



سنگ‌شناسی، زمین‌شیمی و سنگ‌زایی مجموعه آذرین ملک سیاه کوه (شمال زاهدان) با نگرشی بر جایگاه زمین‌ساختی ماگمایی منطقه

محسن جوان خوش خلق^۱، محمد علی آرين^{۱*}، مرتضی رزم آرا^۲، حسین شیخی کاریزکی^۱

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت مقاله: ۹۸/۶/۲، نسخه نهایی: ۹۸/۹/۱۷)

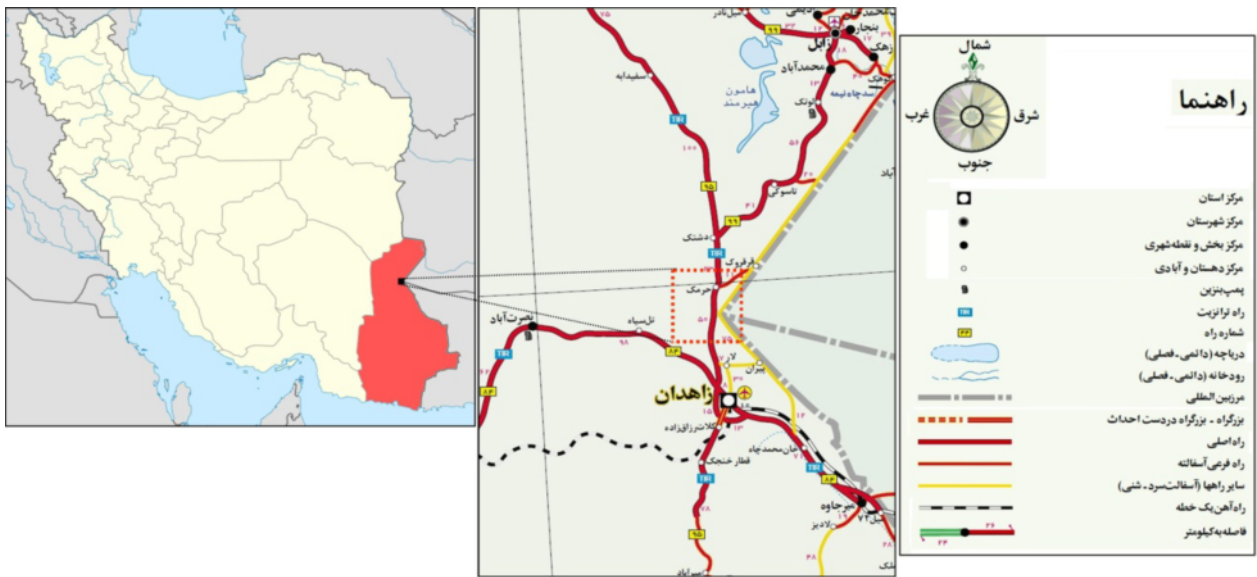
چکیده: مجموعه آذرین ملک سیاه کوه، در حدود ۳۵ کیلومتری شمال شهر زاهدان و در میان روستاهای لار پایین، قرقروک و حرک قرار دارد. بر اساس نتایج نمودارهای نامگذاری سنگ‌ها، سنگ‌های آتشفشانی مجموعه ملک سیاه کوه ترکیب آندزیت بازالتی و تراکی آندزیتی دارند و سنگ‌های آذرین نفوذی آن ترکیب گرانودیوریت و دیوریتی نشان می‌دهند. بر پایه بررسی‌های صحرایی و سنگ‌شناسی، نقشه سنگ‌شناسی منطقه تهیه شد. مهم‌ترین کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌های آذرین منطقه را پلاژیوکلاز، آمفیبول، کلینوپیروکسن، کوارتز و فلدسپات قلیایی تشکیل می‌دهند. از نظر سری ماگمایی، سنگ‌های آذرین منطقه ویژگی نیمه قلیایی از نوع آهکی قلیایی تا شوشونیتی نشان می‌دهند. اغلب سنگ‌های منطقه از عناصر سنگ دوست بزرگ یون (LILE) و عناصر خاکی نادر سبک (LREE) غنی شده و از عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) و عناصر خاکی نادر سنگین (HREE) تهی شده‌اند. این ویژگی‌های تهی شدگی و غنی شدگی در عناصر نام برده در سنگ‌های منطقه، با محیط زمین‌دینامیکی شامل فعالیت ماگمایی پهنه فرورانش سازگار است. توده‌های نفوذی ویژگی گرانیت‌های نوع I، متآلومین، منیزیمی و گرانیت‌های نوع کردیلرایی را نشان می‌دهند. تعیین ویژگی‌های خاستگاه ماگمای مادر بر اساس عناصر نادر و خاکی نادر نمونه‌های منطقه نشان می‌دهد که این سنگ‌ها از ذوب بخشی یک گوشته خاستگاه با ترکیب اسپینل لرزولیت تشکیل شده‌اند. توده‌های مورد بررسی در نمودارهای تعیین محیط زمین‌ساختی در گستره قوس از نوع کرانه فعال قاره‌ای و با ویژگی قوس عادی واقع هستند.

واژه‌های کلیدی: جدایش؛ پهنه فرورانش؛ مجموعه ملک سیاه کوه؛ هضم.

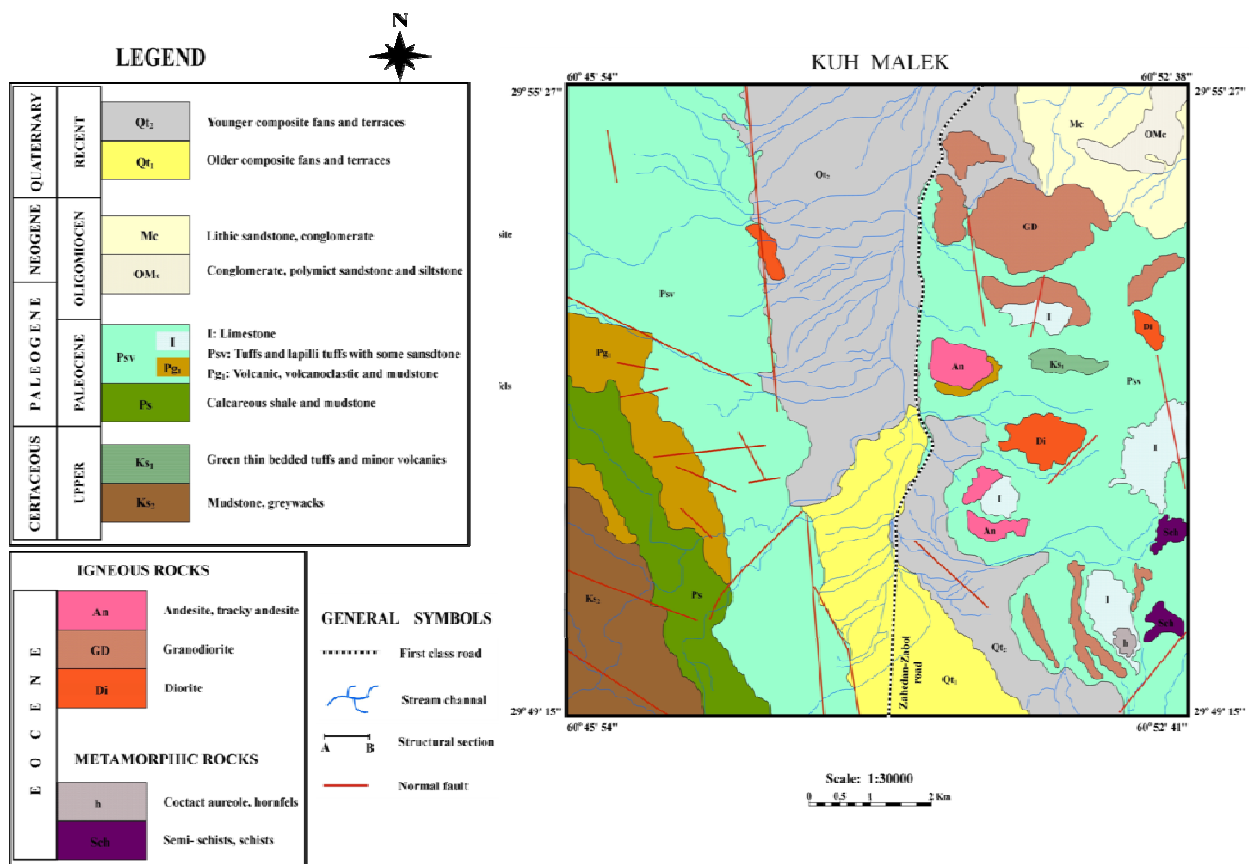
مقدمه

ارتفاع‌های بلندی از سنگ‌های آتشفشانی (ملک سیاه کوه) وجود دارند. این بیرون زدگی‌ها حدود ۱۰ کیلومتر در راستای جاده دیده می‌شوند (شکل ۲). بر پایه سن سنگ‌های آذرین منطقه سن سنجی به روش پتاسیم- آرگون، الیگوسن تعیین شده است [۲]. بررسی‌های سنگ‌نگاری بر سنگ‌های آذرین مجموعه ملک سیاه کوه چهار فاز آذرین را در این مجموعه نشان می‌دهد که از نظر زمین‌شیمیایی این توده‌ها، آهکی قلیایی و متآلومینی هستند و از گرانیتوئیدهای نوع I محسوب می‌شوند [۳].

مجموعه ملک سیاه کوه در جنوب شرق ایران، از توابع استان سیستان و بلوچستان و در گستره طول‌های جغرافیایی $60^{\circ}45'$ و $60^{\circ}52'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $29^{\circ}49'$ و $29^{\circ}55'$ شمالی، در پهنه جوش خورده سیستان [۱] قرار دارد که محل تلاقی سه کشور ایران، افغانستان و پاکستان است. راه دسترسی به این منطقه جاده آسفالت زاهدان به سمت زابل و نهبندان است (شکل ۱). در حدود ۳۵ کیلومتری این جاده، از سمت زاهدان و پس از پاسگاه کوله سنگی، در بخش شرقی جاده، مجموعه‌ای از گنبد‌های کوچک و بزرگ نفوذی و همچنین



شکل ۱ جایگاه جغرافیایی و راه‌های ارتباطی منطقه مورد پژوهش.



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد پژوهش که با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای، صحرایی و سنگ‌نگاری رسم شده است.

از نمونه‌های برداشت شده، حدود ۵۰ مقطع نازک برای بررسی بافت، سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و دگرسانی تهیه و توسط میکروسکوپ قطبشی بررسی شدند. برای بررسی‌های زمین-

روش پژوهش طی عملیات صحرایی، از واحدهای مختلف رخنمون یافته به طور تصادفی و اصولی انجام نمونه‌برداری شد.

روش پژوهش

شیمیایی (بررسی سنگ‌شناسی و سنگ‌زایی سنگ‌های آذرین منطقه) ۲۲ نمونه از نمونه‌های با کمترین دگرسانی به روش طیف‌سنجی فلورسانس پرتوی X (XRF) و طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) در آزمایشگاه دانشگاه فردوسی مشهد تجزیه شدند. برای تفسیر داده‌های زمین‌شیمیایی از نرم افزارهای GCDkit و Minpet استفاده شد.

زمین‌شناسی منطقه مورد پژوهش

ایالت ساختاری سیستان، زمین درز ناشی از برخورد پهنه لوت با قطعه افغان است که روند کلی آن شمالی-جنوبی است [۱] (شکل ۳ الف). این پهنه شامل دو مجموعه آمیزه فیولیتی رتوک در غرب و نه در شرق است که به وسیله حوضه رسوبی سفیدابه از هم جدا می‌شوند (شکل ۳ ب). اگرچه دو گسل نهپندان و هریود آشکارا مرزهای شرقی و غربی این پهنه را مشخص می‌کنند، ولی مرزهای شمالی و جنوبی آن چندان روشن نیست. این پهنه در سمت شمال در اثر عملکرد گسل‌های راستا لغز شاخه شاخه می‌شود و پس از گرایش به سمت شمال غربی و غرب تا جنوب بیرجند و بصیران ادامه یافته، گرانیت شاه کوه را دور زده و در جنوب بیرجند به صورت گسل، از لوت جدا می‌شود. در مرز جنوبی نیز، روندهای شمال-جنوب به راستای جنوب شرقی مایل شده و در یک راستای غربی-شرقی تا پاکستان ادامه می‌یابد. جدایش قطعه افغان (قطعه هلمند) از قطعه لوت در زمان سنومانین انجام شده که با جایگیری گوشته اقیانوسی و انباشت رسوب‌های فلیشی همراه بوده است. البته گسترش بیشتر منشورهای فزاینده و سنگ‌های دگرگونی در بخش شرقی حوضه فلیشی و همچنین برونزدهای کلسیمی-قلیایی پالئوسن-اؤسن دلایلی برای فرورانش قطعه لوت به زیر قطعه افغان هستند [۲،۱]. در حوضه فلیشی شرق ایران، سنگ‌های قدیمی‌تر از کرتاسه رخنمون ندارند. پوسته‌های اقیانوسی، آتشفشانی کرتاسه پسین، نهشته‌های فلیشی پالئوسن-اؤسن و سرانجام سنگ‌های ماگمایی (درونی-بیرونی) این ناحیه، به دلیل قرار گیری در یک پهنه برخوردی، نظم چینه‌ای ندارند. جدا از پوسته اقیانوسی، رخساره‌های سنگی بیشتر از نوع شیل و ماسه سنگ‌های دریایی کرتاسه پسین تا اواخر اؤسن هستند. نبود ردیف‌های رسوبی دریایی جوان‌تر از اؤسن، به حرکت‌های کوهزایی اؤسن-الیگوسن نسبت داده می‌شود که با رخداد زمین‌ساختی پیرنه قابل قیاس

