

پتروگرافی و ژئوشیمی نهشته‌های سیلیسی آواری برش آرک (پالئوسن فوقانی - ائوسن زیرین)، شمال غرب بیرجند، شاهدهی بر جایگاه زمین‌ساختی و سنگ‌شناسی خاستگاه

مریم مرتضوی مهریزی^{۱*}، فریده ملک‌محمدی فرادنبه^۲ و محمودرضا هیهات^۳

۱- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

نویسنده مسئول: mmortazavi@birjand.ac.ir

چکیده

برش آرک در شمال غرب بیرجند در زون ساختاری شرق ایران واقع شده‌است. پتروگرافی و ژئوشیمی نهشته‌های سیلیسی آواری این برش به منظور تعیین ترکیب سنگ‌شناسی و جایگاه زمین‌ساختی ناحیه منشأ مورد مطالعه قرار گرفته‌است. شواهد پتروگرافی نمونه‌های ماسه‌سنگی از جمله انواع کوارتزهای تک‌بلور و چندبلور با خاموشی مستقیم و موجی، فراوانی خرده‌سنگ‌های رسوبی و به مقدار کمتر خرده‌سنگ‌های دگرگونی و ولکانیکی و همچنین ترسیم نتایج آنالیز مودال این نمونه‌ها بر روی نمودارهای تعیین‌کننده منشأ زمین‌ساختی نشان می‌دهد ماسه‌سنگ‌های مطالعه شده حاصل حمل مجدد رسوبات، پس از برخورد و کوهزایی‌اند. بر اساس بررسی ژئوشیمی عناصر اصلی نمونه‌های شیلی نیز این رسوبات از سنگ‌های آذرین منشأ گرفته و به جایگاه زمین‌ساختی برخوردی تعلق دارند. زون زمین‌درز سیستان بین دو بلوک قاره‌ای لوت و افغان واقع شده‌است. بر مبنای کار محققین قبلی، فروانش پوسته اقیانوسی سیستان نقش مهمی را در تحول تکتونیکی منطقه داشته‌است. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که بدلیل فروانش به سمت غرب اقیانوس سیستان در کرتاسه پیشین تا میانی، گوشته فوقانی به زیر بلوک لوت رانده شده و برخورد بین بلوک افغان و لوت در طول زون زمین‌درز سیستان احتمالاً در کرتاسه فوقانی رخ داده‌است. تلفیق داده‌های فوق و مقایسه آن با تحول زمین‌ساختی منطقه نشان می‌دهد که نتایج این مطالعه می‌تواند برای بازسازی جغرافیای دیرینه منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: کانی‌شناسی، اکسیدهای عناصر اصلی، موقعیت برخوردی، پالئوسن فوقانی - ائوسن زیرین، شمال غرب بیرجند.

مقدمه

سنگ‌های رسوبی آواری اطلاعات با ارزشی را در مورد ترکیب، جایگاه زمین‌ساختی و تکامل پوسته قاره‌ای در اختیار قرار می‌دهند (نسبیت و یانگ، ۱۹۸۲؛ باتیا، ۱۹۸۳؛ روزر و کورش، ۱۹۸۶؛ پریاسامی و ونکاتشوارلو، ۲۰۱۷؛ بیگونهی و همکاران، ۲۰۱۷). این سنگ‌ها به عنوان شاهد پوسته قدیمی فوقانی، ممکن است توسط فرسایش مجدداً به حرکت در آمده و توسط نهشته‌های رسوبی دیگر یا یخ پوشیده شوند یا به صورت عمیق در پوسته دفن شوند (زانگ و همکاران، ۲۰۲۰). اگرچه مطالعه پتروگرافی ماسه‌سنگ‌ها فرآیندهای مرتبط با منشأ، موقعیت زمین‌ساختی، محیط رسوبگذاری و حمل و نقل ذرات آواری را آشکار می‌سازد ولی چون دانه‌های چارچوب ماسه‌سنگ تحت تأثیر فشردگی و دفن دچار تغییر می‌شود ممکن است نتیجه‌گیری را با مشکل مواجه کند. در صورتی که، دقت و صحت داده‌های ژئوشیمیایی، درک تفصیلی شواهد موجود در سنگ‌های آواری را برای محققین مقدر می‌سازد (پریاسامی و

ونکاتشوارلو، ۲۰۱۷). از آنجایی که ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی سنگ‌های رسوبی آواری توسط عوامل مختلف چون اختصاصات سنگ منشأ، هوازدگی، فرآیندهای جورشدگی در طی حمل‌ونقل، رسوبگذاری و فرآیندهای دیاژنتیکی متأثر می‌شود (رحمان و سوزوکی، ۲۰۰۷؛ وانی و مندال، ۲۰۱۱؛ توبیا و اسود، ۲۰۱۵؛ بیگونهی و همکاران، ۲۰۱۷؛ هک و روی، ۲۰۲۰)، تلفیقی از اطلاعات پتروگرافی و ژئوشیمی سنگ‌های رسوبی سیلیسی‌آواری می‌تواند ترکیب سنگ‌شناسی ناحیه منشأ رسوبات، موقعیت زمین‌ساختی حوضه‌های رسوبی و شرایط آب‌وهوای دیرینه را مشخص سازد (برای مثال، دیکینسون و سوزک، ۱۹۷۹؛ باتیا، ۱۹۸۳؛ روزر و کورش، ۱۹۸۸؛ توبیا و اسود، ۲۰۱۵؛ ناگراجان و همکاران، ۲۰۱۷). محدوده مورد مطالعه، بخشی از پهنه ساختاری شرق ایران است که در تقسیم‌بندی پهنه‌های رسوبی-ساختاری ایران توسط آقانباتی (۱۳۸۳) تحت عنوان حوضه فلیشی شرق ایران نامیده شده و در مجاورت حاشیه شمال غربی بلوک لوت قرار دارد. در حوضه فلیشی شرق ایران سنگ‌های قدیمی تر از کرتاسه رخنمون ندارد. در ناحیه بیرجند، رسوبگذاری توالی‌های رسوبی پالئوژن از زمان پالئوسن-ائوسن و به دنبال عملکرد فاز کوهزایی لارامید آغاز شده و تا اواخر ائوسن میانی ادامه داشته‌است (آقانباتی، ۱۳۸۳). بخش عمده تحقیقات انجام شده درباره نهشته‌های پالئوسن-ائوسن شمال غرب بیرجند به بررسی‌های ساختاری نظیر تحلیل هندسی-جنبشی چین‌خوردگی‌ها و همچنین، مطالعات فسیل‌شناسی، رسوب‌شناسی و محیط رسوبی واحدهای کربناته منطقه معطوف شده‌است (برای مثال، صمدی افخم، ۱۳۹۱؛ مقدسی، ۱۳۹۲؛ یعقوبی و باقری، ۱۳۹۹). از آنجایی که بررسی‌های رسوب‌شناسی، پتروگرافی و ژئوشیمی سنگ‌های سیلیسی‌آواری در این منطقه بسیار محدود است و تاکنون مطالعه‌ای در این زمینه در برش مورد نظر انجام نشده‌است، مطالعه موارد یاد شده ضروری به نظر می‌رسد. هدف مطالعه حاضر، ارزیابی پتروگرافی طبقات ماسه‌سنگی و ژئوشیمی عناصر اصلی طبقات شیلی توالی رسوبی پالئوسن فوقانی-ائوسن زیرین برش آرک، شمال غرب بیرجند به منظور درک موقعیت زمین‌ساختی منشأ این رسوبات در زمان رسوبگذاری توالی مذکور است. بدیهی است یافته‌های این تحقیق به بازسازی شرایط جغرافیای دیرینه منطقه در این زمان کمک خواهد کرد.

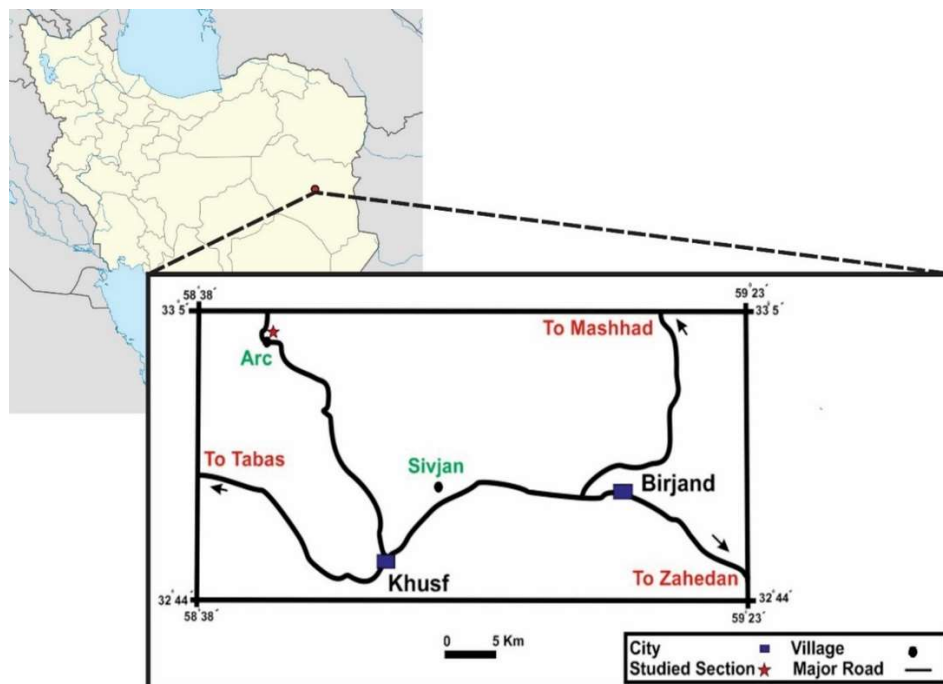
موقعیت زمین‌شناسی ناحیه مورد مطالعه

منطقه مورد نظر در پایانه شرقی ایران و در حد فاصل دو گسل نهبندان (در غرب) و گسل هریرود (در شرق) و در گستره‌ای به وسعت ۸۰۰ کیلومتر طول و ۲۰۰ کیلومتر عرض واقع شده‌است. در این پهنه، انباشته‌های ضخیم از نهشته‌های فلیش‌گونه برجای گذاشته شده که پی‌سنگ افیولیتی دارد. این پهنه که مراحل تکوین از پوسته اقیانوسی تا قاره‌ای را پشت‌سر گذاشته یکی از اشتقاق‌های نئوتتیس است (تیرول و همکاران، ۱۹۸۳). این منطقه که از نظر تقسیم‌بندی ساختاری تحت عنوان زون فلیش شرق ایران (آقانباتی، ۱۳۸۳) یا زون زمین درز سیستان (SSZ¹) (تیرول و همکاران، ۱۹۸۳) نامگذاری شده، از زمان کرتاسه پیشین تا پالئوسن بین دو بلوک قاره‌ای لوت در غرب و بلوک افغان در شرق قرار داشته‌است (تیرول و همکاران، ۱۹۸۳). مجموعه فرورانش موجود در زون زمین‌درز سیستان حاصل برخورد بلوک لوت-ایران مرکزی با کوچک قاره افغان در زمان کرتاسه پیشین تا پالئوسن است که با بسته‌شدن اقیانوس نئوتتیس به سمت شمال همراه بوده‌است. حوضه اقیانوسی نئوتتیس کوچک تحت عنوان اقیانوس سیستان، طی تخریب گوه برافزاینده تغییر شکل یافته زون زمین درز سیستان ایجاد شده‌است (تیرول و همکاران، ۱۹۸۳). به‌عبارتی، بلوک لوت به همراه پلیت ایران مرکزی توسط زون اقیانوس سیستان از بلوک افغان جدا شده‌است (بروکر و همکاران، ۲۰۱۳). زون زمین‌درز سیستان توسط تیرول و همکاران (۱۹۸۳) به دو واحد اصلی تقسیم شده‌است: (۱) مجموعه نه-رتوک تا غرب و (۲) حوضه جلوی قوسی سفیدابه یا زون اقیانوس سیستان. با جای‌گیری افیولیت‌ها و افیولیت ملانژهای کرتاسه، تکامل ساختاری زون زمین‌درز سیستان ادامه یافته و نهایتاً با رسوبگذاری فلیش‌های کرتاسه پسین-ائوسن دنبال می‌شود (بابازاده و دی‌وور، ۲۰۰۴). در مجموعه نه-رتوک، واحدهای افیولیت ملانژ، سنگ‌های دگرگون شده و سنگ‌های دگرگون نشده قابل مشاهده‌است درحالی‌که حوضه جلوی قوسی سفیدابه شامل رسوبات فلیشی به سن ماستریشتین تا ائوسن است که به‌صورت ناپیوسته بر روی مجموعه نه-رتوک قرار می‌گیرد (تیرول و همکاران، ۱۹۸۳). توالی رسوبی آواری پالئوسن-ائوسن در شرق ایران از نظر تنوع سنگ‌شناسی بسیار متنوع و از گسترش و ضخامت قابل توجه‌ای

¹Sistan Suture Zone: SSZ

برخوردار است. برش چینه‌شناسی موردنظر، برش آرک نام دارد که در ۷۰ کیلومتری شمال غرب بیرجند و ۴۰ کیلومتری شمال غرب خوسف واقع شده است (شکل ۱). جاده اصلی بیرجند-طبس مهم‌ترین راه دستیابی به برش موردنظر است. موقعیت جغرافیایی برش آرک، $33^{\circ} 1' 13.67''$ عرض شمالی و $58^{\circ} 40' 7.16''$ طول شرقی است که در محدوده نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ موسویه (روشن‌روان، ۱۳۸۵) قرار می‌گیرد. با توجه به نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ (موسویه (روشن‌روان، ۱۳۸۵) محدوده مورد مطالعه از نظر سنگ‌شناسی به طور عمده متشکل از رسوبات پالئوسن-ائوسن است. در منطقه مورد مطالعه، قدیمی‌ترین سنگ‌ها مربوط به کرتاسه بوده و جدیدترین آنها به ائوسن تعلق دارند.

نهشته‌های سیلیسی‌آواری این برش شامل طبقات کنگلومرایی، ماسه‌سنگی و شیلی با سن پالئوسن فوقانی-ائوسن زیرین و دارای ضخامت ۱۷۱ متر بوده و از سه واحد سنگ‌چینه‌ای (شکل ۲C) تشکیل شده است: (۱) واحد ماسه‌سنگی-شیلی زیرین، (۲) واحد کنگلومرایی میانی و (۳) واحد ماسه‌سنگی-شیلی فوقانی. مرز تحتانی این توالی با واحدهای فلیشی کرتاسه زیرین به صورت ناپیوسته و فرسایشی (شکل ۲B) و مرز بالایی آن با واحدهای مارنی و آهکی ائوسن زیرین به صورت تدریجی است (شکل ۲A). واحد ماسه‌سنگی-شیلی زیرین با ضخامت ۶۵ متر از تناوب طبقات ماسه‌سنگی متوسط تا ضخیم لایه و شیل‌های دارای لامیناسیون افقی تشکیل شده است. واحد کنگلومرایی میانی با ضخامت ۱۰۰ متر ضخیم‌لایه و درشت‌دانه بوده و پلی میکتیک و دانه‌پشتیبان است. طبقه‌بندی تدریجی و ایمبریکاسیون در قطعات گراولی این واحد قابل مشاهده است. واحد ماسه سنگی-شیلی فوقانی با ضخامت ۶ متر شامل طبقات متوسط تا نازک‌لایه بوده و در ظاهر به صورت توده‌ای است. بررسی و شناسایی رخساره‌های سنگی، نحوه تغییرات عمودی و جانبی رخساره‌ای همراه با داده‌های پتروگرافی نشان می‌دهد که رخساره‌های این توالی در محیطی قاره‌ای و احتمالاً در سیستم رودخانه‌ای بریده بر جای گذاشته شده‌اند (ملک محمدی فردانبه و همکاران، ۱۳۹۹).



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به برش آرک.

Figure 1 Geographical location and ways to access the Arc section.

