

## سنگ‌نگاری، کانی‌شناسی و زمین‌شیمی شیل‌های کوه کمر در برش روم (جنوب قائن) برای تعیین خاستگاه و جایگاه زمین‌ساختی

صدیقه زیرجانی‌زاده<sup>۱\*</sup>، یعقوب نصیری<sup>۱</sup>، سیدخلیل فروزنده<sup>۲</sup>، سمیرا تقدیسی نیک‌بخت<sup>۱</sup>، حمید حافظی مقدس<sup>۲</sup>، محمد امین زارعی درمیان<sup>۳</sup>

۱ - مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

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

۳ - گروه مهندسی معدن، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

(دریافت مقاله: ۹۸/۳/۱۸، نسخه نهایی: ۹۸/۸/۴)

**چکیده:** منطقه شیل کوه کمر با ستبرای ۳۵۴ متر از سنگ‌های سیلیسی آواری (ماسه سنگ و شیل) تشکیل شده است. بررسی‌های سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که ماسه سنگ‌های این منطقه در دو گروه نیمه آرکوز و آرکوز قرار دارند. این ماسه سنگ‌ها بیشتر از کوارتزهای بسیلوری و تک‌بلوری و فلدسپار پتاسیم با جورشدگی متوسط و گردشدگی نیمه زاویه‌دار تا نیمه گردشده تشکیل شده‌اند و رسیدگی ترکیبی و بافتی متوسط تا پایینی را نشان می‌دهند. از نظر سنگ‌نگاری، شیل‌ها غنی از کوارتز، آل بیت، کلسیت و دارای مقدار کمی کانی رسی (ایلپیت و کلریت) هستند. تصاویر میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) نیز نشان‌دهنده کانی‌های رسی ایلپیت و کلریت در این شیل‌هاست. به منظور تعیین برخاستگاه، شیل‌های این منطقه تجزیه زمین‌شیمی شدند که نسبت به پوسته قاره‌ای بالایی، تخلیه در مقدار  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{Na}_2\text{O}$ ،  $\text{P}_2\text{O}_5$  و عناصر فرعی  $\text{Sr}$ ،  $\text{Cu}$ ،  $\text{Nb}$ ،  $\text{Ba}$  و غنی‌شدگی در  $\text{CaO}$  و  $\text{U}$  را نشان می‌دهند. نمودار  $\text{Al}_2\text{O}_3$  نسبت به  $\text{TiO}_2$  و نمودارهای سه تایی  $(\text{MgO}+\text{TiO}_2+\text{FeO})$ ،  $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ ،  $(\text{SiO}_2/20)$  و همچنین  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ ،  $(\text{FeO}+\text{MgO})$  (CIA) و  $(\text{PIA})$  محاسبه شده بیانگر هوازدگی شیمیایی ضعیف تا متوسط و آب و هوای خشک و نیمه خشک در ناحیه خاستگاه هستند. نمودارهای تابعی برپایه اکسیدهای عناصر اصلی  $(\text{SiO}_2)$  نسبت به  $(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$  و همچنین نمودار سه تایی  $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ ،  $(\text{SiO}_2/20)$ ،  $(\text{TiO}_2+\text{MgO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$  نشان می‌دهد که شیل‌های این منطقه در جایگاه قاره‌ای فعال قرار دارند. بازسازی جغرافیای دیرینه برای این منطقه طی ائوسن نشان می‌دهد که رسوبگذاری این منطقه در یک حوضه درون قاره‌ای در حال فرونشینی رخ داده است.

**واژه‌های کلیدی:** زمین‌شیمی؛ هوازدگی شیمیایی؛ سنگ خاستگاه؛ برخاستگاه؛ جنوب قائن؛ فلش شرق.

### مقدمه

چه با بررسی‌های سنگ‌نگاری می‌توان برخاستگاه سنگ‌های آواری را تفسیر کرد؛ اما بررسی‌های زمین‌شیمی و استفاده از نمودارهای تفکیکی می‌تواند ابزار قدرتمندی برای تشخیص برخاستگاه این سنگ‌ها باشد [۴-۶]. شیل‌ها به علت همگن و غیر قابل نفوذ بودن نسبت به سنگ‌نگاری ماسه سنگ‌ها، کاربرد