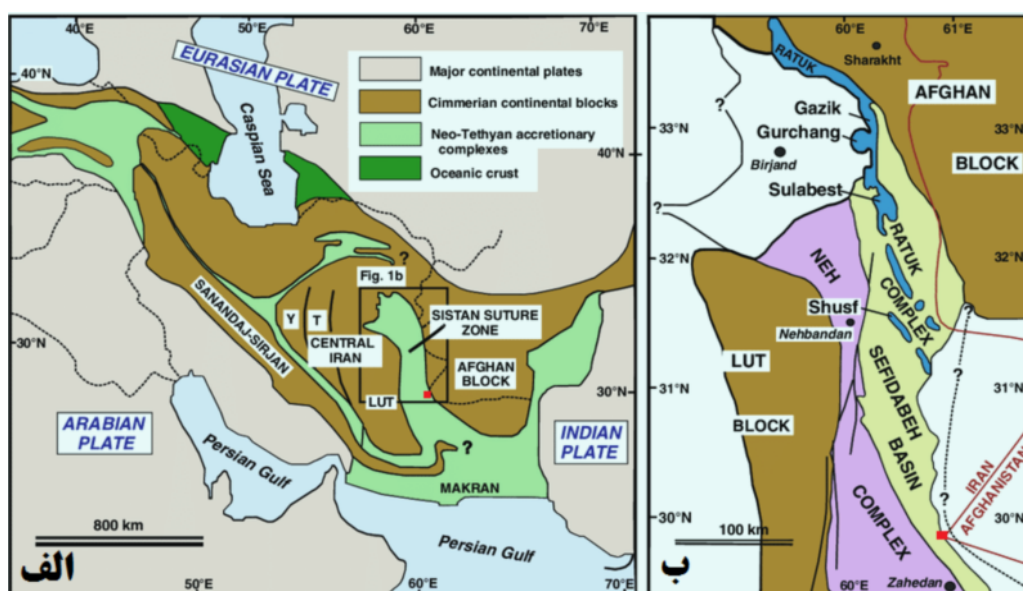
است. البته فعالیت‌های آتشفشانی کم بوده‌اند که نشانگر رخساره‌های آتشفشانی-رسوبی هستند. افزون بر گدازه‌های آندزیتی، پیرامون زاهدان و غرب میرجاوه، توده‌های گرانیتی-دیوریتی به درون فلیش‌ها تزریق شده‌اند که این خود نشانگر گرانیت‌زایی همزمان با کوهزایی پیرنن است. فعالیت‌های ماگمایی ناحیه از زمان نئوژن تا کواترنر ادامه داشته است. در شمال غرب و غرب زابل، گستره‌های وسیعی از روانه‌ها و سنگ‌های آذرآواری الیگوسن-میوسن وجود دارند. گدازه‌های کواترنر کهن‌تر تخت‌های بازالتی هستند که در راستای گسل‌های عمده به سطح زمین رسیده‌اند. آتشفشان تفتان جوان‌ترین تکاپوی ماگمایی است که در شرایط کنونی در مرحله گوگردزایی است، [۴]. سنگ‌های رسوبی منطقه مورد بررسی که توده‌های آذرین در آن‌ها نفوذ نموده‌اند شامل شیل‌های لای دار، مارن، سنگ-های آهکی و کمتر ماسه سنگ هستند. سن این سنگ‌های رسوبی پالئوسن پسین-اؤسن بوده و بنابراین سن این توده‌ها پس از اؤسن است [۳]. با تعیین سن پرتوسنجی به روش K-Ar بر هورنبلندهای منطقه، سن این توده‌ها 4 ± 27.2 و 5 ± 28.8 میلیون سال برآورد شده است [۲]. بنابراین سن توده‌های نفوذی این مجموعه، الیگوسن پسین است. این سن با سن توده‌های نفوذی و کم عمق کوه لار و نوار آساگی در نوار لار-آساگی یکی است [۵]. از کرتاسه میانی تا کنون (شکل ۴)، ناحیه زمین درز سیستان دستخوش چند رویداد مهم زمین‌ساختی شده و همگرایی پایدار میان قطعه‌های لوت و افغان منجر به چین خوردگی و گسل‌های برخوردی-لغزشی گسترده و پیچیده شده است [۱].

سنگ‌نگاری

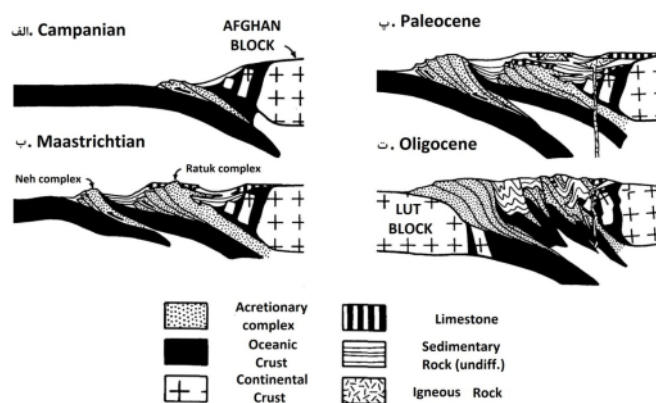
۱) واحد آتشفشانی: واحد آندزیتی بر اساس بررسی‌های سنگ-نگاری ترکیب آندزیت بازالتی و تراکی آندزیت با بافت پورفیری با خمیره ریز دانه و یا ریزسنگی تا شیشه‌ای دارد. آندزیت بازالتی: درشت بلورها (۴۰ تا ۵۵ درصد) به ترتیب درصد فراوانی شامل پلاژیوکلاز (۴۵ تا ۵۰ درصد)، آمفیبول (۲۰ تا ۳۵ درصد) و کلینوپروکسن (۵ تا ۱۰ درصد) هستند. روتیل و آپاتیت سوزنی به عنوان فاز فرعی و کلریت و کانی‌های کدر به عنوان فاز ثانویه حضور دارند. بلورهای پلاژیوکلاز با ماکل چند ریخت به صورت شکل‌دار تا بی‌شکل و با اندازه‌های متوسط و درشت (کوچکتر از ۱ تا ۵ میلی‌متر) هستند و از دید ویژگی‌های نوری، ترکیب آندزین-الیگوکلاز دارند. بافت‌های

مشخص معمولاً به رنگ سبز و به ندرت قهوه‌اي قابل ديده است (شکل ۵ ب). در بعضی نمونه‌ها، هورنبلندهاي با حالت منطقه بندي وجود دارند که به احتمال بسيار تغييرات آهن و منيزيم را نشان می‌دهند. بلورهاي پيروکسن که از دید ویژگی‌هاي نوري بيشتر از نوع کليوپيروکسن (اوژيت) هستند در مواردی اوراليتی و يا به کلريت تبديل شده‌اند (شکل ۵ پ). پيروکسن‌ها و پلاژیوکلازها گاه بافت گلومروپوريفری نشان می‌دهند. درشت بلورها و خميره در برخی جاها به مجموعه‌اي از کلريت، اپيدوت، کربنات و به مقدار کمتر کاني‌هاي رسي، سريسيت و تجزيه شده‌اند به طوري که گاهی آمفيبول‌ها و پيروکسن‌ها را را تنها می‌توان از روی شکل خارجي تشخيص داد.

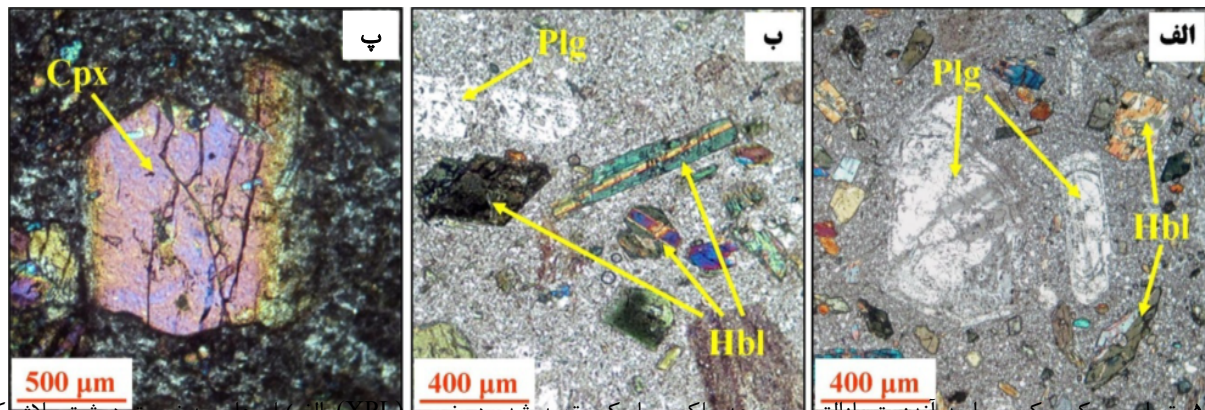
غيرتعادلي شامل منطقه‌بندي نوساني (شکل ۵ الف)، بافت غربالي و ليه باز رشد يافته از جنس فلدسپار پتاسيم در پلاژیوکلازها ديده می‌شوند که می‌توانند نشانگر آميختگی ماگمائي در مخزن ماگما، کاهش فشار همه جانبه يا افزايش فشار بخار آب بر اثر بالاآمدگی ماگما [۶] و يا دگرنهادی پتاسيمي باشند. پلاژیوکلازها در خميره اين سنگ‌ها نیز به صورت تيغه‌هاي کوچک‌تر وجود دارند. آمفيبول از نوع هورنبلند پس از پلاژیوکلاز فراوان‌ترين کاني تشکيل دهنده آندزيت- هاست که به صورت درشت بلور و نیز بلورهاي کوچک‌تر در خميره وجود دارد. هورنبلند به صورت شکل‌دار تا نيمه شکل‌دار در مقاطع طولی (ستونی) و عرضی (شش وجهی) با رخ‌هاي



شکل ۳ الف) جایگاه زمین‌شناسی ایران در نوار چین خورده آلپ- هیمالیا [۱]. ب) ساختار کلی بخشی از پهنه جوش خورده سیستان (پهنه فلیش شرق ایران) که در مرز بین قطعه‌های لوت و افغان به وجود آمده و شامل سه واحد جداگانه مجموعه رتوک، حوضه سفیدابه و مجموعه نه است و تکامل ساختاری فرضی زمین درز شرق ایران [۱]. منطقه مورد پژوهش با مربع قرمز مشخص شده است.



شکل ۴ تکامل زمین‌ساختی ناحیه زمین درز سیستان [۱].



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی واحد آندزیت بازالتی مجموعه ملک سیاه کوه تهیه شده در نوری (XPL). الف) بلورهای به نسبت درشت پلاژیوکلاز دارای منطقه‌بندی، ب) مقطع طولی و عرضی هورنبلند که دارای منطقه‌بندی است و پ) بلور پیروکسن همراه با شکستگی‌های عمیق و لبه‌های حل شده.

۵۵ درصد)، کوارتز (۲۵ تا ۳۵ درصد)، فلدسپات قلیایی (۱۰ تا ۱۵ درصد) و بیوتیت (۵ تا ۱۰ درصد) هستند. کانی‌های فرعی شامل آمفیبول، آپاتیت و اسفن و کانی‌های ثانویه شامل اپیدوت، کلریت و کانی‌های کدر هستند. پلاژیوکلازها اغلب به صورت بلورهای به نسبت بزرگ شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار در نمونه‌ها وجود دارند. پلاژیوکلازهای کوچک‌تر در زمینه و بین بلورهای بزرگ‌تر قرار دارند. آنها دارای ماکل چندریخت، آلبیت-پریکلین و آلبیتی هستند و گاهی نیز منطقه‌بندی نوسانی از خود نشان می‌دهند (شکل ۷ الف). بر پایه زاویه خاموشی و ضریب شکست، قسمت‌های مرکزی ترکیب آندزین تا الیگوکلاز و قسمت‌های لبه‌ای آلبیت دارند. در برخی از بلورهای پلاژیوکلاز، لبه بلور دچار خوردگی و حل شدگی شده است که این امر می‌تواند نشان دهنده ناپایداری شرایط تشکیل بلور و تغییر شرایط مذاب از نظر ترکیب و دما باشد. به علت دگرسانی شدید در منطقه، پلاژیوکلازها گاهی به سوسوریت، اپیدوت و کلریت دگرسان شده‌اند. کوارتز به صورت بی‌شکل و گاهی به صورت گرد شده وجود دارد که اغلب دارای خاموشی موجی است (شکل ۷ ب). آنها در اندازه‌های ریز تا متوسط و به ندرت با بلورهای درشت دیده می‌شوند و معمولاً حالت شکسته شده دارند. شکستگی‌ها و خاموشی موجی می‌تواند بیانگر اثر نیروهای زمین‌ساختی پس از تبلور باشد که این امر با زمین‌ساخت به نسبت شدید منطقه همخوانی دارد. درون بعضی از کوارتزها، میانبرهای آپاتیت و بیوتیت وجود دارد. فلدسپات قلیایی از نوع اورتوکلاز است. این کانی‌ها به صورت نیمه شکل‌دار و به ندرت شکل‌دار و به اندازه‌های کوچک تا متوسط دیده می‌شوند (شکل ۷ پ) و اغلب به کانی‌های رسی دگرسان شده-