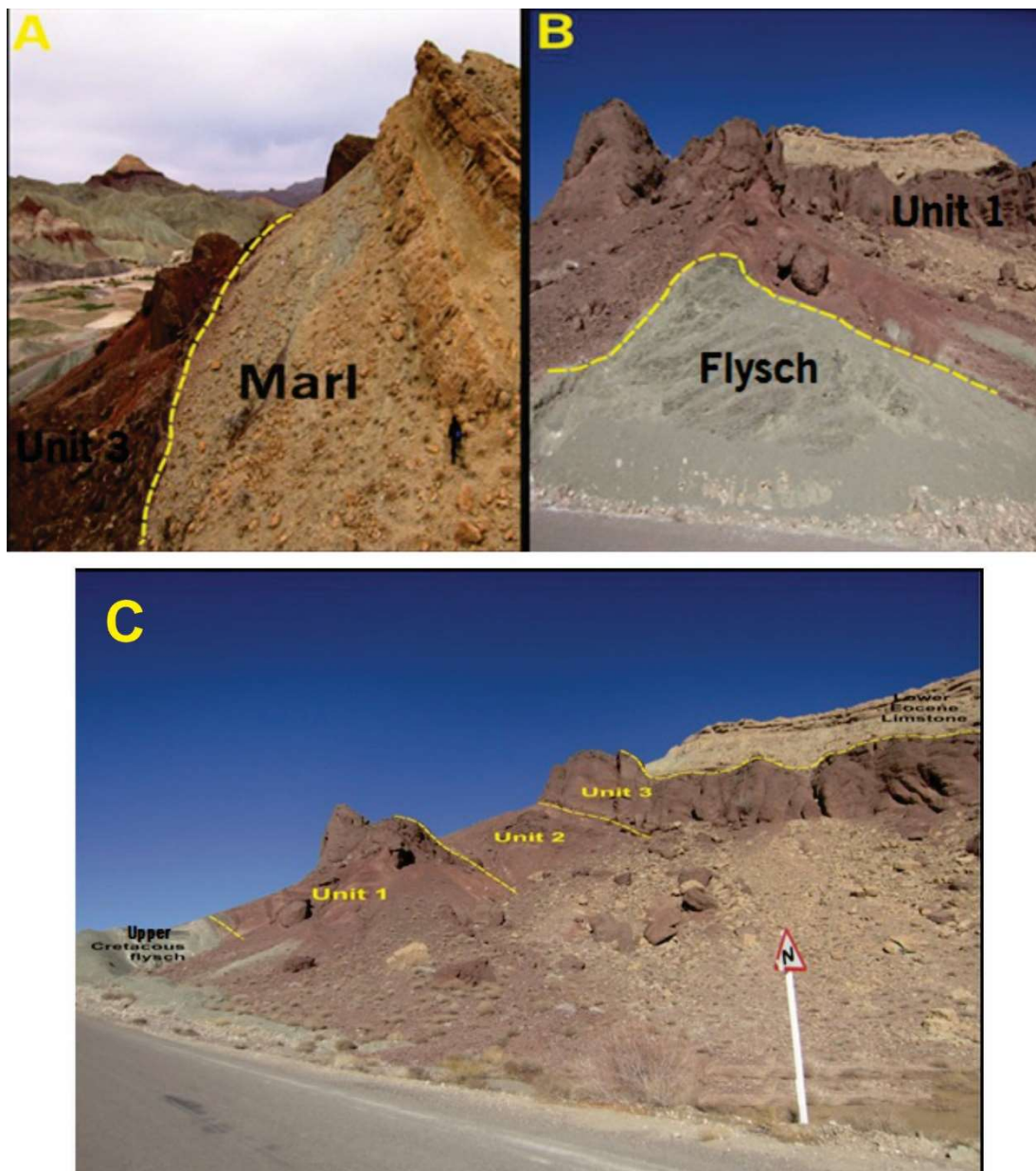
روش مطالعه

از توالی رسوبی سیلیسی آواری برش آرک تعداد ۶۵ نمونه سنگی شامل ۴۴ نمونه کنگلومرایی، ۱۰ نمونه ماسه‌سنگی و ۱۱ نمونه شیلی تازه جهت مطالعه چینه‌شناسی و رسوب‌شناسی جمع‌آوری شده‌است. تعداد ۱۰ مقطع نازک از ماسه‌سنگ‌های توالی مورد نظر تهیه و توسط میکروسکوپ پلاریزان مورد مطالعه قرار گرفته‌است. ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌های ماسه‌سنگی توسط تجزیه و تحلیل مودال تعیین شده‌است. شمارش نقطه‌ای با استفاده از روش گازی-دیکینسون (گازی، ۱۹۶۶؛ دیکینسون، ۱۹۷۰؛ اینگرسول و همکاران، ۱۹۸۴؛ زوفا، ۱۹۸۵) صورت گرفته‌است. حدود ۳۰۰ نقطه برای هر مقطع شمارش شده و نتایج تجزیه و تحلیل مودال دانه‌های چارچوب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده‌است. نامگذاری ماسه‌سنگ‌ها بر اساس طبقه‌بندی ترکیبی (فولک، ۱۹۸۰) صورت گرفته‌است. علائم و حروف اختصاری بکاررفته در جدول‌ها و نمودارهای ترسیم شده در جدول ۱ معرفی شده‌اند. همچنین، ۱۱ نمونه شیلی از توالی مورد مطالعه جهت انجام تجزیه و تحلیل ژئوشیمیایی انتخاب شده‌است. میزان عناصر اصلی نمونه‌های فوق توسط دستگاه ICP-OES در شرکت زر آزما تهران اندازه‌گیری شده‌است. در این روش، نمونه در حد ۷۵ میکرون پودر شده و در کوره ۱۰۵۰ درجه قرار گرفته تا کاملاً ذوب شود. سپس نمونه همگن از داخل کوره بیرون آورده شده و سرد می‌شود. پس از محلول‌سازی و قرارگیری محلول مورد نظر در دستگاه خوانش انجام شده و نتایج تجزیه عناصر اصلی گزارش می‌شود. مقدار اکسیدهای عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی (wt. %) ارائه شده‌است (جدول ۴). میزان خطای نسبی برای عناصر اصلی کمتر از ۲ درصد است و آهن کل به صورت Fe_2O_3 گزارش شده‌است.

نتایج و بحث

پتروگرافی و کانی‌شناسی ماسه‌سنگ‌ها

تجزیه مودال دانه‌های تخریبی سازنده ماسه‌سنگ‌ها به‌طور گسترده جهت مطالعات منشأ مورد استفاده قرار می‌گیرد (دیکینسون و همکاران، ۱۹۸۳؛ چیمبا و همکاران، ۲۰۱۸؛ بیگونهی و همکاران، ۲۰۲۰). از این رو، ترکیب کانی‌شناسی سنگ‌های رسوبی آواری معمولاً به‌عنوان نشانه‌ای حساس از منشأ، آب و هوا و زمین‌ساخت مورد استفاده قرار می‌گیرد (بیگونهی و همکاران، ۲۰۲۰).



شکل ۲ تصاویر صحرایی از (A) مرز فوقانی برش آرک با واحد مارنی-آهکی ائوسن زیرین و (B) مرز تحتانی توالی قرمز رنگ مورد مطالعه با واحد فلیشی کرتاسه فوقانی (جهت دید شمال شرق). (C) تصویر کلی از برش مورد مطالعه (جهت دید به سمت شمال شرق).

Figure 2 Field images of (A) The upper boundary of the arc section with the lower Eocene marl-limestone unit and (B) The lower boundary of the studied red sequence with the Upper Cretaceous flysch unit (northeast view). (C) General view of the studied section (viewing towards the northeast).

بر مبنای کار دیکینسون و همکاران (۱۹۸۳) اجزاء تشکیل‌دهنده رسوب تابعی از ترکیب سنگ مادر، هوازگی و حمل‌ونقل است؛ بنابراین، دانه‌های سازنده چارچوب ماسه‌سنگ‌ها (مودهای تخریبی^۱) با موقعیت زمین‌ساختی ناحیه منشأ در ارتباطند. محققین متعددی (برای مثال، باسو و همکاران، ۱۹۷۵؛ دیکینسون، ۱۹۷۹؛ دیکینسون و همکاران، ۱۹۸۳؛ جعفرزاده و حسینی برزی، ۲۰۰۸) به بررسی نحوه ارتباط بین موقعیت زمین‌ساختی و پتروگرافی ماسه‌سنگ‌ها پرداخته‌اند. یافته‌های حاصل از بررسی‌های مذکور نشان می‌دهد که مطالعات پتروگرافی دانه‌های چارچوب ماسه‌سنگ‌ها (مودهای تخریبی) می‌تواند برای تعیین موقعیت زمین‌ساختی منشأ و فرآیندهای رسوبی مرتبط مورد استفاده قرار گیرد (بیگونهی و همکاران، ۲۰۲۰). از نظر بافتی، ماسه‌سنگ‌های مطالعه شده عموماً متوسط تا درشت‌دانه (۰/۳۴ تا ۰/۸۹ میلی‌متر) بوده و از جورشدگی متوسط تا خوب برخوردارند. شکل دانه‌ها اغلب نیمه زاویه‌دار تا نیمه گردشده است و تماس بین دانه‌ها از نوع نقطه‌ای تا مضرس در تغییر است. ماسه‌سنگ‌های فوق از دانه‌های چارچوب، کانی‌های فرعی، سیمان و فضاهای خالی ساخته شده‌اند. دانه‌های سازنده چارچوب سنگ شامل کوارتز، فلدسپات و خرده‌های سنگی است، درحالی‌که کانی‌های فرعی شامل میکای مسکویت و کانی‌های سنگین تیره است. سیمان زمینه بیشتر از نوع سیمان کربناته (کلسیتی) و اکسید آهن است.

جدول ۱ علائم اختصاری به کار رفته در جدول‌ها، دیاگرام‌ها یا نمودارهای این مطالعه.
Table 1 Abbreviations used in the tables, diagrams or charts of this study.

علائم بکاررفته	تعریف
Q _{m non}	کوارتز تک‌بلور با خاموشی مستقیم
Q _{m un}	کوارتز تک‌بلور با خاموشی موجی
Q _{p>3}	کوارتز چندبلور با بیش از ۳ دانه
Q _{p2-3}	کوارتز چندبلور با ۲ تا ۳ دانه
Q _m	کوارتز تک‌بلور (کوارتز تک‌بلور با خاموشی مستقیم + کوارتز تک‌بلور با خاموشی موجی)
Q _t or Q	کوارتز کل (مجموع کوارتز تک‌بلور و چندبلور)
F	فلدسپات کل
P	پلاژیوکلاز
K	فلدسپات پتاسیم‌دار
L _s	خرده‌سنگ رسوبی
L _v	خرده‌سنگ ولکانیکی
L _m	خرده‌سنگ دگرگونی
L _{vm}	خرده‌سنگ ولکانیکی دگرگون شده
L _{sm}	خرده‌سنگ رسوبی دگرگون شده
L	خرده‌سنگ‌های آواری ناپایدار (مجموع خرده‌سنگ‌های ولکانیکی، رسوبی و رسوبی دگرگون شده)
L _t	خرده‌سنگ‌های آواری کل (خرده‌سنگ‌های آواری ناپایدار + کوارتز چندبلور)
RF	کل خرده‌سنگ‌های ناپایدار و چرت که برای طبقه بندی Folk (1980) استفاده شده است.
Chert	خرده‌سنگ رسوبی چرتی
Carbonate	خرده‌سنگ رسوبی کربناته
Sandstone	خرده‌سنگ رسوبی ماسه‌سنگی
Siltstone	خرده‌سنگ رسوبی سیلتستونی

¹Detrital Mode

در این ماسه‌سنگ ها، کوارتز نیمه زاویه‌دار تا نیمه گردشده حدود ۱۱/۶ تا ۴۷/۳ درصد چارچوب سنگ را تشکیل می‌دهد. دانه‌های کوارتز هم به شکل تک‌بلور (Q_m) و هم به صورت چندبلور (Q_p) وجود دارد و اغلب خاموشی‌های مستقیم و موجی را نشان می‌دهند. در نمونه‌های مورد بررسی، فراوانی کوارتز تک‌بلور (Q_m) بیشتر از کوارتز چندبلور (Q_p) بوده و به‌طور متوسط حدود ۴۵ درصد کل دانه‌های کوارتز را شامل می‌شود (جدول ۳). این دانه‌های کوارتز از نوع کوارتز پلوتونیک با خاموشی مستقیم و به مقدار کم خاموشی موجی (خاموشی موجی ضعیف < 5) می‌باشند. همچنین، فراوانی کوارتز چندبلور در ماسه سنگ‌های مورد نظر (تبلور مجدد و کشیده) به‌طور متوسط ۵ درصد کل دانه‌های کوارتز را شامل شده و از بیش از ۳ دانه ($Q_{p>3}$) تشکیل شده‌است. دانه‌های فلدسپات از نظر شکل نیمه زاویه‌دار تا نیمه گردشده بوده و حدود ۶/۵ تا ۳/۲ درصد دانه‌های چارچوب را شامل می‌شود. انواع فلدسپات‌های مشاهده شده از نوع فلدسپات پتاسیم‌دار (ارتوکلاز) و پلاژیوکلازاند که پلاژیوکلازها فراوان‌ترند. خرده‌های سنگی حدود ۱/۱ تا ۲۷ درصد اجزاء سنگ را به خود اختصاص می‌دهند. خرده‌های سنگی مشاهده شده به ترتیب فراوانی شامل خرده‌سنگ‌های رسوبی (ماسه‌سنگی، سیلتستونی، چرتی و کربناته)، خرده‌سنگ‌های ولکانیکی (آندزیتی) و خرده‌سنگ‌های دگرگونی (اسلیتی و فیلیتی) است. در ماسه‌سنگ‌های برش آرک، کانی‌های فرعی شامل میکای مسکویت (با فراوانی ۱ تا ۳ درصد) و کانی‌های سنگین تیره (با فراوانی ۹ تا ۱۷ درصد) است. در این ماسه‌سنگ‌ها میزان رس ماتریکسی بسیار ناچیز است (کمتر از ۱ درصد) و فضای خالی بین دانه‌ها با سیمان‌های کربناته (به شکل موزائیکی و بلوکی) و اکسید آهن (هماتیت) پر شده‌است. شکل‌های ۳ و ۴ تصاویر میکروسکوپی از برخی اجزاء تشکیل‌دهنده ماسه‌سنگ های مورد مطالعه می‌باشند. از نظر بلوغ بافتی و بر اساس درصد رس ماتریکسی، جورشدگی و گردشدگی دانه‌ها، ماسه‌سنگ های فوق در مرحله نیمه‌بالغ (ساب‌مچور) قرار دارند. نمونه‌های مطالعه شده از نظر ترکیب کانی‌شناسی (کوارتز کل، فلدسپات و خرده‌های سنگی) (فولک، ۱۹۸۰) لیتارنایت هستند (شکل ۵ و جدول ۳).

جدول ۲ نتایج دانه‌شماری اجزاء تشکیل‌دهنده ماسه‌سنگ‌های برش آرک.

Table 2 The point counting results of Arc Section sandstone components.

