

سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی و خاستگاه سنگ‌های آتشفشانی شمال خاور شهر کرمان

مهین رفوسه^۱، علیرضا شاکر اردکانی^۲ و حجت‌اله رنجبر^۳

^۱ کارشناسی ارشد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، واحد جنوب خاوری، کرمان، ایران
^۲ استادیار، گروه مهندسی معدن، مجتمع آموزش عالی زرنده، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
^۳ استاد، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۱۷

چکیده

در شمال و شمال خاور کرمان در بلوک کلمرد سنگ‌های آتشفشانی، نیمه‌زرف (دایک) و آذرآواری (آگلومرا و توف) انوسن وجود دارند. از دید سنگ‌نگاری، گدازه‌ها ترکیب بازالتی، آندزیتی، ریوداسیتی و ریولیتی، دایک‌ها ترکیب آندزیتی و آذرآواری‌ها ترکیب توف بلورین دارند. سنگ‌های آتشفشانی دارای بافت‌های اصلی پورفیری، میکرولیتیک پورفیری و جریانی و از دید تجمع کانیایی دارای کانی‌های پلاژیوکلاز± کوارتز± فلدسپار پتاسیم± بیوتیت± آمفیبول± کلینوپیروکسن± الیون+ کدر هستند. پلاژیوکلازها دارای بافت‌های غیرتعادلی مانند بافت غربالی، تحلیل‌یافتگی و منطقه‌بندی هستند. کوارتزها حواشی تحلیل‌یافته دارند و آمفیبول‌ها و بیوتیت‌ها نیز بیشتر دچار فرایند اپاکی شده‌اند. تشکیل این بافت‌ها را می‌توان به فرایندهایی مانند آمیختگی ماگمایی، تغییرات فشار بخار آب و کاهش فشار همراه با از دست دادن جزئی گرمای بالا هنگام آمدن ماگما ربط داد. مطالعات زمین‌شیمی مشخص کرد که سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه جزو سری ماگمایی ساب‌آلکان با طبیعت کالک‌آلکان هستند. افزون بر این، سنگ‌های آتشفشانی اسیدی متا‌آلومینوس تا پرآلومینوس هستند و مشخصه گرانئیتوئیدهای نوع I را دارند. نمودارهای توصیفی عناصر کمیاب به همراه الگوی عناصر خاکی کمیاب بهنجار شده با کندریت نشان می‌دهد که سنگ‌های آذرین منطقه مورد مطالعه در یک محیط کمان فعال قاره‌ای تشکیل شده‌اند.

کلیدواژه‌ها: کرمان، بلوک کلمرد، آمیختگی ماگمایی، کمان فعال قاره‌ای.

*نویسنده مسئول: مهین رفوسه

E-mail: refoshe@yahoo.com

۱- پیش‌نوشتار

شدند. سپس طی بازدیدهای صحرایی از بخش‌های با کمترین دگرسانی حدود ۲۳ نمونه سنگی برداشت شد و پس از تهیه مقطع نازک و مطالعه آنها با میکروسکوپ پلاریزان، به منظور بررسی بیشتر ویژگی‌های سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی سنگ‌های مورد نظر، ۶ نمونه که نماینده انواع سنگی مختلف بودند انتخاب و برای تجزیه شیمیایی عناصر اصلی توسط روش XRF، فرعی و خاکی کمیاب توسط روش ICP-MS به آزمایشگاه ALS Chemex کانادا فرستاده شدند (جدول ۱).

۳- مطالعات صحرایی و سنگ‌نگاری

به‌طور کلی سنگ‌های آذرین انوسن منطقه مورد مطالعه را بیشتر گدازه‌ها تشکیل می‌دهند که با مقادیر کمتری توده‌های نفوذی نیمه‌زرف (دایک) و سنگ‌های آذرآواری همراه می‌شوند. گدازه‌ها دارای ترکیب سنگ‌شناختی بازالتی، آندزیتی، ریوداسیتی و ریولیتی هستند. بافت اصلی این سنگ‌ها پورفیری و میکرولیتیک پورفیری است که افزون بر بافت‌های یادشده در خمیره این سنگ‌ها بافت‌های گوناگون دیگری مانند میکرولیتیک و جریانی نیز دیده می‌شود (شکل ۳-الف).

ویژگی‌های سنگ‌شناسی سنگ‌های آذرین منطقه به تفکیک عبارتند از:

- ریولیت: این سنگ‌ها بخش‌های به نسبت کمی از منطقه را به خود اختصاص داده‌اند که دارای توپوگرافی خشن و مرتفع بوده و به‌صورت قله‌هایی با ارتفاع زیاد در میان کوه‌های منطقه دیده می‌شوند. در بخش بالایی سنگ‌های ریولیتی حفراتی دیده می‌شود که به علت خروج گاز ایجاد شده و بیشتر توسط کوارتز ثانویه پر شده‌اند. از دید سنگ‌نگاری، ریولیت‌ها دارای درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز (۱۰ درصد)، فلدسپار پتاسیم (۳ درصد)، کوارتز (۵ درصد) و بیوتیت (۵ درصد) در زمینه‌ای متشکل از کانی‌های ریز یادشده به همراه فلدسپار پتاسیم هستند؛ به‌گونه‌ای که پلاژیوکلازها به‌صورت اشکال شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و بیشتر به فرم تخته‌ای هستند. پلاژیوکلازها دارای ماکل‌های پلی‌سنستیک، کارلسباد-آلیت و منطقه‌بندی هستند که با توجه به زاویه خاموشی ماکل‌های پلی‌سنستیک (۱۸-۸ درجه) بیشتر

منطقه مورد مطالعه در ۲۵ کیلومتری شمال و شمال خاور کرمان، در پهنه‌ای میان طول‌های جغرافیایی "۵۹° ۹' ۵۷" تا "۲۹° ۱۷' ۵۷" و عرض‌های جغرافیایی "۲۴° ۵۶' ۳۰" تا "۳۴° ۵۷' ۳۰" شمالی قرار گرفته است. منطقه مورد مطالعه دارای ریخت‌شناسی ملایم در جنوب و خش در محدوده شمالی است (شکل ۱) که از دید تقسیمات زمین‌شناسی جزئی از ایران مرکزی و جزو بلوک کلمرد در ناحیه کرمان است. این منطقه از شمال به سنگ‌های آتشفشانی حدواسط و آذرآواری انوسن پسین و از جنوب به سری سیمک با سنگ‌شناسی کنگلومرای ستبرلایه، کنگلومرا با قله‌های درشت همراه با لایه‌هایی از ماسه‌سنگ محدود می‌شود (شکل ۲). سنگ‌های آتشفشانی به‌صورت ناپیوسته روی سنگ‌های کهن‌تر که بیشتر از آهک، شیل و ماسه‌سنگ تشکیل شده‌اند؛ قرار گرفته‌اند (شکل ۱). کوهزایی لارامید موجب چین‌خوردگی و بالاآمدگی آهک‌های کرتاسه شده است و مهم‌ترین عامل برای تعیین قطعات درشت، سازند کنگلومرای کرمان است. از دیدگاه زمین‌ساختی می‌توان چنین بیان کرد که شرایط رسوبی قاره‌ای و نواحی کم‌ژرفای دریایی در منطقه حاکم بوده و رسوب‌گذاری مارن، شیل، آهک ریفی و آهک پکتن‌دار در اواخر ژوراسیک میانی، ژوراسیک پایانی و احتمالاً نئوکومین صورت گرفته است. جنبش‌های کوهزایی کرتاسه پایینی سبب قرارگیری این رسوبات به‌طور پسروده و ناهمساز روی رسوبات ژوراسیک شده است (عزیزان و همکاران، ۱۳۷۲). راه‌های دسترسی منطقه شامل جاده آسفالت کرمان - کوهپایه است که از خاور منطقه عبور می‌کند و تعدادی راه فرعی نیز روستاهای سیمک، ده‌شاه، انارستان و وامق آباد را به هم مرتبط می‌سازد.