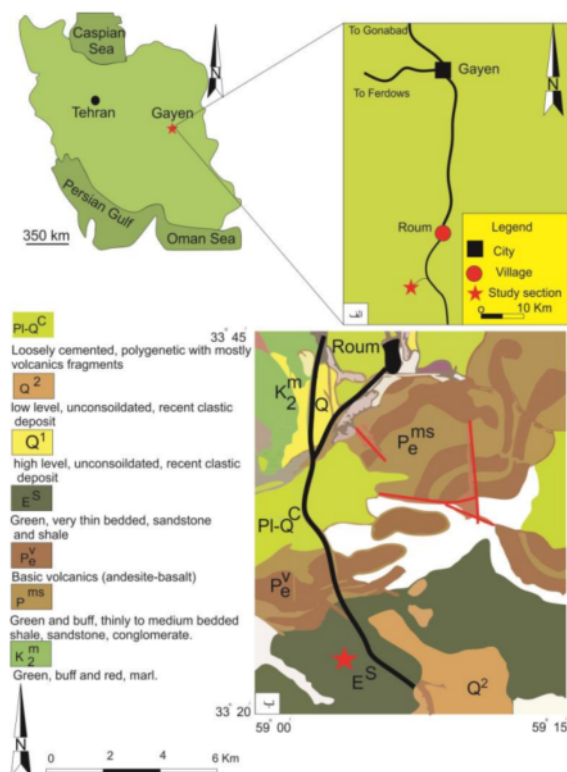
شناخت برخاستگاه سنگ‌های رسوبی آواری در بررسی جغرافیای دیرینه سودمند است [۱]. ترکیب رسوب‌های آواری وابسته به نوع سنگ‌های ناحیه خاستگاه، آب و هوا و پستی و بلندی است که همه در کنترل زمین‌ساخت هستند [۲، ۳]. اگر

شیل با دگرشیمی زاویه‌دار رسوب‌های کرتاسه را پوشانده‌اند. در دوره‌های الیگوسن پایانی و میوسن پیشین نیز بر حسب فاصله از این دو قطعه، رسوب‌های فلیشی وابسته به دوره پالئوژن چین‌خوردگی یافته و موجب تشکیل حوضه‌های رسوبی دوره نئوژن در سطح این ناحیه شده‌اند. سرانجام با چین‌خوردگی واحدهای رسوبی وابسته به دوره نئوژن در دوره پلیوکواترنر چهره کنونی این ناحیه شکل گرفته است. در این پژوهش، واحدهای ائوسن در برش روم در ۳۵ کیلومتری جنوب‌قائن (شکل ۱ الف) و در عرض جغرافیایی  $32^{\circ} 20'$  شمالی و طول جغرافیایی  $59^{\circ} 00'$  تا  $59^{\circ} 15'$  شرقی بررسی شد (شکل ۱ ب). برش مورد بررسی ۳۵۴ متر سبتر دارد و بیشتر شامل سنگ‌های سیلیسی آواری (ماسه سنگ و شیل) بوده و به صورت ناپیوسته روی سنگ آهک‌های کرتاسه جای گرفته است. شیل‌های این مجموعه از نوع شیل‌های سبز رنگ با فرسایش مدادی بوده و ماسه سنگ‌ها نیز متوسط تا نازک لایه با رنگ سبز زیتونی تا تیره هستند (شکل ۲). این واحدها در برگه زمین‌شناسی روم ائوسن پیشین در نظر گرفته شده است [۱۱].

