌های آتشفشانی پالئوژن (الیگوسن-میوسن) که بیشتر متمایل به اسیدی-حدواسط بوده و شامل سنگ‌های ریولیتی تا آندزیتی است. ب) سنگ‌های آتشفشانی پالئوژن (پالئوسن) که کم و بیش بازیک و غالباً از نوع بازالتی هستند [۵]. این ماگماتیسم، به طور مشخص محدود به گسل‌ها و شکستگی‌های محدود کننده‌ی بلوک لوت است.

سنگ‌شناسی

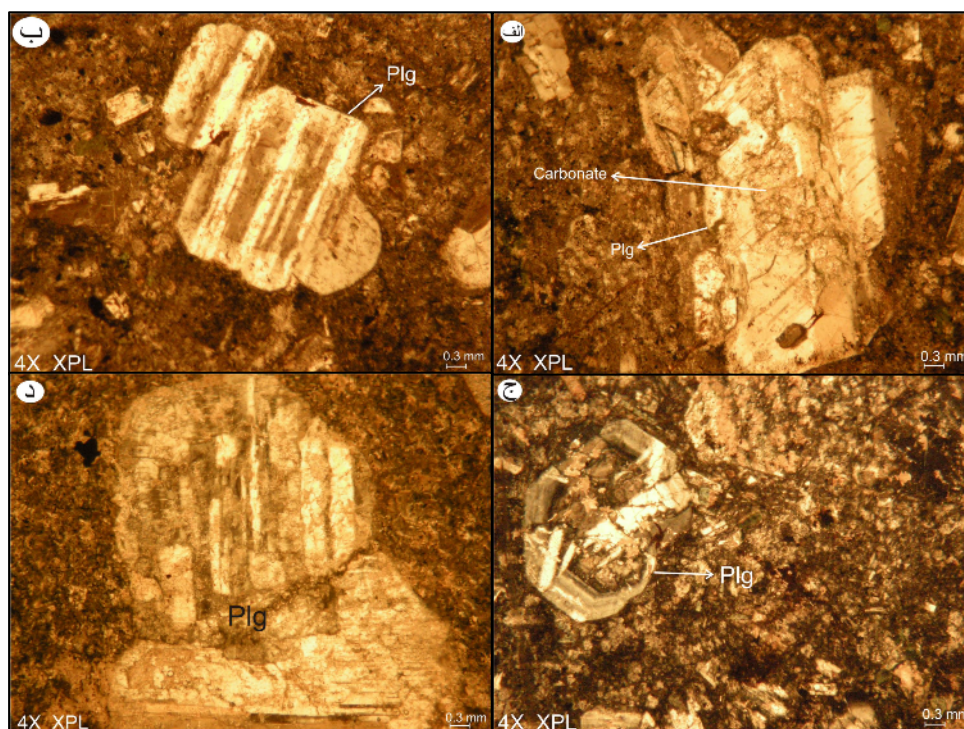
نهبشته‌های منطقه‌ی مورد بررسی به طور کلی به پس از ائوسن تعلق داشته و سنگ‌های قدیمی‌تر از ائوسن در گستره‌ی مورد

بررسی برونزد ندارد [۶]. واحدهای موجود در گستره‌ی معدن مس ماهور به شرح زیرند (شکل ۲): واحد (EO^{ba})؛ این مجموعه بصورت مناطقی که با شکل حلقوی سطح زمین را با سنگ‌هایی به رنگ سیاه پوشانیده‌اند، و شامل آندزیت‌بازالت و بازالت به رنگ خاکستری تیره تا سیاه، قابل تفکیک است. این واحد سنگی در بخش غربی این گستره گسترش دارد. واحد (E^۱): این واحد سنگی شامل توف، بیشتر با ترکیب حدواسط تا اسیدی به رنگ سبز و خاکستری، گدازه‌های داسیتی، گدازه‌های آندزیتی، توف و سنگ‌های آتشفشانی، توف جریان‌ی و ماسه سنگ است که توف یاد شده بیشتر از توف لیتیک تشکیل شده است و در سطح به صورت برشی، سیلیسی و پیریتی شده دیده می‌شود. واحد (EO^d): این واحد سنگی که با رنگ روشن خود بیشترین گسترش را در گستره‌ی پی جویی به نمایش می‌گذارد. بخش‌های گسترده‌ای از شرق و جنوب و جنوب شرقی گستره را فرا گرفته است از جمله سنگ‌های دیده شده در این واحد می‌توان به داسیت و ریوداسیت‌های حاوی پیریت اشاره کرد که با رنگ روشن خود به خوبی قابل تفکیک است. رورانگی‌های آبرفتی جوان (Q^{۱۲}): نهشته‌های آبرفتی جوان شامل ماسه، سیلت و رس هستند، که سن این واحد با توجه به نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ چاه‌وک، کواترنر است و بیشترین گسترش را در بخش جنوب غربی این گستره دارد. این مجموعه‌ی آتشفشانی بیشتر تحت تاثیر دگرسانی‌های کربناتی، سریستیک، سیلیسی، پروپیلیتیک و آرژیلیک قرار گرفته‌اند. بافت‌های مهم در این سنگ‌ها پورفیری، دانه‌ای تا ریز دانه‌ای، برشی، کلوفرم، موزائیکی و ویتروکلاستیک‌اند. کانی‌های تشکیل دهنده‌ی این سنگ‌ها عبارتند از: (۱) پلاژیوکلاز: در مقاطع میکروسکوپی فنوکریست‌های پلاژیوکلاز به عنوان یکی از فراوان‌ترین کانی‌های موجود در این سنگ-هاست که در بیشتر مواقع تحت تاثیر دگرسانی قرار گرفته و به کربنات، سریسیت، اپیدوت و کانی‌های رسی تبدیل شده است (شکل ۳ الف). پلاژیوکلاز در انواع نمونه‌های آندزیتی بیش از ۵۰ درصد حجم سنگ را تشکیل داده و سالم مانده و تحت تاثیر دگرسانی قرار نگرفته‌اند. بلورهای پلاژیوکلاز به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دارند و دارای ماکل پلی‌سنتتیک (شکل ۳ ب)، بافت غربالی (شکل ۳ الف) و منطقه‌بندی (شکل ۳ پ) هستند. در حاشیه تعدادی از پلاژیوکلازها حالت غبار آلودگی دیده می‌شود (شکل ۳ ت)، که این حالت به احتمال ناشی از اختلاط ماگمایی است. زمینه‌ی ریز بلوری شامل بلورهای ریز