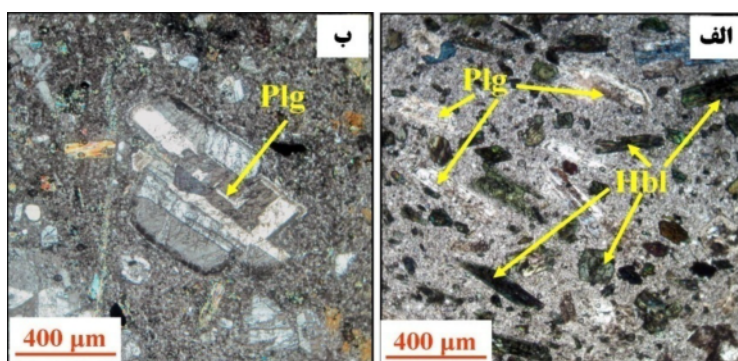
تراکی آندزیت: حدود ۴۰ تا ۴۵ درصد بافت سنگ را درشت بلورها و باقی آن را کانی‌های ریز خمیره تشکیل می‌دهند. درشت بلورها به ترتیب درصد فراوانی شامل پلاژیوکلاز (۳۵ تا ۴۰ درصد)، فلدسپات قلیایی (۲۰ تا ۲۵ درصد) و آمفیبول (۲۰ تا ۲۵ درصد) هستند (شکل ۶ الف). بیوتیت و کوارتز سوزنی، به عنوان فاز فرعی و سربسیت و کانی‌های کدر به عنوان فاز ثانویه حضور دارند. بلورهای پلاژیوکلاز دارای اندازه حدود ۰/۵ تا ۱/۵ میلیمتر هستند و با توجه به بررسی‌های سنگ‌نگاری، ترکیب آنها از آندزین تا الیگوکلاز متغیر است. آنها اغلب شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار و دارای بافت چندریخت هستند و در برخی نمونه‌ها حالت منطقه‌بندی نوسانی نیز نشان می‌دهند (شکل ۶ ب). فلدسپات قلیایی از نوع سانیدین ریز بلور است که اغلب به صورت تیغ‌های ریزسنگی در خمیره وجود دارند. آمفیبول از نوع هورنبلند بوده و بیش‌ترین و مهم‌ترین کانی فرومنیزین در تراکی آندزیت‌هاست. به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار در مقاطع طولی (ستونی) و عرضی (شش‌وجهی) وجود دارند (شکل ۶ الف). درشت بلورها بافت گلمروپورفیری نیز نشان می‌دهند. فاز انباشتی کابرو شامل انباشت کانی‌های مافیک درشت بلور (پیروکسن ماکل‌دار و پلاژیوکلاز) با بافت دانه‌ای در متن برخی از نمونه‌ها به صورت اتولیت وجود دارد.

۲) واحد آذرین نفوذی: بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری، ترکیب آنها گرانودیوریت و دیوریت با بافت دانه‌ای دانه متوسط تا ریز است که در بعضی دیوریت‌ها بافت آن‌ها بسیار ریز و تا حدی پورفیری است.

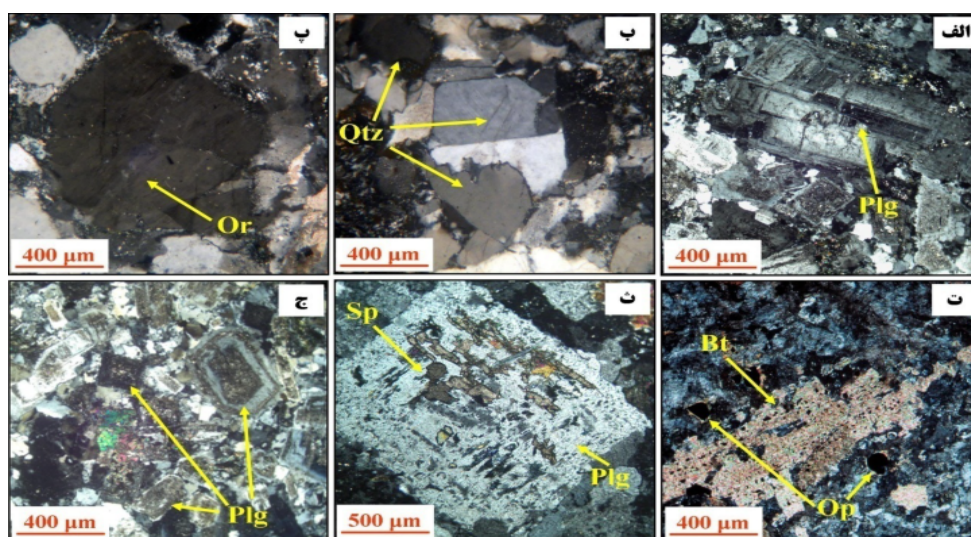
گرانودیوریت: درشت بلورهای تشکیل دهنده سنگ (۵۰ تا ۷۰ درصد) به ترتیب درصد حجمی فراوانی شامل پلاژیوکلاز (۴۰ تا

دار دیده می‌شود. آمفیبول‌ها در نور طبیعی به رنگ سبز مایل به آبی و به احتمال بسیار از نوع سدیمی هستند. اپیدوت به صورت تک بلور یا اجتماعی از بلورهای کوچک در اثر دگرسانی پلاژیوکلازها تشکیل شده است. سوسوریت شدن پلاژیوکلازها در نتیجه عملکرد محلول‌های گرمایی منجر به تشکیل اپیدوت-ها می‌شود. کلریت در نتیجه تجزیه کانی‌هایی چون بیوتیت‌ها ایجاد شده است. همه یا بخشی از نمونه‌های دارای بیوتیت، به کلریت تجزیه شده است. کانی‌های رسی اغلب در اثر دگرسانی فلدسپات‌های قلیایی و پلاژیوکلازها ایجاد گردیده‌اند به طوری که در بعضی از نمونه‌ها، سطح کانی‌ها کدر و مات شده و منظره‌ای غبار آلود به وجود آمده است (شکل ۷ ج).

اند. در بعضی از بلورهای اورتوکلاز، میانبارهایی از بیوتیت و آپاتیت یافت می‌شود. آنها در برخی نمونه‌ها، به صورت پرتیتی نیز دیده می‌شوند. بیوتیت در نور طبیعی به رنگ‌های قهوه‌ای روشن و سبز زیتونی دیده می‌شود (شکل ۷ ت)، شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار در اندازه ریز تا متوسط بوده و گاهی نیز به صورت ثانویه و بی‌شکل در اندازه کوچک دیده می‌شود. روی بعضی از کانی‌ها از قبیل پلاژیوکلاز کانی‌هایی چون اسفن، کلریت و تشکیل شده‌اند (شکل ۷ ث). بعضی از بلورهای بیوتیت به شدت کلریتی شده‌اند و گاهی از بلور بیوتیت تنها شکل اولیه باقی مانده است. آمفیبول از نوع هورنبلند است و به تعداد کم در بعضی از نمونه‌ها به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل-



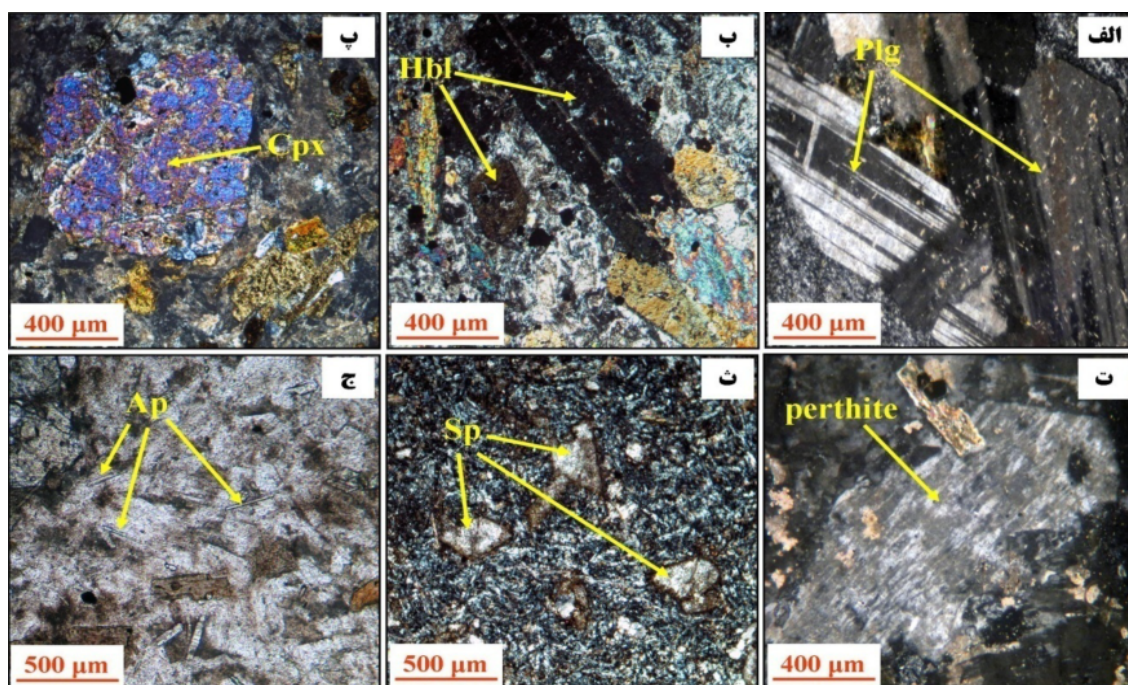
شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی واحد تراکی آندزیت مجموعه ملک سیاه کوه در نور XPL: الف) بافت پورفیری جریان‌ی در تراکی آندزیت‌ها، درشت بلورهای شاخص این سنگ‌ها شامل پلاژیوکلاز و آمفیبول هستند ب) بلورهای پلاژیوکلاز با ماکل آلیتی و چندریخت.



شکل ۷ تصاویر میکروسکوپی واحد گرانودیوریتی مجموعه ملک سیاه کوه در وضعیت نوری XPL: الف) پلاژیوکلازهای بهم چسبیده با ماکل آلیت-پریکلین و نیز منطقه بندی نوسانی با حاشیه واکنشی به همراه پلاژیوکلازهای کوچک‌تر که به کانی‌های رسی دگرسان شده‌اند. ب) بلور کوارتز بی‌شکلی که دارای شکستگی است. پ) اورتوکلاز تا حدودی پرتیتی شده. ت) بلور کشیده بیوتیت دارای میانبارهای کدر. ث) اسفن‌های بی‌شکلی تشکیل شده بر روی پلاژیوکلاز دارای حاشیه واکنشی و انحلالی. ج) پلاژیوکلاز به همراه فلدسپات آلکان که در اثر دگرسانی به کانی‌های رسی تبدیل شده است.

هورنبلند سبز بوده و اندازه آن‌ها متوسط تا کوچک هستند و به صورت بی شکل و نیمه شکل‌دار ستونی کشیده وجود دارند (شکل ۸ ب). در برخی نمونه‌ها، شاهد تشکیل بیوتیت‌های ثانویه بر آمفیبول هستیم. پیروکسن از نوع کلینوپروکسن (اوژیت) است و به صورت نیمه شکل‌دار در نمونه‌ها وجود دارد. پیروکسن اغلب دارای شکستگی و حل شدگی است به طوری که در این نقاط، کانی‌های کدر و بیوتیت‌های ثانویه تشکیل شده‌اند (شکل ۸ پ). پیروکسن‌های بزرگ‌تر به صورت خال خال کانی‌هایی چون اسفن، بیوتیت و هورنبلندهای کوچک‌تر را دربر گرفته‌اند. فلدسپات قلیایی به مقدار کم به صورت بی شکل از نوع ارتوز پرتیتی وجود دارد (شکل ۸ ت). اسفن به صورت خود شکل و گوه‌ای در نمونه‌ها قابل دیده است. وجود اسفن نشان از وجود یک ماگمای مافیک‌تر غنی از تیتانیم و دارای نرخ هسته سازی کمتر در مقایسه با بلورهای تیغه‌ای شکل ریز پلاژیوکلاز دارد (شکل ۸ ث). بیوتیت‌ها به شکل ثانویه به صورت لکه‌ای از تبدیل پیروکسن و آمفیبول در شرایط ماگمایی بوجود آمده‌اند، رنگ آن‌ها از قهوه‌ای روشن (گاهی) تا شکلاتی تغییر می‌کند. آپاتیت‌ها به صورت سوزن گون در اغلب نمونه‌ها پراکنده هستند (شکل ۸ ج).

دیوریت: درشت بلورهای تشکیل‌دهنده سنگ (۴۰ تا ۵۵ درصد) به ترتیب درصد حجمی فروانی شامل پلاژیوکلاز (۴۵ تا ۵۵ درصد)، آمفیبول (۱۵ تا ۲۰ درصد) و پیروکسن (۵ تا ۱۰ درصد) هستند. کانی‌های فرعی شامل کوارتز، فلدسپات قلیایی، اسفن، آپاتیت و بیوتیت و کانی‌های ثانویه شامل کانی‌های رسی، اپیدوت، زوئیزیت و کانی‌های کدر هستند. پلاژیوکلازها به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار با ماکل آلبیت، آلبیت-پریکلین و برخی با ساختار منطقه‌ای دیده می‌شوند (شکل ۸ الف). اندازه آن‌ها از ریز بلور (به صورت تیغک‌های کوچک ریزسنگی) تا درشت بلور (بیش از ۲ سانتیمتر) متغیر است. بر پایه زاویه خاموشی و ضریب شکست، ترکیب آن‌ها بین آندزین تا آلبیت است. در برخی از نمونه‌ها، بخش‌های مرکزی پلاژیوکلاز به کانی‌های رسی، سوسوریت و اپیدوت دگرسان شده‌اند. برخی از بلورهای پلاژیوکلاز به صورت غربالی و همچنین با لبه‌های کنگره‌ای و تا اندازه‌ای موج گون دیده می‌شوند؛ به عبارت دیگر، مرز اغلب آن‌ها با کانی‌های دیگر و یا با هم به صورت کنگره‌ای و نامنظم است. همچنین بلورهای تیغه‌ای شکل کوچک پلاژیوکلازهای کلسیمی‌تر با اسفن دارای رابطه پوست ماری بارزی هستند. آمفیبول‌ها اغلب از نوع



شکل ۸ تصاویر میکروسکوپی واحد دیوریتی مجموعه ملک سیاه کوه در وضعیت نوری XPL: الف) پلاژیوکلاز با ماکل تغییر شکل یافته. ب) هورنبلند به صورت نیمه شکل‌دار کشیده و شکل‌دار شش وجهی. در بخش‌های حاشیه‌ای و مرکزی آن انحلال صورت گرفته است. پ) پیروکسن نسبتاً درشت که در بخش‌های حاشیه‌ای، مرکزی و در راستای کلیواژها انحلال صورت گرفته است. ت) ارتوز پرتیتی با لکه‌های روشن آلبیت. ث) بلورهای خود شکل اسفن در زمینه‌ای از پلاژیوکلاز. ج) سوزن‌های آپاتیت که بر روی بلور بزرگ پلاژیوکلاز تشکیل شده‌اند.