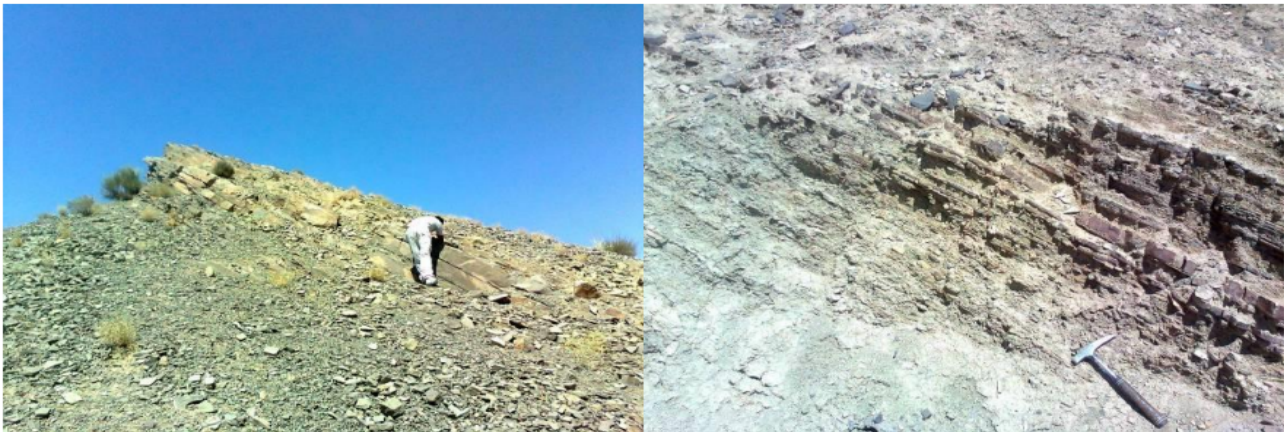
بهتری در بررسی‌های زمین‌شیمی برخاستگاه دارند [۷-۹]. ترکیب کانی‌شناسی و زمین‌شیمی سنگ‌های رسوبی آواری نشان‌دهنده ترکیب سنگ و جایگاه زمین‌ساختی ناحیه خاستگاه و عوامل محیطی شامل نوع و مدت زمان هوازدگی، سازوکار ترابرد محیط رسوبی و همچنین فرآیندهای پس از رسوبگذاری است. عوامل زمین‌شیمی چون عناصر اصلی و فرعی و نسبت‌های آن‌ها به طور گسترده برای تفسیر برخاستگاه و جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های سیلیسی آواری به کار می‌روند. از رفتار زمین‌شیمیایی عناصر فرعی حساس به اکسایش - کاهش نیز برای پی بردن به شرایط محیطی حوضه استفاده می‌شود. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های عنصری شیل‌های منطقه کوه کمر، برخاستگاه (تفسیر سنگ خاستگاه، محیط زمین‌ساختی و آب و هوای دیرینه) و شرایط زمین‌شناسی ایران طی ائوسن بررسی شد.

#### زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد بررسی از دیدگاه زمین‌ساختی در منطقه فلیش شرق ایران واقع است [۱۰]. قدیمی‌ترین سنگ‌های این ناحیه واحدهای سنگی وابسته به دوره کرتاسه پیشین هستند. در دوره ائوسن، رسوب‌های رخساره فلیشی شامل ماسه سنگ و



شکل ۱ الف) راه‌های دسترسی به برش مورد بررسی. ب) بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ روم که جایگاه برش مورد بررسی بر آن نشان داده شده است (برگرفته از مرجع [۱۱] با تغییرات).



شکل ۲ نماهایی از واحدهای مورد بررسی (دید به سمت شمال شرق).