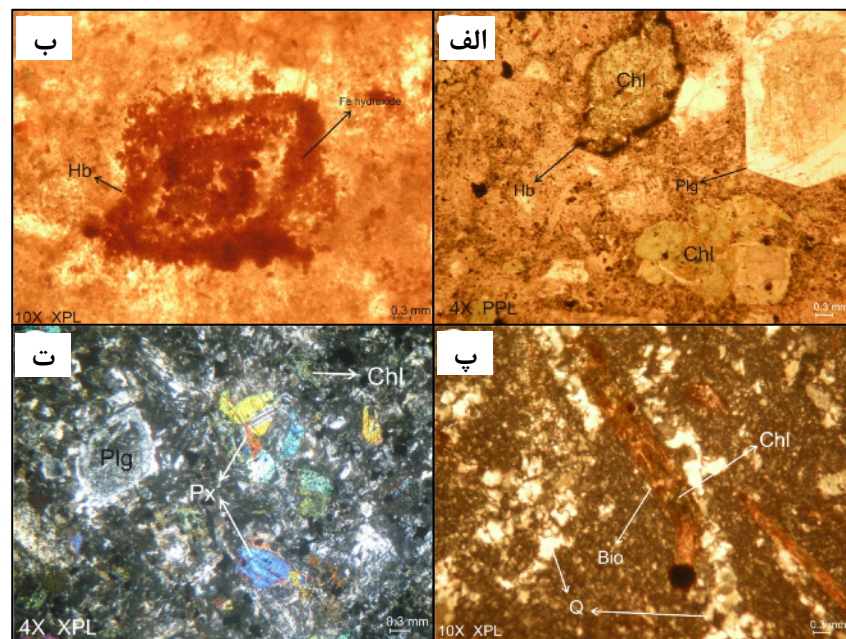
پلاژیوکلاز است، که این اختلاف زیاد و ناگهانی بین اندازه‌ی دانه‌های فنوکریست و زمینه را نتیجه تبلور دومرحله‌ای می‌دانند، که کانی‌های درشت بلور به صورت اولیه در عمق تشکیل شده و معرف مراحل اولیه‌ی تبلورند، در صورتی که ریز بلورهای خمیره در نتیجه انتقال ناگهانی مخلوط بلور و گدازه به بخش‌های بالایی پوسته زمین شکل گرفته‌اند. فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در زمینه‌ی ریز دانه سبب ایجاد بافت پورفیری شده است. (۲) کوارتز: این کانی هم به صورت ریزدانه و هم درشت دانه دیده شده و در نمونه‌های داسیتی از درصد بیشتری برخوردار است، کوارتز در منطقه‌ی مورد بررسی هم به صورت رگه-رگچه و همزمان با کانی‌سازی و هم به شکل ثانویه دیده می‌شوند. رگه‌های فراوانی از کوارتز در نمونه وجود دارند که ثانویه‌اند. کوارتز در ابعاد ریز بلورین تا بلورهایی با ابعاد ۳۰۰ میکرون دیده می‌شوند. انواع درشت‌تر کوارتز خودریخت هستند و بلورهای نسبتاً خودشکل کوارتز به صورت رگچه‌هایی دیده می‌شوند که حاصل به دنبال هم قرار گرفتن دانه‌های کوارتز است. (۳) کانی‌های تیره: این کانی‌ها حدود ۲۰-۵ درصد حجمی کانی‌ها را تشکیل می‌دهند. در بعضی نمونه‌های مورد بررسی، بیوتیت‌های مشاهده شده اولیه اند و برخی از این بیوتیت‌ها تا اندازه‌ای کلریتی شده‌اند (شکل ۴ پ). پلاژیوکلاز به وسیله بیوتیت و کانی‌های تیره جانشین شده است، و آمفیبول‌ها نیز با حاشیه‌های سوخته دیده می‌شوند، که مشاهده سوختگی در هورنبلند و بالا بودن PH₂O در پایان روند بلوری شدن، بالا بودن fO₂ هنگام بیرون‌ریزی گدازه را نشان می‌دهد. حاشیه‌ی سوخته هورنبلند حاکی از دمای زیاد ماگمای سازنده‌ی سنگ‌های آتشفشانی هنگام خروج است (شکل ۴ الف). اکسایش بیوتیت و هورنبلند به اکسیدهای آهن هنگام بیرون‌ریزی گدازه مشاهده می‌شود (شکل ۴ ب)، و کلریتی‌شدن فازهای مافیک نظیر بیوتیت، آمفیبول نیز در سنگ‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۴ پ، ۴ الف). پیروکسن‌های مشاهده شده در سنگ‌های منطقه نیز به صورت فنوکریست و گاهی ریز دانه‌اند بطوریکه در پیروکسن آندزیت‌ها تا ۱۵-۱۰ درصد حجم سنگ را تشکیل می‌دهند (شکل ۴ ت). (۴) کانی‌های ثانویه: کانی‌هایی از قبیل سریسیت، کانی‌های رسی، کلسیت، کلریت، اپیدوت و کوارتز ثانویه در این سنگ‌ها مشاهده می‌شوند که حاصل دگرسانی کانی‌هایی چون پلاژیوکلاز، هورنبلند و بیوتیت‌اند.



شکل ۲ موقعیت نمونه‌های برداشت شده و واحدهای سنگی منطقه‌ی کانسار مس ماهور.



شکل ۳ بلورهای پلاژیوکلاز با بافت غربالی و کربناتی شدن آن (الف)، بافت پلی‌سنتتیک (ب)، منطقه‌بندی در بلور پلاژیوکلاز (ج) و حاشیه‌ی غبار آلود اطراف بلور پلاژیوکلاز (د).