۲- روش پژوهش

برای انجام این پژوهش پس از جمع‌آوری منابع و کسب اطلاعات لازم، همه کارهای پژوهشی پیشین که روی منطقه انجام شده بود به دقت مطالعه شد. تصاویر ماهواره‌ای استر و ETM+ منطقه تهیه و به منظور استخراج اطلاعات زمین‌شناسی منطقه استفاده

تشکیل دهنده این گروه سنگ‌ها هم به‌صورت درشت‌بلور و هم میکروولیت است که بیش از ۷۰ درصد از کل سنگ را شامل می‌شود؛ به‌گونه‌ای که درشت‌بلورهای آن عمدتاً شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار بوده و دارای ماکل‌های پلی‌سنتتیک و منطقه‌بندی هستند. فلدسپار پتاسیم یکی دیگر از درشت‌بلورهای موجود در آندزیت‌ها است که حدود (۳) درصد حجمی را به خود اختصاص داده است و عمدتاً به‌صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار است. اندازه آنها بیشینه ۳ میلی‌متر است و به شدت به کانی‌های رسی دگرسان شده‌اند. از دیگر درشت‌بلورهای موجود می‌توان به بیوتیت اشاره کرد که حدود یک درصد از کل سنگ را به خود اختصاص می‌دهد. شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و بیشینه اندازه آنها ۲ میلی‌متر است. آمفیبول‌های موجود در این سنگ‌ها به‌صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار است و در حدود ۱ درصد از کل سنگ را شامل می‌شود. اندازه آنها میان ۰/۳ تا ۰/۵ میلی‌متر و گاه در حدود ۱/۵ میلی‌متر است. برخی از آمفیبول‌ها در اثر دگرسانی، به اکسید آهن، کلسیت، کلریت و بیوتیت ثانویه تبدیل شده‌اند و تنها قالبی از آنها باقی مانده است (شکل ۳-ث). کلینوپیروکسن نیز از دو نسل اصلی تشکیل شده‌اند: الف) درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن که اندازه آنها حدود یک میلی‌متر است و معمولاً رنگ تداخلی بالایی دارند و شکل‌دار هستند و به سطوح بلورین خود محدود می‌شوند و حدود ۳ درصد از کل سنگ را تشکیل می‌دهند (شکل ۳-ج)؛ ب) میکرودرشت‌بلورهای کلینوپیروکسن که معمولاً حالت نیمه‌شکل‌دار دارند و در فازهای بعدی متبلور شده‌اند. این کانی‌ها نیز حدود ۳ درصد از کل سنگ را به خود اختصاص می‌دهند.

– بازالت: بازالت‌های منطقه مورد مطالعه دارای گسترش زیادی نیستند و در نمونه دستی رنگ آنها سیاه و بافت عمده آنها پورفیری است. در این سنگ‌ها مجموعه‌ای از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، الیون، کلینوپیروکسن، آمفیبول و کانی‌های کِبِر در زمینه‌ای از مزوستاز و یا شیشه قرار گرفته‌اند؛ به‌گونه‌ای که درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز حدود ۱۰ درصد کل سنگ را تشکیل می‌دهند و به‌صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و به فرم تخته‌ای هستند. پلاژیوکلازها ماکل‌های پلی‌سنتتیک و کارلسباد-آلیت نشان می‌دهند و بیشتر به کلسیت، کلریت، اپیدوت و اکسید آهن دگرسان شده‌اند. از دیگر درشت‌بلورهای موجود در بازالت‌ها، الیون است که ۵ درصد کل سنگ را تشکیل می‌دهند. الیون‌ها شکل‌دار بوده و با توجه به اینکه نسبت به دیگر کانی‌ها در برابر دگرسانی حساس‌تر هستند، بنابراین به شدت دگرسان شده و تنها فرم اولیه بی‌پیرامیدال آنها باقی مانده است که بیشتر توسط کانی‌های ثانویه کلسیت و کلریت جانشین شده‌اند. آمفیبول از دیگر کانی‌های موجود در برخی از نمونه‌های بازالتی است که هم به‌صورت درشت‌بلور و هم به‌صورت کانی‌های ریز در زمینه حضور دارند و در حدود ۱ درصد از کل سنگ را به خود اختصاص داده‌اند. درشت‌بلورهای شکل‌دار آمفیبول به‌شدت دگرسان شده‌اند و تنها قالب عرضی شش وجهی آنها بر جای مانده است که توسط کانی‌های ثانویه کلریت، کلسیت، اپیدوت و اکسید آهن جانشین شده‌اند. از دیگر درشت‌بلورهای موجود در بازالت‌ها می‌توان به کلینوپیروکسن اشاره کرد که ۳ درصد کل سنگ را تشکیل می‌دهند. کلینوپیروکسن‌ها با توجه به ویژگی‌های نوری همچون رنگ تداخلی و زاویه خاموشی (۳۵-۳۰) که از خود نشان می‌دهند، از نوع اورژیت هستند. این درشت‌بلورها به‌صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و اندازه ۱ تا ۱/۵ میلی‌متر هستند. گاه کلینوپیروکسن‌ها در اثر تجزیه به اورالیت دگرسان شده‌اند.

دایک‌های منطقه از دید ترکیب سنگ‌شناختی، ترکیب آندزیتی و بافت میکروولیتیک پورفیری دارند. درشت‌بلورهای موجود در دایک‌ها شامل پلاژیوکلاز (۱۰ درصد)، کلینوپیروکسن (۵ درصد)، آمفیبول (۳ درصد) و کانی‌های کِبِر (۳ درصد) هستند؛ به‌گونه‌ای که درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز به‌صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار هستند و بیشینه اندازه آنها در حد ۳ میلی‌متر است که بیشتر به کلسیت دگرسان شده‌اند. بلورهای کلینوپیروکسن نیز شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با بیشینه اندازه

سدبیک و از نوع آلیت تا الیگو کلاز هستند. اندازه آنها از ۱ تا ۳ میلی‌متر متغیر است و گاه دارای حواشی تحلیل‌یافته هستند. این کانی‌ها تحت تأثیر محلول‌های گرمایی، در امتداد رخ‌ها با شدت‌های متفاوت دگرسان شده و بیشتر به سرسیت تبدیل شده‌اند. کوارتز از دیگر کانی‌های موجود در ریولیت‌هاست که به‌صورت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل بوده و اندازه آنها از ۰/۲ میلی‌متر به‌صورت ریزبلور در زمینه تا بیشینه ۵ میلی‌متر به‌صورت درشت‌بلور متغیر است. درشت‌بلورهای کوارتز حالت خوردگی خلیجی دارند (شکل ۳-ب) که این حالت به علت رشد غیرتعدالی یا تأثیرات انحلالی ناشی از کاهش فشار در هنگام بالاآمدگی ماگما به سطح زمین به وجود می‌آید (Nelson & Montana, 1992). به‌طور کلی عوامل مؤثر در ایجاد خوردگی خلیجی کوارتز عبارتند از (Donaldson & Henderson, 1988; Shelly, 1993):

- کاهش فشار ناشی از بالاآمدگی ماگما و افزایش فشار بخار آب نسبت به فشار کل سبب تغییر حالت اوتکتیک کوارتز-ارتوز و آلیت شده که در این حالت فشار بخار آب منحنی کوتکتیک را پایین می‌آورد و در پایان سبب ناپایداری و انحلال کوارتز می‌شود.
- کاهش فشار کل و افزایش فشار بخار آب سبب تغییر دما می‌شود و همچنین اکسایش گازی در نزدیکی سطح زمین دمای ماگما را افزایش می‌دهد و این زمینه انحلال درشت‌بلورهای کوارتز پیش از تشکیل را فراهم می‌کند.
- درشت‌بلورهای کوارتز که از پیش تشکیل شده‌اند با قرارگیری در مذاب با گرمای بالاتر (برای نمونه ماگمای بازیک) با آن واکنش می‌دهد و اشکال انحلالی در آنها ایجاد می‌شود.
- خروج حباب‌های گاز از پیرامون این درشت‌بلورها به سیال حرکت متلاطمی می‌دهد (به‌ویژه در محل تماس حباب با سطح بلور)، سبب انحلال سریع و ایجاد حفره در آنها می‌شود.
- آمیختگی ماگمایی در آتشفشان‌ها بسیار معمول است که در بسیاری از موارد قرارگیری این بلورها در یک ترکیب بازیک تر انحلال می‌یابند.
- تغییر ترکیب شیمیایی ماگما همراه با تغییر فشار.

بیوتیت از دیگر درشت‌بلورهای موجود در ریولیت‌ها بوده که تقریباً ۵ درصد از کل سنگ را تشکیل می‌دهند. اندازه آنها ۱ تا ۲ میلی‌متر بوده و شماری از بیوتیت‌ها دارای حالت اعوجاج و شکسته شده هستند (شکل ۳-پ) که این مسئله ناشی از تحمل فشار است (Vernon, 2004). همچنین برخی از بیوتیت‌ها دارای حواشی تحلیل‌یافته هستند و عموماً اپاکی شده‌اند (شکل ۳-ت) که این پیامد ناشی از کاهش فشار کل نسبت به فشار بخار آب است که به دنبال آن افزایش تصاعدی مواد فرار سبب تسریع فرایند اکسایش و افزایش چشمگیر بخار آب موجب اکسیده شدن این کانی می‌شود (پومری و همکاران، ۱۳۸۳).