### روش بررسی

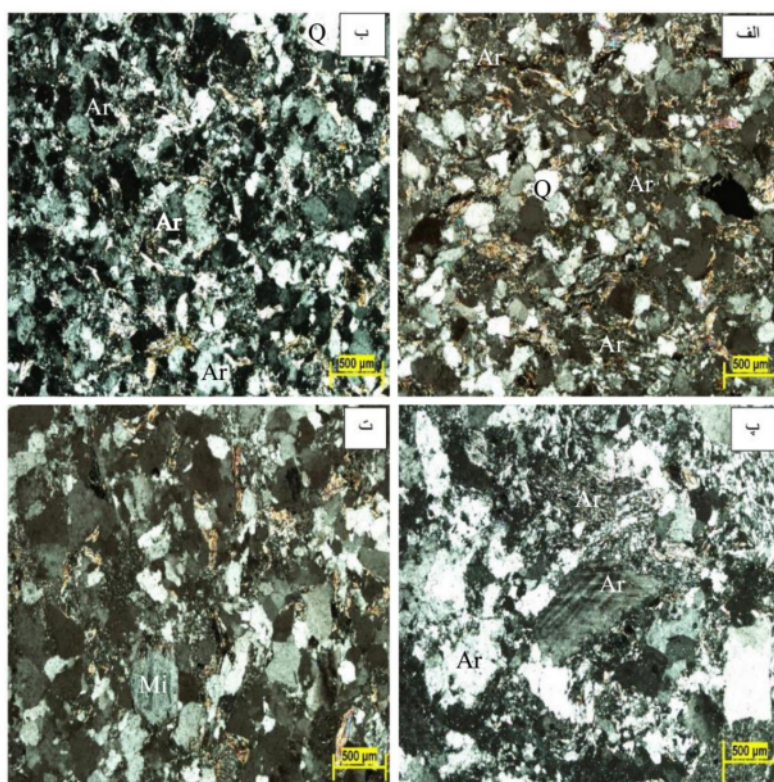
در این پژوهش، یک برش سطحی به سببرای ۳۵۴ متر اندازه-گیری و از منطقه مورد بررسی در مجموع ۳۵۰ نمونه ماسه سنگ و شیل برداشت شد. از این میان، ۳۰ نمونه شیل انتخاب شد که نماینده کل منطقه مورد مطالعه هستند. مقدار کربنات کلسیم در سیمان می‌تواند در نمونه‌ها خطا ایجاد کند؛ از این رو، نمونه‌هایی با کمترین مقدار کربنات کلسیم انتخاب شدند. به منظور تعیین اکسیدهای اصلی و فرعی، نمونه‌های پودر شده توسط طیف‌سنج فلئورسانس پرتو ایکس (XRF) فیلیپس مدل PW 1480 در آزمایشگاه تجزیه‌کنندگان کانسارهای بلورین آمتیس خاور تجزیه شدند. به منظور تشخیص کانی‌شناسی رس‌های موجود در شیل‌ها از پراش سنج پرتوی X (XRD) استفاده شد. تعداد ۵ نمونه با کمترین مقدار کربنات انتخاب و پس از پودر شدن به آزمایشگاه کانسارهای بلورین آمتیس ارسال شده و توسط دستگاه Explorer Tcu 2000N تجزیه شدند. برای مطالعات میکروسکوپی، ۲ نمونه شیل کانسارهای بلورین آمتیس نخست در ابعاد کوچک شکسته و با روکش طلا پوشیده شد و سپس با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل LEO 1450Vp مجهز به طیف‌سنج پراش انرژی پرتوی X (EDX) بررسی شدند. برای تعیین سنگ خاستگاه و جایگاه زمین‌ساختی از نسبت اکسیدهای اصلی چون  $K_2O$ ،  $Al_2O_3$ ،  $SiO_2$ ،  $Na_2O$  و عناصر فرعی و عناصر نادر خاکی استفاده شد. در این پژوهش، برای محاسبه شاخص هوازدگی شیمیایی (CIA) و شاخص تنوع ترکیبی (ICV) از روش McLennan استفاده شد به طوری که به دلیل مقادیر بالای  $CaO$ ، برای اصلاح مقادیر،  $Na_2O$  در فرمول به  $CaO$  تبدیل می‌شود.