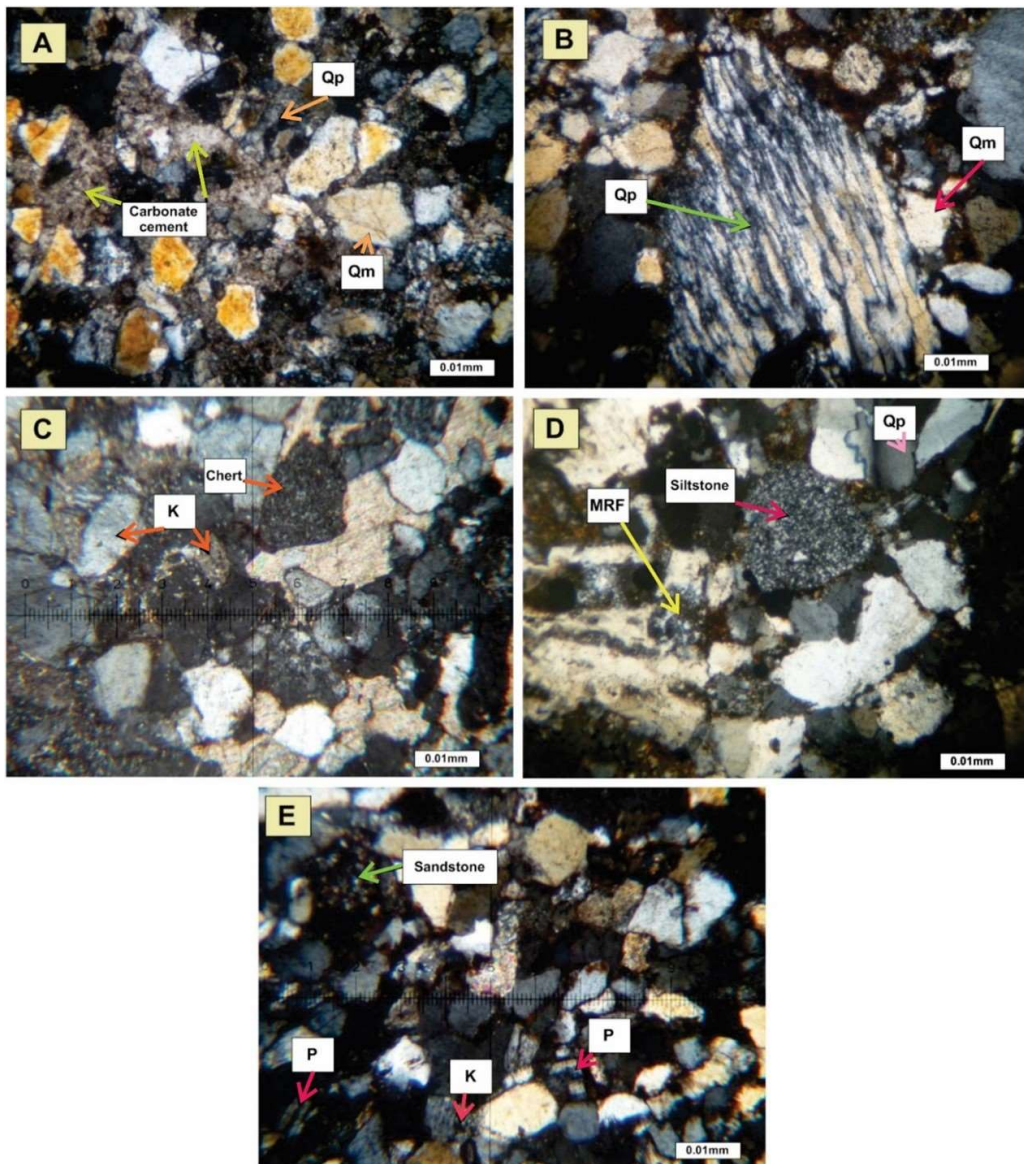
SUM	Opaque m.	Mica	MRF	VRF	Siltstone	Sandstone	Carbonate	Chert	P	K	Q_p	$Q_{m\ un}$	$Q_{m\ non}$	شماره نمونه
۳۰۰	۲۴	۴	۹	۱۷	۱۳	۵۵	۱۰	۱۶	۱۳	۸	۲۲	۱۳	۹۶	F4
۳۰۰	۱۴	۱	۴	۱۰	۱۰	۵۴	۷	۱۷	۱۴	۶	۲۳	۱۷	۱۲۳	F6
۳۰۰	۱۱	۱	-	۶	۱۰	۴۸	۱۳	۲۲	۱۷	۸	۳۰	۱۳	۱۲۱	F7
۳۰۰	۱۱	۳	۱۱	-	۱۲	۴۴	۷	۱۸	۸	۳	۲۰	۲۳	۱۴۰	F8
۳۰۰	۱۷	۴	-	-	۱۱	۵۶	۱۱	۱۵	۱۵	۸	۱۱	۸	۱۴۴	F10
۳۰۰	۱۶	۱	-	-	۱۵	۵۰	۱۱	۲۴	۱۴	۸	۲۹	۲۴	۱۰۸	F16
۳۰۰	۱۴	۴	-	۱۴	۲۴	۵۰	۱۳	۲۰	۱۴	۶	۳۰	۱۴	۹۷	F26
۳۰۰	۱۹	۳	-	۱۳	۲۴	۴۵	۹	۱۳	۱۵	۶	۲۱	۸	۱۲۴	F28
۳۰۰	۱۲	۳	-	۱	۲۰	۴۳	۱۱	۱۴	۱۶	۷	۵	۷	۱۶۱	F42
۳۰۰	۱۷	۱	-	۱۹	۱۶	۴۴	۸	۱۳	۱۵	۷	۳۰	۱۴	۱۱۶	F46

جدول ۳ درصد فراوانی دانه‌های تشکیل‌دهنده نمونه‌های ماسه‌سنگی مورد مطالعه.

Table 3 The abundance percentage of the constituent grains of the studied sandstone samples.

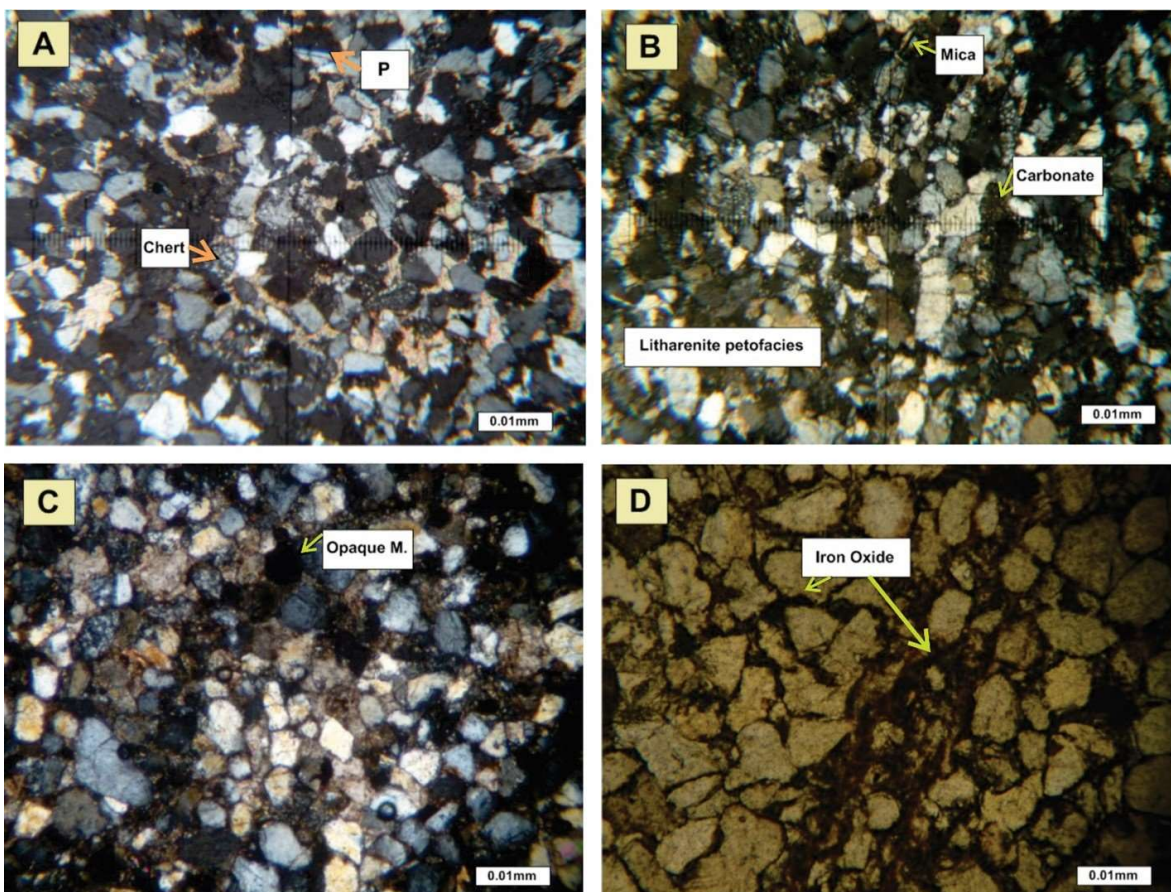
$L_t=Q_p+L$	$L=L_{vm}+L_{sm}$	L_m	L_v	L_s	Siltstone	Sandstone	Carbonate	Chert	F	P	K	Q_t	$Q_{p>3}$	$Q_{m\ un}$	$Q_{m\ non}$	شماره نمونه
۴۷/۱	۳۹/۸	۳/۰	۵/۶	۳۱/۲	۴/۳	۱۸/۳	۳/۳	۵/۳	۶/۹	۴/۳	۲/۶	۴۳/۶	۷/۳	۴/۳	۳۲/۰	F4
۴۱/۴	۳۳/۸	۱/۳	۳/۳	۲۹/۲	۳/۳	۱۸/۰	۲/۳	۵/۶	۶/۶	۴/۶	۲/۰	۵۴/۲	۷/۶	۵/۶	۴۱/۰	F6
۴۲/۹	۳۲/۹	-	۲/۰	۳۰/۹	۳/۳	۱۶/۰	۴/۳	۷/۳	۸/۲	۵/۶	۲/۶	۵۴/۶	۱۰/۰	۴/۳	۴۰/۳	F7
۳۷/۱	۳۰/۵	۳/۶	-	۲۶/۹	۴/۰	۱۴/۶	۲/۳	۶/۰	۳/۶	۲/۶	۱/۰	۶۰/۸	۶/۶	۷/۶	۴۶/۶	F8
۳۴/۴	۳۰/۸	-	-	۳۰/۸	۳/۶	۱۸/۶	۳/۶	۵/۰	۷/۶	۵/۰	۲/۶	۵۴/۲	۳/۶	۲/۶	۴۸/۰	F10
۴۲/۸	۳۳/۲	-	-	۳۳/۲	۵/۰	۱۶/۶	۳/۶	۸/۰	۷/۲	۴/۶	۲/۶	۵۳/۶	۹/۶	۸/۰	۳۶/۰	F16
۵۰/۱	۴۰/۱	-	۴/۶	۳۵/۵	۸/۰	۱۶/۶	۴/۳	۶/۶	۶/۸	۴/۶	۲/۰	۴۶/۹	۱۰/۰	۴/۶	۳۲/۳	F26
۴۱/۶	۳۴/۶	-	۴/۳	۳۰/۳	۸/۰	۱۵/۰	۳/۰	۴/۳	۷/۰	۵/۰	۲/۰	۵۰/۹	۷/۰	۲/۶	۴۱/۳	F28
۳۱/۰	۲۹/۴	-	۰/۳	۲۹/۱	۶/۶	۱۴/۳	۳/۶	۴/۶	۷/۶	۵/۳	۲/۳	۵۷/۵	۱/۶	۲/۳	۵۳/۶	F42
۴۳/۱	۳۳/۱	-	۶/۳	۲۶/۸	۵/۳	۱۴/۶	۲/۶	۴/۳	۷/۳	۵/۰	۲/۳	۵۳/۲	۱۰/۰	۴/۶	۳۸/۶	F46

درصد فراوانی و اختصاصات دانه‌های تخریبی چارچوب ماسه‌سنگ‌های برش آرک نشان‌دهنده حضور سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی قدیمی در ناحیه منشأ است. وجود کوارتزهای تک‌بلور و چندبلور در نمونه‌های مورد مطالعه نشان‌دهنده هر دو منبع آذرین و دگرگونی این دلنه‌هاست. بر مبنای طبقه‌بندی ژنتیکی و تجربی انواع کوارتز (فولک، ۱۹۸۰؛ یاسو، ۲۰۰۳) دانه‌های کوارتز تک‌بلور اغلب پلوتونیک هستند درحالی‌که کوارتزهای چندبلور از نوع کوارتز دگرگونی تبلور مجدد و کشیده می‌باشند. فراوانی کوارتزهای تک‌بلور با خاموشی مستقیم نشان‌دهنده اشتقاق این ماسه‌سنگ‌ها از منابع آذرین است. علاوه بر این، وجود دانه‌های کوارتز تک‌بلور با خاموشی موحی ضعیف و کوارتزهای چندبلور نشان‌دهنده وجود منابع دگرگونی تأمین‌کننده این دانه‌های کوارتز است. با توجه به ترکیب لیتارنایتی ماسه‌سنگ‌های برش آرک و فراوانی زیاد خرده‌سنگ‌های رسوبی به نظر می‌رسد فرسایش نهشته‌های رسوبی قدیمی‌تر نیز در تشکیل ماسه‌سنگ‌های این منطقه نقش داشته‌است. به عبارتی، در ایجاد اجزاء تشکیل‌دهنده ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه، تنوعی از سنگ‌های منشأ شامل سنگ‌های آذرین، رسوبی قدیمی و به مقدار کمتر دگرگونی شرکت داشته‌اند. علاوه بر نمونه‌های ماسه‌سنگی، قسمت اعظم توالی مورد مطالعه از طبقات کنگلومرای ضخم لایه تشکیل شده‌است. بررسی پتروفاسیس کنگلومرای نشان می‌دهد که اجزاء تشکیل‌دهنده قطعات و ماتریکس این پتروفاسیس با پتروفاسیس ماسه‌سنگی مشابه است. در قطعات کنگلومرا فراوانی کوارتز تک‌بلور (پلوتونیک) بین ۲ تا ۳۵ درصد، کوارتز چندبلور (دگرگونی تبلور مجدد و کشیده) حدود ۱ تا ۱۵ درصد، فلدسپات (ارتوکلاز و پلاژیوکلاز) از کمتر از ۱ تا ۶ درصد، خرده‌سنگ‌های رسوبی (شامل خرده‌های ماسه‌سنگی، سیلتستونی، چرتی و کربناته) حدود ۲۰ تا ۵۵ درصد و خرده‌سنگ‌های ولکانیک حدود کمتر از ۱ تا ۳ درصد است و بقیه اجزاء نظیر میکای مسکویت و کانی‌های سنگین تیره در ماتریکس کنگلومرا قابل مشاهده‌اند. تصویر میکروسکوپی برخی از قطعات کنگلومرای در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده‌است. تشابه ترکیب قطعات گراولی و فراوانی آنها در پتروفاسیس کنگلومرای با پتروفاسیس ماسه‌سنگی می‌تواند تأییدی بر حضور سنگ‌های آذرین، رسوبی و به مقدار کمتر دگرگونی در ناحیه منشأ رسوبات باشد.



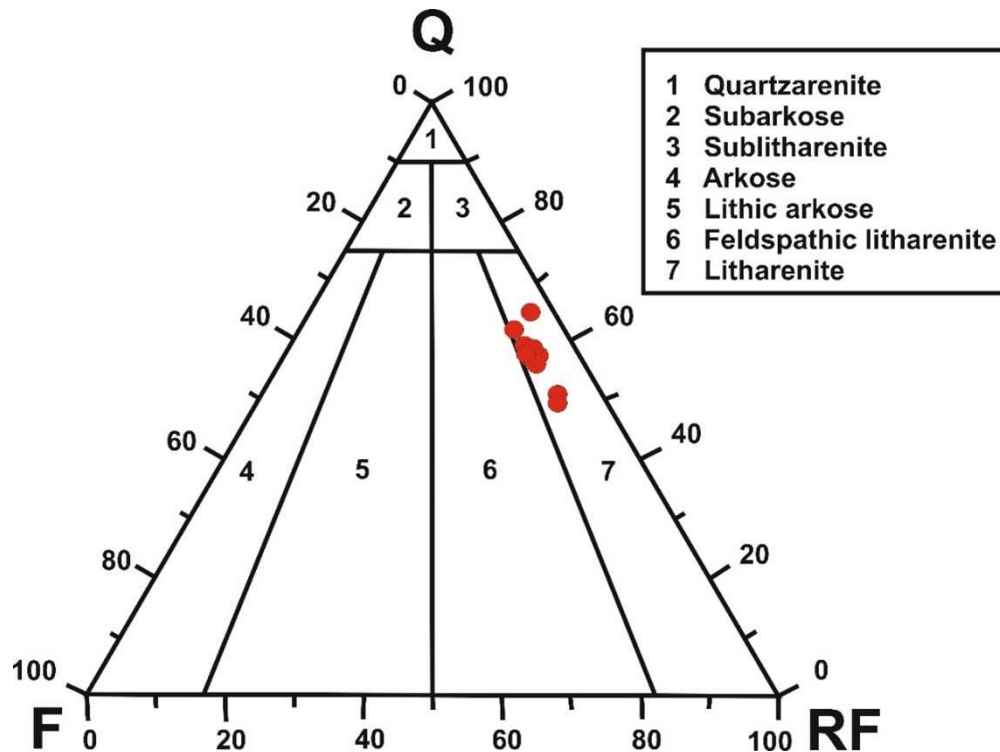
شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی (نور XPL) از اجزاء تشکیل‌دهنده نمونه‌های ماسه‌سنگی مورد بررسی، (A) کوارتز تک‌بلور (Q_m) و چندبلور (Q_p) در زمینه‌ای از سیمان کربناته، (B) کوارتز تک‌بلور پلوتونیک (Q_m) و کوارتز چندبلور کشیده (Q_p)، (C) فلدسپات پتاسیم‌دار ارتوکلاز (K) و خردسنگ چرتی (Chert)، (D) خردسنگ دگرگونی (MRF) و خردسنگ سیلتستونی (Siltstone)، (E) خردسنگ ماسه‌سنگی (Sandstone)، ارتوکلاز (K) و پلاژیوکلاز (P).