– ریوداسیت: بیشتر سنگ‌های ریوداسیتی موجود در منطقه مورد مطالعه در محدوده روستای سیمک رخ‌منون دارند و در جاهای دیگر منطقه گسترش این سنگ‌ها بسیار کم و تنها محدود به رخ‌منون‌های کوچک است. این سنگ‌ها از دید تجمع کانیایی و ویژگی‌های کانی‌شناسی کاملاً مشابه سنگ‌های ریولیتی موجود در منطقه هستند با این تفاوت که درشت‌بلورهای فلدسپار پتاسیم ندارند و همچنین درصد حجمی میکروولیت‌های پلاژیوکلاز آن به مراتب بیشتر از فلدسپار آلکالن موجود در زمینه است (نسبت پلاژیوکلاز به فلدسپار آلکالن تقریباً ۳ به ۱ است).

– آندزیت: آندزیت‌های موجود در منطقه گسترش زیادی دارند و در سطح تازه شکسته شده، خاکستری تا سبز رنگ و دارای بافت پورفیری هستند. تجمع درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم، بیوتیت، آمفیبول، کلینوپیروکسن و کانی‌های کِبِر در یک زمینه میکروولیتی سبب تشکیل بافت گلوپورفیری شده است. گاه حضور کوارتز اولیه در زمینه سبب می‌شود که ترکیب سنگ به سوی آندزیت کوارتزار متمایل شود. پلاژیوکلاز از جمله فراوان‌ترین اجزای

درجه اشباع‌شدگی آلومین می‌شود (Lang, 1991؛ در گاهی، ۱۳۸۶). الگوی عناصر خاکی کمیاب بهنجار شده با کندریت نیز برای نمونه‌های آتشفشانی مورد مطالعه رسم شد (شکل ۱۰)، همان‌گونه که دیده می‌شود روند نمونه بازالتی با نمونه‌های اسیدی متفاوت است همچنین نمونه‌های یادشده از دید بی‌هنجاری Eu دارای دو روند کلی هستند. برخی از آنها بدون بی‌هنجاری هستند (نمونه بازالتی) و برخی از آنها بی‌هنجاری منفی دارند (نمونه‌های اسیدی). بنابراین به نظر می‌رسد که باید بی‌هنجاری منفی Eu را به نقش باقی ماندن پلاژیوکلاز در پسماند حاصل از ذوب (Campbell et al., 1982; Lentz, 1998) و یا کم بودن فوگاسیته اکسیژن مربوط دانست؛ زیرا در شرایط احیایی Eu به صورت Eu^{+2} در آمده و در مذاب پسمانده متمرکز می‌شود (Cullers & Graf, 1984)؛ در صورتی که نبود بی‌هنجاری مشخص Eu، مبین تفریق کم اهمیت پلاژیوکلاز و یا شرایط اکسیدان ماگمای تشکیل‌دهنده آنهاست؛ زیرا در شرایط اکسیدان از شکل‌گیری Eu^{+2} جلوگیری می‌شود (Magganas, 2002) و در واقع Eu به صورت Eu^{+3} در می‌آید و به مانند دیگر REE رفتار می‌کند (Cullers & Graf, 1984). همچنین به نظر می‌رسد که تفاوت ترکیبی نمونه‌ها از دید عناصر خاکی کمیاب باید از منشأهای متفاوت، درجات تفریق متفاوت، ذوب بخشی گوناگون و آمیختگی از این عوامل حاصل شده باشند؛ چرا که شکل الگوی REEها بیشتر در قالب این عوامل توجیه می‌شود (Henderson, 1984).

۵- سنگ‌زایی

برای تعیین محیط زمین‌ساختی سنگ‌های آذرین منطقه مورد مطالعه از نمودارهای مختلف محیط زمین‌ساختی استفاده شد. همان‌گونه که در نمودار $Al_2O_3 - TiO_2$ (Muller & Groves, 1997) دیده می‌شود همه نمونه‌های یادشده در محدوده سنگ‌های مرتبط با کمان هستند و به‌طور مشخص از محیط زمین‌ساختی درون صفحه‌ای جدا می‌شوند (شکل ۱۰). (Pearce et al., 1984) برای جدایش گرانیت‌های برخوردی از گرانیت‌های کمان آتشفشانی نمودارهایی را ارائه کردند؛ به‌گونه‌ای که (Menuge et al., 2002) نیز از این نمودارها برای تعیین محیط تشکیل ریولیت‌های منطقه لورنتیان استفاده کردند، بنابراین همان‌گونه که در شکل ۱۱ دیده می‌شود سنگ‌های اسیدی منطقه مورد مطالعه در محدوده گرانیت‌های مرتبط با کمان قرار گرفته‌اند. همچنین سنگ‌های منطقه مورد مطالعه در نمودار Wood (1980) نیز در محدوده مرتبط با کمان قرار می‌گیرند (شکل ۱۲). این در حالی است که با توجه به الگوی چندعنصری نمونه‌ها (شکل ۱۳)، تقریباً تمرکز بالای Th و بی‌هنجاری منفی Ta، Nb، Ti دیده می‌شود و این نوع توزیع عناصر نیز نشان از شکل‌گیری سنگ‌های منطقه مورد مطالعه در محیط زمین‌ساختی مرتبط با کمان دارد (Pfander et al., 2002). لازم به یادآوری است که همه ماگماهای مرتبط با کمان از Nb تهی‌شدگی دارند؛ چرا که عدم تحرک Nb و باقی ماندن آن در صفحه فرورونده وارد نشدن این عنصر در سیالات آزاد شده از صفحه فرورونده بر خلاف Th دلیل اصلی این عامل است (Pfander et al., 2002). همچنین غنی‌شدگی از عناصر Ba، U و Rb نیز به علت ماهیت فرورانش است؛ زیرا به علت تحرک به نسبت بالای این عناصر سیال‌های مشتق شده از صفحه فرورونده غنی از این عناصر هستند (Khalaji et al., 2005; He et al., 2007). همچنین الگوی چندعنصری نمونه بازالتی منطقه مورد مطالعه از دید Sr با الگوی نمونه‌های اسیدی متفاوت و دارای بی‌هنجاری مثبت است. وجود بی‌هنجاری مثبت Sr می‌تواند نشانه منشأ گرفتن ماگمای تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها از پوسته اقیانوسی فرورو باشد؛ چرا که ماگماهایی که از ذوب پوسته قاره‌ای منشأ می‌گیرند بی‌هنجاری منفی Sr دارند (Wang et al., 2006). بنابراین احتمال دارد که نمونه‌های اسیدی منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر آلودگی پوسته‌ای قرار گرفته باشند. (Dunphy & Ludden 1998) با

۳ میلی‌متر هستند و گاه به ترمولیت-اکتینولیت دگرسان شده‌اند و در حاشیه و در راستای رخ‌های آنها اکسید آهن جانشین شده است. درشت‌بلورهای آمفیبول نیز عمدتاً به‌صورت نیمه‌شکل‌دار هستند و بیشینه اندازه آنها ۲ میلی‌متر است که گاه به کلریت، بیوتیت ثانویه و اکسیدهای آهن دگرسان شده‌اند. کانی‌های کبر عمده‌تاً به‌صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار هستند و در برخی جاها به‌صورت گروهی تجمع حاصل کرده‌اند (شکل ۳-چ).

نهشته‌های آذرآواری موجود در منطقه مورد مطالعه مشتمل بر توف‌های بلورین و آگلومراست. توف‌های بلورین عمدتاً دارای کانی‌های پلاژیوکلاز، کوارتز، کلینوپروکسن، آمفیبول، بیوتیت و کانی‌های کبر هستند (شکل ۳-ح). در توف‌های موجود در منطقه در اطراف بیوتیت‌هایی که دچار فرایند اکسایش شده‌اند آثاری از کانی‌های ثانویه به ویژه اپیدوت به‌صورت هاله‌ای فرا گرفته است (شکل ۴-الف). همچنین در برخی از آنها آثار مالاکیت نیز دیده می‌شود. آگلومراها دسته‌ای از سنگ‌های آذرآواری منطقه مورد مطالعه هستند که حجم به نسبت محدودی در منطقه مورد مطالعه دارند. آگلومراها دارای قطعاتی در اندازه بیشینه ۱۰ سانتی‌متر هستند (شکل ۴-ب). ترکیب سنگ‌شناختی قطعات موجود در آنها بیشتر از نوع آندزیتی (دارای درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و بیوتیت‌ها و آمفیبول‌های اپاکی شده) تا داسیتی (دارای درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، کوارتز و احتمالاً آمفیبول‌هایی که توسط اکسید آهن جانشین شده‌اند) است.