### بحث و بررسی

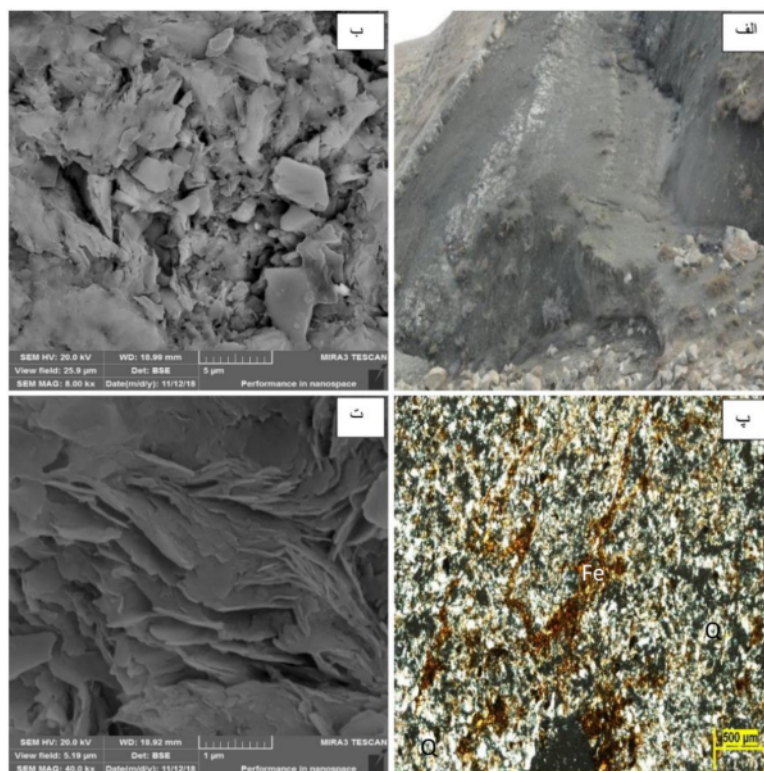
#### سنگ‌نگاری ماسه سنگ

ترکیب اجزای تشکیل دهنده رسوب‌های سیلیسی آواری وابسته به سنگ‌شناسی ناحیه خاستگاه و عملکرد فرایند هوازدگی است که اغلب توسط اقلیم و زمین‌شناسی ناحیه خاستگاه کنترل می‌شود و سنگ‌نگاری آنها اطلاعات مهمی از سنگ اولیه را ارائه می‌کند. ترکیب ۲۰ نمونه از ماسه سنگ‌های منطقه بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری تعیین شد. به این ترتیب، ماسه سنگ-های منطقه مورد بررسی در نمودار سه تایی QFR در گستره سنگ رخساره نیمه آرکوز و آرکوز با تغییرات بین ۰/۱ تا ۰/۶ میلیمتر قرار دارند (شکل ۳). بررسی ویژگی‌های بافتی اجزای تشکیل دهنده ماسه سنگ‌ها نشان می‌دهد که در سنگ رخساره آرکوز اندازه دانه‌ها ۰/۱۴ تا ۰/۳۶ میلی‌متر و اجزای تشکیل دهنده شامل کوارتزهای بسببوری با خاموشی موجی و کوارتز تک بلوری با خاموشی موجی (با میانگین ۷۵ تا ۶۷ درصد) هستند. مقدار بسیار کمتری از اجزای این ماسه سنگ‌ها را به ترتیب فلدسپات بیشتر میکروکلین و ارتوکلاز (با میانگین ۱۵ تا ۳۳ درصد)، میکا و خرده‌های سنگی (کمتر از ۵ درصد) تشکیل می‌دهند (شکل‌های ۴ الف و ب). در سنگ رخساره نیمه آرکوز، اندازه دانه‌ها ۰/۱۴ تا ۰/۳۶ میلی‌متر بوده و اجزای تشکیل دهنده شامل کوارتز (به طور متوسط ۸۸ درصد)، فلدسپات از نوع میکروکلین و ارتوکلاز (با میانگین ۱۰ درصد) و مقادیر جزئی پلاژیوکلاز (کمتر از ۳ درصد) به صورت تازه تا دگرسان شده است. سیمان‌های این ماسه سنگ از نوع اکسید آهن و سیلیس است (شکل‌های ۴ ب و ت).





شکل ۳ الف) سنگ رخساره آرکوز (Q): دانه کوارتز و Ar: دانه فلدسپات آرکوز. ب) سنگ رخساره نیمه آرکوز (Q): دانه کوارتز و Ar: دانه فلدسپات آرکوز. پ) دانه های آرکوز در سنگ رخساره آرکوز (Ar). ت) دانه فلدسپات میکروکلین (Mi) در سنگ رخساره آرکوز [۱۲].



شکل ۴ الف) سنگ رخساره شیل. ب) تصویر SEM از سنگ رخساره شیل که نشان دهنده کانی های رسی کلریت است. پ) سنگ رخساره لای سنگ که دارای کوارتز (Q) و سیمان اکسید آهن (Fe) است. ت) تصویر SEM که نشان دهنده کانی های رسی ایلیت در سنگ رخساره لای سنگ است.

## سنگ‌نگاری شیل‌ها

شیل‌ها از دو سنگ رخساره تشکیل شده‌اند، که هر دو بدون فسیل هستند. آنها سبز و خاکستری رنگ بوده (شکل ۵ الف) و بر اساس نتایج SEM، شامل کانی‌های رسی ایلیت و کلریت هستند (شکل ۵ ب).

## سنگ رخساره لای سنگ

این سنگ رخساره شامل لای سنگ‌های خاکستری رنگ دارای دانه‌های کوارتز، فلدسپات و سیمان سیلیسی و اکسید آهن است (شکل‌های ۵ پ و ت).