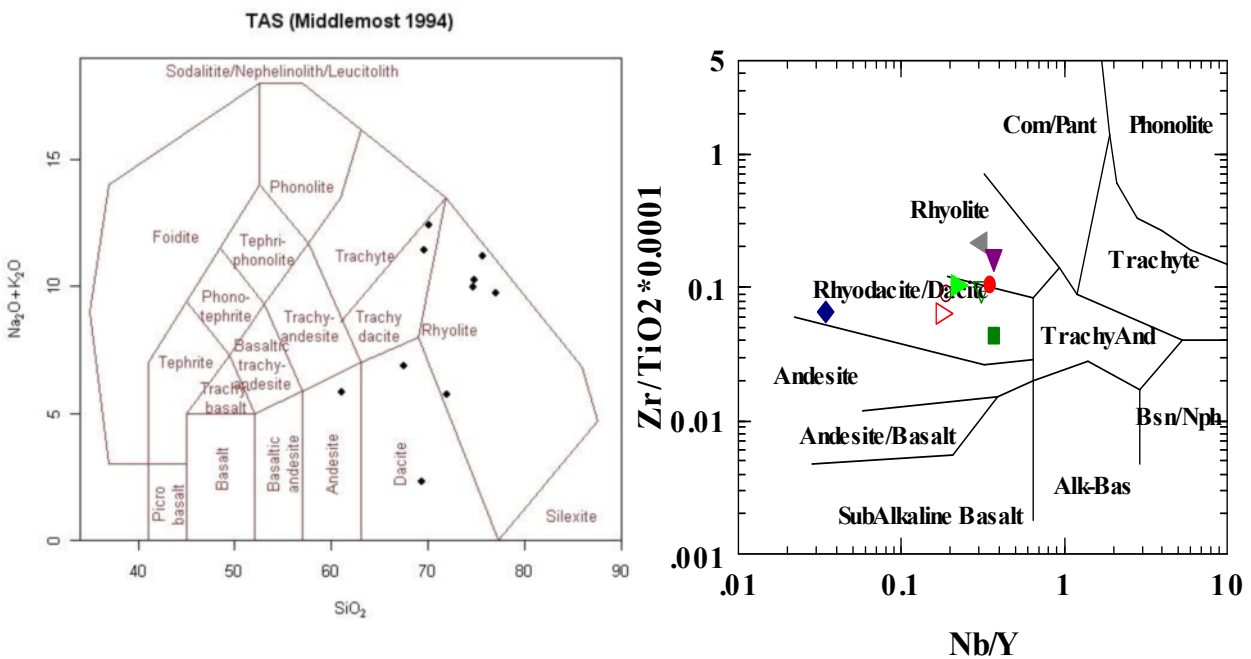


شکل ۴ بلورهای هورنبلند با حاشیه‌ی سوخته و کلریتی شدن آن (الف)، اکسایش هورنبلند به اکسید آهن (ب)، کلریتی شدن بیوتیت (پ) و بلور پیروکسن (ت).

ژئوشیمی

به منظور تعیین دقیق نوع سنگ‌های آتشفشانی منطقه‌ی مورد بررسی، پس از بررسی‌های میکروسکوپی و شناسایی کانی‌ها از رده‌بندی شیمیایی نیز استفاده شد، بدین منظور سعی شد تا نمونه‌های انتخاب شده سالم و کمتر دگرسان شده باشند، نتایج حاصل از تجزیه‌ی ژئوشیمیایی نمونه‌های مختلف سنگ‌های آتشفشانی در جدول ۱ آورده شده‌اند. درصد SiO_2 موجود در نمونه‌ها از ۴۷٫۸۹ تا ۸۴٫۴۵ درصد وزنی متغیر است، و در نمودار TAS پیشنهاد [۷] نمونه‌های سنگی منطقه‌ی مورد بررسی در گستره‌ی داسیت، آندزیت، تراکی داسیت و ریولیت قرار می‌گیرند (شکل ۵). با توجه به این که امکان دگرسانی و تغییرات کانی‌شناسی و شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی بیشتر از سنگ‌های آذرین درونی است، لذا با استفاده از عناصری که امکان تحرک کمتری دارند، می‌توان آنها را نام‌گذاری کرد و در مواقعی که سنگ دستخوش دگرسانی شده، در تعیین نام سنگ می‌تواند مفید باشد، نمودار Zr/TiO_2 نسبت به Nb/Y نمونه‌ای از این نمودارهاست [۸] در این نمودار، سنگ‌های منطقه در گستره‌های ریولیت و ریوداسیت- داسیت قرار می‌گیرد (شکل ۵). در نمونه‌های مورد بررسی با افزایش SiO_2 غلظت Al_2O_3 نسبتاً افزایش می‌یابد که این با روند عادی جدایش عناصر در سنگ‌های عادی منافاتی ندارد. آلومینیم از آغاز تا

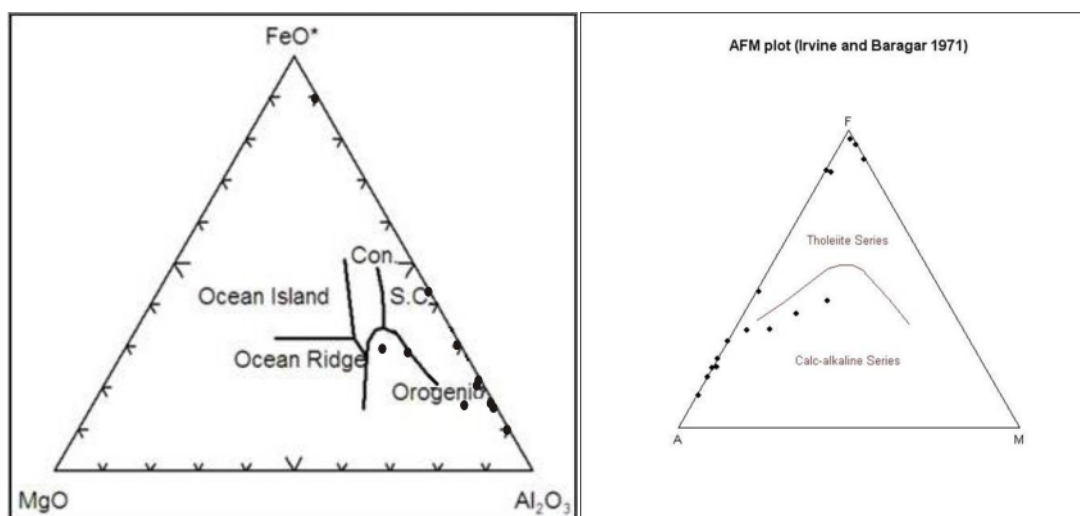
پایان جدایش ماگمایی حضور دارد و در آغاز جدایش ماگمایی، در ساختار پلاژیوکلازهای کلسیک و پیروکسن قرار می‌گیرد و در پایان جدایش با پیشرفت سری پیوسته، پلاژیوکلازها در فلدسپات‌های قلیایی متمرکز می‌شود. میزان این اکسید در نمونه‌های مورد بررسی از ۱٫۶۳ تا ۱۵٫۱۶ درصد وزنی متغیر است. از آنجا که Mg همانند Ca از عناصر دیرگداز محسوب شده و تمایل دارند در فازهای اولیه (آغاز فرآیند جدایش)، کانی‌های مافیک را تشکیل دهند و از محلول خارج شوند، بنابراین با افزایش روند جدایش (افزایش SiO_2 غلظت MgO به شدت کاهش می‌یابد. میزان MgO در سنگ‌های مورد بررسی از ۰٫۱ تا ۳٫۶۳ درصد وزنی متغیر است. CaO اکسیدی است که در مراحل اولیه‌ی جدایش تمایل دارد وارد فازهای با دمای بالا مانند کانی‌های مافیک و پلاژیوکلازهای کلسیم‌دار شود، بدین ترتیب است که با خروج این کانی غلظت این اکسید با ادامه‌ی روند جدایش کاهش خواهد یافت، که این امر می‌تواند به شکل‌گیری ترکیب پلاژیوکلازها از کلسیک به سدیک حین تبلور بخشی ماگما وابسته باشد. میزان CaO در نمونه‌های مورد بررسی از ۰٫۱ تا ۶٫۷۷ درصد وزنی متغیر است. عناصر K و Na از عناصر متحرک‌اند. میزان Na_2O در نمونه‌های منطقه از ۰٫۱۳ تا ۳٫۰۹ درصد وزنی تغییر می‌کند و میزان K_2O در این نمونه‌ها ۰٫۵۴ تا ۱۱٫۲۲ درصد وزنی است.