Figure 3 Microscopic images (XPL) of the constituent components of the investigated sandstone samples, (A) monocrystalline (Q_m) and polycrystalline (Q_p) quartz in a carbonate cement background, (B) plutonic monocrystalline quartz (Q_m) and stretched polycrystalline quartz (Q_p), (C) orthoclase potassium feldspar (K) and chert rock fragment, (D) metamorphic (MRF) and siltstone rock fragments, (E) Sandstone rock fragment, orthoclase (K) and plagioclase (P).



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی (نور XPL و PPL) از اجزاء تشکیل‌دهنده نمونه‌های ماسه‌سنگی مورد بررسی، (A) خرده‌سنگ چرتی و پلاژیوکلاز، (B) پتروفاسیس لیتارنایتی همراه با خرده‌سنگ کربناته (Carbonate) و میکای مسکویت (Mica)، (C) کانی سنگین تیره (Opaque M.) و (D) سیمان اکسید آهن در نور PPL.

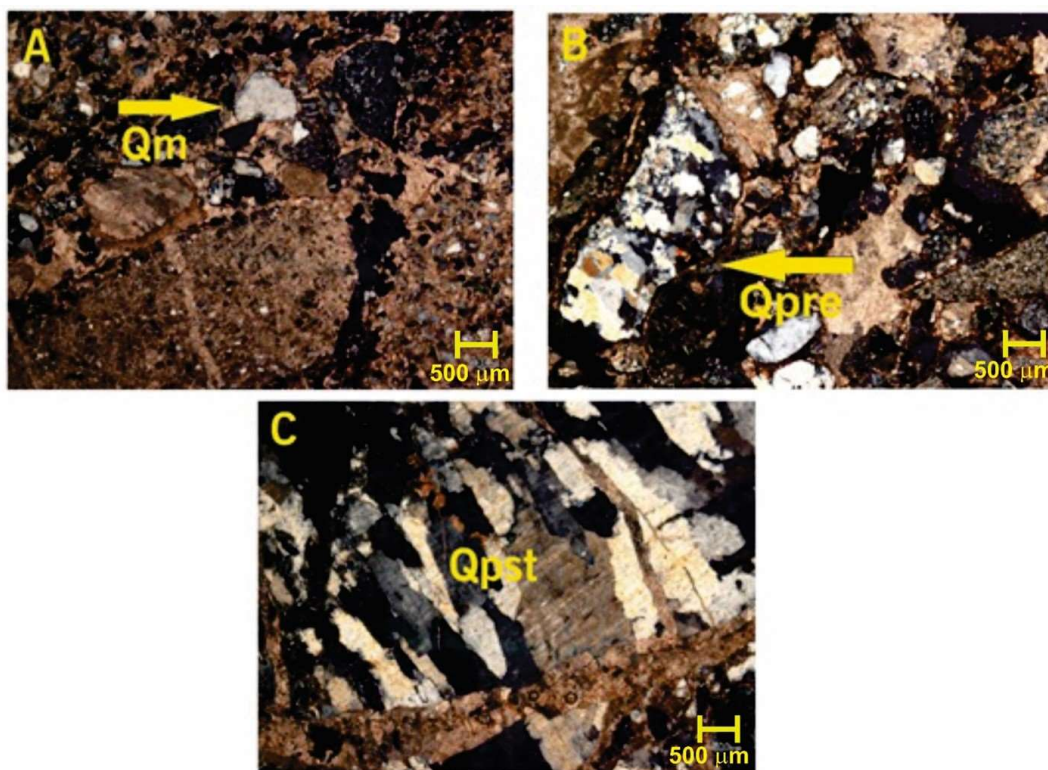
Figure 4 Microscopic images (XPL and PPL) of the constituent components of the investigated sandstone samples, (A) chert fragment and plagioclase, (B) litharenite petofacies with carbonate rock fragments and Muscovite (Mica), (C) opaque heavy mineral (Opaque M.) and (D) iron oxide cement in PPL.



شکل ۵ نمودار طبقه‌بندی ترکیبی ماسه‌سنگ‌ها (فولک، ۱۹۸۰)، اکثر نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده لیتارنایت پلات شده‌اند.

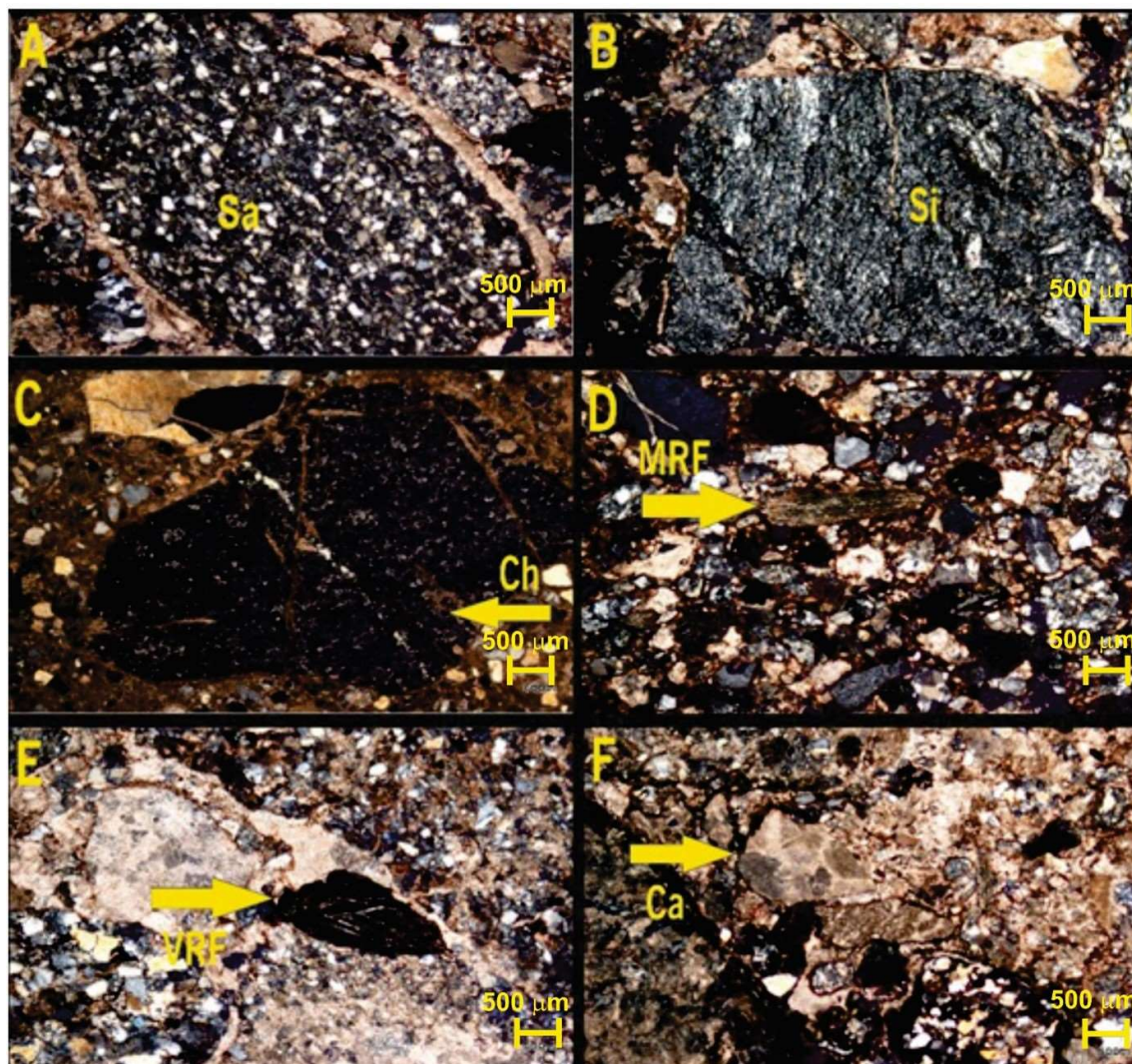
Figure 5 The compositional classification chart of sandstones (Folk, 1980), most of the studied samples are plotted in the litharenite field.

با توجه به نقشه زمین‌شناسی منطقه (روشن روان، ۱۳۸۵) واحدهای ولکانیکی و آذرین حدواسط (بازالت، توف و آندزیت) کرتاسه و واحدهای فلیشی (شیل، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و آهک) با همین سن در شمال شرق و شرق برش مورد مطالعه وجود دارند و می‌توانند به‌عنوان سنگ منشأ رسوبی و آذرین این توالی در نظر گرفته شوند. تناوب واحدهای ولکانیکی و رسوبی کرتاسه نشان‌دهنده احتمال وجود دگرگونی در واحدهای رسوبی این منطقه است که می‌تواند تأمین‌کننده خرده‌سنگ‌های دگرگونی و کوارتزهای دگرگونی این مجموعه باشد. نتایج دانه‌شماری ماسه‌سنگ‌های فوق در نمودارهای Q_mFL_t (شکل ۹B)، $Q_pL_vL_s$ ، Q_mPK (شکل ۱۰A و B) و Q_iFL (شکل‌های ۸A، ۸B و ۹A) (دیکینسون، ۱۹۷۹؛ دیکینسون و سوزک، ۱۹۷۹؛ دیکینسون و همکاران، ۱۹۸۳؛ دیکینسون، ۱۹۸۸) نشان می‌دهد که اکثر نمونه‌ها در محدوده‌های زون برخورد، کوهزایی با چرخه مجدد همراه با منشأ آذرین قرار می‌گیرند. ذرات آواری که از مناطق برخوردی و چرخه‌های مجدد کمربندهای کوهزایی سرچشمه گرفته‌اند دارای ترکیب بسیار متنوعی هستند که منعکس‌کننده انواع مختلف کوهزایی است (برخورد قاره با قاره با برخورد قاره با اقیانوس). رسوبات حاصل از چرخه‌های مجدد کوهزایی یا حوضه‌های مجاور جلوی خشکی و حوضه‌های اقیانوسی باقیمانده را پر می‌کنند یا توسط سیستم‌های رودخانه‌ای به حوضه‌های دورتر و در موقعیت‌های زمین‌ساختی غیر-وابسته حمل می‌شوند. در بسیاری از ماسه‌سنگ‌های حاصل از چرخه‌های مجدد کوهزایی فراوانی دانه‌ها با خرده‌سنگی است و معمولاً در رسوباتی که از برخورد قاره‌ها حاصل شده‌اند علاوه بر دانه‌های کوارتز، خرده‌سنگ‌های رسوبی فراوانند و



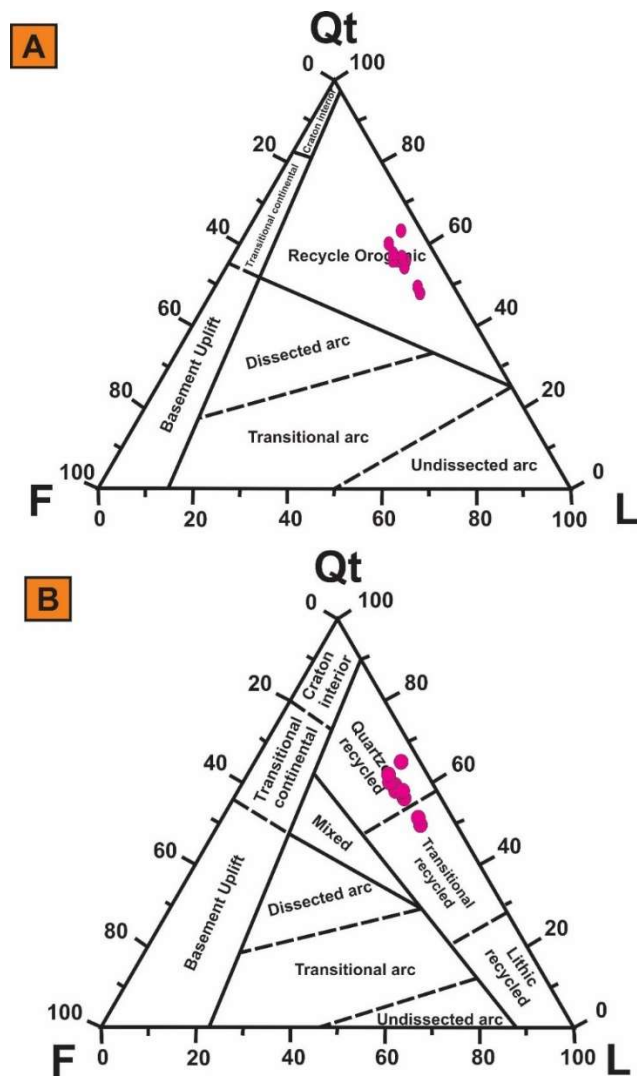
شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی از انواع کوارتز در قطعات پتروفاسیس کنگلومرایی برش آرک (نور XPL)، (A) کوارتز تک‌بلور پلوتونیک (Qm)، (B) کوارتز چندبلور دگرگونی تبلور مجدد (Qpre) و (C) کوارتز چندبلور دگرگونی کشیده (Qpst).

Figure 6 Microscopic images of quartz types in the conglomerate petrofacies clasts of Arc Section (XPL), (A) plutonic monocrystalline quartz (Qm), (B) recrystallized metamorphic polycrystalline quartz (Qpre) and (C) stretched metamorphic polycrystalline quartz (Qpst).



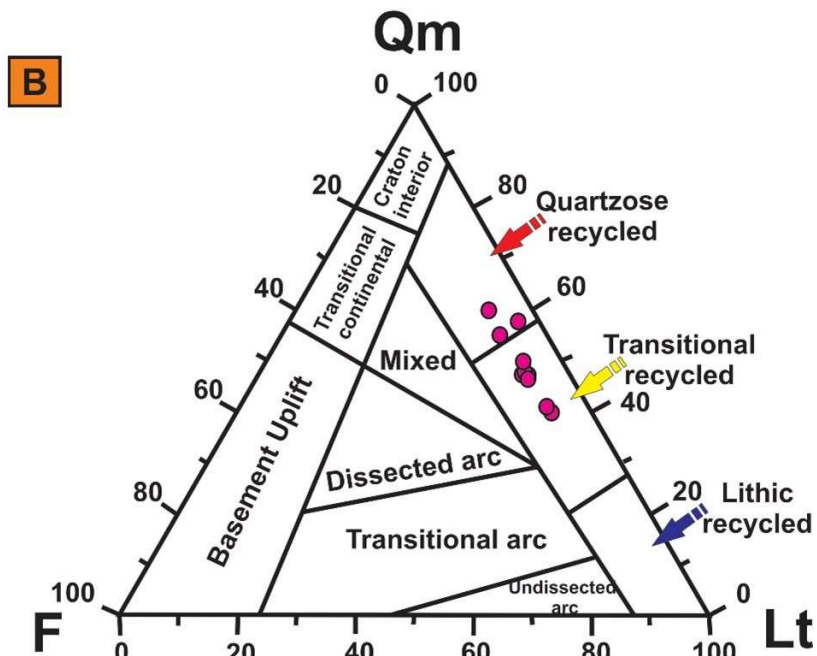
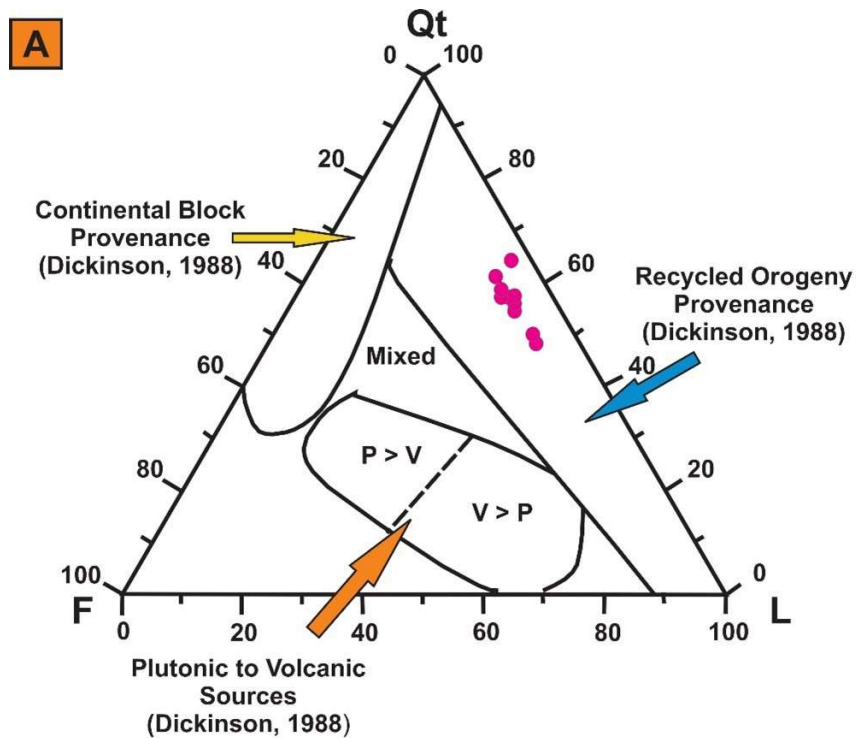
شکل ۷ تصاویر میکروسکوپی از انواع خرده‌سنگ‌های پتروفاسیس کنگلومرایبی برش آرک (XPL). (A) خرده‌سنگ رسوبی ماسه‌سنگی (Sa)، (B) خرده‌سنگ رسوبی سیلتستونی (Si)، (C) خرده‌سنگ رسوبی چرتی (Ch)، (D) خرده‌سنگ دگرگونی (MRF)، (E) خرده‌سنگ ولکانیکی (VRF)، (F) خرده‌سنگ کربناته (Ca).