زمین شیمی

وابسته به مجموعه آهکی قلیایی پتاسیم بالا هستند. گرانودیوریت با مقدار LREE بالا و مقدار HREE پایین مشخص می‌شود. همه شواهد زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی نشان می‌دهد که سنگ‌های کوارتز دیوریت، کوارتز مونوزدیوریت و گرانودیوریت در ملک سیاه کوه به ظاهر در نتیجه تبلوربخشی یک ماگمای خاستگاه تشکیل شده‌اند. بر پایه نمودار TAS [7] برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه ملک سیاه کوه، این سنگ‌ها شامل طیف پیوسته‌ای از آندزیت و تراکی آندزیت هستند (شکل 9 الف). بر اساس نمودار نام گذاری سنگ‌های نفوذی TAS [8]، گستره ترکیبی توده گرانیتوئیدی میزبان منطقه شامل دیوریت و گرانودیوریت است (شکل 9 ب).

رده‌بندی شیمیایی و نامگذاری: داده‌های زمین‌شیمیایی توده‌های آذرین برای بررسی ساختارهای سنگ‌زا و جایگاه زمین-ساختی سنگ‌های آذرین در منطقه مورد پژوهش استفاده شد. فراوانی اکسیدهای اصلی از 22 نمونه از این مجموعه با استفاده از XRF و عناصر کمیاب و خاکی نادر (REE) با استفاده از ICP-MS از بررسی شد (جدول 1). نتایج نشان می‌دهد که تراکی آندزیت‌ها دارای مقدار SiO_2 در گستره 55/46 تا 60/45٪ و مقدار قلیایی ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) حدود 6 تا 10٪ بوده، اما سنگ‌های حدواسط منطقه دارای مقدار SiO_2 از 55٪ تا 60 درصد وزنی هستند. افزون بر این، مقدار SiO_2 در گرانودیوریت‌ها از 63/31 تا 64/1٪ و کل مقدار قلیایی‌ها از 5/56 به 6/46٪ متغیر است. در نتیجه، این گرانودیوریت‌ها

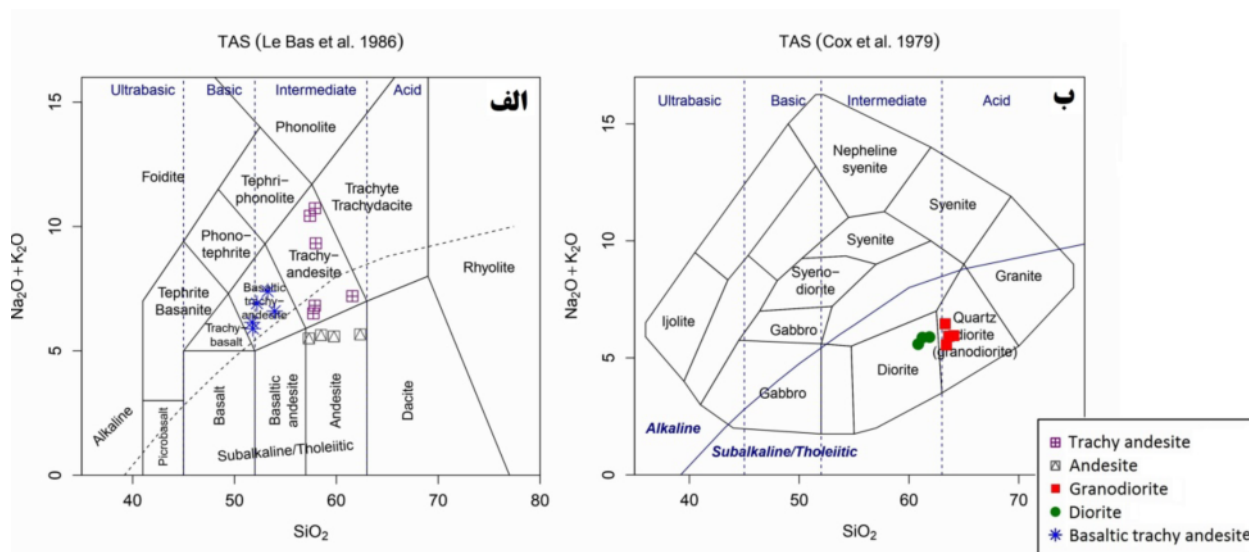
جدول 1 نتایج آنالیز عناصر اصلی، کمیاب و خاکی نادر سنگ‌های منطقه ملک سیاه کوه به روش XRF (درصد وزنی) و ICP-MS (ppm).

نمونه	LL8	LJ6	LK6	LM10	LF14	Km21	Km35	Km49	LL7	Km33	Km41	Km30	Km44	Km57	LK10	Km59	Km28	Km20	Km18	Km11	Km68	Km74
SiO ₂	50.59	51.06	51.35	52.09	52.15	55.46	55.96	56.1	56.11	56.34	57.28	57.62	59.1	60.45	61.56	60.84	61.22	61.87	63.21	63.42	63.64	64.1
TiO ₂	0.76	0.88	0.72	0.73	0.77	0.47	0.49	0.64	0.68	0.63	0.68	0.53	0.69	0.6	0.57	0.57	0.61	0.31	0.28	0.22	0.29	0.26
Al ₂ O ₃	13.22	12.19	11.26	13.09	12.16	17.16	14.87	18.47	11.28	14.52	18.68	12.73	11.57	12.93	14.93	14.93	16.56	16.11	16.17	15.64	17.42	15.65
Fe ₂ O ₃	10	8.24	8.71	8.05	8.04	4.97	7.9	5.34	7.71	7.62	5.19	6.02	5.17	6.58	5.51	5.51	4.39	5.5	5.44	5.48	5.34	4.89
MnO	0.18	0.14	0.2	0.18	0.15	0.09	0.17	0.09	0.16	0.16	0.16	0.15	0.12	0.15	0.12	0.12	0.15	0.08	0.23	0.18	0.12	0.16
MgO	8.13	10.29	9.47	9.54	7.47	2.52	5.86	2.34	6.48	5.96	4.31	7.21	9.25	4.73	4.19	4.19	4.76	3.12	2.23	3.27	3.16	2.74
CaO	9.28	9.23	9.07	9.2	9.88	4.21	6.8	2.87	7.82	4.87	2.74	8.21	7.04	5.18	5.97	5.97	4.62	4.85	2.5	4.84	3.14	4.21
Na ₂ O	2.99	2.08	1.98	2.16	2.58	2.46	2.36	2.86	2.18	2.25	2.88	2.15	2.4	2.22	2.22	2.22	2.76	2.26	2.97	3.12	2.21	2.22
K ₂ O	2.02	3.72	4.81	5.07	2.92	6.82	2.01	6.65	2.46	2.46	5.86	2.17	2.27	2.67	2.16	2.16	2.16	2.62	2.62	2.44	2.71	2.62
P ₂ O ₅	0.41	0.59	0.78	0.69	0.41	0.62	0.22	0.68	0.51	0.58	0.54	0.27	0.22	0.49	0.2	0.2	0.29	0.28	0.23	0.14	0.1	0.13
LOI	1.22	1.17	1.22	1.24	1.47	2.27	2.21	2.56	2.56	1.08	1.16	0.98	1.56	0.99	1.82	2.02	1.74	2.78	1.1	0.99	1.64	1.64
Total	100	99.72	99.67	99.92	100	99.92	99.92	99.92	99.92	99.89	99.89	99.67	99.67	99.74	99.85	100.6	99.85	99.72	99.96	99.96	99.92	99.92
V	9.48	10.22	10.19	99.64	99.25	137.4	127.1	139.5	96.5	129.2	89.4	96.5	94.6	96.8	99.1	99.6	11.02	142.5	129.4	128.8	120.2	110.7
Cr	12.4	22.8	51.7	12.8	47.9	18.0	12.5	12.9	12.2	21.2	19.8	12.4	12.8	12.5	18.0	10.6	11.7	15.9	15.1	15.0	14.2	11.8
Ni	52.6	61.5	55.7	52.9	54.2	57.2	52.4	77.6	52.7	60	55	77.6	62.8	59.4	51.8	59.2	78.1	90.2	98.6	101.4	71.2	91.5
Co	2.46	2.92	2.89	2.22	2.74	11.4	12.1	14.2	2.22	11.5	12.6	12.7	12.1	13	19.2	12.2	11.5	11.9	13	12.2	12.8	14.5
Zn	76.2	55.9	14.9	10.2	58.9	56.4	74.4	55.2	101.7	51.4	62.2	57	57.5	54.4	87.6	55.8	55.4	52.1	52.8	50.5	58.2	64.2
Ga	16.5	14.2	14.1	15	15.9	15	16.2	14.2	14.2	15.4	14.2	17.8	14.4	18.1	22.2	21.2	17.4	18.1	19	19.6	18.2	17.8
Sn	2	2.2	1.8	2.2	2.2	2	2	1.9	1.9	2.2	2	2	2	2.4	1.8	1.8	2	2.9	1.8	2	2	2
W	2.2	4.8	6.1	4.6	12.5	1.5	1.2	1.2	2.1	1.2	1.4	1.2	1.2	1.1	7.9	1	1	1.8	1.1	1.2	1.4	0.9
Br	12.5	12.1	15.8	16.2	12.2	22.4	21.5	22.6	14.15	22.6	22.6	23.2	22.1	22.0	12.4	20.4	22.6	25.2	22.4	22.6	22.4	22.8
Sr	7.45	18.7	7.91	9.55	6.21	21.9	27.5	28.12	7.10	20.55	22.5	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2
Rb	79.7	131.8	125.4	118.5	96.7	74.2	78.8	99.1	75.5	82.4	117.2	125.7	99.2	128.5	78.9	115.7	128.1	128.9	152.4	125.2	158.2	158.2
Nb	5.7	12	7.4	10.2	10.1	10.5	15.7	10.2	8.6	14.5	10.7	11.6	11.4	11.1	10.6	11.5	11.6	12.2	11.1	11.9	10.9	12.2
Y	19.6	18.9	20.6	19.5	20.2	11.2	15.2	11.1	16.9	12.4	12.9	11.2	12.6	11.8	14.1	12.6	12.6	12.2	12.5	12.2	11.5	14.7
Zr	87.8	41.9	55.2	66.8	24.5	70.2	89.6	85.4	72.2	70.6	88.7	81.1	88.7	10.5	20.9	91.4	106.1	99.5	120	128.2	142.9	142.5
Cs	1.5	8.2	5.6	1.2	2.8	2.4	2.7	2.1	1	2.9	2.6	1.2	1.5	2.2	4.9	1.8	4.6	5.7	10.6	6.2	7.1	8.4
Hf	2.8	1.8	2.1	2.4	1.2	1.9	2.4	2.8	2.6	1.8	2.1	2.4	2.5	2.2	1	2.4	4.1	5.7	5.1	4.6	4.2	5.2
Ta	0.5	1.4	0.7	0.9	1.4	1.2	0.9	0.5	0.8	1.1	1.4	0.8	0.8	0.9	0.9	1.2	1.2	1.1	0.9	1.2	1.1	0.9
Th	2.9	2.6	5.8	6.1	2.7	11.4	12.2	10.6	5.2	11.4	10.9	11.9	11.8	11.4	4.7	11.2	12.7	11.9	12.1	12.1	11.8	10.2
U	1.2	1.7	2.1	2	1.2	1.7	2.6	2.1	1.8	2.5	2.4	2.8	2.4	2.4	1.7	2.7	2.2	2.2	2.8	2.8	2.4	2.7
La	17.1	22.2	22.4	26.2	17.7	20.6	22.1	16.2	20.9	22.2	17.7	21.4	25.5	20.1	21.2	21.2	15.6	22.8	19.6	26.7	25.8	24.2
Ce	22.5	45	46.1	50.1	35.2	59.2	44.6	62.4	29.5	41.4	29.8	55.2	57.4	41.8	40.6	46.4	56.8	69.9	46.4	47.9	49.6	41.9
Pr	4.4	6	6.2	6.5	4.8	5.1	4.9	5	5	5.4	4.8	5.9	6.1	4.4	5.1	6.5	5.8	8.1	7.2	4.5	6.4	6.7
Nd	18	22.7	22.9	27.2	18.6	18.6	21.1	22.2	20.4	19.2	21.9	22.4	17.8	25.2	19.2	21.2	24.1	27.2	16.4	25.1	24.2	24.2
Sm	4.9	5.5	6.4	6.8	5.1	6.7	5.1	5.6	5.1	6.2	5.2	5.5	6.4	4.8	6.4	6.8	2.7	6.7	5.1	4.2	5.1	6.7
Eu	1.9	1.8	2.1	2.5	1.7	1.7	1.4	1.8	1.9	1.7	1.6	1.9	1.1	1.1	1.8	0.9	1	1.1	1.2	1	1.1	1.1
Gd	2.7	4.9	5.2	5.5	4.4	3.4	3.6	4.1	2.7	4.2	4.8	5.1	2.7	4.9	2.5	3.4	6.1	5.8	5.2	3.9	5.1	5.7
Th	0.7	0.8	0.8	0.9	0.7	0.7	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.9	0.8	0.7	0.9	0.7	0.9	0.9
Dy	4	4.2	4.5	4.2	4.2	2.9	2.5	2.7	2.5	2.4	4.2	4.1	4.2	2.6	2.9	4.2	4.5	4.6	4.1	2.6	5.2	2.7
Ho	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.6	0.6	0.5	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.7	0.9	0.6	0.9	0.8	0.9	0.7	0.9	0.9
Er	2.1	2	2.1	2.1	2.1	1.4	1.8	1.7	1.8	2.1	1.9	2.1	2.2	2.1	1.4	1.4	2.9	2.8	2.5	2.2	2.1	2.4
Tm	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Yb	2.5	2.2	2.2	2.2	2.5	1.5	1.9	2	1.9	2.2	2.2	2.1	2.5	2.2	1.5	2.1	2.4	2.6	2.5	2.2	2.1	2.4
Lu	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.4	0.3	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.5	0.5