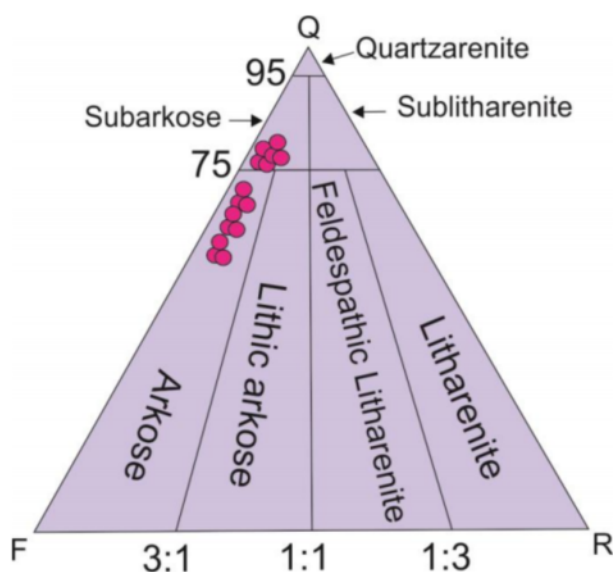
## تجزیه اکسیدها

نتایج تجزیه شیل‌های منطقه در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. این شیل‌ها دارای ۴۶/۹۰ درصد  $\text{SiO}_2$ ، ۹/۵۹ درصد  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ، ۰/۷۰ درصد  $\text{Na}_2\text{O}$ ، ۱/۹۶ درصد  $\text{MgO}$ ، ۱/۵۷ درصد  $\text{K}_2\text{O}$ ، ۰/۵۲ درصد  $\text{TiO}_2$ ، ۰/۰۶ درصد  $\text{MnO}$ ، ۱۵/۱۱ درصد  $\text{CaO}$ ، ۰/۰۸ درصد  $\text{P}_2\text{O}_5$  و ۴/۹۸ درصد  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  هستند. مقادیر نسبت‌های  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  برابر با ۵/۵۹ تا ۳/۸۹ و به طور میانگین ۰/۰۸ درصد،  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  برابر ۳/۰۳ تا ۱/۷۳ و به طور میانگین ۲/۲۴ درصد،  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  ۰/۱۲ تا ۰/۱۶ و به طور میانگین ۰/۱۶ درصد،  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  برابر با ۲۲/۷۱ تا ۲۱/۳۱ و به طور میانگین ۱۸/۴۴ درصد و مقدار  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  برابر با ۱/۳۷ تا ۴/۲۴ و به طور میانگین ۲/۲۷ درصد است. شاخص هوازدگی  $(\text{CIA} = \text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$

$(\text{K}_2\text{O}) \times 100$  و نیز شاخص دگرسانی پلاژیوکلازها  $(\text{PIA} = (\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}) + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}) \times 100$  در شیل‌های مورد بررسی بدست آمدند.

## کانی‌شناسی

بر اساس نتایج XRD، کانی‌های سازنده شیل‌های منطقه در نمونه‌های مورد بررسی به ترتیب فراوانی شامل کوارتزهای نیمه زاویه‌دار تا نیمه گردشده، فلدسپار و کانی‌های ورقه‌ای (ایلیت، کلریت و مسکوویت) هستند (شکل ۶). ترکیب اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی شیل‌های منطقه به‌نحیج شده با ترکیب پوسته قاره‌ای بالایی در نمودارهای عنکبوتی آورده شده است (شکل ۷). براساس نمودار تهی‌شدگی- غنی‌شدگی عناصر اصلی در شیل‌ها نسبت به میانگین (شکل ۴)،  $\text{P}_2\text{O}_5$ ،  $\text{Ba}$ ،  $\text{Na}_2\text{O}$ ،  $\text{Th}$  و  $\text{Nb}$  تهی‌شدگی و  $\text{Co}$ ،  $\text{Ni}$ ،  $\text{K}_2\text{O}$  و  $\text{CaO}$  غنی‌شدگی نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۴، تهی‌شدگی  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  و  $\text{SiO}_2$  ناشی از عدم هوازدگی شدید و همچنین عدم حمل دوباره رسوب‌هاست [۴-۶]. تهی‌شدگی  $\text{SiO}_2$  نشان دهنده بلوغ پایین شیل‌های منطقه است [۴-۶]. تهی‌شدگی  $\text{Na}_2\text{O}$  به دلیل پایداری کم در فرآیندهای ترابری بوده که سبب از بین رفتن آن‌ها شده است. میانگین  $\text{CaO}$  در نمونه‌ها تقریباً ۳ برابر مقدار  $\text{CaO}$  در پوسته قاره‌ای بالایی است که نشانگر سیمان کربناتی در نمونه‌هاست به طوری که باعث کاهش مقادیر  $\text{SiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در نمونه‌ها شده است.