از پدیده‌های قابل توجه در سنگ‌ها، بیوتیت‌ها گاه دارای حالت خمیدگی و شکسته شده هستند که نشان‌دهنده اعمال فشار است (Vernon, 2004). همچنین اپاکی شدن بیوتیت‌ها و آمفیبول‌های موجود در سنگ‌های منطقه مورد مطالعه عمومیت دارد. به‌طور کلی حضور بافت غربالی، منطقه‌بندی و حاشیه‌واجذبی در بلورهای پلاژیوکلاز به همراه خوردگی خلیجی کوارتز و اپاکی شدن بیوتیت‌ها و آمفیبول‌های سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه نشانگر شرایط ناعدالی در زمان تبلور این سنگ‌هاست و عواملی چون آمیختگی ماگمایی، تغییر در دما، فشار و ترکیب شیمیایی می‌تواند این شرایط را فراهم آورد (Gill, 1981; Best & Christiansen, 2001; Kawabata & Shuto, 2005; Plechov et al., 2008).

۴- مطالعات زمین‌شیمی

سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه، بر پایه نمودار Winchester & Floyd (1977) در محدوده بازالت-آندزیت، داسیت-ریوداسیت و تراکی‌آندزیت با تمایلی به محدوده ریولیت رسم می‌شوند (شکل ۵) که این چگونگی قرارگیری بر مطالعات سنگ‌نگاری نیز همخوانی دارد. با توجه به اینکه سری ماگمایی برای تعیین فرضیه ارتباط رژیم‌های زمین‌ساختی مختلف و مدل‌سازی رویدادهای زمین‌ساختی بسیار مفید است (Rollinson, 1998)؛ بنابراین برای تعیین سری ماگمایی، نمودارهای متعددی بر پایه اکسیدهای اصلی و عناصر غیرمتحرک توسط سنگ‌شناسان ارائه شده است؛ در این پژوهش از نمودارهای SiO_2 در برابر Nb/Y (Winchester & Floyd, 1977؛ شکل ۶) و AFM (Irvine & Baragar, 1971؛ شکل ۷) بهره گرفته شد که سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه به ترتیب در محدوده ساب‌آلکان و کالک‌آلکان قرار می‌گیرند. همچنین نمونه‌های اسیدی منطقه مورد مطالعه بر پایه درجه اشباع‌شدگی آلومین (ASI؛ Zen, 1986) در نمودار A/NK در برابر A/CNK (Shand, 1943) در محدوده متا‌آلومینوس تا پرآلومینوس جای می‌گیرند (شکل ۸)؛ البته حضور کانی‌های مافیک (شامل آمفیبول و بیوتیت) و نیز نبود کانی‌های مشخصه گرانیت‌های پرآلکان و پرآلومینوس دلیلی بر متا‌آلومینوس بودن سنگ‌های اسیدی منطقه مورد مطالعه است و قرارگیری آنها در محدوده پرآلومینوس را بایستی به دگرسانی سربستی فلدسپارهای موجود در آنها مربوط دانست؛ چراکه این نوع دگرسانی سبب افزایش

- بافت غربالی، منطقه‌بندی و حاشیه خورده شده در بلورهای پلاژیوکلاز به همراه خوردگی خلیجی کوارتز و اپاکی شدن بیوتیت‌ها و آمفیبول‌های سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه نشانگر شرایط ناعادلی در زمان تبلور این سنگ‌هاست. عواملی چون آمیختگی ماگمایی، تغییر در دما، فشار و ترکیب شیمیایی می‌تواند این شرایط را فراهم آورد.

- بر طبق مطالعات زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه از دید سنگ‌شناختی در سری ماگمایی ساب‌آلکان با طبیعت کالک‌آلکان قرار می‌گیرند و سنگ‌های اسیدی جزو گرانیتوئیدهای نوع I با طبیعت پراآلومینوس به شمار می‌روند.

- نبود بی‌هنجاری مشخص Eu برای نمونه بازالتی منطقه مورد مطالعه در الگوی بهنجار شده عناصر خاکی کمیاب، نشان‌دهنده تفریق کم اهمیت پلاژیوکلاز و یا شرایط اکسیدان ماگمای تشکیل‌دهنده آنهاست؛ در حالی که بی‌هنجاری منفی Eu در نمونه‌های اسیدی را می‌توان به باقی ماندن پلاژیوکلاز در پسماند حاصل از ذوب و یا جدایش آن در طی تفریق و یا ذوب بخشی و یا کم بودن فوگاسیته اکسیژن مربوط دانست.

- وجود بی‌هنجاری مثبت Sr برای نمونه بازالتی منطقه مورد مطالعه، بیانگر منشأ گرفتن ماگمای تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها از پوسته اقیانوسی فرورو است؛ در حالی که بی‌هنجاری منفی Sr نمونه‌های اسیدی احتمالاً ناشی از آلودگی پوسته‌ای ماگمای تشکیل‌دهنده آنهاست.

- نمودارهای متمایز کننده محیط زمین‌ساختی همراه با نمودارهای عنکبوتی نشان‌دهنده آن است که سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه در یک محیط کمان قاره‌ای ایجاد شده‌اند.

استفاده از دو عنصر کمیاب Y و Zr محیط زمین‌ساختی کمان ماگمایی را به دو کمان آتشفشانی اقیانوسی و کمان آتشفشانی حاشیه فعال قاره‌ای تقسیم کردند. بنابراین بر پایه این نمودار، نمونه‌های منطقه مورد مطالعه در محدوده حاشیه فعال قاره‌ای قرار گرفته‌اند (شکل ۱۴).

۶- نتیجه‌گیری

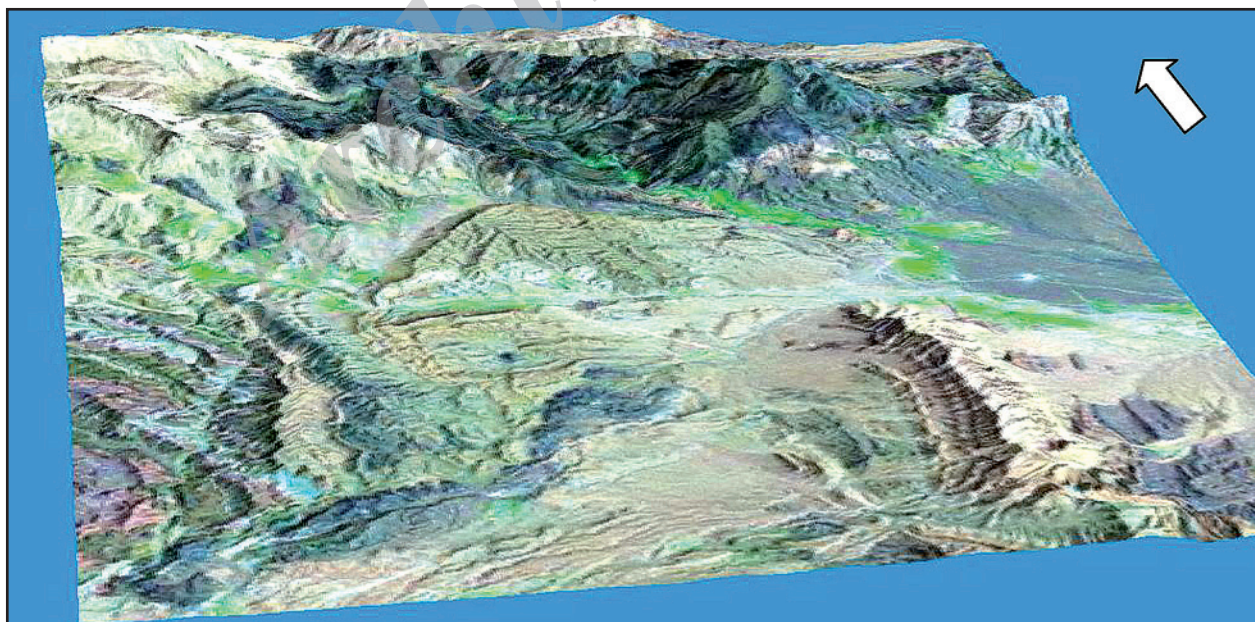
با توجه به مطالعات صحرایی، سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی سنگ‌های آذرین موجود در شمال و شمال خاور کرمان نتایج زیر حاصل شد:

- مطالعات میکروسکوپی نشان می‌دهد که ترکیب سنگ‌شناختی گدازه‌ها بازالتی، آندزیتی، ریوداسیتی و ریولیتی، ترکیب سنگ‌شناختی دایک‌ها آندزیتی و ترکیب سنگ‌شناختی توف‌ها توف بلورین و آگلومراست؛ به گونه‌ای که درشت‌بلورهای موجود در این سنگ‌ها شامل پلاژیوکلاز± فلدسپار پتاسیم± کوارتز± بیوتیت± آمفیبول± کلینوپیروکسن± الیون+ کانی‌های کدر است و بافت شاخص گدازه‌ها و دایک‌ها پورفیری، میکرولیتیک پورفیری و جریانی است.