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-01-03]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.4.8]

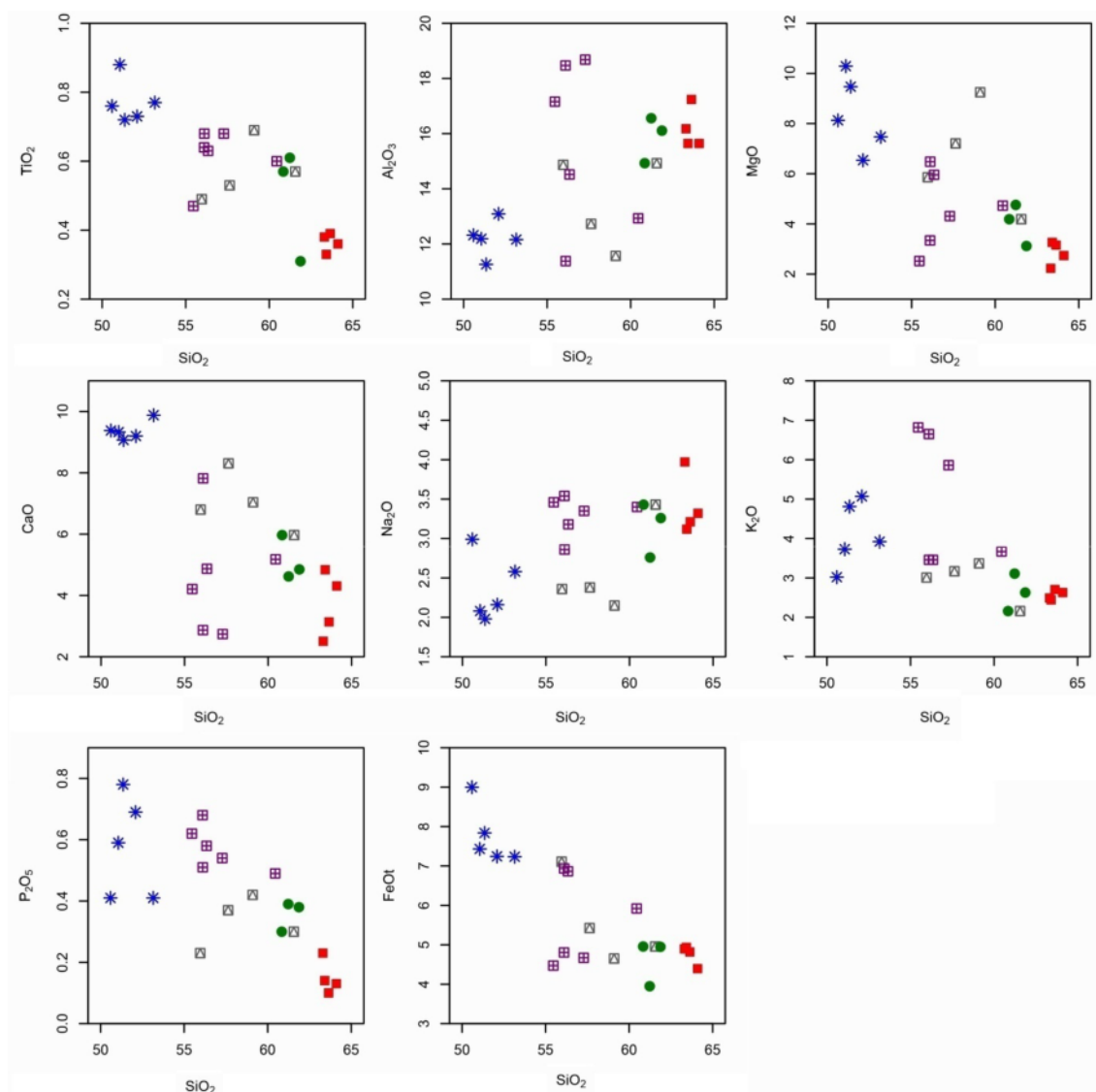
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.591]



شکل ۹ الف) موقعیت سنگ‌های آتشفشانی منطقه بر روی نمودار مجموع قلیایی نسبت به سیلیس TAS، از [۷]، ب) موقعیت نمونه‌های سنگی آذرین نفوذی منطقه ملک سیاه کوه بر روی نمودار مجموع قلیایی نسبت به سیلیس TAS، از [۸].

افزایش SiO_2 در ماگماها روندی افزایشی نشان می‌دهد. مقادیر FeO و MgO در مذاب‌ها به ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی سنگ‌های خاستگاه، مقدار ذوب‌بخشی، میزان سیال‌ها، درجه جدایش یافتگی ماگما و شرایط جدایش ماگمایی بستگی دارد. این دو اکسید در نمونه‌های سنگی منطقه مورد بررسی، با افزایش SiO_2 روندی کاهشی دارند (شکل ۱۰). روند نزولی اکسیدهای Fe و Mg بیانگر سازگاری آن‌ها طی جدایش است. این عناصر در کانی‌های دیرگدازی چون الیوین، پیروکسن و مگنتیت وارد می‌شوند و بنابراین با افزایش SiO_2 ، کاهش نشان می‌دهند. TiO_2 و P_2O_5 در سنگ‌های منطقه، مقادیر پایینی دارند که از ویژگی‌های سنگ‌های وابسته به فرورانش محسوب می‌شود [۱۰]. همچنین، بررسی تغییرات عناصر در نمودارهای هارکر بیانگر پراکندگی در روند زمین‌شیمیایی برخی عناصر اصلی در سنگ‌های منطقه است. به نظر می‌رسد که چنین روندهای پراکنده عناصر در نمودارهای هارکر افزون بر جدایش ماگمایی برآمده از تبلوربخشی، در اثر عوامل مختلف سنگ‌شناسی دیگر چون آلودگی، انباشت درشت بلورها و یا آمیختگی ماگمایی نیز باشد. به احتمال بسیار ماگماهای منطقه در اثر عوامل مختلف سنگ‌شناسی، اغلب ویژگی‌های اولیه خود را از دست داده‌اند.

زمین‌شیمی عناصر اصلی: در سنگ‌های آذرین منطقه گستره تغییرات اکسیدهای اصلی به صورت SiO_2 از ۵۰٫۵۹ تا ۷۰٫۵۹ wt% تا ۴٫۳۹ تا ۱۱٫۲۶ wt% Al_2O_3 ، ۱۸٫۶۸ تا ۲۲٫۲۳ wt% Fe_2O_3 از ۲٫۱۵ تا ۱۰ wt% MgO از ۲٫۲۳ تا ۱۰٫۲۹ wt% CaO ، ۲٫۱۶ تا ۶٫۸۲ wt% Na_2O از ۲٫۰۸ تا ۳٫۹۷ wt% K_2O و ۲٫۱۶ تا ۶٫۸۲ wt% است (جدول ۱). نمودارهای تغییرات هارکر اکسیدهای اصلی برای سنگ‌های آذرین منطقه در شکل ۱۰ آمده است. بر این اساس، سنگ‌های آذرین منطقه برای اکسید CaO با افزایش مقدار سیلیس، روند کاهشی نشان می‌دهند. این روند کاهشی می‌تواند بیانگر جدایش پلاژیوکلاز طی جدایش ماگمایی باشد، زیرا این عناصر بیشتر در ساختار فلدسپارها به ویژه پلاژیوکلازها وارد می‌شوند. همچنین CaO در ساختار پیروکسن و آمفیبول نیز وارد شده که باعث ایجاد روند کاهشی در آن طی جدایش ماگمایی شده است. Al_2O_3 با افزایش مقدار سیلیس روند افزایشی نشان می‌دهد، به احتمال بسیار Al_2O_3 در درجه ذوب بخشی یکسان در فشارهای کم، در مقایسه با فشارهای بالا، افزایش نشان می‌دهد [۹]. اگرچه در سنگ‌های منطقه، پراکندگی‌هایی در عنصر Al دیده می‌شود که می‌تواند به دلیل متحرک بودن آن باشد. Na_2O که جزء اکسیدهای ناسازگار محسوب می‌شود، به طور کلی با



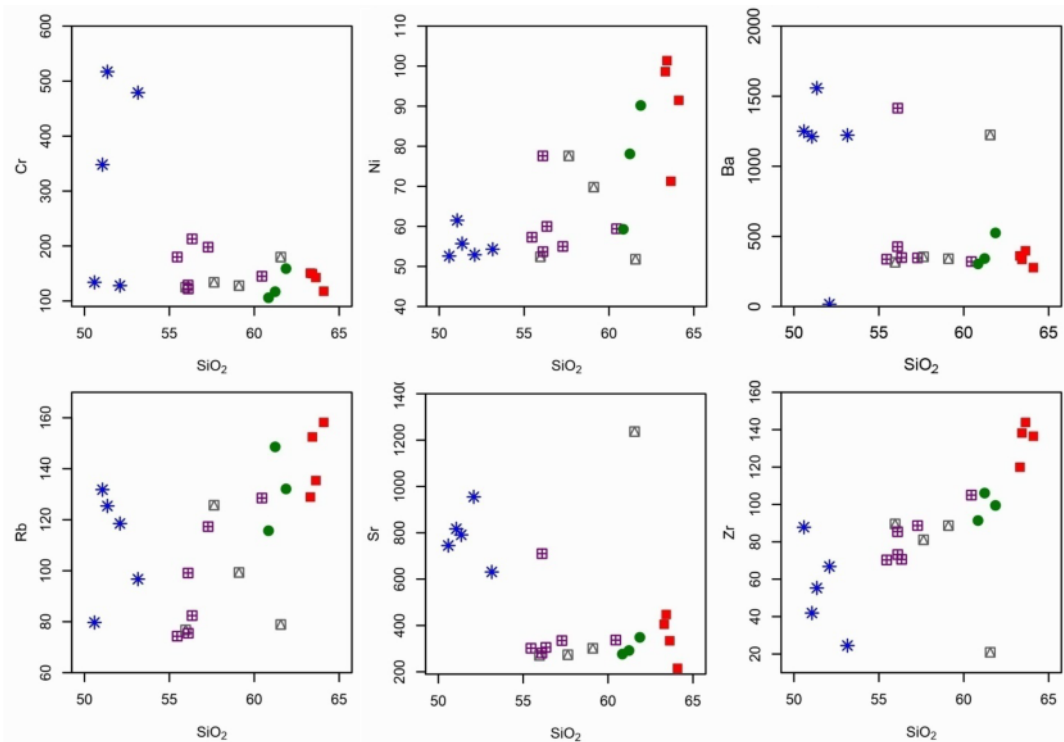
شکل ۱۰ نمودارهای پراکندگی مجموعه عناصر اصلی در مقابل SiO_2 برای سنگ‌های آذرین منطقه ملک سیاه کوه.