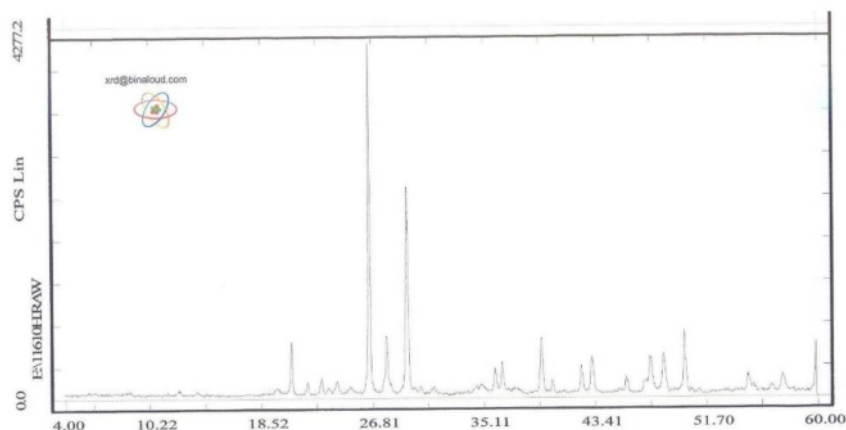
شکل ۵ رده‌بندی ماسه سنگ‌ها بر اساس نتایج فولک [۱۲]. نمونه‌های ماسه سنگی در گستره آرکوز و نیمه آرکوز قرار دارند.

جدول ۱ نتایج تجزیه اکسیدهای اصلی شیل‌های منطقه (برحسب % wt).