Figure 7 Photomicrographs of rock fragment types of Arc Section conglomerate petrofacies (XPL). (A) Sandstone sedimentary rock fragment (Sa), (B) Siltstone sedimentary rock fragment (Si), (C) Chert sedimentary rock fragment (Ch), (D) Metamorphic rock fragment (MRF), (E) volcanic rock fragment (VRF), (F) carbonate rock fragment (Ca).



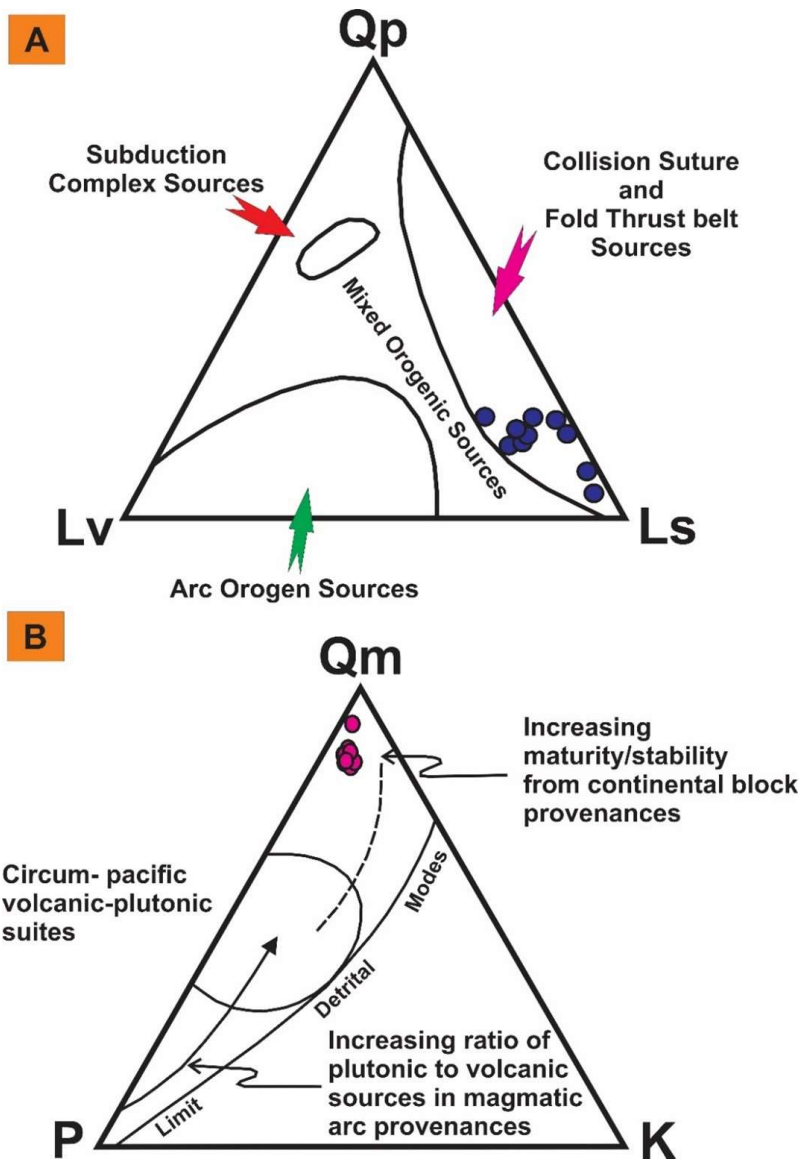
شکل ۸ قرارگیری نتایج آنالیز مودال نمونه‌های ماسه‌سنگی در محدوده کوهزایی با چرخه مجدد در نمودارهای $QtFL$ (A) (دیکینسون، ۱۹۷۹) و (B) (دیکینسون، ۱۹۸۸).

Figure 8 Placing the results of modal analysis of sandstone samples in the recycled orogen field in the $QtFL$ diagrams (A) (Dickinson, 1979) and (B) (Dickinson, 1988).



شکل ۹ قرارگیری نتایج آنالیز مودال نمونه‌های ماسه‌سنگی در محدوده کوهزایی با چرخه مجدد در نمودارهای (A) Q_tFL (دیکینسون و همکاران، ۱۹۸۳) و (B) Q_mFL_t (دیکینسون و همکاران، ۱۹۸۳).

Figure 9 Placement of the modal analysis results of sandstone samples in the recycled orogen field in (A) Q_tFL diagrams (Dickinson et al., 1983) and (B) Q_mFL_t (Dickinson et al., 1983).



شکل ۱۰ ترسیم نتایج دانه‌شماری نمونه‌های مطالعه شده در نمودارهای (A) $Q_pL_vL_s$ (دیکینسون و همکاران، ۱۹۸۳) و (B) نمودار Q_mPK (دیکینسون و سوزک، ۱۹۷۹). اغلب نمونه‌ها در محدوده‌های کوهزایی با چرخه مجدد و زون برخوردی با منشأ آذرین قرار گرفته‌اند.

Figure 10 Drawing the results of point counting of the studied samples in (A) $Q_pL_vL_s$ (Dickinson et al., 1983) and (B) Q_mPK diagrams (Dickinson and Suzek, 1979). Most of the samples are located in orogenic regions with recycling and collision zone with igneous origin.

همانطور که سنگ‌های عمیق‌تر در اثر بالآمدگی رخنمون می‌یابند، معادل دگرگون شده خرده‌سنگ‌های رسوبی فراوان می‌شوند. بنابراین، این ماسه‌ها بیشتر از دانه‌های کوارتزی-سنگی (کوارتزولیتیک)، با مقدار کمی فلدسپات و دانه‌های ولکانیکی تشکیل شده‌اند (نسبت خرده‌سنگ‌های رسوبی به خرده‌سنگ‌های ولکانیکی بالا است). در صورتی که، در کوهزایی قاره‌ای-اقیانوسی ذرات حاصل از بالآمدگی مجموعه فرورانش دارای مقادیر فراوانی خرده‌سنگ آذرین و خرده‌سنگ‌های رسوبی دانه‌ریز نظیر چرت است. همچنین، فلدسپات خیلی فراوان است (تاگر، ۲۰۰۱). همانطور که در شکل ۵ و جدول ۳ مشاهده می‌شود، ماسه‌سنگ‌های مطالعه شده دارای ترکیب کوارتزولیتیک بوده، دارای مقادیر کم فلدسپات و نسبت بالای Q_m/Q_p و نسبت

پایین L_v/L_s می‌باشند که با قرارگیری نمونه‌های فوق در محدوده برخوردی (برخورد قاره‌ای - قاره‌ای)، کوهزایی با چرخه مجدد و ترکیب ماسه‌سنگ‌های حاصل از آن مطابقت دارد. علاوه بر این، بررسی ترکیب قطعات گراولی در پتروفاسیس کنگومرایی نیز نسبت بالای کوارتز تک بلور به چند بلور و همچنین نسبت بالای خرده‌سنگ‌های رسوبی به خرده‌سنگ‌های ولکانیکی را نشان می‌دهد که با مقادیر پایین فلدسپات در این پتروفاسیس همراه است که این داده‌ها نیز می‌تواند تأییدی بر نتایج حاصل از مطالعه ترکیب ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه باشد.

ژئوشیمی نمونه‌های شیلی

نتایج تجزیه عناصر اصلی یازده نمونه شیلی برش آرک در جدول ۴ آورده شده است. مقدار SiO_2 از $44/78$ تا $53/24$ درصد (به‌طور میانگین $50/07$ درصد)، Al_2O_3 9 تا $11/93$ درصد (به‌طور میانگین $10/39$ درصد)، Na_2O $0/23$ تا $1/36$ درصد (به‌طور میانگین $0/92$ درصد)، MgO $1/63$ تا $8/73$ درصد (به‌طور میانگین $4/71$ درصد)، K_2O $1/64$ تا $2/81$ درصد (به‌طور میانگین $2/30$ درصد)، TiO_2 $0/5$ تا $0/47$ درصد (به‌طور میانگین $0/54$ درصد)، MnO_2 $0/07$ تا $0/1$ درصد (به‌طور میانگین $0/056$ درصد)، CaO $7/43$ تا $14/71$ درصد (به‌طور میانگین $11/47$ درصد)، P_2O_5 $0/06$ تا $0/1$ درصد (به‌طور میانگین $0/087$ درصد) و Fe_2O_3 $3/32$ تا $4/94$ درصد (به‌طور میانگین $3/97$ درصد) در تغییر است.

جدول ۴ نتایج آنالیز اکسیدهای عناصر اصلی نمونه‌های شیلی برش آرک (مقادیر اکسیدهای عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی قید شده است).

Table 4 The results of the major oxides analysis of the Arc Section shale samples (the values of the major oxides are stated in terms of weight percentage).

LOI	TiO_2	SO_3	P_2O_5	Na_2O	MnO	MgO	K_2O	Fe_2O_3	CaO	Al_2O_3	SiO_2	شماره نمونه
۱۴/۳۳	۰/۵۶	۰/۱۰	۰/۰۶	۱/۱۳	۰/۰۹	۴/۹۵	۲/۳۷	۴/۰۹	۱۰/۴۰	۱۰/۱۴	۵۱/۷۷	F1
۱۴/۰۰	۰/۵۶	۰/۱۲	۱>	۱/۳۶	۰/۰۰۷	۳/۱۳	۱/۶۴	۳/۸۵	۱۲/۷۷	۹/۲۷	۵۳/۲۴	F2
۱۳/۷۰	۰/۵۸	۰/۰۹	۰/۰۷	۱/۲۸	۰/۰۰۷	۴/۱۸	۲/۱۰	۴/۰۵	۱۰/۷۹	۱۰/۴۷	۵۲/۶۲	F3
۱۵/۴۵	۰/۵۲	۰/۰۶	۰/۰۷	۱/۲۲	۰/۰۰۷	۴/۰۰	۱/۷۴	۳/۵۹	۱۳/۳۰	۹/۳۱	۵۰/۶۷	F24
۱۷/۴۰	۰/۵۰	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۹۰	۰/۱۰	۸/۰۵	۲/۳۸	۳/۸۴	۱۰/۲۰	۱۰/۰۱	۴۶/۴۲	F48
۱۳/۱۲	۰/۶۲	۱/۰۱	۰/۱۱	۰/۸۹	۰/۰۶	۶/۹۹	۲/۷۹	۴/۹۴	۷/۴۳	۱۱/۹۳	۵۰/۱۱	F57
۱۴/۴۴	۰/۵۸	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۷۴	۰/۰۶	۲/۲۸	۲/۷۸	۴/۲۵	۱۲/۵۵	۱۱/۵۳	۵۰/۶۰	F59
۱۹/۰۷	۰/۴۷	۰/۱۶	۰/۰۷	۱/۰۱	۰/۱۱	۸/۷۳	۱/۹۱	۳/۳۲	۱۱/۲۶	۹/۰۰	۴۴/۷۸	F60
۱۵/۳۶	۰/۵۵	۰/۱۷	۰/۱۲	۰/۸۱	۰/۰۵	۱/۶۳	۲/۶۷	۴/۴۰	۱۴/۷۱	۱۱/۲۰	۴۸/۳۳	F62
۱۵/۳۸	۰/۵۷	۰/۰۶	۰/۱۱	۰/۵۸	۱>	۱/۷۹	۱۲/۸۱	۳/۹۵	۱۴/۰۹	۱۱/۴۵	۴۹/۲۰	F63
۱۴/۳۷	۰/۵۱	۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۲۳	۰/۰۷	۶/۱۷	۲/۲۰	۳/۴۶	۸/۷۰	۱۰/۰۷	۵۳/۰۲	F65

خاستگاه^۱

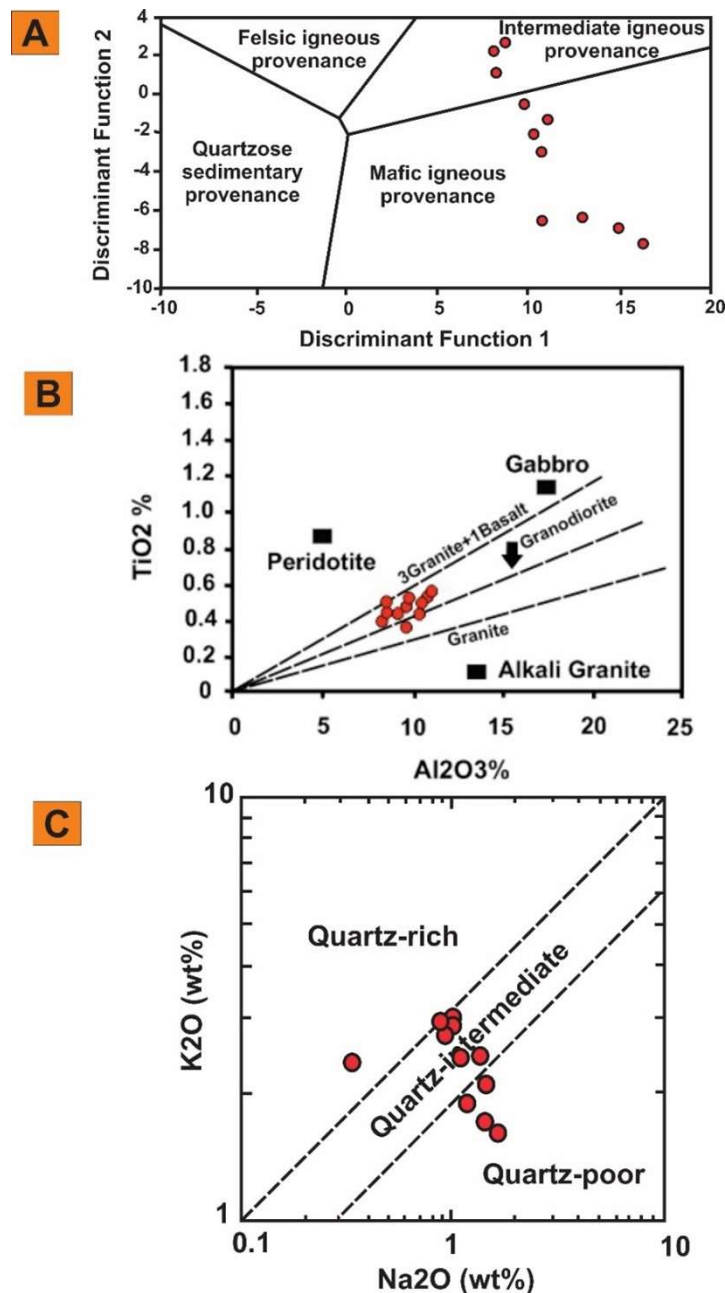
مطالعه منشأ سنگ‌های رسوبی آواری اغلب به منظور درک ترکیب و تکامل زمین‌شناسی ناحیه منشأ رسوب و تعیین جایگاه زمین‌ساختی حوضه رسوبگذاری انجام می‌شود. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی رسوبات آواری تابعی از عملکرد پیچیده عوامل مختلف نظیر ترکیب سنگ منشأ، میزان هوازدگی، حمل و نقل و دیاژنز است. هر چند، جایگاه زمین‌ساختی حوضه رسوبی ممکن است نقش پررنگ‌تری نسبت به عوامل دیگر داشته باشد زیرا موقعیت‌های زمین‌ساختی مختلف می‌توانند مواد منشأ با مشخصه‌های شیمیایی متغیر را ایجاد کنند (زید و گهتانی، ۲۰۱۵). در بررسی‌های ژئوشیمیایی منشأ، سنگ‌های رسوبی دانه‌ریز نظیر شیل‌ها اهمیت بیشتری دارند زیرا حاوی اجزاء کانی‌شناسی سنگ مادر بوده و اختصاصات ترکیب پوسته ناحیه منشأ را بهتر از دیگر سنگ‌های رسوبی آواری منعکس می‌کنند (هک و روی، ۲۰۲۰). این سنگ‌ها معمولاً قبل از رسوبگذاری همگن بوده، بعد از رسوبگذاری نفوذ ناپذیرند و حاوی مقادیر بالاتری از عناصر فرعی می‌باشند (بیگونهی و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین، مشخصه اصلی منشأ و شرایط هوازدگی دیرینه حوضه رسوبی بخوبی در شیمی بالک شیل‌ها حفظ شده است (هک و روی، ۲۰۲۰). ترکیب اکسیدهای عناصر اصلی نمونه‌های شیلی برش آرک، به‌منظور تعیین منشأ رسوبی، با بکارگیری تحلیل تابع تفکیک‌کننده (روزر و کورش، ۱۹۸۸)، مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحلیل تابع تفکیک‌کننده (روزر و کورش، ۱۹۸۸)، ۴ محدوده منشأ اصلی به نام‌های آذرین مافیک، حدواسط، فلسیک و رسوبی کوارتزار با حمل مجدد از یکدیگر مجزا شده است. در روش تابع تفکیکی از مقادیر اکسیدهای عناصر اصلی نظیر TiO_2 , K_2O , Al_2O_3 , Na_2O , Fe_2O_3 و CaO و MgO برای تمایز منشأهای چهارگانه فوق استفاده شده است. داده‌های مربوط به اکسیدهای عناصر اصلی نمونه‌های مورد مطالعه، در نمودار تفکیکی فوق، در محدوده‌های منشأ آذرین مافیک و حدواسط قرار می‌گیرند (شکل ۱۱A). نمودار دو متغیره TiO_2 در مقابل Al_2O_3 ، که توسط مک لنان و همکاران (۱۹۸۰) ارائه شده، نشان می‌دهد که ناحیه منشأ اغلب نمونه‌ها آذرین حدواسط است (شکل ۱۱B). در نمودار دوتایی K_2O در مقابل Na_2O (کروک، ۱۹۷۴) (شکل ۱۱C) نیز اکثر نمونه‌های شیلی مطالعه شده در محدوده با مقدار کوارتز حدواسط قرار می‌گیرند که باتوجه به نتایج مطالعه پتروگرافی ماسه‌سنگ‌ها و کنگلومراهای همراه در توالی مورد مطالعه و حضور خرده‌سنگ‌های ولکانیکی منشأ آذرین حدواسط محتمل‌تر است.