باریم در کانی‌های فلدسپار قلیایی و بیوتیت جایگزین پتاسیم می‌شود، به طوری که در فلدسپارهای قلیایی تا حدود ۱۱/۴۵ و در بیوتیت‌ها تا ۲۳/۵ برابر مذاب غنی شدگی نشان می‌دهد [۱۲]. عنصر Sr نمودار هارکر پراکندگی قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهد. این امر به احتمال بسیار به دلیل انباشتگی پلاژیوکلاز در سنگ‌های منطقه است. افزون بر پلاژیوکلازها، این عنصر جانشین K در فلدسپات‌های پتاسیم‌دار نیز می‌شود (شکل ۱۱). نشان می‌دهد. فراوانی عنصر Cr در سنگ‌های منطقه پایین است که این ویژگی در عناصر سازگار بیانگر آن است که این سنگ‌ها برآمده از ماگماهایی بسیار جدایش یافته‌اند. مقدار عنصر Ni در سنگ‌های منطقه با افزایش مقدار SiO_2 افزایش

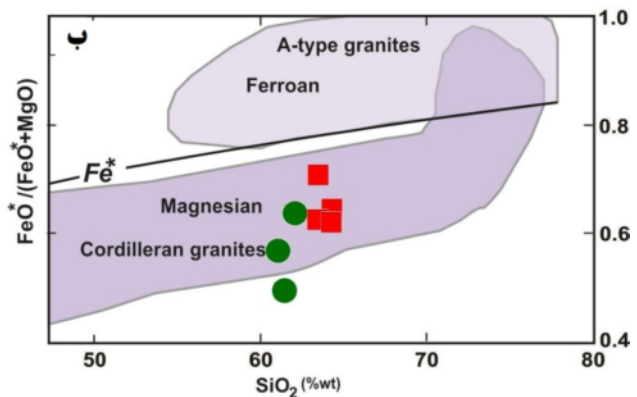
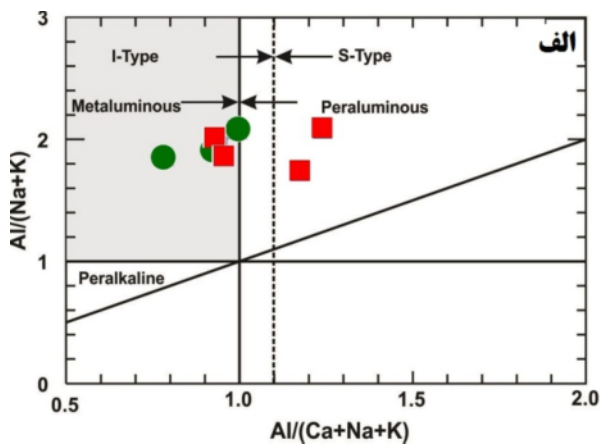
زمین‌شیمی عناصر کمیاب: عناصر کمیاب در مقایسه با عناصر اصلی، در متمایز کردن فرایندهای سنگ شناسی کارایی بیشتری دارند [۱۱]. به طور کلی، مقدار عنصر Rb در سنگ‌های منطقه با افزایش مقدار SiO_2 افزایش می‌یابد. روند افزایشی دیده شده در عنصر Rb با جدایش بلوری کانی‌های فلدسپار قلیایی و بیوتیت همخوانی دارد (شکل ۱۱). مقادیر عناصر Ba و Sr با افزایش جدایش ماگمایی کاهش می‌یابد. عنصر Zr طی جدایش، روند افزایشی نشان می‌دهد. زیرکونیم در فراورده‌های نهایی جدایش به وفور یافت می‌شود و به دلیل شعاع یونی بزرگ وارد کانی‌های رایج سنگ ساز نمی‌شود. عنصر Cr در نمونه‌های آذرین منطقه با افزایش جدایش، روند کاهشی

نمودار ضریب اشباع از آلومین [۱۵،۱۴] که به صورت $A/CNK (Al/Ca+Na+K)$ تعریف شده است توده گرانیتوئیدی منطقه ویژگی مت‌آلومین نشان می‌دهد (شکل ۱۲ الف). در این نمودار، ویژگی نوع I سنگ‌های منطقه نمایان است. در نمودار $Fe^*/(FeO^*+MgO)$ که به صورت نسبت به SiO_2 است [۱۶]، سنگ‌های منطقه در گستره منیزیم‌دار و گرانیت‌های نوع کردیلرایی قرار دارند (شکل ۱۲ ب).

می‌یابد (شکل ۱۱). جدای از تبلور بخشی اکسیدهای آهن و سیلیکات‌های فرومنیزین و یا انباشت احتمالی این فازها، فراوانی عناصر Cr و Ni بیشتر ناشی از فازهای کانی شناسی گوشته بوده و تا حد زیادی مستقل از عوامل زمین‌دینامیکی محیط جایگزینی ماگما (چون اجزاء درگیر در فرایند فرورانش) است [۱۳]. به منظور تعیین ویژگی‌های زمین‌شیمیایی توده گرانیتوئیدی منطقه از نمودارهایی نیز استفاده شد. بر اساس



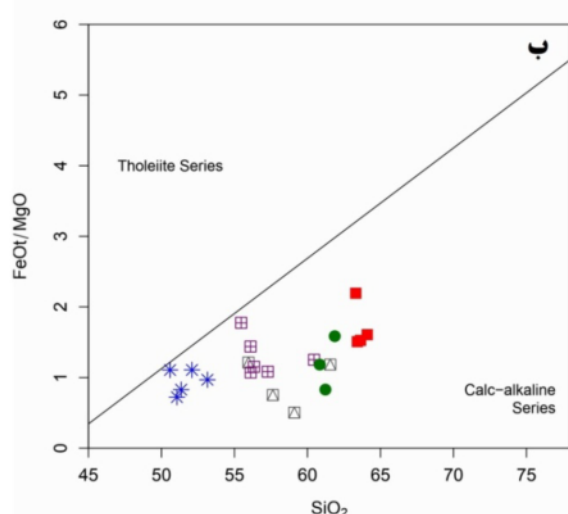
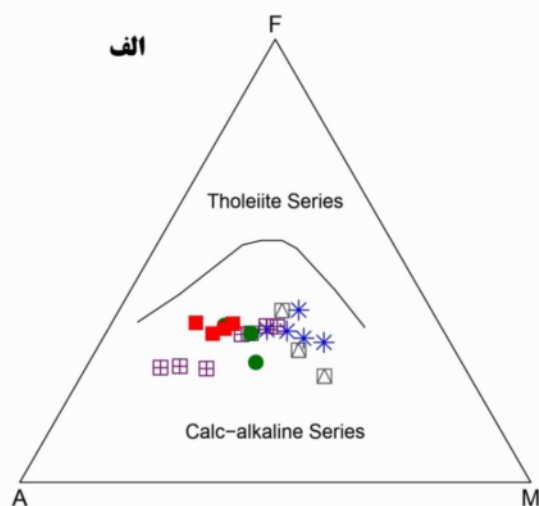
شکل ۱۱ نمودارهای تغییرات برخی از عناصر کمیاب نسبت به SiO_2 برای سنگ‌های آذرین منطقه ملک سیاه کوه.



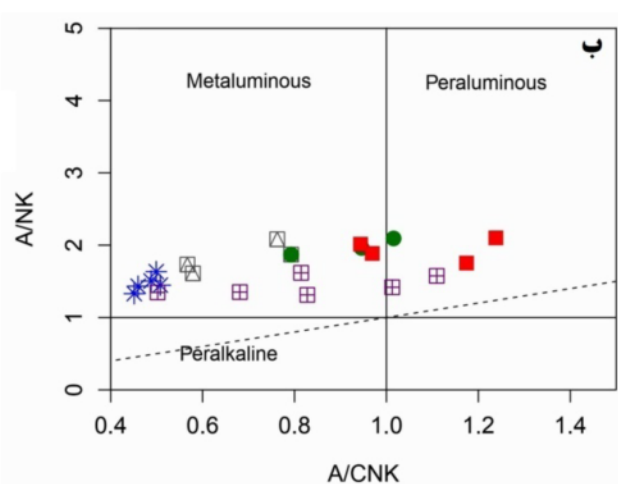
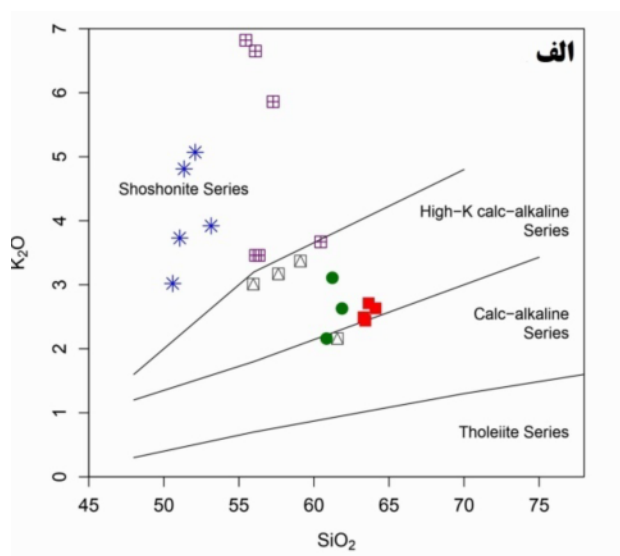
شکل ۱۲ الف) نمودار تعیین میزان اشباع از آلومین در گرانیت‌های منطقه بر اساس اندیس Shand، مرز بین گرانیت‌های I و S از [۱۴] می‌باشد. ب) موقعیت نمونه‌های گرانیتی منطقه بر روی نمودار $FeO^*/(FeO^*+MgO)$ در برابر SiO_2 از [۱۶]. تمامی نمونه‌ها در قلمرو گرانیتوئیدهای کردیلرایی و نوع منیزیمی واقع شده‌اند.

شناسي، اين سنگها بخشي از ايالت آهكي قليايي هستند كه از قطعه لوت به منطقه سيستان گسترش مي يابد. از اين رو، ويژگي هاي زمين شيميائي مجموعه آذرين ملك سياه كوه، به اجزاي يك فرورانش شديد مربوط مي شود. بررسي شاخص اشباع از آلومين اين نمونه ها بر پايه نمودار $A/NK=Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ [۲۰] كه از معيارهاي بنيادين در تشخيص گرانيتويدهاي نوع I از نوع S است [۱۳]، نشان مي دهد كه سنگهاي آذرين ملك سياه كوه بيشتر متاآلومين و از نوع I هستند (شكل ۱۴ ب).

تعيين ماهيت ماگمائي: به منظور تفكيك روندهاي جديش توليئي و آهكي قليايي، در نمونه هاي منطقه، از نمودار AFM [۱۷] استفاده شد. بر اساس اين نمودار، سنگهاي آذرين منطقه در گستره آهكي قليايي قرار دارند (شكل ۱۳ الف). اين ويژگي سنگهاي آذرين منطقه در نمودار FeO^*/MgO نسبت به SiO_2 [۱۸] نيز مشخص است (شكل ۱۳ ب)، به طوري كه نمونه هاي داراي نسبت FeO^*/MgO بالاتر ويژگي توليئي از خود نشان مي دهند. آنها در نمودار K_2O-SiO_2 [۱۹]، بيشتر سرشت آهكي قليايي پتاسيم بالا تا شوشونيتي نشان مي دهند (شكل ۱۴ الف). بنابراين، با توجه به روابط شيميائي و سنگ



شكل ۱۳ تمایز سری ساب آلکالن به دو سری کالک آلکالن و توله ایتی در نمودارهای الف) AFM [۱۷]، ب) $FeO/MgO-SiO_2$ از [۱۸]، برای سنگهای منطقه ملك سياه كوه.

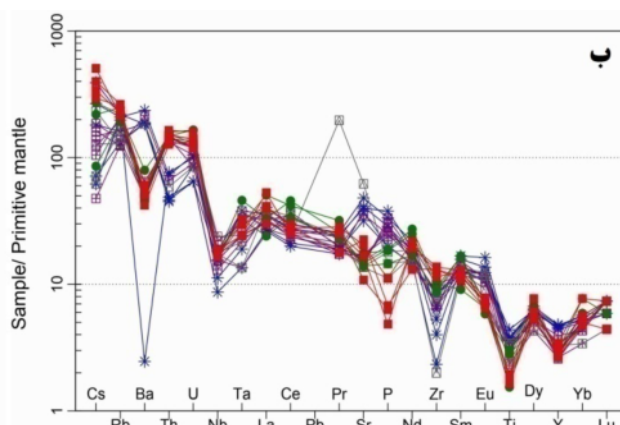
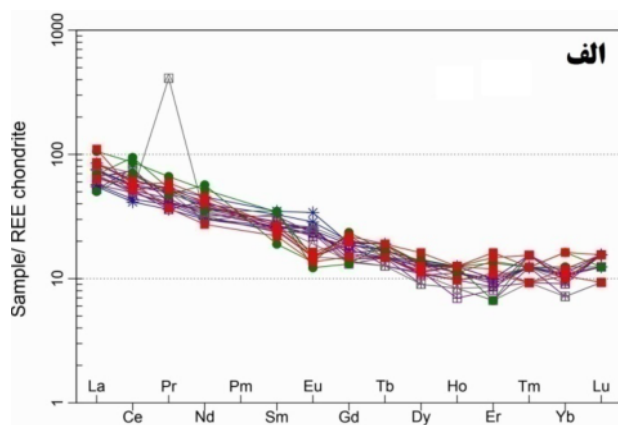


شكل ۱۴ الف) نمودار k_2O-SiO_2 ارائه شده توسط [۱۹]، ب) نمودار $A/NK=Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ ارائه شده توسط [۲۰].

کمتر از ۱٪ باشد. همچنین سنگ‌های منطقه ناهنجاری منفی در عنصر Eu نشان می‌دهند. این ویژگی به همراه روند منفی Sr در نمودارهای تغییرات، ناشی از جدایش کانی پلاژیوکلاز است.

در نمودار عناصر کمیاب و خاکی نادر بهنجار شده به گوشته اولیه [۲۴]، سنگ‌های منطقه در عناصر Ba, Nb, Ta, Sr, Ti, Eu, Zr و ناهنجاری منفی دارند و در عناصر Cs, Rb, Th, U, LREE و P ناهنجاری مثبت نشان می‌دهند (شکل ۱۵ ب). ویژگی‌های تهی‌شدگی و غنی‌شدگی در این عناصر در سنگ‌های منطقه با محیط زمین‌دینامیکی شامل فعالیت ماگمایی پهنه فرورانش همخوانی دارد [۲۲، ۲۵-۲۷]. از سوی دیگر ناهنجاری منفی در عناصر Nb-Ta و Ti و نیز غنی‌شدگی در عنصر Th می‌تواند در ارتباط با دخالت مولفه‌های فرورانشی در سنگ‌زایی سنگ‌های منطقه، دگرنهادی گوشته‌ای یا آلیایش پوسته قاره‌ای باشد [۲۸]، زیرا چنین ناهنجاری‌هایی در سنگ‌های برآمده از پوسته قاره‌ای نیز دیده می‌شود [۲۹، ۳۰]. ناهنجاری‌های منفی P و Ti نیز جدایش کانی‌های آپاتیت و اکسیدهای Fe-Ti را نشان می‌دهد. مقادیر بالای عنصر Rb و مقدار پایین Sr و Ti با مذاب‌های شاخص پوسته‌ای همخوانی دارد [۳۱، ۳۲]، که آلودگی نسبی با پوسته پسین طی دگرگونی ماگمایی را به همراه فرآیند هضم و تبلور بخشی (AFM) نشان می‌دهد.