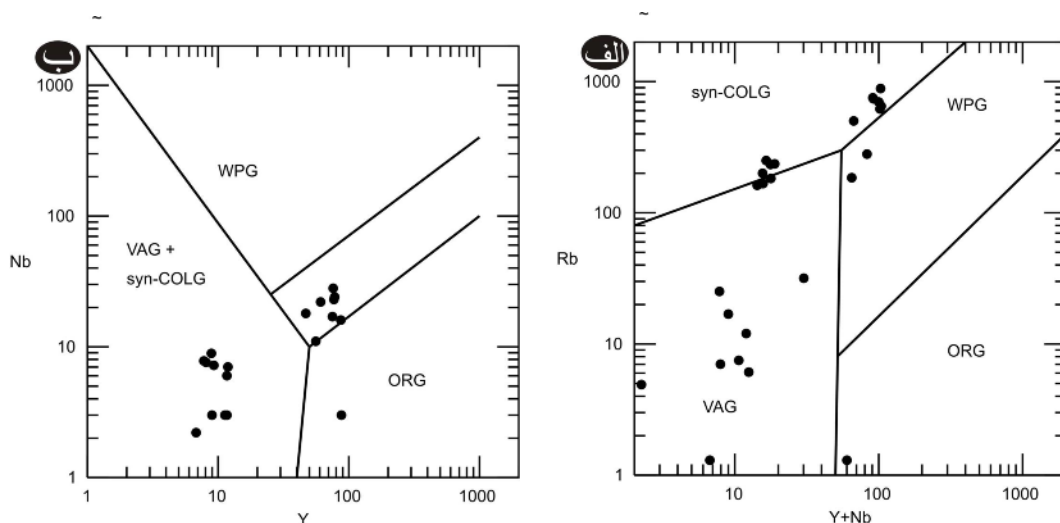
شکل ۵ موقعیت سنگ‌های آتشفشانی منطقه‌ی مورد بررسی در نمودار [۸،۷].

نمودار جدایش محیط زمین‌ساختی گرانیتوئیدهای پیشنهادی [۱۲] که برحسب عناصر کمیاب $Y + Nb$ و Rb است نیز، موقعیت زمین‌ساختی سنگ‌های منطقه‌ی مورد بررسی در گستره‌ی وابسته به قوس‌های آتشفشانی و همزمان با برخورد قرار می‌گیرد (شکل ۷). دیگر نمودارهای استفاده شده برای تعیین جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های ماگمایی از $Hf/3-Th$ و $Nb/16$ است [۱۳] که نمونه‌ها در گستره‌ی CAB یا حاشیه‌ی مخرب قاره‌ای قرار می‌گیرند (شکل ۸).

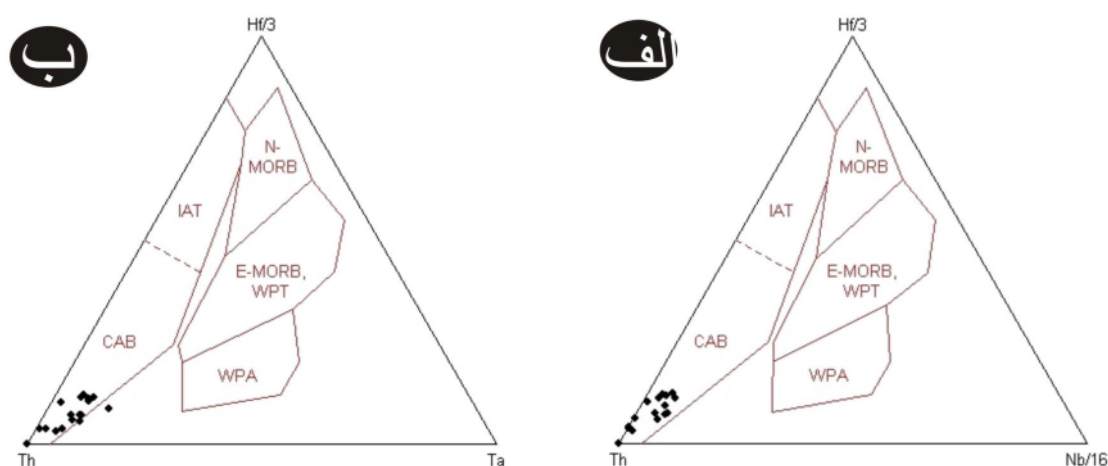
زمین‌ساختی سنگ‌ها و جدا کردن قوس‌های آتشفشانی می‌توان از نمودار مثلثی [۱۱] استفاده کرد، که با توجه به این نمودار، نمونه‌های منطقه در موقعیت زمین‌ساختی همزمان با برخورد قاره‌ای جای می‌گیرند (شکل ۶). به منظور تعیین محیط زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی مورد بررسی، از نمودارهایی استفاده می‌شود که عناصر کمیاب کم تحرکی نظیر Y ، Nb ، Hf ، Ta و Zr و غیره سازنده‌های آن هستند. این عناصر نسبتاً نامتحرک بوده و هنگام عملکرد فرآیندهایی مثل هوازدگی و دگرسانی از خود حساسیتی نشان نمی‌دهند. با استفاده از



شکل ۶ نمودار AFM [۱۰] و جدایش سنگ‌های آذرین وابسته به قوس‌های آتشفشانی [۱۱] و موقعیت نمونه‌های منطقه‌ی مورد بررسی بر آن.