جایگاه زمین‌ساختی ناحیه منشأ

پژوهشگران مختلفی نظیر باتیا (۱۹۸۳)، باتیا و کروک (۱۹۸۶) و روزر و کورش (۱۹۸۶) به این نتیجه رسیده‌اند که ترکیب شیمیایی سنگ‌های رسوبی سیلیسی آواری به مقدار زیادی توسط جایگاه زمین‌ساختی ناحیه منشأ آنها و حوضه‌های رسوبی کنترل شده است. بنابراین، سنگ‌های سیلیسی آواری با جایگاه زمین‌ساختی مختلف، مشخصه‌های ژئوشیمیایی مخصوص به خود را دارند. نمودارهای تفکیک‌کننده جایگاه زمین‌ساختی^۲ نتایج قابل قبولی برای سنگ‌های آواری دارند که توسط هوازدگی و دگرگونی بعد از رسوبگذاری متأثر نشده است (بیگونهی و همکاران، ۲۰۱۷). نمودارهای دو متغیره از ژئوشیمی عناصر اصلی و فرعی وجود دارند (باتیا، ۱۹۸۳؛ باتیا و کروک، ۱۹۸۶؛ روزر و کورش، ۱۹۸۶) که توسط محققین مختلف برای تعیین جایگاه زمین‌ساختی ماسه‌سنگ‌ها و شیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند (برای مثال، اعتماد سعید و همکاران، ۲۰۱۵؛ طاهری و همکاران، ۲۰۱۸؛ مقدم و همکاران، ۲۰۲۰). از میان نمودارهای مختلف تفکیک‌کننده جایگاه تکتونیکی، نمودار تفکیک‌کننده بر اساس اکسیدهای عناصر اصلی روزر و کورش (۱۹۸۶) به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

¹ Provenance

² Discrimination Diagrams



شکل ۱۱ (A) داده‌های حاصل از آنالیز ژئوشیمی عناصر اصلی نمونه‌های مورد بررسی در نمودار تابع تمایزی منشأ روزر و کورش (۱۹۸۸) در محدوده‌های آذرین حدواسط و آذرین مافیک قرار گرفته است. (B) نتایج ژئوشیمیایی نمونه‌های شیلی برش آرک در نمودار مک لنان و همکاران (۱۹۸۰) در محدوده سنگ‌های حدواسط گرانودیوریتی و (C) در نمودار کروک (۱۹۷۴) در محدوده سنگ‌های با مقدار کوارتز حدواسط ترسیم شده است.

Figure 11(A) The data obtained from the geochemical analysis of the major elements of the studied samples are placed in the intermediate igneous and mafic igneous field of the discriminant function diagram of Roser and Korsch (1988). (B) The geochemical results of the Arc Section shale samples are plotted in the McLennan et al. (1980) diagram in the range of intermediate granodiorite rocks and (C) in the Crook (1974) diagram in the rocks with intermediate quartz content field.

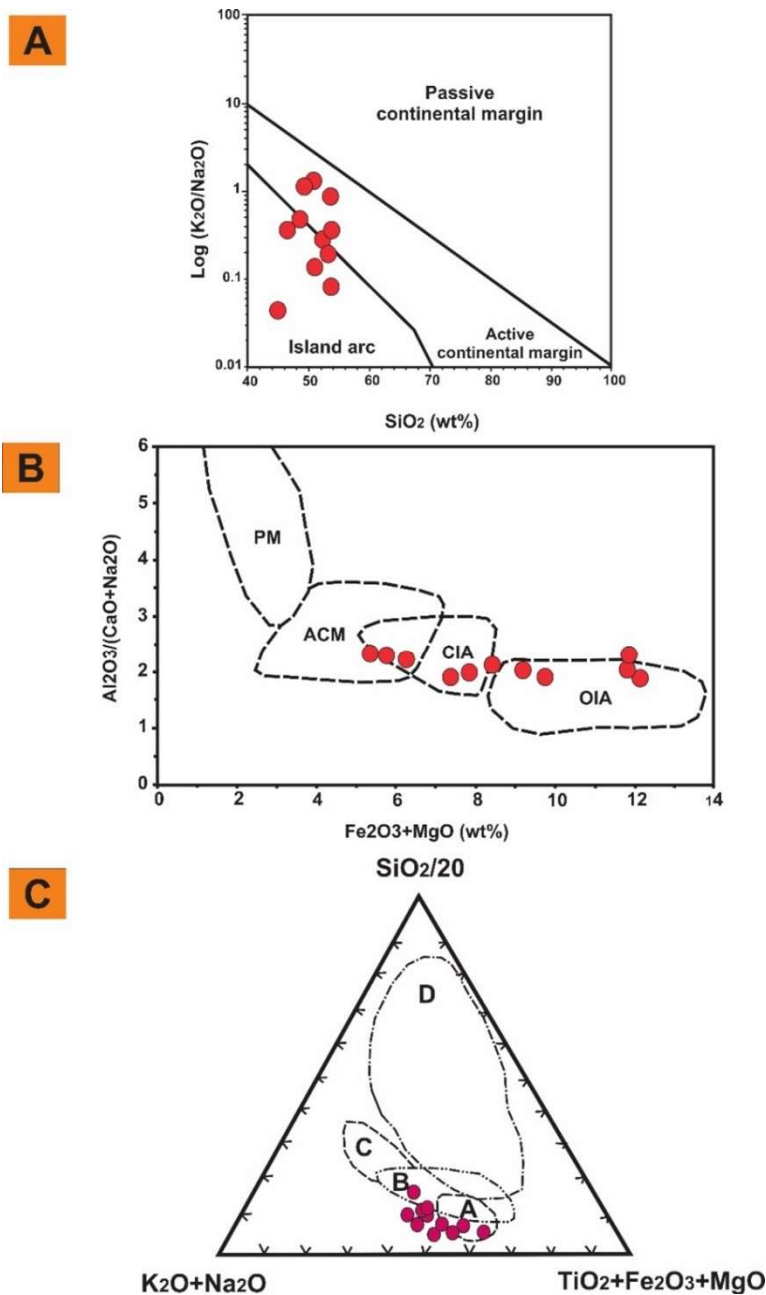
روزر و کورش (۱۹۸۶) بر اساس نسبت K_2O/Na_2O و میزان درصد SiO_2 ، نموداری را برای تعیین جایگاه زمین‌ساختی رسوبات دیرینه ارائه کرده‌اند و در این نمودار چهار جایگاه تکتونیکی را از هم تفکیک کرده‌اند: (۱) جزیره قوسی اقیانوسی (OIA)، جزیره قوسی قاره ای (CIA)، حاشیه قاره‌ای فعال (ACM) و حاشیه قاره‌ای غیرفعال (PM). اغلب نمونه‌های شیلی مطالعه شده با داشتن مقادیر کمتر از ۶۰ درصد SiO_2 و با نسبت‌های کمتر از ۱۰ K_2O/Na_2O در محدوده جزایر قوسی قاره‌ای و اقیانوسی و حاشیه قاره‌ای فعال^۲ نمودار فوق، قرار گرفته‌اند (شکل ۱۲A). نمودار دو متغیره $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$ در مقابل (Fe_2O_3+MgO) (باتیا، ۱۹۸۳) نشان می‌دهد که نمونه‌های شیلی برش آرک در ارتباط با قوس‌های ماگماتیکی (قاره‌ای و اقیانوسی) هستند (شکل ۱۲B). همچنین، ترسیم نتایج عناصر اصلی نمونه‌های فوق در نمودار مثلثی کرومبگ (۱۹۹۴) $(SiO_2/20-K_2O+Na_2O-TiO_2+Fe_2O_3+MgO)$ نشان می‌دهد که نمونه‌های مورد بررسی با موقعیت جزایر قوسی قاره‌ای و اقیانوسی در ارتباط هستند (شکل ۱۲C). از آنجایی که نمودارهای فوق نتیجه مناسبی را در تعیین جایگاه زمین‌ساختی نهشته‌های مورد مطالعه نشان نمی‌دهند، از نمودارهای تفکیک‌کننده موقعیت تکتونیکی که بر اساس اکسیدهای عناصر اصلی و توسط ورما و آرمسترانگ-آلترین (۲۰۱۳) ارائه شده، استفاده شده است. بدلیل اینکه درصد SiO_2 نمونه‌های شیلی برش آرک بین ۴۴/۷۸ تا ۵۳/۲۴ درصد (به طور متوسط ۵۰/۰۷ درصد) در تغییر است، از نمودار شکل ۱۳A و معادلات توابع تفکیک‌کننده مربوط به نمونه‌های دارای سیلیس پایین (شکل ۱۳B) با درصد SiO_2 بین ۶۳ ≤ تا ۳۵ > درصد استفاده شده است. در این نمودار سه محدوده زمین‌ساختی از هم تفکیک شده است: قوس-ریفت-برخورد. ترسیم نتایج اکسیدهای عناصر اصلی نمونه‌های مورد مطالعه در این نمودار (ورما و آرمسترانگ-آلترین، ۲۰۱۳) نشان می‌دهد که اکثر نمونه‌ها در محدوده برخوردی قرار گرفته‌اند (شکل ۱۳A) که با نتایج حاصل از مطالعه‌های پتروگرافی ماسه‌سنگ‌های همراه نیز مطابقت بیشتری دارد.

مقایسه نتایج حاصل از مطالعات پتروگرافی و ژئوشیمیایی با تحول زمین‌ساختی منطقه

زون زمین‌درز سیستان در شرق ایران، شاخه‌ای مبهم از نئوتتیس با روند شمالی-جنوبی است که تاریخچه زمین‌ساختی پیچیده‌ای را پشت سر گذاشته است (کمپ و گریفیس، ۱۹۸۲؛ تیرو و همکاران، ۱۹۸۳؛ مک کال، ۱۹۹۷). همانطور که نگاشت‌های رادیولردار منطقه پیشنهاد می‌کند (بابازاده و دی وور، ۲۰۰۴)، اقیانوس سیستان در کرتاسه پیشین باز شده است. تعیین سن U-Pb زیرکان در دو توده لوکوبابروی افیولیت بیرجند با سن تقریبی ۱۱۳ و ۱۰۷ میلیون سال، نشان می‌دهد که ایجاد لیتوسفر اقیانوسی در کرتاسه میانی همچنان ادامه داشته است (زرین کوب و همکاران، ۲۰۱۲). درک مکانیزم و زمان بسته‌شدن اقیانوس تاکنون مجهول باقیمانده است. به‌طور کلی، به نظر اکثر محققین، فرورانش پوسته اقیانوسی نقش بسیار مهمی در تحول زمین‌ساختی منطقه داشته است. دو دیدگاه کلی در مورد الگوی ژئودینامیکی فرورانش وجود دارد: (۱) فرورانش به زیر بلوک افغان، یا به زیر بلوک لوت انجام شده است. (۲) فرورانش دو سویه نامتقارن به زیر بلوک‌های لوت و افغان و با سرعت‌های متفاوت صورت گرفته است. مدل‌های ژئودینامیکی که شامل فرورانش به سمت شرق به زیر بلوک افغان (کمپ و گریفیس، ۱۹۸۲؛ تیرو و همکاران، ۱۹۸۳)، فرورانش به سمت غرب به زیر بلوک لوت (زرین کوب و همکاران، ۲۰۱۲)، فرورانش دوطرفه (ارجمندزاده و همکاران، ۲۰۱۱) و فرورانش درون اقیانوسی به سمت شرق (ساکانی و همکاران، ۲۰۱۰) می‌باشند، پیشنهاد شده است. زمان بسته‌شدن اقیانوس سیستان و در نتیجه برخورد لوت-افغان توسط برخی پژوهشگران، ائوسن میانی (کمپ و گریفیس، ۱۹۸۲؛ تیرو و همکاران، ۱۹۸۳) و توسط برخی دیگر کرتاسه پسین (زرین کوب و همکاران، ۲۰۱۲؛ آنجیبوست و همکاران، ۲۰۱۳) فرض شده است. بروکر و همکاران (۲۰۱۳) با تعیین سن نمونه‌هایی با موقعیت‌های جغرافیایی مختلف و درجات دگرگونی متفاوت در کمر بند افیولیتی، با استفاده از چند روش مختلف نظیر Rb-Sr, U-Pb و $^{40}Ar/^{39}Ar$ نتیجه گرفته‌اند که فرورانش تا کرتاسه پسین (از ۸۷ تا ۸۳ میلیون سال) فعال بوده است.

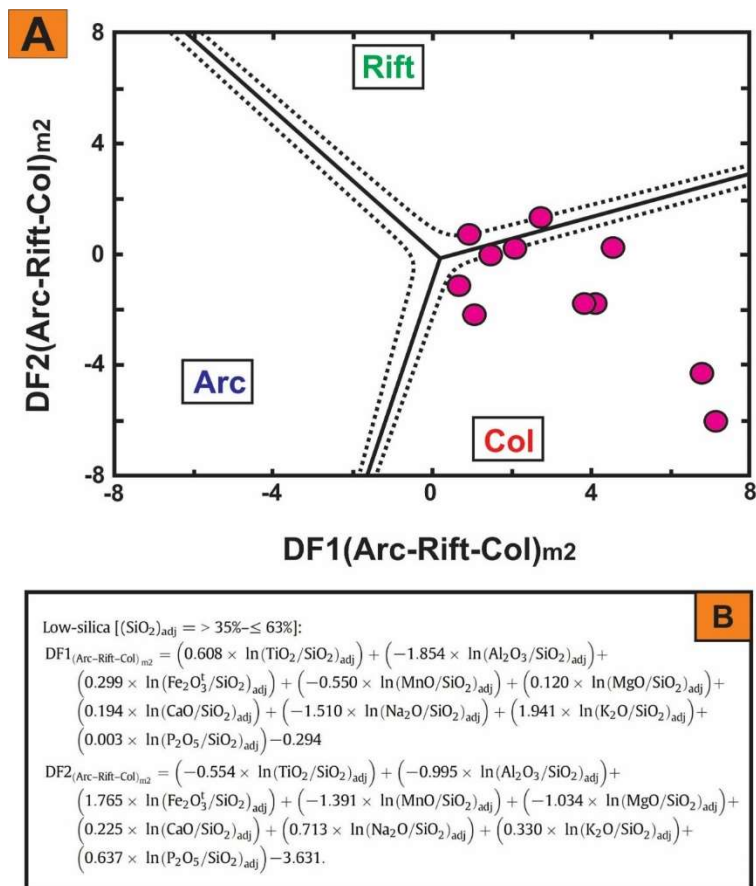
¹ Island Arcs

² Active continental margin



شکل ۱۲ داده‌های ژئوشیمی نمونه‌های شیلی مطالعه شده در (A) نمودار دو متغیره روزر و کورش (۱۹۸۶) که جهت تعیین جایگاه زمین‌ساختی ترسیم شده در محدوده جزایر قوسی و حاشیه قاره‌ای فعال قرار می‌گیرند. (B) ترسیم داده‌های فوق در نمودار باتیا (۱۹۸۳) که در محدوده جزایر قوسی قاره‌ای و اقیانوسی قرار می‌گیرند و (C) ترسیم نمونه‌های مورد مطالعه در نمودار مثلثی کروونبرگ (۱۹۹۴) که آن نیز محدوده جزایر قوسی قاره‌ای و اقیانوسی را نشان می‌دهد.