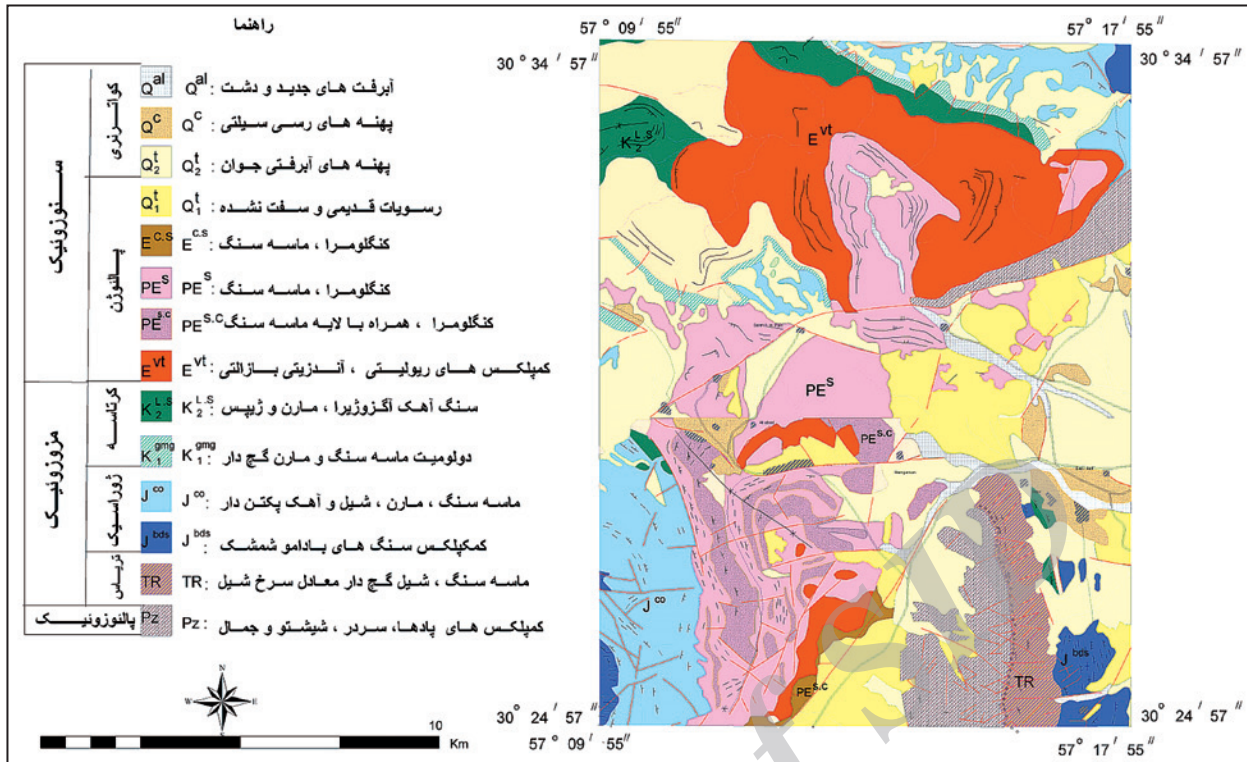
- فراوان‌ترین کانی این سنگ‌ها، پلاژیوکلاز است که به دو صورت بلورهای ریز تیغه‌ای و درشت تخته‌ای عموماً نیمه‌شکل دار دیده می‌شوند. این بلورها شامل ماکل پلی‌سنتتیک، منطقه‌بندی، بافت غربالی و حواشی خورده شده هستند.

- بلورهای کوارتز در سنگ‌های ریوداسیتی و ریولیتی دارای بافت خلیجی هستند و در زمینه‌ای از بلورهای بسیار ریز فلدسپار قلیایی دیده می‌شوند.

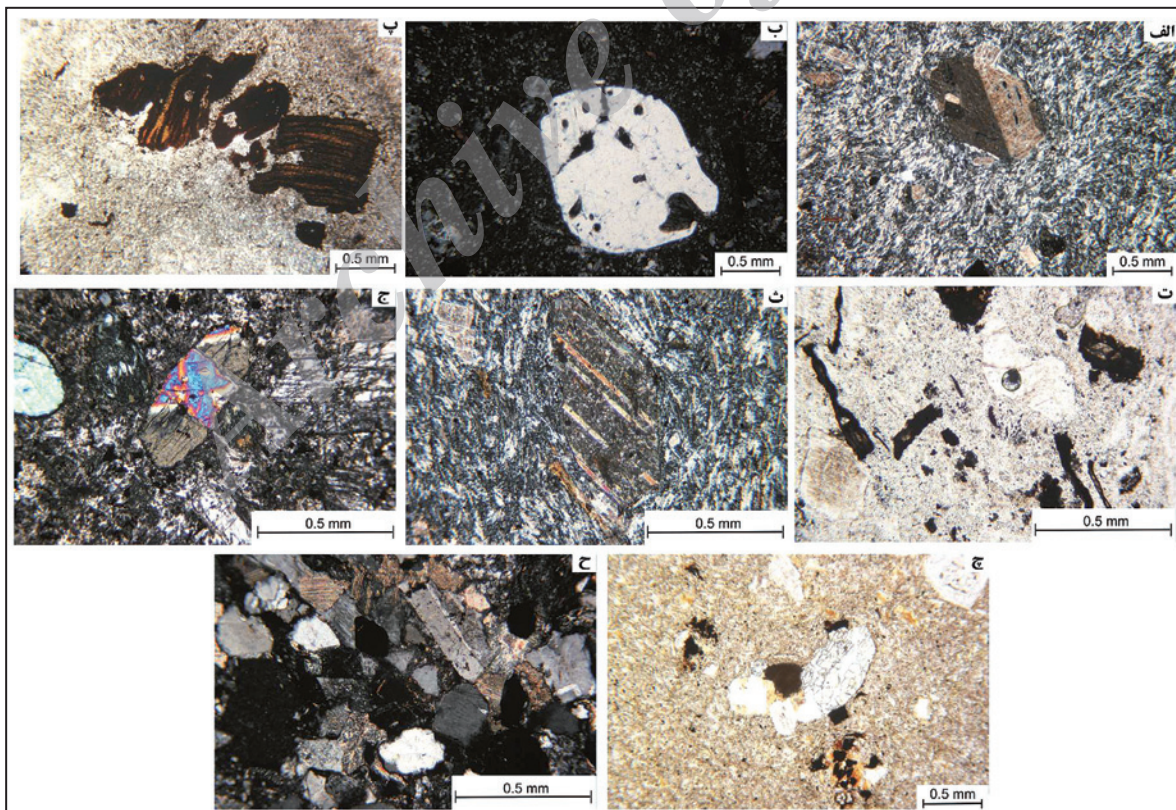
- گاه بیوتیت‌ها دارای حالت اعوجاج و شکسته شده هستند که نشان‌دهنده اعمال فشار است. همچنین اکسیده و اپاکی شدن بیوتیت‌ها و آمفیبول‌ها در سنگ‌های منطقه مورد مطالعه عمومیت دارد.



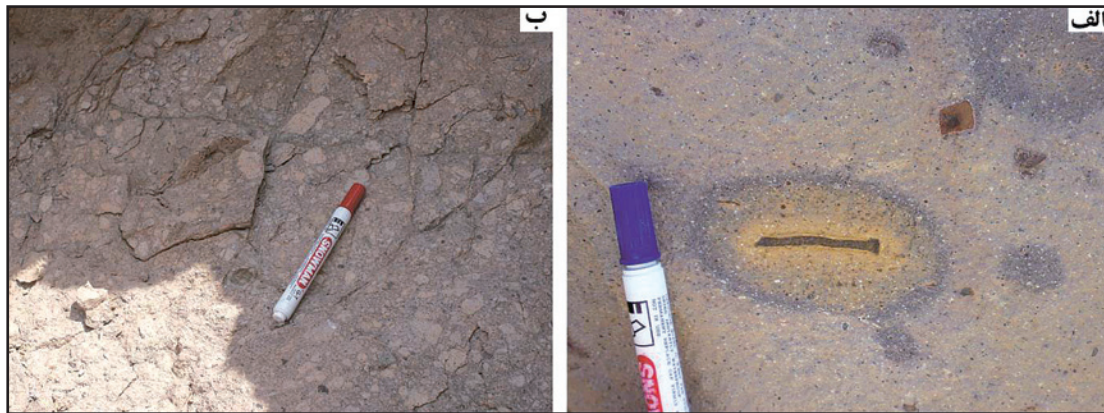
شکل ۱- ریخت‌شناسی عمومی منطقه، تصویر ترکیب رنگی ۷-۴-۱ ماهواره لندست روی مدل ارتفاعی رقومی منطبق شده است، سنگ‌های آتشفشانی در شمال و جنوب‌باختر با رنگ تیره دیده می‌شوند.