نمودارهای عنکبوتی عناصر کمیاب و خاکی نادر: الگوی عناصر خاکی نادر (REE) بهنجار شده به کندریت [۲۱] در (شکل ۱۵ الف) نشان داده شده است. همه نمونه‌ها، با وجود سرشت ماگمایی و ترکیب سنگ‌شناسی متفاوت، دارای الگوهای فراوانی مشابه هستند. نتیجه آشکار بررسی زمین‌شیمیایی REE‌ها غنی‌شدگی LREE در مقایسه با MREE‌ها و HREE‌هاست. میزان غنی‌شدگی LREE نسبت به کندریت بین ۵۰ تا ۱۰۰ برابر است. این ویژگی می‌تواند بیانگر حضور گارنت به عنوان فاز باقیمانده در مذاب باشد، چرا که گارنت ضریب توزیع پسین برای HREE‌ها دارد [۱۲]. از طرف دیگر، این الگوها می‌تواند ناشی از درجات محدود و کم ذوب‌بخشی گوشته خاستگاه این سنگ‌ها باشد [۲۲]. همچنین این روندها می‌تواند توسط جدایش هورنبلند (از MREE‌ها) و زیرکن (HREE) نیز توضیح داده شود. جدایش آمفیبول می‌تواند ویژگی‌های عناصر اصلی را در مذاب‌های محیط‌های قوسی تغییر دهد. آمفیبول مقادیر SiO_2 بالاتر و TiO_2 پایین‌تری دارد. از این رو، چنین جدایشی به طور موثری مذاب‌های باقیمانده را به سمت SiO_2 بالاتر و TiO_2 پایین‌تر سوق خواهد داد [۲۳] که با روند دیده شده برای سنگ‌های منطقه همخوانی دارد. همچنین، حضور فازهای فرعی چون اسفن، زیرکن و آپاتیت اثر زیادی بر الگوی REE‌ها گذاشته و ضرایب جدایش آن‌ها را بالا می‌برند، هر چند که فراوانی این کانی‌ها



شکل ۱۵ نمودارهای عنکبوتی نمونه‌های منطقه ملک سیاه کوه. الف) الگوهای توزیع عناصر نادر خاکی نمونه‌های منطقه، بهنجار شده به کندریت [۲۱]، ب) بهنجار شده با گوشته اولیه [۲۴].

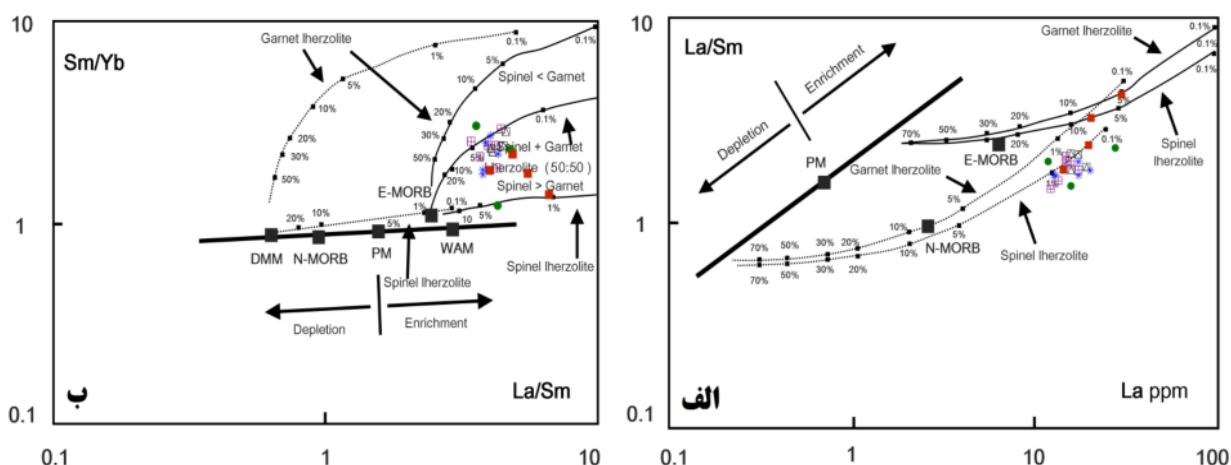
سنگ زايي و خاستگاه زمين ساختي ماگمائي

تعيين ويژگي هاي سنگ خاستگاه نمونه هاي سنگي: براي تعيين ويژگي هاي خاستگاه ماگمائي مادر سنگ هاي آذرين ملك سياه كوه از نمودارهاي مرجع [33] استفاده شد. جاياگاه نمونه ها در نمودار La نسبت به La/Sm نشان مي دهد كه خاستگاه گوشته غني شده از LREEها براي تشكيل ماگمائي مادر لازم است (شكل 16 الف). نمودار La/Sm نسبت به Sm/Yb نيز نشان مي دهد كه ماگمائي مادر برآمده از ذوب بخشي يك خاستگاه اسپينل - لرزوليت با كمی گارنت بوده است (شكل 16 ب).

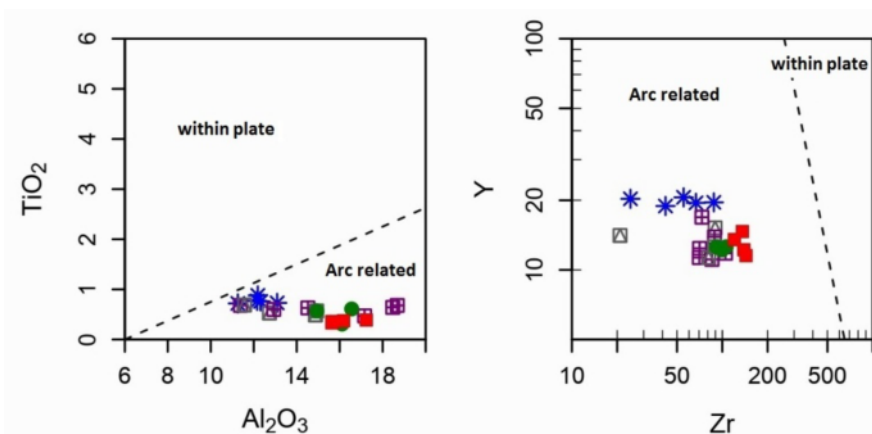
خاستگاه زمين ساختي ماگمائي سنگ هاي منطقه: براي تعيين محيط زمين ساختي سنگ هايي كه در محيط هاي زمين ديناميكي متفاوتي تشكيل شده اند، نمودارهاي متنوعي بر اساس عناصر اصلي، كمياب و خاكي نادر ارائه شده است. در نمودارهاي TiO₂ نسبت به Al₂O₃ [34] و Y نسبت به Zr [35]

[35] كه براي تفكيك محيط هاي قوسي از محيط هاي درون صفحه اي ارائه شده اند، سنگ هاي آذرين منطقه ملك سياه كوه در گستره كمان هاي ماگمائي ناشي از فرورانش قرار دارند (شكل 17).

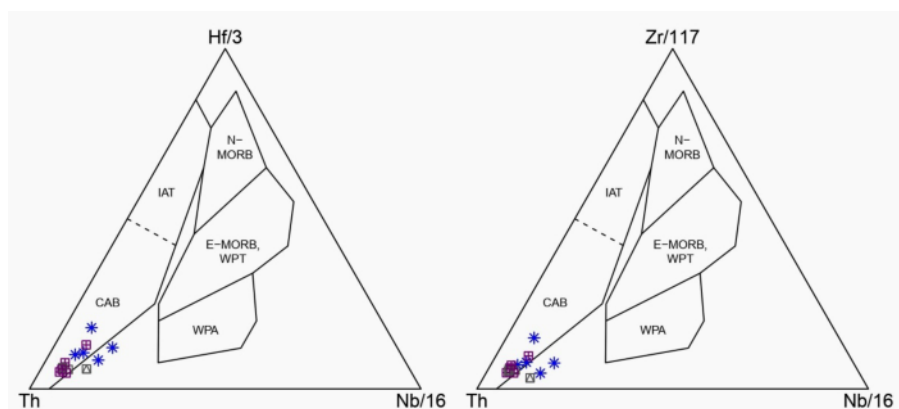
به منظور تعيين محيط زمين ديناميكي سنگ هاي آتشفشاني منطقه ملك سياه كوه از نمودارهاي سه متغيره Th- Zr/117-Nb/16 و Hf/3-Th- Nb/16 [36] استفاده شد كه بر اساس آنها، همه نمونه ها ويژگي محيط هاي قوسي را نشان داده و در گستره بازالت هاي قوسي واقع مي شوند (شكل 18). به منظور بررسي دقيق تر محيط زمين ديناميكي توده هاي نفوذی منطقه، از نمودارهاي مرجع [37]، استفاده شد. كه همه نمونه ها در گستره گرانيت هاي كمان هاي آتشفشاني (VAG) و خارج از محيط هم زمان با برخورد قرار دارند (شكل 19).



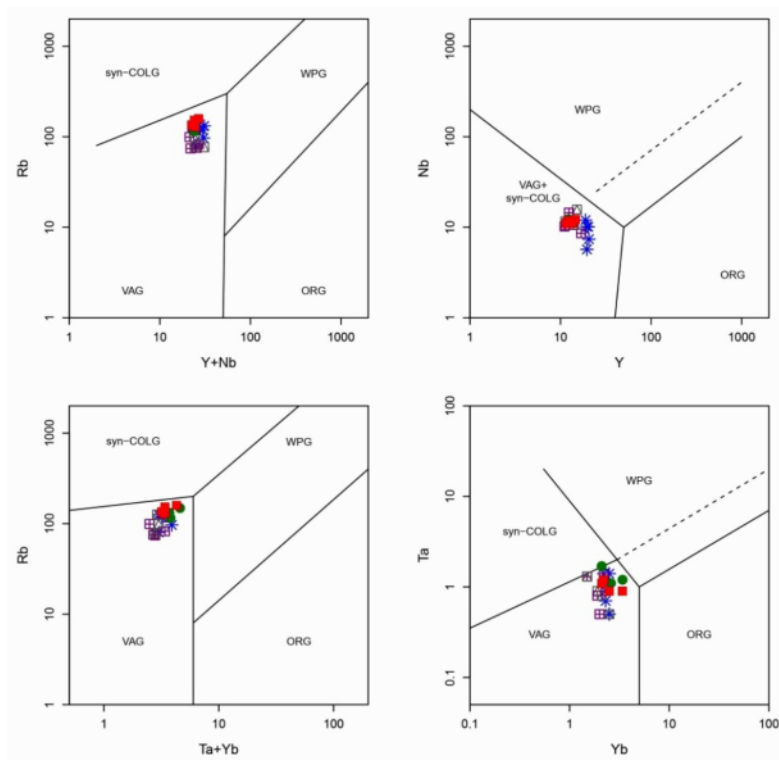
شكل 16 تعيين ويژگي هاي منشاء گوشته اي ماگمائي مادر سنگ هاي آذرين ملك سياه كوه بر پايه موقعيت نمونه ها در نمودارهاي، الف) La در برابر La/Sm و ب) Sm/Yb در برابر La/Sm [33] كه نشانگر منشاء گوشته غني شده از LREE با تركيب اسپينل - لرزوليت داراي كمی گارنت هستند.



شكل 17 تعيين محيط تكتونيكي سنگ هاي ولكانيكي ملك سياه كوه بر اساس نمودارهاي [34، 35]. همانطور كه مشخص است نمونه ها در محدوده محيط هاي قوسي قرار مي گيرند.



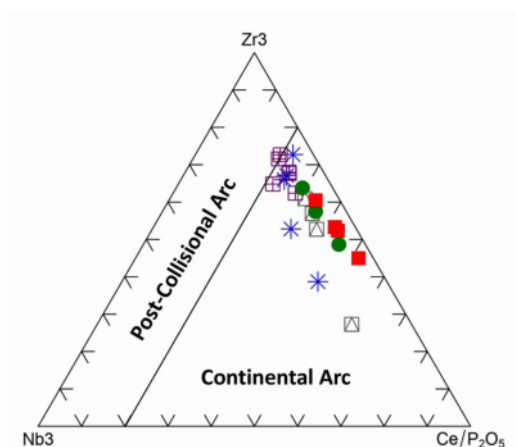
شکل ۱۸ تعیین محیط تکتونیکی سنگ‌های آذرین منطقه ملک سیاه کوه بر اساس نمودارهای [۳۶]. همان طور که مشخص است نمونه‌ها در محدوده بازالت‌های قوسی قرار می‌گیرند.



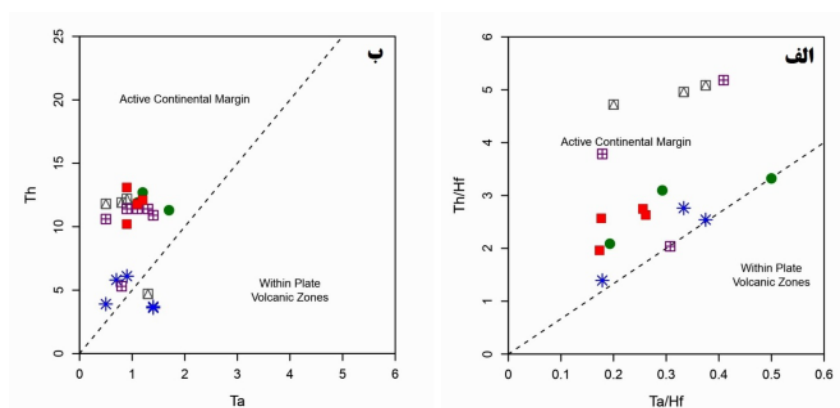
شکل ۱۹ نمودارهای [۳۷]، برای تعیین محیط ژئودینامیکی توده‌های نفوذی منطقه. تمامی نمونه‌ها در محدوده قوس آتشفشانی واقع شده‌اند.