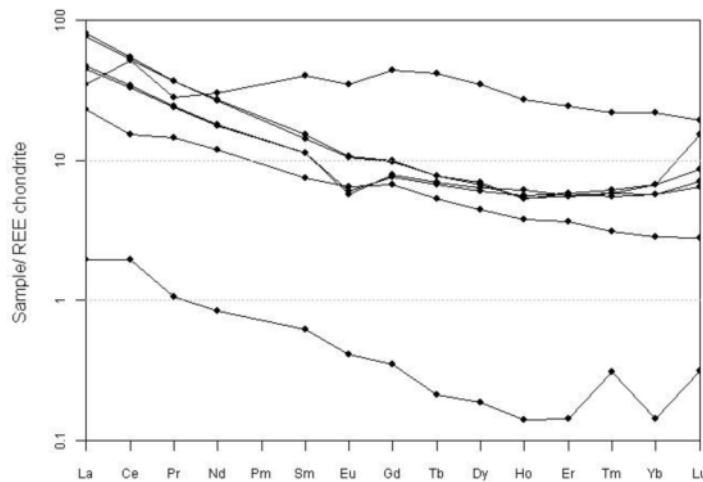
شکل ۷. قرارگیری نمونه‌های منطقه‌ی مورد بررسی در قوس‌های آتشفشانی و محیط زمینی ساختی همزمان با برخورد [۱۲].



شکل ۸. نمودار زمین ساختی ماگمایی سنگ‌های کانسار مس ماهور که در گستره‌ی CAB یا حاشیه‌ی مخرب قاره‌ای قرار می‌گیرند، Hf/3-Th-Nb/16 (الف) و Hf/3-Th-Ta (ب)، [۱۳].

ها نسبت به HREE و اینکه ممکن است در اثر شکل‌گیری‌های ماگما در سنگ‌های شکل یافته‌ی منطقه متمرکز شده باشند [۱۵]. عامل دیگری که ممکن است موثر باشد، تشکیل این سنگ‌های وابسته به مناطق فرورانش است [۱۶]. نسبت Eu^*/Eu به دست آمده از ۰/۶۱ تا ۰/۹۳ تغییر می‌کند، بنابراین یک بی‌هنجاری منفی ضعیف دیده می‌شود. جدول ۳ مقادیر محاسبه شده‌ی Eu^*/Eu را نشان می‌دهد. غنی‌شدگی نمونه‌های مورد بررسی کانسار مس ماهور از عناصر خاکی کمیاب سبک و تهی‌شدگی آنها از عناصر خاکی کمیاب سنگین و نیز بی‌هنجاری منفی Eu نسبت به کندریت از سرشتی‌های سنگ‌های آهکی-قلیایی آتشفشان‌های حاشیه‌ی قاره‌هاست [۱۷].

در نمودار ترسیم شده‌ی عناصر خاکی کمیاب نمونه‌های مورد بررسی در کانسار مس ماهور نسبت به کندریت [۱۴] (شکل ۹)، شیب منفی مشاهده می‌شود که نشان دهنده‌ی غنی‌شدگی نمونه‌ها از عناصر خاکی کمیاب سبک (LREE) و تهی‌شدگی از عناصر خاکی کمیاب سنگین (HREE) نمونه‌های منطقه است. مقادیر آنالیز عناصر REE در جدول ۲ آورده شده‌اند. میزان $(La/Yb)_N$ برای نمونه‌های مورد بررسی بین ۱/۶۱ تا ۱۳/۵۲ به دست آمده است. الگوی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب در نمونه‌های یاد شده نسبتاً موازی است که نشان‌دهنده‌ی هم‌خاستگاه بودن آنهاست. برای غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE می‌توان به ناسازگارتر بودن



شکل ۹ نمودار عناصر خاکی کمیاب نمونه‌های کانسار مس ماهور، بهنجار شده بر اساس کندریت [۱۴].

جدول ۲ نتایج تجزیه شیمیایی عناصر خاکی کمیاب (برحسب PPM) به روش ICP-MS

Sample	Lu	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Y
4-172	۰٫۴۹	۴۲٫۹	۴٫۵۱	۱۶	۲٫۸	۰٫۷۷	۲٫۵۲	۰٫۳۷	۲٫۱۸	۰٫۳۹	۱٫۱۵	۰٫۱۹	۱٫۴	۱۱٫۷
4-173	۰٫۲۸	۴۴٫۲	۴٫۵۱	۱۶٫۲	۳	۰٫۷۸	۲٫۵۸	۰٫۳۷	۲٫۲۵	۰٫۳۸	۱٫۲۲	۰٫۲	۱٫۴	۱۱٫۹
MH2d-43	۰٫۲۱	۲۶٫۷	۲٫۹۱	۱۰٫۶	۲٫۲	۰٫۴۴	۱٫۹۷	۰٫۳۲	۱٫۹۵	۰٫۴	۱٫۲۲	۰٫۱۸	۱٫۲	۱۱٫۳
MH2d-40	۰٫۲۳	۲۷٫۶	۲٫۹۹	۱۰٫۷	۲٫۲	۰٫۴۲	۲٫۰۴	۰٫۳۳	۲٫۰۵	۰٫۴۴	۱٫۱۸	۰٫۱۹	۱٫۲	۱۱٫۷
BZ011	۰٫۰۱	۱٫۵۸	۰٫۱۳	۰٫۵	۰٫۱۲	۰٫۰۳	۰٫۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۶	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۲۵
BZ017	۰٫۶۲	۴۱٫۷	۳٫۴۱	۱۸٫۲	۷٫۸۱	۲٫۵۵	۱۱٫۴	۱٫۹۸	۱۱٫۱۵	۱٫۹۴	۵٫۱۳	۰٫۷۱	۴٫۵۹	۳۰٫۱
G1	۰٫۰۹	۱۲٫۳۵	۱٫۷۶	۷٫۱	۱٫۴۶	۰٫۴۸	۱٫۷۳	۰٫۲۵	۱٫۴۳	۰٫۲۷	۰٫۷۶	۰٫۱	۰٫۵۹	۷٫۷۱

جدول ۳ محاسبه نسبت Eu/Eu^* نمونه‌های مورد مطالعه در کانسار مس ماهور.