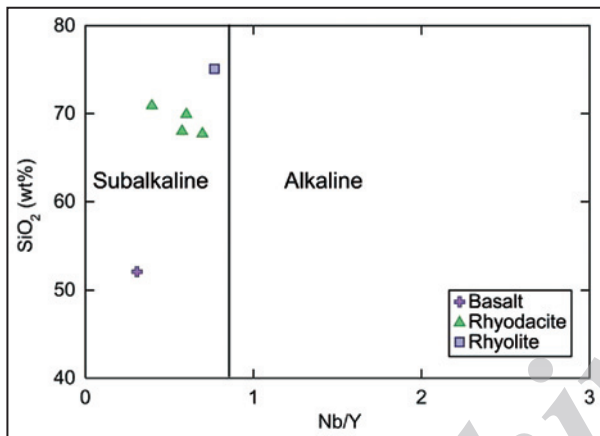
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی کرمان (عزیزان و همکاران، ۱۳۷۲) و حرجند (سهندی و حاج‌ملاعلی، ۱۳۷۴).



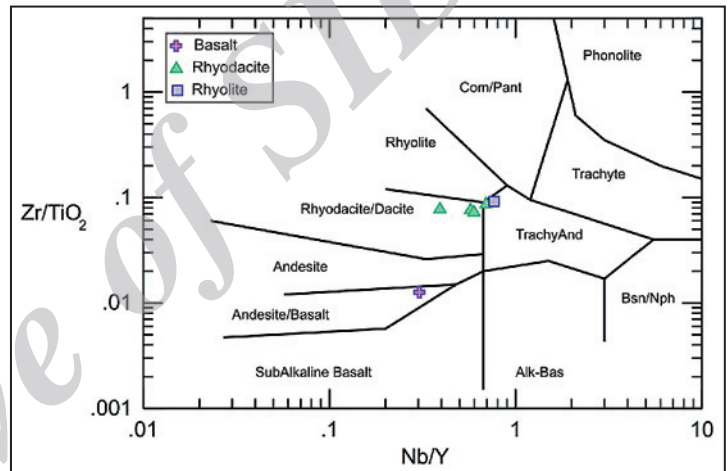
شکل ۳- الف) حضور درشت‌بلور فلدسپار پتاسیم در زمینه‌ای با بافت جریان‌ی (وضعیت نور: XPL)؛ ب) نمایی از درشت‌بلور کوارتز خلیجی (وضعیت نور: XPL)؛ پ) درشت‌بلورهای بیوتیت که دچار پدیده خمش شده‌اند (وضعیت نور: PPL)؛ ت) درشت‌بلورهای بیوتیت اپاکی شده با حواشی تحلیل یافته (وضعیت نور: PPL)؛ ث) درشت‌بلور آمفیبول که به کانی ثانویه کلسیت دگرسان شده است (وضعیت نور: XPL)؛ ج) نمایی از درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن (وضعیت نور: XPL)؛ چ) درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن به همراه تجمع کانی‌های کلدِر (وضعیت نور: PPL)؛ ح) حضور کانی‌های پلاژیوکلاز، کوارتز، آمفیبول، کلسیت و اکسیدهای آهن در توف بلورین (وضعیت نور: XPL).



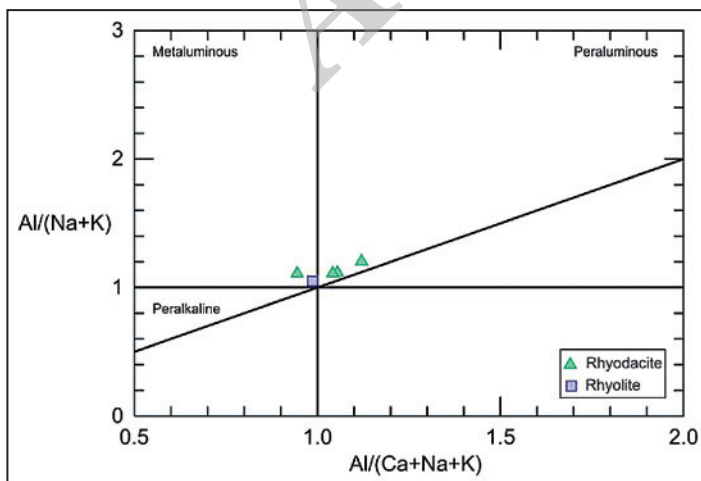
شکل ۴- الف) نمای از هاله دگرسانی اپیدوتی شدن در پیرامون بلور بیوتیت اپاکی شده در توف‌های منطقه مورد مطالعه؛ ب) نمای از آگلومراهای موجود در منطقه مورد مطالعه.



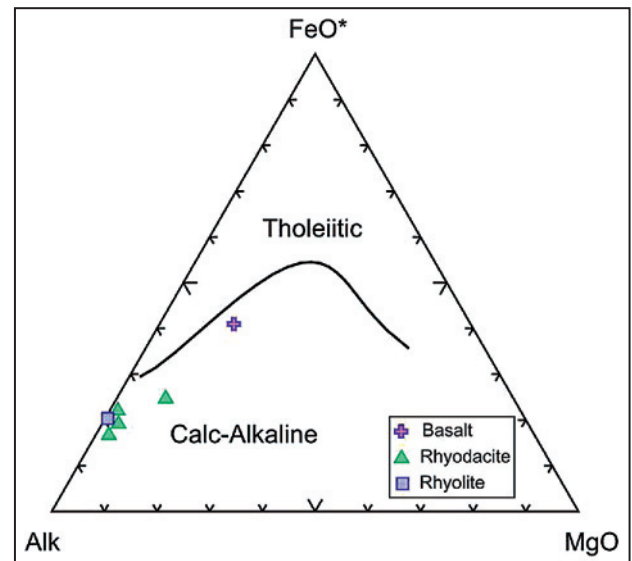
شکل ۶- تعیین سری ماگمایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه بر پایه نسبت Nb/Y در برابر SiO_2 (Winchester & Floyd, 1977)



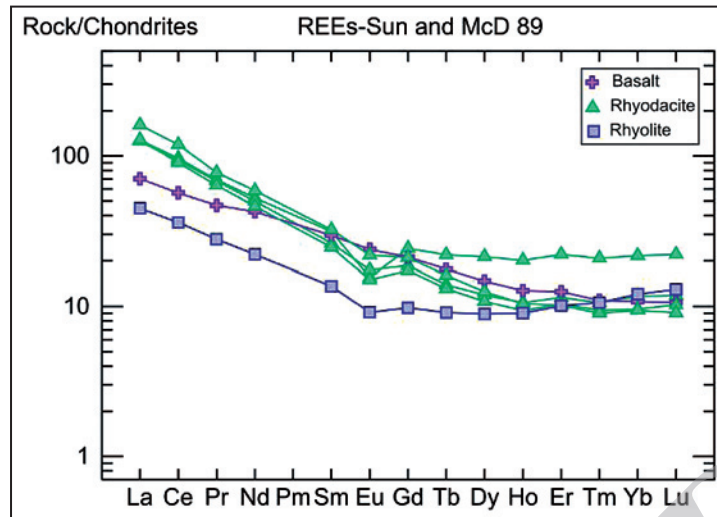
شکل ۵- نام‌گذاری زمین‌شیمی نمونه‌های سنگ‌های آتشفشانی منطقه بر پایه نسبت Zr/TiO_2 در برابر Nb/Y (Winchester & Floyd, 1977).



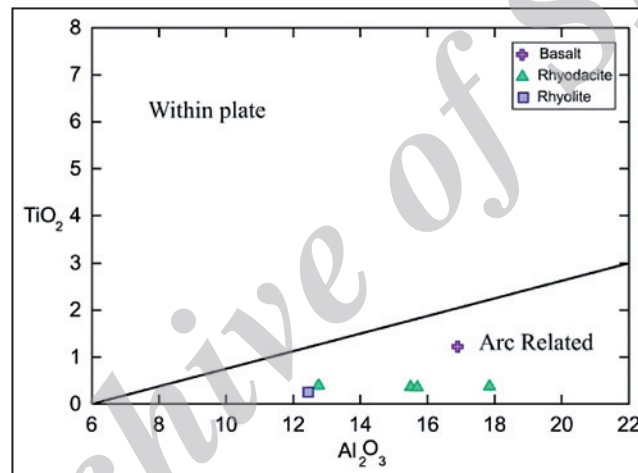
شکل ۸- نمودار Shand (1943) برای نمونه‌های اسیدی منطقه مورد مطالعه.