Figure 12 The geochemical data of the studied shale samples in (A) the two-variable diagram of Roser and Korsch (1986), which are placed in the area of island arc and active continental margin to determine the tectonic setting. (B) Plotting the above data in Bhatia's diagram (1983), which are in the range of continental and oceanic island arcs, and (C) Drawing the studied samples in Croonenberg's triangular diagram (1994), which is also in the continental and oceanic island arc fields.

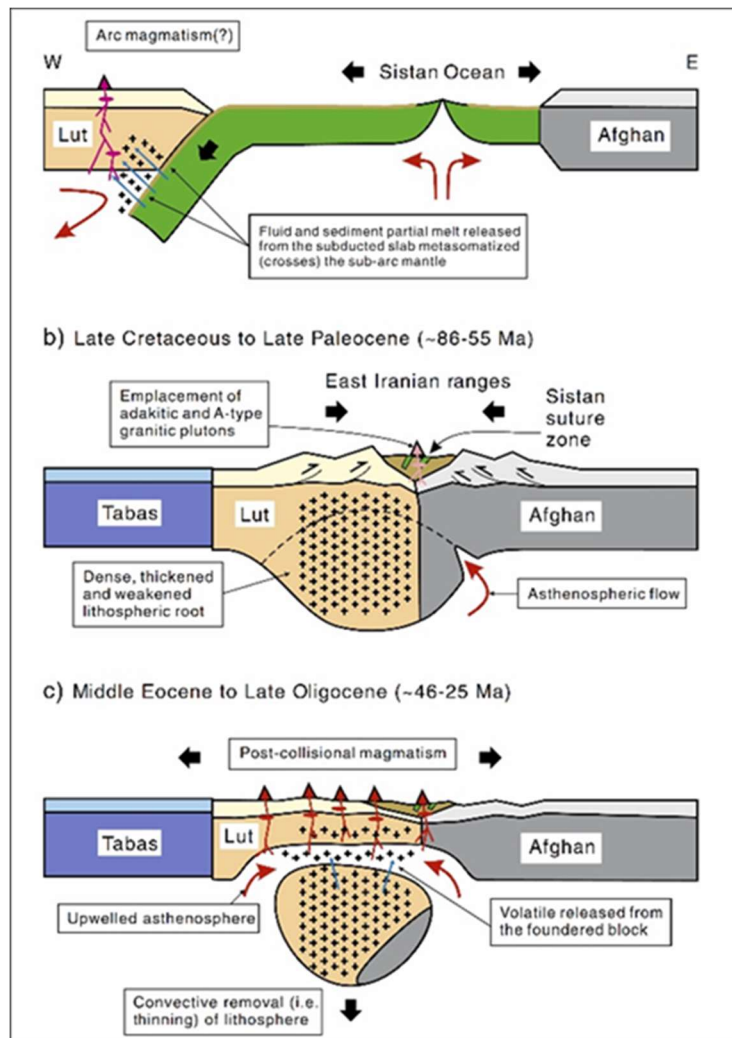


شکل ۱۳ ترسیم داده‌های اکسیدهای عناصر اصلی نمونه‌های شیلی برش آرک در (A) نمودار ورما و آرمسترانگ-آلتترین (۲۰۱۳) با استفاده از توابع تفکیک کننده جدید (معادلات قسمت B تصویر) که اکثر داده‌ها در محدوده زمین ساختی برخوردی (Col) قرار گرفته‌اند.

Figure 13 Plotting of the major oxides data of the Arc Section shale samples in (A) Verma and Armstrong-Altrin (2013) diagram by using the new discrimination functions (equations in part B of the picture) that most of the data are placed in the collisional tectonics setting (Col).

مطالعه بخش‌های شمالی زون خردشده سیستان توسط زرین کوب و همکاران (۲۰۱۲) با نتایجی در مورد تحول تکتونوماگمایی شرق ایران همراه بوده‌است. با توجه به داده‌های سن‌سنجی U-Pb زیرکان، در اوایل کرتاسه (بیش از ۱۱۳ میلیون سال) اقیانوس سیستان بین دو بلوک لوت و افغان باز شده و سنگ‌کره اقیانوسی گسترش یافته‌است. با بسته شدن اقیانوس سیستان در اوایل تا اواخر کرتاسه (۸۶ تا ۱۱۳ میلیون سال)، توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی با ماهیت آداکیتی نمود پیدا کرده‌است. دو بلوک افغان و لوت در اواخر کرتاسه تا پالئوسن (۸۶ تا ۵۵ میلیون سال) به هم برخورد کرده و در نتیجه این برخورد، رژیم فشارشی به کششی تبدیل و ماگماتیسم نوع گرانیتوئیدی تیپ A (با سن ۵۶ میلیون سال) بروز پیدا کرده‌است. با ادامه فرونشینی ناشی از کوهزایی، تداوم کشش باعث نازک‌شدگی لیتوسفر ضخیم و فعال شدن ماگماتیسم حجیم و وسیع کالک‌آلکالن در شرق ایران شده‌است. از ائوسن میانی تا الیگوسن (۴۵ تا ۲۵ میلیون سال) در غرب پهنه لوت، جای‌گیری ولکانیسم کالک‌آلکالن صورت گرفته‌است. تشکیل بازالت‌های درون صفحه‌ای از اواسط میوسن تا کواترنری در شرق ایران به دنبال نازک‌شدگی لیتوسفر و بالآمدگی آستنسفر انجام شده‌است. مطالعات پانگ و همکاران (۲۰۱۳) نیز نشان می‌دهد که به علت فرورانش به سمت غرب اقیانوس سیستان در کرتاسه پیشین تا میانی، گوشته فوقانی به زیر بلوک لوت رانده شده و برخورد بلوک لوت و افغان در امتداد زون برخوردی سیستان، احتمالاً در کرتاسه بالایی رخ داده‌است. از جمله شواهد این برخورد می‌توان به جای‌گیری توده‌های نفوذی آداکیتی (با سن ۸۶ میلیون سال) و گرانیت‌های تیپ A (با سن

۵۵ میلیون سال) در زون برخوردی سیستان اشاره کرد (شکل ۱۴). با توجه به آنچه ذکر شد، پیش از نهشته شدن رسوبات سیلیسی-آواری برش آرک با سن پالئوسن فوقانی-اوسن زیرین، منطقه از نظر تکتونیکی فعال بوده و احتمالاً جایگاه تکتونیکی برخوردی قاره ای-قاره ای همراه با فرورانش نیز در این منطقه وجود داشته است. بنابراین، نتایج بررسی جایگاه زمین ساختی با استفاده از پتروگرافی نمونه های ماسه سنگی (مناطق کوهزایی با چرخه مجدد) و ژئوشیمی نمونه های شیلی (منطقه برخوردی) تاحدودی با جایگاه زمین-ساختی زون شرق ایران در این زمان مطابقت دارد.



شکل ۱۴ مدل ژئودینامیک ارائه شده برای تکامل تکتونوماگمایی زون زمین درز سیستان توسط پانگ و همکاران (۲۰۱۳)، (a) کرتاسه پیشین تا کرتاسه میانی: بازشدگی اقیانوس سیستان و تخریب بعدی آن در اثر فرورانش به سمت غرب به زیر بلوک لوت. (b) کرتاسه پسین تا پالئوسن پسین: برخورد دو بلوک لوت و افغان با یکدیگر و ایجاد رشته کوه های شرق ایران و ضخیم شدن لیتوسفر زیرین. (c) اوسن میانی تا الیگوسن پسین: حرکت واگرایی ریشه لیتوسفری ضخیم شده همراه با فرونشست رشته کوه های شرق ایران.

Figure 14 The geodynamic model presented for the tectonomagmatic evolution of the Sistan Suture Zone by Pang et al. (2013), a) Early Cretaceous to Middle Cretaceous: the opening of the Sistan Ocean and its subsequent destruction as a result of westward subduction under the Lot block. b) Late Cretaceous to Late Paleocene: Collision of Lut and Afghan blocks with each other and creation of mountain ranges in eastern Iran and thickening of the underlying lithosphere. c) Middle Eocene to Late Oligocene: divergent movement of the thickened lithospheric root along with the subsidence of the mountain ranges of eastern Iran.

نتیجه‌گیری

مطالعه‌های پتروگرافی نمونه‌های مطالعه شده در برش آرک (شمال غرب بیرجند) نشان می‌دهد که این ماسه‌سنگ‌ها از نظر ترکیب لیتارنایت هستند. مشاهده‌های پتروگرافی و رسم نتایج دانه‌شماری بر روی نمودارهای Q_mFL ، Q_mFlt و Q_mPK نشان می‌دهند ماسه‌سنگ‌های پالئوسن فوقانی-ائوسن زیرین این برش حاصل زون‌های برخوردی و مناطق کوهزایی با چرخه‌مجدد هستند. مطالعه ژئوشیمی نمونه‌های شیلی و ترسیم نمودارهای تفکیک‌کننده جایگاه زمین‌ساختی بر اساس مقادیر اکسیدهای عناصر اصلی نیز بیان‌کننده رسوب‌گذاری نمونه‌های برش آرک در موقعیت برخوردی است. با تلفیق داده‌های پتروگرافی، ژئوشیمیایی و زمین‌شناسی منطقه نمونه‌های مطالعه شده دارای سنگ منشأ احتمالی آذرین، رسوبی و به‌مقدار ناچیز دگرگونی هستند. بررسی نحوه تکامل ساختاری زون زمین‌درز سیستان در این زمان نشان می‌دهد که نتایج حاصل از این مطالعه به جایگاه زمین‌ساختی واقعی منطقه نزدیک است.

References

- Aghanbati, A (1383) Geology of Iran. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, 586 p.
- Angiboust, S., Agard, P., De Hoog, J.C.M., Omrani, J and Plunder, A (2013) Insights on deep, accretionary subduction processes from the Sistan ophiolitic “melange” (EasternIran). *Lithos*, 156–159:139–158.
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., Medina, J.M and Homam, S.M (2011) Sr/Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut Block, Eastern Iran), *Journal of Asian Earth Sciences*, 41: 283–296.
- Babazadeh, S.A., De Wever, P (2004) Early Cretaceous radiolarian assemblages from radiolarites in the Sistan Suture (eastern Iran). *Geodiversitas*, 26: 185-206.
- Baiyegunhi, C., Liu, K., Gwavava, O (2017) Geochemistry of sandstones and shales from the Eccia Group, Karoo Supergroup, in the Eastern Cape Province of South Africa: Implications for provenance, weathering and tectonic setting. *Open Geosciences*, 9: 340-360.
- Baiyegunhi, T.L., Liu, K., Gwavava, O, Baiyegunhi, C (2020) Petrography and tectonic provenance of the Cretaceous sandstones of the Bredasdorp basin, off the south coast of South Africa: evidence from framework grain modes. *Journal of Geosciences*, 10: 340.
- Basu, A., Young, S.W., Suttner, L.J., James, W.C., Mack, G.H (1975) Re-evaluation of the use of undulatory extinction and polycrystallinity in detrital quartz for provenance interpretation. *Journal of Sedimentary Petrology*, 45: 873–882.
- Basu, A (2003) A perspective on quantitative provenance analysis, in Valloni, R and Basu, A. (eds), *Quantitative Provenance Studies in Italy. Memorie Descrittive Della Carta Geologica dell’ Italia*, 61: 11-22.
- Bhatia, M.R (1983) Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstones. *Journal of Geology*, 91: 611-627.
- Bhatia, M. R., Crook, K. W (1986) Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contribute Mineral Petrology*, 92: 181–93.
- Bröcker, M., Fotoohi Rad, G., Burgess, R., Theunissen, S., Paderin, I., Rodionov, N., Salimi, Z (2013) New age constraints for the geodynamic evolution of the Sistan Suture Zone, eastern Iran. *Lithos*, 170-171: 17-34.
- Camp, V., Griffis, R (1982) Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos*, 15 (3): 221-239.
- Chima, P., Baiyegunhi, C., Liu, K., Gwavava, O (2018) Petrography, modal composition, and tectonic provenance of some selected sandstones from the Stormberg Group, Karoo Supergroup, in the Eastern Cape Province, South Africa. *Open Geosciences*, 10: 821–833.
- Crook, K.A.W (1974) Lithogenesis and geotectonics: the significance of compositional variation in flyscharenites (greywackes). *Society of Economic, Paleontology and Mineralogy Special Publication*, 19: 304-310.
- Dickinson, W.R (1970) Interpreting detrital modes of greywacke and arkose. *Journal of Sedimentary Petrology*, 40: 695-707.
- Dickinson, W.R (1979) Plate Tectonics and Sandstone Compositions. *American Association Petroleum Geologists Bulletin*, 63: 2164–2194.
- Dickinson, W.R (1988) Provenance and Sediment Dispersal in Relation to Paleotectonics and Paleogeography of Sedimentary Basins. In *New Perspectives in Basin Analysis*; Kleinspehn, K.L., Paola, C., Eds., Springer, New York, 2–25.

- Dickinson, W. R., Beard, L. S., Brakenridge, G. R., Erjavec, J. L., Ferguson, R. C., Inman, K. F., Ryberg, P. T (1983) Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. *Geological Society of America Bulletin*, 94(2): 222-235.
- Dickinson, W.R., Suczek, C.A (1979) Plate tectonic and sandstone composition. *American Association Petroleum Geologists Bulletin*, 63: 2164-2182.
- Etemad-Saeed, N., Hosseini-Barzi, M., Adabi, M. H., Sadeghi, A., Houshmandzadeh, A (2015) Provenance of Neoproterozoic sedimentary basement of northern Iran, Kahar Formation. *Journal of African Earth Sciences*, 111: 54-75.
- Folk, R.L (1980) *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company, Texas.
- Gazzi, P (1966) Le arenarie del flysh sopracretaceo dell Appennino modenese: Correlazioni con il flysh di Monghidoro. *Mineralogical Petrografica Acta*, 12: 69-97.
- Haque, M.M., Roy., M.K (2020) Sandstone-shale geochemistry of Miocene Surma Group in Bandarban anticline, SE Bangladesh: implications for provenance, weathering, and tectonic Setting. *Earth Sciences*, 9(1): 35-51.
- Ingersoll, R.V., Bullard, T.F., Ford, R., Grimm, J.P., Pickle, J.D., Sares, S.W (1984) The effect of grain size on detrital modes: a test of the Gazzi-Dickinson pointcounting method. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54: 103-116.
- Jafarzadeh, M., Hosseini-Barzi, M (2008) Petrography and geochemistry of Ahawz sandstone Member of Asmari Formation, Zagros, Iran: Implications on provenance and tectonic setting. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25: 247-260.
- Kroonenberg, S. B (1994) Effects of provenance, sorting and weathering on the geochemistry of fluvial sands from different tectonic and climatic environments. *Proceedings of the 29th International Geological Congress Part A*: 69-81.
- Malek Mohammadi Faradenbeh, F., Mortazavi Mehrizi, M. Hayhat, M.R (2018) Lithofacies and sedimentary environment of Lower Eocene siliciclastic deposits northwest of Birjand. *Proceedings of the 5th National Conference of Sedimentological Society of Iran with an emphasis on sediment erosion and pollution, Kerman*, pages 783 to 790.
- McCall, G.J.H (1997) The geotectonic history of the Makran and adjacent areas of southern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 15: 517-531.
- McLennan, S.M., Nance, W.B., Taylor, S.R (1980) Rare earth element-thorium correlation in sedimentary rocks and the composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44: 1833-1839.
- Moghaddam, S. P., Salehi, M. A., Jafarzadeh, M., Zohdi, A (2020) Provenance, palaeoweathering and tectonic setting of the Ediacaran Bayandor Formation in NW Iran: implications for the northern Gondwana continental margin during the late Neoproterozoic. *Journal of African Earth Sciences* 161: 103670.
- Moghadasi, M (2012) Petrographic study and sedimentary environment of Paleocene-Eocene carbonate units of Bainabad section, northwest of Birjand, eastern Iran. Master's thesis, Islamic Azad University, Zahedan branch.
- Nagarajan, R., Armstrong-Altrin, J.S., Kessler, F.L., Jong, J (2017) Petrological and geochemical constraints on provenance, paleoweathering, and tectonic setting of clastic sediments from the Neogene Lambir and Sibuti Formations, northwest Borneo. *Sediment Provenance, Chapter 7*: 123- 153.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M (1982) Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299: 715-717.
- Periasamy, V., Venkateshwarlu, M (2017) Petrography and geochemistry of Jurassic sandstones from the Jhuran Formation of Jara dome, Kachchh basin, India: implication for provenance and tectonic setting. *Journal of Earth Systems sciences*, 126: 44-64.
- Pang, K.N., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y., Chu, C.H., Lee, H.Y., Lo, C.H (2013) Eocene-Oligocene post-collisional magmatism in the Lut-Sistan region, eastern Iran: Magma genesis and tectonic implications. *Lithos*, 180- 181: 234- 251.
- Rahman, M.J.J., Suzuki, S (2007) Geochemistry of sandstones from the Miocene Surma Group, Bengal basin, Bangladesh: implication for provenance, tectonic setting and weathering. *Geochemical Journal*, 41: 415-428.
- Roser, B.P., Korsch, R.J (1988) Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology*, 67: 119-139.
- Roser B.P., Korsch R.J (1986) Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *Journal of Geology*, 94: 635-650.
- Roshan Ravan, J (2007) Geological map of Moussaviyeh with 1:100000 scale. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran.