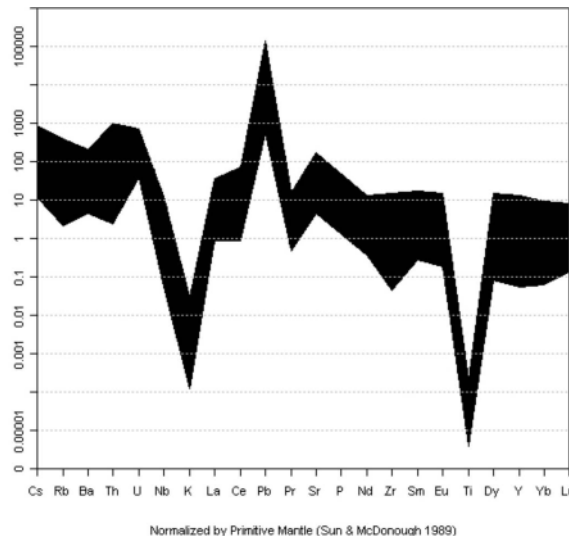
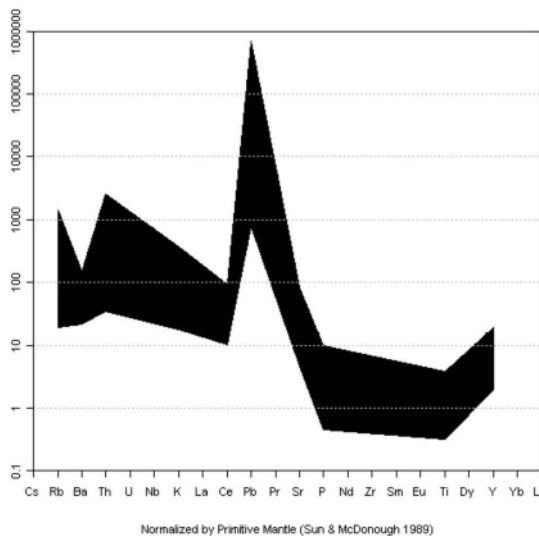
Sample	MCD-4-172	MCD-4-173	MCD-MH2d48	MCD-MH2d40	MCD-BZ011	MCD-BZ017	MCD-G1
Eu	۰٫۷۷	۰٫۷۸	۰٫۴۴	۰٫۴۲	۰٫۰۳	۲٫۵۵	۰٫۴۸
Gd	۲٫۵۲	۲٫۵۸	۱٫۹۷	۲٫۰۴	۰٫۰۹	۱۱٫۴	۱٫۷۳
Sm	۲٫۸	۳	۲٫۲	۲٫۲	۰٫۱۲	۷٫۸۱	۱٫۴۶
EuN	۱۰٫۴۷	۱۰٫۶۲	۵٫۹۸	۵٫۷۲	۰٫۴۱	۳۴٫۶۹	۶٫۵۳
GdN	۹٫۷۳	۹٫۹۶	۷٫۶۱	۷٫۸۷	۰٫۳۵	۴۴٫۰۲	۶٫۶۸
SmN	۱۴٫۳۶	۱۵٫۳۸	۱۱٫۲۸	۱۱٫۲۸	۰٫۶۲	۴۰٫۰۵	۷٫۴۸
Eu/Eu*	۰٫۸۸	۰٫۸۶	۰٫۶۵	۰٫۶۱	۰٫۸۹	۰٫۸۳	۰٫۹۳

ای باشد [۱۹] بیهنجاری‌های مثبت Pb تا بالای ۱۰۰۰ برابر مقادیر اولیه آنها در گوشته‌ی اولیه است که به دگرنهادی گوهی گوشته‌ای به وسیله‌ی شاره‌های ناشی از پوسته‌ی اقیانوسی فرورو یا آلایش ماگما با پوسته‌ی قاره‌ای اشاره دارد [۲۰]. در نمودار عنکبوتی (شکل ۱۰) عنصر K بیهنجاری مثبت نشان می‌دهد (بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر مقادیر اولیه این عنصر نسبت به گوشته‌ی اولیه)، و خاستگاه Kی موجود در این سنگ‌ها معمولاً از خاستگاه رسوب‌هایی است که به‌وسیله‌ی ورقه‌ی

ترکیب شیمیایی سنگ‌های منطقه‌ی مورد بررسی نسبت به فراوانی این عناصر به گوشته‌ی اولیه [۱۸] بهنجار شده اند (شکل ۱۰). در نمونه‌های مورد بررسی کانسار مس ماهور، غنی‌شدگی نسبتاً ضعیفی از عناصر Th از ۱۰ تا ۱۰۰ برابر و Uی بالای ۱۰۰ برابر مقادیر اولیه آنها در گوشته‌ی اولیه نشان می‌دهند که این امر احتمالاً به دلیل اضافه شدن گدازه‌ی حاصل از رسوب‌های پلاژی و یا شاره‌های حاصل از پوسته‌ی اقیانوسی دگرسان شده به چشمه‌ی ذوب‌شده‌ی گوهی گوشته-

پی‌ام و مقادیر Nb از ۰٫۱ تا ۲۸ تغییر می‌کند. بالا بودن غلظت عناصر LILE (Sr, Pb, Cs, Rb, Ba) در این نمونه‌ها احتمالاً به دلیل عملکرد و تاثیر پوسته‌ی قاره‌ای در غنی شدن ماگماها در محلول‌های تشکیل دهنده‌ی آن باشد. نسبت عناصر LILE/HFSE در این سنگ‌ها بالاست، به گونه‌ای که نسبت Ba/Hf و Sr/Zr در این سنگ‌ها بالاست. عناصر LILE به دلیل دارا بودن پتانسیل یونی پایین، در فشار و دمای بالا به آسانی در شاره‌های آبدار حل شده و انتقال می‌یابند [۲۳]. در صورتی که میزان انحلال‌پذیری عناصر HFSE در شاره‌های آبدار پایین است، و باعث می‌شود که حین ذوب بخشی با از دست دادن آب پوسته‌ی اقیانوسی فرورونده، گوهی گوشته بر اثر دگرنهادی شاره‌های آبدار از عناصر LILE نسبت به عناصر HFSE غنی شود. هم‌چنین عناصر HFSE به دلیل دارا بودن بار الکتریکی بالا و شعاع اتمی کم، تمایل چندانی برای ورود به فاز آبگون را ندارند و این در حالی است که عناصر LILE چون دارای شعاع اتمی بزرگ هستند به سادگی طی آبدایی وارد فاز مایع می‌شوند، بنابراین هنگامی که پوسته‌ی اقیانوسی فرورونده دستخوش آبدایی شود، شاره‌ای تولید می‌شود که غنی از عناصر LILE است و این مایع می‌تواند موجب دگرنهادی گوشته‌ای شود که در زیر این پوسته قرار گرفته است و عناصر HFSE هم که وارد فاز مایع نشده‌اند در همان نهشته‌های باقیمانده انباشته می‌شود، به طوری که فرآیند فرورانش نقش مهم و تاثیرگذاری در افزایش میزان نسبت LILE/HFSE بازی می‌کند.