[۳۸]، همه نمونه‌های منطقه در گستره کرانه فعال قاره‌ای قرار دارند (شکل ۲۱). بنابراین، محیط زمین‌ساختی ماگمایی منطقه ملک سیاه کوه را می‌توان از محیط‌های کرانه فعال قاره‌ای به شمار آورد. همچنین با استفاده از نمودارهای لگاریتمی تغییرات Nb و Y نسبت به [۳۹] Rb/Zr می‌توان قوس‌های نابالغ یا اولیه را از انواع عادی و بالغ تفکیک نمود. چنانکه در شکل ۲۲ دیده می‌شود، سنگ‌های آذرین منطقه ملک سیاه کوه در گستره قوس عادی واقع هستند.

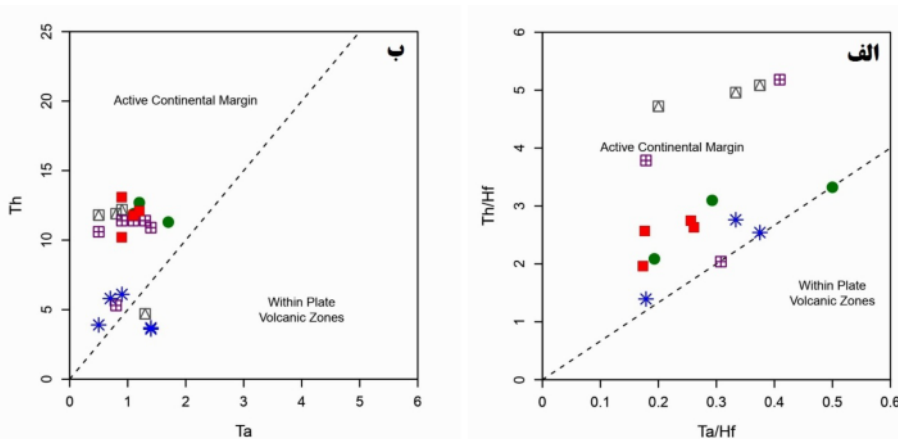
حال با توجه به این که محیط زمین‌ساختی ماگمایی سنگ‌های آتشفشانی و آذرین نفوذی منطقه ملک سیاه کوه از نوع قوسی است، باید مشخص شود که این کمان ماگمایی از کدام نوع بوده است. برای این منظور از نمودار مرجع [۳۴] که برای تفکیک کمان ماگمایی کرانه‌های فعال قاره‌ای از کمان‌های پس از برخورد به کار می‌رود، استفاده شد. بر اساس نمودار مثلثی Nb*50-Zr*3-Ce/P₂O₅ مشخص شد که همه نمونه‌ها در گستره قوس قاره‌ای واقع شده‌اند (شکل ۲۰). همچنین بر اساس نمودارهای Th نسبت به Ta و Th/Hf نسبت به Ta/Hf



شکل ۲۰ نمودار مثلثی Nb*50-Zr*3-Ce/P₂O₅ از [۳۴]. تمامی نمونه‌ها در محدوده قوس قاره‌ای واقع شده‌اند.



شکل ۲۱ نمودارهای الف) نسبت Th/Hf به Ta/Hf و ب) نسبت Th به Ta از [۳۸]، تمام نمونه‌های منطقه در گستره حاشیه فعال قاره‌ای واقع شده‌اند.



شکل ۲۱ نمودارهای الف) Th/Hf در برابر Ta/Hf و ب) Th در برابر Ta از [۳۸]، تمام نمونه‌های منطقه در محدوده حاشیه فعال قاره‌ای واقع شده‌اند.

برداشت

بر اساس نمودارهای نامگذاری سنگ‌ها، سنگ‌های آتشفشانی ترکیب آندزیت بازالتی و تراکی آندزیتی دارند و سنگ‌های آذرین نفوذی نیز ترکیب گرانودیوریت و دیوریتی نشان می-

دهند. توده‌های نفوذی و سنگ‌های آتشفشانی منطقه در نمودارهای TAS و هارکر، شکاف ترکیبی نشان نمی‌دهند. بر اساس نمودارهای هارکر، تبلور بخشی مهم‌ترین عامل تنوع ترکیبی سنگ‌های منطقه است. البته گفتنی است که به

North of Zahedan", M.Sc., University of Tehran: Tehran (1998).

[4] Agha Nabati A., "Geology of Iran.", Department of Geological Survey of Iran: Tehran, (2004) 606 p.

[5] Chance P., "Petrogenesis of a low-Ti, potassic suite; Kuh-e Lar caldera subsidence complex, eastern Iran", Unpublished M.S. Thesis, University of Western Ontario: London (1981).

[6] Nelson S.T., Montana A., "Sieved Textured Plagioclase in Volcanic Rocks Produced by Rapid Decompression", American Mineralogist, 77, 1242-1249.

[7] Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen A., Zanettin B., "A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram", Journal of petrology, 27(3) (1986) 745-750.

[8] Cox k. G., Bell J. D., Pankhurst R., "The interpretation of igneous rocks, London", George Allen and Unwin, 450pp (1979).

[9] Green N. L., Harry D. L., "On the relationship between subducted slab age and arc basalt petrogenesis, Cascadia subduction system", North America Earth and Planetary Science Letters 171 (1999) 367-381.

[10] Defant M.J., Jackson T.E., Drummond M.S., de Boer J.Z., Bellon H., Feigenson M.D., Maury R.C., Stewart R.H., "The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica", An overview: Geological Society of London Journal, V. 149, (1992) p. 569-579.

[11] Rollinson H., "Garnet orthopyroxene thermobarometry of granulites from the northern marginal zone of the Limpopo belt, Zimbabwe, in daly, J.S., Cliff, R. A., and Yardley, B. W. D., eds.", evolution of metamorphic Belts: geological society [London] special publication 43, P. 331-335.

[12] Rollinson H., "Using geochemical data: evolution, presentation and interpretation", Longman, Singapore, (1993) pp. 353.

[13] Mason R. D., van Bergen M., Martinez M., Sumarti S., Valdes J., Malavassi E., Sriwana T., "Magnatic and hydrothermal controls on trace element output at active volcanoes as recorded by spherules of sulfur in acid crater lakes", EOS Trans Am Geophys union Fall Meet 82(47): (2001)V42B-1019.

[14] Chappell B.W., White A.J.R., "Two contrasting granite types", Pacific Geology 8(1974) 173-174.

دلیل وجود پراکندگی در برخی عناصر در نمودارهای هارکر، افزون بر تبلور بخشی، عواملی چون آلیش و یا آمیختگی ماگمایی نیز در دگرگونی مذاب‌های منطقه نقش داشته‌اند.

از نظر سری ماگمایی، سنگ‌های مجموعه ملک سیاه کوه ویژگی نیمه قلیایی از نوع آهکی قلیایی تا شوشونیتی نشان می‌دهند. بر اساس نمودارهای عنکبوتی، اغلب سنگ‌های منطقه از LILE ها و LREE ها غنی شده و از HFSE ها و HREE ها تهی شده‌اند. آنها همچنین برای عناصر Sr, Ti, Ta, Nb, Ba, Eu, Zr و ناهنجاری منفی دارند ولی برای عناصر Rb, Cs, Th, U, LREE ها و P ناهنجاری مثبت نشان می‌دهند. این ویژگی‌های تهی‌شدگی و غنی‌شدگی در عناصر نام برده در سنگ‌های منطقه با محیط زمین‌دینامیکی شامل فعالیت ماگمایی پهنه فرورانش همخوانی دارد. همچنین، مقادیر بالای عناصر Rb و K و مقادیر پایین عناصر Sr و Ti آلودگی نسبی مذاب‌های برآمده از پوسته پسین طی دگرگونی ماگمایی را به همراه فرآیند هضم و تبلور بخشی (AFM) نشان می‌دهد. توده‌های نفوذی ویژگی گرانیتهای نوع I، متآلومین و منیزیم دار و گرانیتهای نوع کردیلرایی را نشان می‌دهند.

تعیین ویژگی‌های خاستگاه ماگمای مادر بر اساس عناصر نادر و خاکی نادر نمونه‌های منطقه نشان می‌دهد که این سنگ‌ها از ذوب بخشی یک گوشته خاستگاه با ترکیب اسپینل لرزولیت ناشی شده‌اند. از نظر محیط زمین ساختی، توده‌های نفوذی و سنگ‌های آتشفشانی منطقه با داشتن شواهدی چون غنی‌شدگی از LILE ها به همراه ناهنجاری منفی در عناصر Nb-Th, Zr, Ti در محیط قوسی تشکیل شدند. همچنین توده‌های مورد بررسی در نمودارهای تعیین محیط زمین ساختی در گستره قوس از نوع کرانه فعال قاره‌ای و با ویژگی قوس عادی واقع هستند.

مراجع

[1] Tirrul R., Bell I. R., Griffis R. J., Camp V. E. "The Sistan suture zone of eastern Iran", Geological Society of America Bulletin, Vol. 94, (1983) p. 134-150.

[2] Camp V. E., Griffis R. J., "Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran", Lithos, Vol. 3, (1982) p. 221-329.

[3] Kuhestanian m., "Petrology and geochemistry of igneous rocks of Malek Siah kuh Complex,

- swarms-time markers of crustal evolution, (2006) 131-146.
- [29] Arculus R.J., "Aspects of magma genesis in arcs", *Lithos* 33 (1994) 189-208.
- [30] Van Wagoner N. A., Leybourne M. I., Dadd K. A., Baldwin D. K., McNeil W., "Late Silurian bimodal volcanism of southwestern New Brunswick, Canada: Products of continental extension", *Geological Society of America Bulletin*, 114(4) (2002) 400-418.
- [31] Harris N.B., Pearce J.A., Tindle A.G., "Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. *Geological Society*", London, Special Publications V. 19 (1986) p. 67-81.
- [32] Chappell B.W., White A.J.R., "I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt", *Trans. R. Soc. Edinburgh: Earth Sci.* 83 (1992) 1-26.
- [33] Aldanmaz E., Pearce J.A., Thirlwall M., Mitchell J., "Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 102(2000) 67-95.
- [34] Muller D., Groves D. I., "Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization", sec. updated. Springer-Verlag, 242pp (1997).
- [35] Le Maitre R. W., Bateman P., Dudek A. J., Keller M. J., "Lameyre Le Bas, PA Sabine, R. Schmid, H. Sorensen, A. Streckeisen, AR Wolley, B. Zanetti. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*", Blackwell, Oxford, 193. *Lithos*, 75, 39-54.
- [36] Wood D. A., "The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province", *Earth Planet Scientific Letters* 50 (1980) 11-30.
- [37] Pearce J. A., Harris N. B. W., Tindle A. G., "Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks", *J. Petrol.* V. 25 (1984) 956-983.
- [38] Schandl E.S., Gorton M.P., "From Continents to Island Arc: A Geochemical Index of Tectonic Setting for Arc-Related and within Plate Felsic to Intermediate Volcanic Rocks", *Canadian Mineralogist*, 38 (2002) 1065-1073.
- [39] Brown G. C., Thorpe R. S., Webb P. C., "The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources: *Geol.*", *Soc. London. Jour.*, v. 141, p. 413-426.
- [15] White A. J. R., Chappell B. W., "Granitoid types and their distribution in the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia", *Geological Society American Memoir* V. 159 (1983) 21-34.
- [16] Frost B. Ronald, Calvin G. Barnes, William J. Collins, Richard J. Arculus, David J. Allis, Carol D. Frost, "A Geochemical Classification for Granitic Rocks", *J. Of Petrology* 42 (2001) 2033-2048.
- [17] Irvine T. N., Baragar W. R. A., "A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks", *Canadian Journal of Earth Science*, 8, 523-548.
- [18] Miyashiro A., "volcanic rock series in island arcs and active continental margins", *American Journal of Science*, 274(1974) 321-355.
- [19] Peccerillo R., Taylor S. R., "Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58: 63-81.
- [20] Shand S.J., "The eruptive rocks: 2nd edition, John Wiley", New York, 444 p.
- [21] Boynton W. V., "Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson P (ed) *Rare Earth Element Geochemistry*", Elsevier, Amsterdam, pp 63-114 (1984).
- [22] Wilson M., "Igneous petrogenesis. A global tectonic approach.", Chapman and Hall, 466 pp (1989).
- [23] Davidson J., Turner S., Handley H., McPherson C., Dosseto A., "Amphibole "Sponge" in arc crust? *Geology*", vol. 35 (2007) 787-790.
- [24] McDonough W.F., Sun S.-S., "Composition of the Earth", *Chemical Geology* 120: 223-253. doi: 10.1016/0009-2541(94)00140-4, (1995).
- [25] Foley S. F., Wheller G. E., "Parallels in the origin of the geochemical signatures of island arc volcanics and continental potassic igneous rocks: the role of residual titanates", *Chemical Geology*, 85(1) (1990) 1-18.
- [26] Spandler C., Hermann J., Arculus R., Mavrogenes J., "Geochemical heterogeneity and elemental mobility in deeply subducted oceanic crust: insights from high-pressure mafic rocks from New Caledonia", *Chem. Geol.* 206 (2004) 21-42
- [27] Kessel R., Schmidt M. W., Ulmer P., Pettke T., "Trace element signature of subduction-zone fluids", melts and supercritical liquids at 120-180 km depth. *Nature*, vol. 437, no. 7059 (2005) 724-727.
- [28] Soesoo A., "Mesozoic alkali basalts and felsic rocks in eastern Victoria, Australia". Dyke