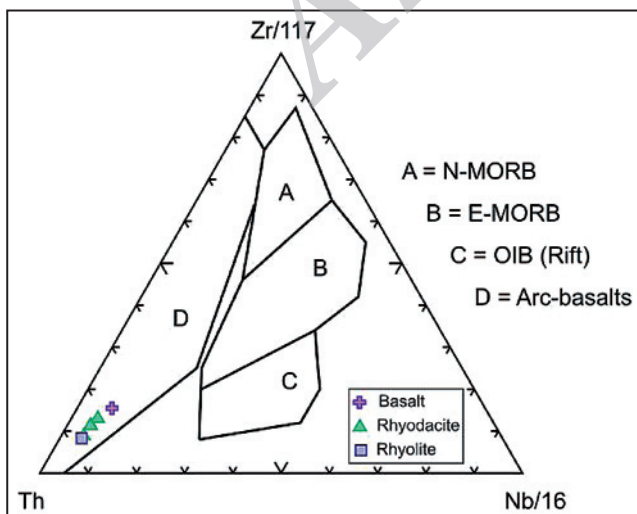
شکل ۷- تعیین سری ماگمایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه بر پایه نمودار AFM (Irvine & Baragar, 1974).



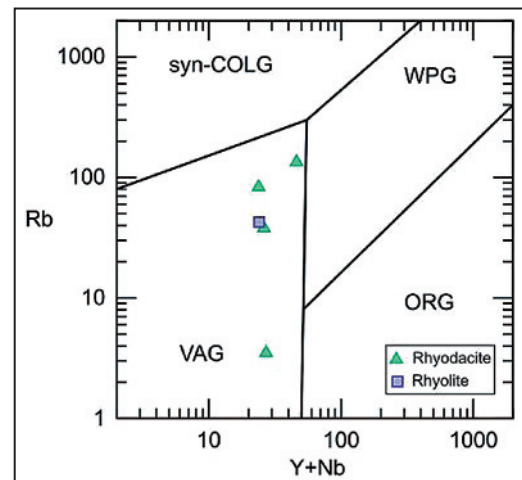
شکل ۹- الگوی عناصر خاکی کمیاب بهنجار شده بر پایه کندریت (Sun & McDonough, 1989) برای نمونه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه.



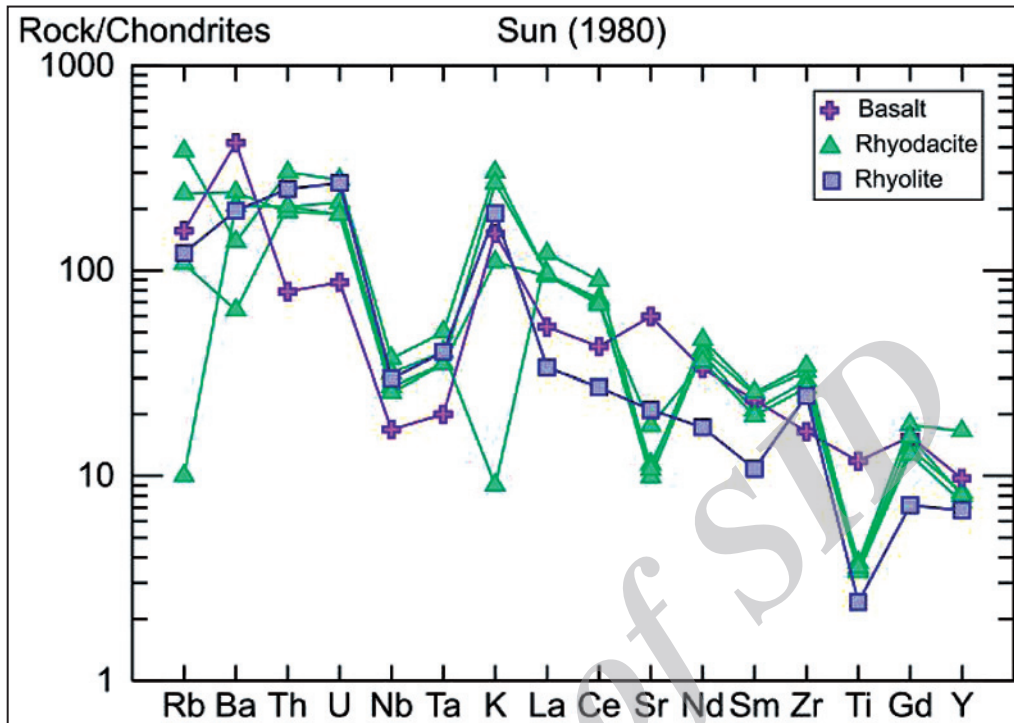
شکل ۱۰- نمودار TiO_2 - Al_2O_3 برای تعیین محیط زمین‌ساختی نمونه‌های منطقه مورد مطالعه (Muller & Groves, 1997).



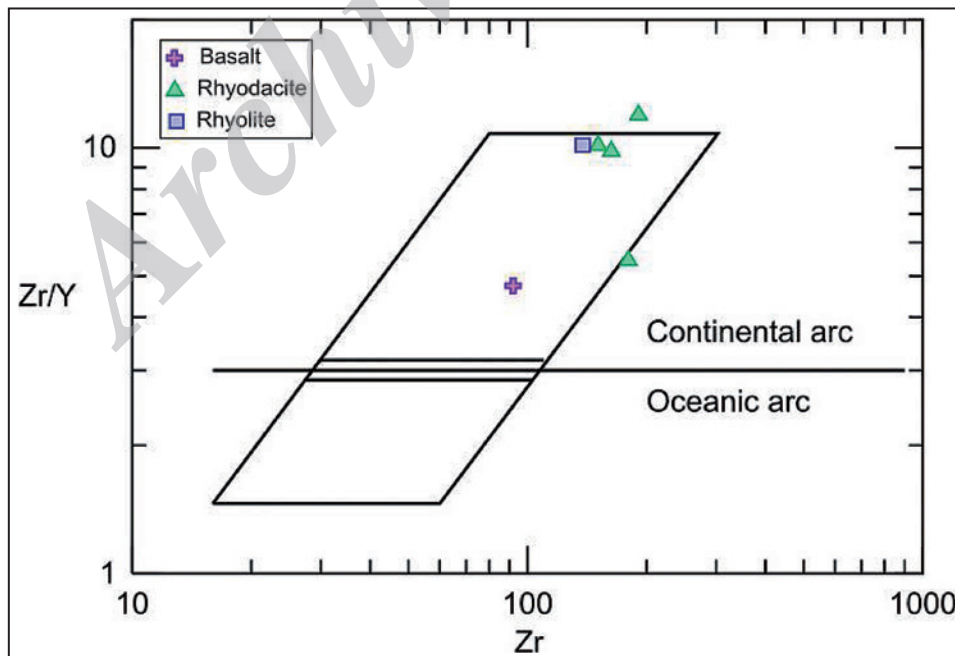
شکل ۱۲- موقعیت سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه در نمودار (Wood 1980).



شکل ۱۱- موقعیت سنگ‌های آتشفشانی اسیدی منطقه مورد مطالعه در نمودار (Pearce et al. 1984).



شکل ۱۳- الگوی چندعنصره بهنجار شده نسبت به کندریت (Sun, 1980) برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه.



شکل ۱۴- نمودار Zr/Y- Zr (Dunphy & Ludden, 1998) برای تعیین محیط زمین‌ساختی نمونه‌های منطقه مورد مطالعه.

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی، فرعی و خاکی کمیاب نمونه‌های سنگی منطقه مورد مطالعه (عناصر اصلی برحسب درصد حجمی و عناصر فرعی و خاکی کمیاب برحسب بخش در میلیون).