فرورونده وارد گوشته شده‌اند. غنی‌شدگی عناصری مانند Ba و Sr (بین ۱۰ تا ۱۰۰ برابر مقادیر اولیه آنها نسبت به گوشته‌ی اولیه) به این دلیل است که باریم عنصری ناسازگار و متحرک است که مقدار آن معمولاً در پوسته‌ی قاره‌ای و رسوب‌های زیاد است و هنگامی که پوشش رسوبی روی پوسته‌ی اقیانوسی فرورونده می‌شود، عناصر Ba و Sr به وسیله‌ی شاره‌های مشتق شده از رسوب‌های آبدار و پوسته‌ی اقیانوسی به گوهی گوشته‌ی ای منتقل شده و تولید ماگماهایی با Ba و Sr بالا می‌کنند [۲۱]. و بی‌هنجاری مثبت Sr می‌تواند به مشارکت پلاژیوکلاز حین ذوب بخشی سنگ خاستگاه یا نشانه‌ی ریشه گرفتن ماگمای تشکیل دهنده‌ی این سنگ‌ها از پوسته‌ی اقیانوسی فرورو باشد. میزان Th در نمونه‌های منطقه از ۰٫۲ تا ۲۱۹ پی‌ام و میزان Ba از ۳۰ تا ۱۴۵۰ پی‌ام تغییر می‌کند که نسبت بالای Ba/Th در نمونه‌ها اشاره به تاثیر رسوب‌ها در پیدایش ماگما دارد [۲۱]. بی‌هنجاری منفی Ti به وسیله‌ی کانی‌های تیتان دار مانند اسفن، ایلمنیت، روتیل و تیتانومگنتیت و بعضی از آمفیبول‌ها کنترل می‌شود و با افزایش فشار قابلیت حل شدن کانی‌های تیتان دار در شاره‌های آبدار کاهش می‌یابد و کانی‌های یاد شده‌ی غنی از عناصر HFSE، طی فرآیندهای ذوب بخشی در اعماق بیش از ۳۰ کیلومتر به صورت فازهای برجای باقی می‌مانند و باعث ایجاد بی‌هنجاری منفی Ti می‌شوند [۲۲]. نتایج آنالیز تعدادی از عناصر موجود در نمونه‌های مورد بررسی در جدول ۴ دیده می‌شوند. مقادیر Ta در نمونه‌ها از ۰٫۱ تا ۰٫۶۸ پی‌ام و مقادیر Ti کمتر از ۰٫۱۰۵ تا ۰٫۲۸ پی‌ام -



شکل ۱۰ نمودار عنکبوتی بهنجار شده به گوشته‌ی اولیه [۱۸].

جدول ۴ نتایج آنالیز تعدادی از عناصر موجود در نمونه‌های سنگ مورد مطالعه.

Sample	Cs (PPM)	Ba (PPM)	Hf (PPM)	P(PPM)	Ti %
N5	۰٫۰۹	۱۶۰	۰٫۱	۱۰	۰٫۰۰۵
N6	۳٫۴۳	۶۹۰	۱٫۵	۲۰۰	۰٫۱۶۷
S86180	۵٫۲۶	۹۳۰	۱٫۸	۵۲۰	۰٫۲۷۱
S86181	۰٫۴۲	۳۰	۰٫۱	۴۰	۰٫۰۰۵
S86182	۰٫۵۷	۵۰	۰٫۱	۱۵۰	۰٫۰۰۶
S86183	۱٫۴۳	۵۰۰	۰٫۷	۱۱۰	۰٫۰۷۹
S86184	۲٫۷۷	۹۲۰	۱٫۷	۱۳۰	۰٫۱۸۱
S86185	۲٫۳۲	۶۴۰	۲٫۵	۷۰	۰٫۰۶۳
S86186	۱٫۹۹	۵۹۰	۰٫۱	۵۰	۰٫۰۰۹
BZ012	-	۱۲۰۰	-	۴۳۰	۰٫۰۵
BZ013	-	۶۰	-	۱۲۰	۰٫۰۵
BZ016	۰٫۵۴	۱۸۰	۰٫۱۳	۳۰	۰٫۰۰۵
BZ018	۰٫۲۵	۲۲۰	۰٫۱۴	۱۰۰	۰٫۰۰۵
BZ011	۰٫۱۸	۳۰	۰٫۰۲	۲۰	۰٫۰۰۵
BZ017	۰٫۵۲	۷۸۰	۰٫۱۱	۱۰۰۰	۰٫۰۰۵
G1	۶٫۸	۷۱۰	۰٫۱۲	۲۴۰	۰٫۰۳
S4-172	۲٫۸	۱۴۵۰	۳	-	۰٫۲۸
MH2d-43	۲٫۶	۶۴۱	۲	-	۰٫۱۷

برداشت

بر اساس رده‌بندی شیمیایی، سنگ‌های مورد بررسی عبارتند از آندزیت، تراکی آندزیت، آندزیت‌بازالت، ریولیت، داسیت و ریوداسیت. بر اساس نمودارهای سنگ‌شناسی، سری ماگمایی سنگ‌های مورد بررسی دارای ماهیت آهکی-قلیایی پریپتاسیم هستند، و با استفاده از نمودارهای جداکننده محیط زمین ساختی، سنگ‌های آتشفشانی مورد نظر در نواحی فرورانش و گاهی در نواحی درون صفحه‌ای قرار گرفته‌اند، و بالا بودن نسبت‌های LILE/HFSE و LREE/HREE جزء نشانه‌های فرورانش محسوب می‌شوند. بیهنجاری منفی عناصر Nb، P و Ti و بیهنجاری مثبت Pb و K در این سنگ‌ها نشان دهنده تشابه سرشتی‌های شیمیایی این سنگ‌ها با ماگماتیسیم قوس-های آتشفشانی است.