- Saccani, E., Delavari, M., Beccaluva, L., Amini, S (2010) Petrological and geochemical constraints on the origin of the Nehbandan ophiolitic complex (eastern Iran): implication for the evolution of the Sistan Ocean. *Lithos*, 117: 209–228.
- Samadi-Afkham, M (2012) Study of biostratigraphy and microfacies of the Paleocene-Eocene sedimentary sequence in the north of Khusf, Dahan-Roud Section, Eastern Iran. Master's thesis, Birjand University.
- Taheri, A., Jafarzadeh, M., Armstrong-Altrin, J., Mirbagheri, S. R (2018) Geochemistry of siliciclastic rocks from the Shemshak Group (Upper Triassic–Middle Jurassic), northeastern Alborz, northern Iran: implications for palaeoweathering, provenance, and tectonic setting. *Geological Quarterly* 62(3): 522-535.
- Tirrul, R., Bell, I.R., Griffis, R.J., Camp, V.E (1983) The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 94: 134–150.
- Tobia, F.H., Aswad, K.J (2015) Petrography and geochemistry of Jurassic sandstones, Western Desert, Iraq: implications on provenance and tectonic setting. *Arabian Journal of Geosciences*, 8: 2771-2784.
- Tucker M.E (2001) *Sedimentary Petrology: An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks*. 3rd ed., Blackwell Science Lt: Hoboken, NJ, USA, 262p.
- Verma, S.P. Armstrong-Altrin, J.S (2013) New Multi-Dimensional Diagrams for Tectonic Discrimination of Siliciclastic Sediments and Their Application to Precambrian Basins. *Chemical Geology* 355: 117-133.
- Wani, H., Mondal, M.E.A (2011) Evaluation of provenance, tectonic setting, and paleoredox conditions of the Mesoproterozoic-Neoproterozoic basins of the Bastar craton, central Indian Shield: using petrography of sandstones and geochemistry of shales. *Lithosphere*, 3: 143-154.
- Yaghoubi, M., Bagheri, S (2019) Relative shortening mechanism in the Eocene structural arc northwest of Birjand, eastern Iran. *Earth Sciences Quarterly* 29: 116-286.
- Zaid, S.M., Al Gahtani, F (2015) Provenance, diagenesis, tectonance, diagenesis, tectonic setting, and geochemical setting, and geochemistry of Hawkesbury Sandstone (Middle Triassic), southern Sydney Basin, Sydney Basin, Australia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 24: 72-98.
- Zarrinkoub, M.H., Pang, K.-N., Chung, S.-L., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y., Lee, H.Y (2012) Zircon U/Pb age and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite, Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos*, 154: 392–405.
- Zhang, M., Yanqiu, Y., Jinyoung, C., Cai, K., Mingyuan, S (2020) Petrography and geochemistry of clastic sedimentary rocks as evidence for the provenance of the Jurassic stratum in the Daqingshan area. *Open Geosciences*, 12: 1350- 1368.
- Zuffa, G.G (1985) Optical analyses of arenites: Influence of methodology on compositional results, in Zuffa, G.G., ed., *Provenance of Arenites*. Dordrecht, Reidel. NATO ASI Series, 165- 189.

Petrography and Geochemistry of Arc section (Upper Paleocene-Lower Eocene) siliciclastic deposits, northwest of Birjand, evidence of provenance tectonic setting and Lithology

M. Mortazavi Mehrizi^{1*}, F. Malekmohammadi² and M. R. Hayhat³

- 1- Assist. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran
- 2- M. Sc., student. Dept., of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran
- 3- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

* mmortazavi@birjand.ac.ir

Abstract

The Arc Section in the northwest of Birjand is located in the eastern Iran structural zone. The petrography and geochemistry of siliciclastic deposits of this section have been studied in order to determine the lithology and tectonic setting of the source area. Petrographic evidence of sandstone samples, including types of monocrystalline and polycrystalline quartz with non undulose and undulose extinction, the abundance of sedimentary rock fragments and to a lesser extent metamorphic and volcanic lithics, as well as drawing results of the modal analysis of these samples on the tectonic provenance diagrams show that the studied sandstones are the result of recycled orogeny and post collision. Also, based on the geochemical analysis of the major elements of the shale samples, these sediments originate from igneous rocks and belong to the collision tectonic setting. The Sistan suture zone is placed between two continental blocks of Lut and Afghan. According to most researchers, subduction of the oceanic crust has played a very important role in the tectonic evolution of this region. The recent studies show that due to the westward subduction of the Sistan Ocean in the Early to Middle Cretaceous, the upper mantle was pushed under the Lut block and the collision between the Lut and Afghan blocks along the Sistan collision zone probably occurred in the Upper Cretaceous. Combining above data and comparing it with the tectonic evolution of the region shows that the results of this study can be used to reconstruct the paleogeography of this area.

Keywords: Mineralogy, Major oxides, Collision setting, Upper Paleocene- Lower Eocene, Northwest of Birjand.

Introduction

Clastic sedimentary rocks provide valuable information about the composition, tectonic setting and evolution of the continental crust (Nesbitt and Young, 1982; Bhatia, 1983; Roser and Korsch, 1986; Periasamy and Venkateshwarlu, 2017; Baiyegunhi et al., 2017). As evidence of the old upper crust, these rocks may have been remobilized by erosion and covered by other sedimentary deposits or ice or buried deep in the crust (Zhang et al., 2020). Although the petrographical study of sandstones reveals processes related to the origin, tectonic setting, depositional environment and transportation of clastic particles, but because the grains of the sandstone framework change under the influence of compression and burial, it may be difficult to draw conclusions. If the accuracy of geochemical data enables researchers to detail understand the evidence in clastic rocks (Periasamy and Venkateshwarlu, 2017). Since the chemical composition and mineralogy of clastic sedimentary rocks are affected by various factors such as source rock properties, weathering, sorting processes during transportation, sedimentation and diagenetic processes (Rahman and Suzuki, 2007; Wani and Mondal, 2011; Tobia and Aswad, 2015; Baiyegunhi et al., 2017; Haque and Roy, 2020), a combination of petrographic and geochemical information of siliciclastic sedimentary rocks can determine the nature of the source area, the tectonic setting of the sedimentary basins and the paleoclimate conditions. (e.g. Dickinson and Suczek, 1979; Bhatia, 1983; Roser and Korsch, 1988; Tobia and Aswad, 2015; Nagarajan et al., 2017). The studied area is a part of the eastern Iran structural, which in the division of sedimentary-structural zones of Iran by Aghanbati (2004) is called as the eastern

Iran flysch and is located in the vicinity of the northwest margin of Lut block. In the eastern Iran flysch zone, there are no rocks older than the Cretaceous outcrops. In Birjand area, the sedimentation of Paleogene sedimentary sequences started from Paleocene-Eocene, following the action of the Laramide orogenic phase, and continued until the end of the Middle Eocene (Aghanbati, 2013). Most of the researches of the Paleocene-Eocene deposits in the northwest of Birjand is focused on structural studies such as geometrical-kinetic analysis of folds, as well as paleontology, sedimentology and sedimentary environment studies of carbonate units (e.g. Samadi Afkham, 2012; Moghdisi, 2013; Yaqoubi and Bagheri, 2020). Since the investigations of sedimentology, petrography and geochemistry of siliciclastic rocks in this area are very limited and any study has been done in this field in the Arc section, it seems necessary to study the mentioned cases. The Arc stratigraphic section is located 70 km northwest of Birjand and 40 km northwest of Khosuf. The Birjand-Tabas main road is the most important way to reach the studied section. The geographic location of the Arc section is $33^{\circ} 1' 13.67''$ north latitude and $58^{\circ} 40' 7.16''$ east longitude, which is placed within the 1:100000 Moussavieh geological map (Roshan Ravan, 2007).

Materials & Methods

65 fresh rock samples have been collected from the siliciclastic sedimentary sequence of the Arc section for the study of stratigraphy and sedimentology. 10 sandstone thin sections of studied sequence have been prepared and studied by polarizing microscope. Mineralogical composition of sandstone samples was determined by modal analysis. Point counting was done using the Gazzi-Dickinson method (Gazzi, 1966; Dickinson, 1970; Ingersoll et al., 1984; Zuffa, 1985). About 300 points were counted for each section. Sandstone samples were classified based on compositional classification of Folk (1980). 11 shale samples from the studied sequence have been selected for geochemical analysis. The amount of the main element oxides of the above samples was measured by the ICP-OES device at Zar Azma Company in Tehran.

Discussion of Results & conclusions

Modal analysis of the detrital grains of sandstones framework is widely used for provenance studies (Dickinson et al., 1983; Chima et al., 2018; Baiyegunhi et al., 2020). Therefore, the mineralogical composition of clastic sedimentary rocks is usually used as a sensitive indicator of origin, climate and tectonics (Baiyegunhi et al., 2020). Several researchers (e.g. Basu et al., 1975; Dickinson, 1979; Dickinson et al., 1983; Jafarzadeh and Hosseini-Barzi, 2008) have investigated the relationship between tectonic setting and petrography of sandstones. The findings of the mentioned investigations show that petrographic studies of framework grains of sandstones (detrital modes) can be used to determine the provenance tectonic setting and associated sedimentary processes (Baiyegunhi et al., 2020). In terms of texture, the studied sandstones are generally medium to coarse-grained (0.34 to 0.89 mm) and are moderately to well sorted. The grain shape is often subangular to subrounded, and the grain contacts varies from point to suture contacts. The above sandstones are made of framework grains, minor minerals, cement and pore space. The constituent grains of the rock framework include quartz, feldspar, and rock fragments, while minor minerals include muscovite and opaque heavy minerals. The rock cement is mostly carbonate (calcite) and iron oxide. Based on the percentage of clay matrix, roundness and sorting of grains, the above sandstones are submature. The studied samples, based on mineralogical composition (total quartz, feldspar and rock fragments) (Folk, 1980) are litharenite. The abundance and specificities of the sandstone framework detrital grains in the Arc section indicate the presence of old igneous, metamorphic and sedimentary rocks in the source area. Considering the litharenite composition and the abundance of sedimentary fragments of the studied samples, it seems that the erosion of older sedimentary deposits also played a role in the formation of sandstones in this region. In other words, a variety of source rocks, including old igneous, metamorphic and sedimentary rocks, have been involved in creating the components of the studied sandstones. According to the geological map of the region (Roshan Ravan, 2006), the Cretaceous volcanic and intermediate igneous (basalt, tuff and andesite) and flysch units (shale, sandstone, conglomerate and limestone) are existing in the northeast and east of the study section that can be considered as sedimentary and igneous source rocks of this sequence. The alternation of Cretaceous volcanic and sedimentary units indicates the possibility of metamorphism in

the sedimentary units of this region, which can provide metamorphic quartz and rock fragments of this collection. The point counting results of the above sandstones in the Q_mFL_t , Q_mPK , $Q_pL_vL_s$ and Q_tFL diagrams (Dickinson, 1979; Dickinson and Suzek, 1979; Dickinson, 1988; Dickinson et al., 1983) show that most of the samples are placed in the limits of collision suture zone, recycled orogenic with igneous tectonic provenance. The studied sandstones have a quartz lithic composition. They have low amounts of feldspar and high ratio of Q_m/Q_p and L_s/L_v , which correspond with the plot of the above samples in the collision suture zone, recycled orogenic with igneous tectonic provenance fields.

The study of the siliciclastic sedimentary rocks provenance is often done in order to understand the geological composition and evolution of the source area and to determine the sedimentary basin tectonic setting. In geochemical investigations of provenance, fine-grained sedimentary rocks such as shales are more important because they contain mineralogical components of the mother rock and reflect the characteristics of the composition of the source area crust better than other clastic sedimentary rocks (Haque and Roy, 2020). The composition of the main element oxides of the Arc shale samples has been used to determine the sedimentary provenance by using the various provenance discriminating diagrams. Based on mentioned diagrams, studied samples probably have igneous source rocks. The siliciclastic rocks with different tectonic settings have their own geochemical characteristics. The tectonic setting diagrams have acceptable results for clastic rocks that are not affected by post depositional weathering and metamorphism (Baiyegunhi et al., 2017). There are bivariate diagrams of major and minor element geochemistry that have been used by various researchers to determine the tectonic setting of sandstones and shales (Bhatia, 1983; Bhatia and Crook, 1986; Roser and Korsch, 1986; Verma and Armstrong-Altrine, 2013). Various plots of our data in the above diagrams indicate that the tectonic setting of studied shale source area probably is collision setting.

The Sistan suture zone in eastern Iran is an ambiguous branch of the Neotethys with a north-south trend that has undergone a complex tectonic history (Camp and Griffis, 1982; Tirrul et al., 1983; McCall, 1997). The sistan suture zone is placed between two continental block of Lut and Afghan. According to most researchers, subduction of the oceanic crust has played a very important role in the tectonic evolution of this region. Studies by Pang et al. (2013) also shows that due to the westward subduction of the Sistan Ocean in the Early to Middle Cretaceous, the upper mantle was pushed under the Lut block and the collision between the Lut and Afghan blocks along the Sistan collision zone probably occurred in the Upper Cretaceous. Among the evidences of this collision, we can mention the placement of adakite intrusive masses (86 million years old) and A-type granites (55 million years old) in the collision zone of Sistan. According to what has been mentioned, before the deposition of siliciclastic sediments of the Upper Paleocene-Lower Eocene age, the area was tectonically active and probably there were collisional zone in this area. Therefore, the results of tectonic setting investigations using petrography (recycled orogenic regions) and geochemistry of studied sandstone and shale samples are approximately consistent with the tectonic setting of the eastern zone of Iran at this time.

Conclusions

The petrographic studies of the samples studied in Arc section (northwest of Birjand) show that these sandstones are litharenite in terms of composition. Petrographic observations and plotting clastic mode results on Q_tFL , Q_mFL_t and Q_mPK diagrams show that the Upper Paleocene-Lower Eocene sandstones of this section are the result of collision zones and recycled orogenic zones. The geochemical study of shale samples and the drawing of tectonic setting discriminant diagrams based on the major oxides indicate the collision setting (especially continental-continental collision) for these data. The combination of petrographic, geochemical and geological data indicate that the studied samples have possible main igneous and sedimentary source rocks with minor metamorphic sources. Examining the tectonic evolution of the Sistan suture zone at this time shows that the results of this study are close to the real tectonic setting of the region.