SAMPLE Rock Type	RA6 Rhyodacite	RBI Rhyodacite	RCI Basalt	RD5 Rhyodacite	RE Rhyodacite	RF4 Rhyolite
SiO ₂	70.70	67.80	51.90	69.70	67.50	74.90
Al ₂ O ₃	12.76	15.50	16.90	15.70	17.85	12.45
Fe ₂ O ₃	3.19	3.11	7.89	2.63	2.42	2.31
CaO	1.48	0.59	5.97	0.68	0.80	0.57
MgO	1.09	0.20	2.45	0.39	0.33	0.05
Na ₂ O	3.32	8.14	5.60	5.78	10.45	5.38
K ₂ O	4.37	1.59	2.19	3.86	0.13	2.75
Cr ₂ O ₃	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
TiO ₂	0.39	0.36	1.22	0.35	0.37	0.25
MnO	0.04	0.04	0.10	0.03	0.02	0.03
P ₂ O ₅	0.19	0.21	0.21	0.12	0.24	0.08
SrO	0.02	<0.01	0.07	0.02	<0.01	0.01
BaO	0.06	0.02	0.18	0.11	0.08	0.09
LOI	1.29	0.60	3.87	0.50	0.90	0.20
Total	98.90	98.20	98.60	99.90	101	99.10
Cr	10	10	40	10	<10	30
Ga	15.20	14.50	15.00	12.10	21.30	10.40
Ni	<5	<5	17	<5	5	<5
V	22	30	180	25	21	57
Zn	73	98	105	39	35	32
Rb	134	37.80	54.70	83.10	3.50	42.60
Sr	108.50	125.50	656	193.50	118	231
Y	33.10	16.60	19.40	14.90	16.00	13.60
Zr	180	163	92	151	191	138
Nb	13.00	9.50	5.90	8.90	11.10	10.40
Cs	1.46	0.50	2.76	0.88	0.17	0.14
Ba	525	243	1595	916	787	745
Hf	5.30	4.30	2.60	4.10	5	4.20
Ta	1	0.70	0.40	0.70	0.80	0.80
Pb	15	8	6	6	5	7
Th	15.05	10.25	3.94	9.63	10.25	12.50
U	3.61	2.79	1.14	2.46	2.44	3.48
La	30.10	29.60	16.70	30.40	38.10	10.60
Ce	59	57	34.60	55.20	72.80	22
Pr	6.58	6.46	4.45	6.04	7.36	2.64
Nd	24.50	23.30	19.80	21.50	27.40	10.30
Sm	4.79	4.01	4.52	3.77	4.92	2.08
Eu	0.90	1.01	1.38	0.87	1.27	0.53
Gd	4.97	3.82	4.35	3.55	4.33	2.01
Tb	0.82	0.52	0.66	0.49	0.60	0.34
Dy	5.41	3.03	3.73	2.74	3.18	2.26
Ho	1.14	0.60	0.72	0.53	0.59	0.51
Er	3.65	1.90	2.07	1.72	1.68	1.67
Tm	0.53	0.27	0.28	0.24	0.23	0.27
Yb	3.68	1.99	1.83	1.63	1.60	2.05
Lu	0.56	0.30	0.27	0.26	0.23	0.33

کتابنگاری

بومری، م.، گرگیچ، م. ن.، بیابانگرد، ح. و خطیب، م. م.، ۱۳۸۳- ژئوشیمی سنگ‌های ولکانیکی تفتان، جنوب شرق ایران. هشتمین همایش انجمن زمین شناسی ایران. در گاهی، س.، ۱۳۸۶- ماگماتیسزم پس از برخورد میوسن در گستره سرچشمه- شهر بابک، شمال غرب کرمان: بررسی داده‌های ایزوتوپی، تحلیل‌های پتروژنتیکی و الگوی ژئودینامیکی توده‌های گرانیتویدی و نقش ماگماتیسزم آداکیتی در توسعه کانه‌زایی مس. پایان نامه دکتری پترولژی. دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده علوم، بخش زمین شناسی. ۳۱۱ ص. سهندی، م. ر. و حاج ملا علی، ا.، ۱۳۷۴- نقشه زمین شناسی راور به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور. عزیزان، ح.، سیفوری، س. و شهرکی، ا.، ۱۳۷۲- نقشه زمین شناسی کرمان به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

References

- Best, M. G. & Christiansen, E. H., 2001- *Igneous petrology*, Blackwell 458 pp.
- Campbell, K., Ghazi, A. M., LaTour, T. & Hassanipak, A. A., 2000- *Geochemistry, petrology and tectonics of the Shahr-e-Babak ophiolite, SE. Iran. Abstracts with Programs-Geological Society of America, southeastern Section 31, 9.*
- Cullers, R. L. & Graf, J. L., 1984- Rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: Intermediate and silicic rocks- ore petrogenesis. In Henderson, P., *Rare earth element geochemistry*. Elsevier Amsterdam 275-316.
- Donaldson, C. H. & Henderson, C. M. B., 1988- A new interpretation of round embayments quartz crystals. *Mineralogical Magazine* 52: 27-33.
- Dunphy, J. M. & Ludden, J. N., 1998- Petrological and geochemical characteristics of a Paleoproterozoic magmatic arc (Narsajuaq terrane, Ungava, Canada) and compositions to Superior Province granitoids. *Precambrian Research* 91: 109-152.
- Gill, J. B., 1981- *Orogenic andesites and plate tectonics*. Springer-Verlag, Berlin 358 pp.
- He, Y., Zhao, G., Sun, M. & Wilde, S. A., 2007- *Geochemistry, isotope systematic and petrogenesis of the volcanic rocks in the Zongtiao moution: An alternative interpretation for the evolution of the southern margin of the North China craton. Lithos* 102: 158-178.
- Henderson, P., 1984- *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, Amesterdam 510 pp.
- Irvine, T. N. & Baragar, W. R. A., 1971- A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Science* 8: 523-548.
- Kawabata, H. & Shuto, K., 2005- Magma mixing recorded in intermediate rocks associated with high-Mg andesites from the Setouchi volcanic belt, Japan: implications for Archean TTG formation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 140: 241- 271.
- Khalaji, A. A., Esmaily, D., Valizadeh, M. V. & Rahimpour, H., 2005- Petrology and geochemistry of the complex Borojerd, Sanandaj-Sirjan zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 29: 859-877.
- Lang, J. R., 1991- *Isotopic and geochemical characteristics of Laramid igneous rocks in Arizona*, Ph.D. thesis, University of Arizona 20 pp.
- Lentz, D. R., 1998- Petrogenetic evolution of felsic volcanic sequences associated with Phanerozoic volcanic-hosted massive sulphide systems: The role of extensional geodynamics. *Ore Geology Reviews* 12: 289-327.
- Magganas, A. C., 2002- Constraints on the petrogenesis of Evros ophiolite extrusives, NE Greece. *Lithos* 65: 165-182.
- Menuge, J. F., Brewer, T. S. & Seeger, C. M., 2002- Petrogenesis of metaaluminous A-type rhyolites from the St Francois Mountains, Missouri and the mesoproterozoic evolution of the southern Laurentian matgin. *Precambrian Research* 113: 269-291.
- Muller, D. & Groves, D. I., 1997- Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization. *Lecture Notes in Earth Sciences* No.56.
- Nelson, S. T. & Montana, A., 1992- Sieve-textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression. *American Mineralogist* 77: 1242-1249.
- Pearce, J. A. Harris, B. W. & Tindle, A. G., 1984- Ttrace element of diseriminant diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25: 956-983.
- Pfander, J. A., Jochum, K. P., Kroner, I. K. A. & Todt, W., 2002- Coupled evolution of back-arc and island arc like mafic crust in the late-Neoproterozoic Agardagh Tes-Chem ophiolite, Central Asia: evidence from trace element and Sr- Nd- Pb isotope data. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 143: 154-174.
- Plechov, P. Y., Tsai, A. E., Shcherbakov, V. D. & Dirksen, O. V., 2008- Opacitization Conditions of Hornblende in Bezymyanni Volcano Andesites (March 30, 1956 Eruption). *Petrology* 16(1): 19-35.
- Rollinson, H., 1998- *Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation*. Longman, Singapore 352 pp.
- Shand, S. J., 1943- *Eruptive Rocks; Their Genesis, Composition, Classification, and their Relation to Ore Deposits*”, with a chapter on Meteorites (revised second edition): Hafner Publishing Co., New York 444 pp.
- Shelly, D., 1993- *Igneous and metamorphic rocks under the microscope*. Chapman and Hall 445 pp.
- Sun, S. S. & McDonough, W. F., 1989- Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle compositions and processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication 42: 313-345.
- Sun, S. S., 1980- Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and island arcs. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 297: 409-445.
- Vernon, R. H., 2004- *A Practical Guide to Rock Microstructure*. Cambridge University Press, Cambridge 336.
- Wang, Q., Xu, J. F., Jian, P., Bao, Z. W., Zhao, Z. H., Li, C. F., Xiong, X. L. & Ma, J. L., 2006- Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology* 47: 119-144.
- Winchester, J. A. & Floyd, P. A., 1977- Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements, *Chemical Geology* 20: 325-343.
- Wood, D. A., 1980- 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 and Planetary Science Letters* 50: 11-30.
- Zen, E., 1986- Aluminum enrichment in silicate melts by fractional crystallization: some mineralogical and petrographic constraints. *Journal of Petrology* 27: 1095-1118.