مراجع

- [۱] بهادران ن.، ترابی ق.، احمدیان ج.، موراتا م.، "مطالعه شیمی کانی سنگ‌های آتشفشانی ناحیه غرب عروسان کبودان (شمال شرق اصفهان)"، مجله بلور شناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۱ (۱۳۸۷) ص ۹۹-۱۱۲.
- [۲] سیادی م.، نوربهشت ا.، ترابی ق.، داوودیان دهکردی ع.، "شیمی بلورها و مقایسه ترکیب کانی شناسی سنگ‌های

یکی دیگر از مهمترین بیهنجاری منفی به عنصر Nb وابسته است. رولینسون (۱۹۹۳) اعتقاد دارد که تهی‌شدگی از عنصر Nb شاخص سنگ‌های قاره‌ای است و ممکن است نشان دهنده شرکت پوسته در فرایندهای ماگمایی باشد [۲۴]. چاپل (۱۹۹۹) معتقد است که شاره‌ها و گدازه‌های ناشی از پوسته‌ای اقیانوسی فرورو با دگرنهادی گوهی گوشته‌ای بالای خود، باعث ایجاد بی‌هنجاری منفی Nb می‌شوند [۲۵]. هه و همکاران (۲۰۰۷) معتقدند که تمام ماگماهای قوس از Nb تهی‌شدگی دارند که علت آن در ماهیت فرورانش و عدم تحرک Nb و باقی ماندن آن در صفحه‌ی فرورانده شده است به طوری که این عنصر به شاره‌های آزاد شده از صفحه وارد نمی‌شود. به نظر این پژوهشگران، غنی‌شدگی سنگ‌ها از Sr، Cs، Ba، Pb و Sr را به ماهیت فرورانش وابسته می‌دانند، و چون این عناصر از تحرک نسبتاً بالایی برخوردارند و شاره‌های مشتق شده از صفحه‌ی فرورونده غنی از این عناصر هستند [۲۶]. درکل نابهنجاری منفی عناصر Nb، P و Ti که منجر به پیدایش الگوی ضربدری در روند تغییرات عناصر کمیاب نمونه‌ها شده است، می‌تواند نشان دهنده‌ی شکل‌گیری سنگ‌ها در منطقه‌ی فرورانش باشد، زیرا در منطقه‌ی فرورانش شاره‌های آزاد شده از لیتوسفر فرورونده که از Nb فقیر و از LILE غنی‌اند در گوهی گوشته افزایش می‌یابند [۲۷].

- [17] Nagudi N., Kobrel C., Kurat G., "Petrography and Geochemistry of the Singo Granite, Uganda and Implications for its Origin", *Journal of African Earth Science*, 36: (2003) 1-14.
- [18] Sun S.S., McDonough W.F., "Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD, Norry M(eds). *Magmatism in the Ocean Basins*", Geological Society of London Special Publication. 42 (1989) 313-345.
- [19] Fan W.M., Gue F., Wang Y.J., Lin G., "Late Mesozoic Calc-alkalin Volcanism of Post-orogenic Extention in the Northen Da Hinggan Mountains, Northeastern China", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121 (2003) 115-135.
- [20] Kamber B.S., Ewart A., Bruce M.C., Donald G.D., "Fluid mobile trace element constraints on the role of slab melting and implication of Archean crustal growth model", *Contrib Mineral Petrol.* 144 (2002) 38-56.
- [21] Morata D., Aguirre L., "Extensional Lower Cretaceous Volcanism in the Coastal Range(29 20-30 S), Chile: Geochemistry and Petrogenesis", *Journal of. South Amer. Earth Science*, 16: (2003) 459-476.
- [22] Glenn A.G., "The Influence of Melt Structure on Trace Element Partitioning Near the Peridotite Solidus", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147: (2004) 511-527.
- [23] Green T.H., Pearson N.J., "Ti-rich Accessory Phase Saturation in Hydrous Mafic-Felsic Compositions at High P, T", *Journal of Chemical Geology*, 54, (1986) 185-201.
- [24] Rollinson H.R., "Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation", London (Longman) (1993).
- [25] Chappell B.W., "Aluminium Saturation in I and S-type Granites and the Characterization of Fractionated Haplogranites", *Lithos*, 46, (1999) 535-551.
- [26] He Y., Zhao G., Sun M., Wilde S.A., "Geochemistry, Isotope Systematic and Petrogenesis of the Volcanic Rocks in the Zongtiao Mountain: An Alternative Interpretation for the Evolution of the Southern Margin of the North China Craton", *Lithos*, 102: (2007) 158-178.
- [27] Pearce J.A., Parkinson I.J., "Trace element models for mantel melting: application to volcanic arc petrogenesis". In: Prichard, H.M., Alabaster, T., Harris, N.B.W., Neary, C.R(Eds.), *Magmatic processes in Plate Tectonics*, Vol. 76. Geology Society of London Special Publication, (1993) 373-403.
- آتشفشانی ائوسن و برونوم‌های آذرین بازی آنها در شمال انارک(شمال شرق اصفهان)، مجله بلور شناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۱ (۱۳۸۷) ص ۱۱۳-۱۲۴.
- [۳] کریم پور م.ح.، ملک زاده سفارودی آ.، مظاهری س.ا.، حیدریان م.ح.، "ماگماتیزم و انواع کانی‌سازی مس، طلا، قلع و تنگستن در بلوک لوت"، مجموعه مقالات پانزدهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دانشگاه فردوسی، (۱۳۸۶).
- [4] Stocklin J., "Structural history and tectonics of Iran", A review- Amer: Ass. Petrol. Geol. Bull.(1968) 52,7, 1229-1258.
- [۵] امامی م.ه.، "ماگماتیزم در ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور"، کتاب شماره ۷۱ (۱۳۷۹).
- [۶] حسینی ض.، افشاریان م.، چاپچی ز.، "نقشه زمین شناسی چهارگوش شماره ک ۱۹/۱ ایران"، ده‌سلم(چاهوک)، (۱۳۷۱).
- [7] Middlemost E.A.K., "Naming materials in the magma/igneous rock system", *Earth-Science Reviews* 37(1994) 215-224.
- [8] Winchester J.A., Floyd P.A., "Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements", *Chem. Geol.*, 20 (1977) 325-343.
- [9] Gourgaud A., Vincent P.M., "Petrology of two continental alkaline intraplate series at Emi Koussi volcano, Tibesti, Chad", *J. Volcan. Geo. Res.* 129, (2003) 261-272.
- [10] Irvine T.N., Baragar W.R.A., "A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks", *Can. J. Earth sci.*, 8(1971) 523-548.
- [11] Pearce J.A., Gale G.H., "Identification of ore-deposition environment from trace element geochemistry of associated igneous host rocks", *Geological Society Special* 7(1977) 14-24.
- [12] Pearce J.A., "Source and setting of granitic rocks", *Episode* 19(1996).
- [13] Wood D.A., "The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectono magmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British tertiary volcanic province", *Earth and Plan. Sci. Lett.* 50 (1980) 11-30.
- [14] Boynton w.v., "Geochemistry of the rare earth elements. Meteorite studies. IN: Henderson P.(ed.)", *Rare earth element geochemistry*. Elsevier. (1984) 63 -114.
- [15] Krauskopf K.P., Bird D.K., "Introduction to Geochemistry", Mc Graw Hill, (1976) 788P.
- [16] Winter J.D., "An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology", Prentice Hall, (2001) 697p.