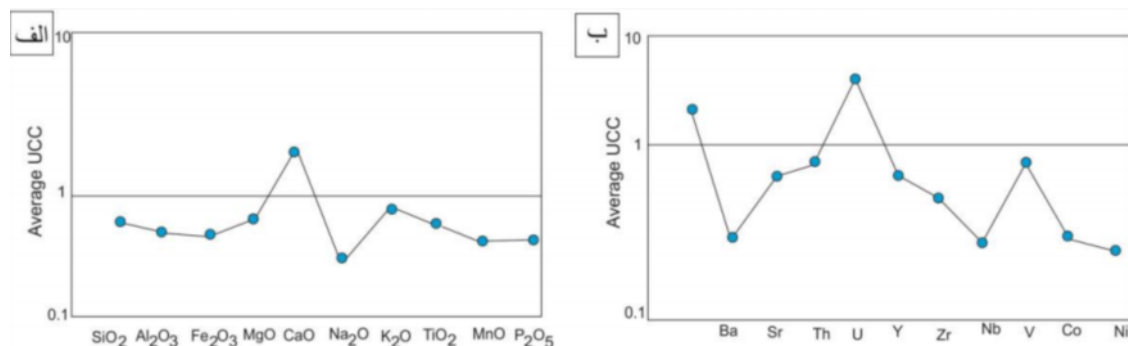
شماره نمونه	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
۱	۰.۱	۰.۱۰۷	۰.۵۲۴	۱.۸۸	۱.۰۶	۱.۱۷	۲۲.۶۲	۴.۳۰	۷.۳۸	۴۳.۲۹
۲	۰.۱۰۶	۰.۰۶۳	۰.۶۶۱	۲.۱۵	۲.۱۰	۰.۴۴	۱۵.۶۵	۵.۹۶	۱۰.۷۵	۴۶.۶۵
۳	۰.۰۹۴	۰.۰۸۷	۰.۵۳۲	۲.۱۳	۱.۳۱	۱.۰۰	۱۷.۷۸	۴.۸۳	۸.۲۰	۴۸.۹۸
۴	۰.۱۰۳	۰.۰۹۰	۰.۵۶۵	۲.۲۰	۱.۳۰	۱.۰۶	۱۶.۸۴	۴.۴۱	۸.۲۱	۵۱.۲۳
۵	۰.۰۹۹	۰.۰۷۹	۰.۵۷۲	۲.۱۸	۱.۸۳	۰.۹۱	۱۶.۷۱	۴.۴۶	۸.۹۱	۴۸.۷۵
۶	۰.۱۰۴	۰.۰۸۷	۰.۵۸۰	۲.۳۶	۱.۹۹	۰.۸۸	۱۵.۰۴	۴.۷۷	۹.۴۴	۴۹.۶۱
۷	۰.۱۰۶	۰.۰۷۴	۰.۵۸۷	۲.۶۳	۱.۷۱	۰.۸۷	۱۵.۰۷	۵.۸۲	۹.۴۹	۴۹.۶۱
۸	۰.۱۰۵	۰.۰۷۳	۰.۵۳۴	۴.۴۵	۱.۹۸	۰.۴۵	۱۶.۹۲	۸.۷۴	۸.۵۴	۳۸.۵۴
۹	۰.۱۰۷	۰.۰۴۸	۰.۵۹۵	۲.۱۱	۲.۲۳	۰.۳۲	۱۱.۷۰	۶.۱۳	۱۱.۴۵	۵۰.۱۱
۱۰	۰.۰۹۳	۰.۱۰۷	۰.۴۸۱	۱.۲۴	۱.۳۱	۰.۴۷	۲۰.۳۱	۴.۲۱	۷.۲۳	۴۴.۱۶
۱۱	۰.۰۹۰	۰.۰۲۸	۰.۷۱۳	۲.۶۵	۱.۸۴	۰.۵۸	۱۳.۳۵	۶.۱۲	۱۲.۲۵	۴۹.۵۵
۱۲	۰.۰۹۹	۰.۰۶۸	۰.۵۴۳	۱.۸۴	۱.۸۸	۰.۴۸	۱۶.۰۸	۴.۶۷	۹.۴۷	۴۸.۰۴
۱۳	۰.۰۷۰	۰.۰۵۵	۰.۴۶۸	۰.۹۸	۱.۳۲	۰.۳۸	۱۷.۳۵	۳.۷۵	۸.۵۵	۵۴.۵۰
۱۴	۰.۰۸۷	۰.۰۵۹	۰.۵۴۳	۱.۹۵	۱.۲۸	۰.۵۱	۳۲.۱۲	۴.۷۵	۸.۴۵	۴۰.۶۵
۱۵	۰.۰۹۳	۰.۰۷۹	۰.۶۰۰	۱.۱۲	۱.۵۲	۰.۷۲	۱۷.۷۹	۴.۳۶	۸.۱۸	۴۸.۸۰
۱۶	۰.۱۱۴	۰.۰۸۸	۰.۵۸۹	۲.۱۶	۱.۵۹	۱.۱۶	۱۶.۷۴	۴.۹۷	۹.۰۵	۴۷.۶۹
۱۷	۰.۱۰۶	۰.۰۶۴	۰.۵۹۸	۲.۲۶	۱.۸۷	۰.۸۰	۱۳.۳۱	۵.۷۰	۹.۴۹	۵۲.۲۴
۱۸	۰.۱۱۸	۰.۰۸۱	۰.۵۸۸	۲.۵۲	۱.۷۵	۰.۷۹	۱۶.۱۱	۵.۹۴	۳.۷۷	۴۷.۶۳
۱۹	۰.۰۹۷	۰.۱۰۳	۰.۷۹۹	۱.۶۱	۱.۱۹	۱.۰۵	۱۹.۸۲	۳.۶۶	۷.۲۷	۴۸.۰۰
۲۰	۰.۱۱۲	۰.۰۹۴	۰.۵۸۶	۲.۱۰	۱.۶۵	۰.۹۵	۱۸.۴۰	۴.۵۵	۸.۸۷	۴۶.۵۳
۲۱	۰.۱۱۰	۰.۰۷۷	۰.۶۰۹	۲.۱۶	۱.۹۵	۰.۹۰	۱۳.۷۳	۵.۲۴	۹.۴۹	۵۱.۸۹
۲۲	۰.۰۴۶	۰.۰۱۳	۰.۰۵۱	۲.۷۲	۱.۱۴	۱.۵۵	۵.۰۵	۴.۱۵	۱۶.۸۴	۶۴.۱۵
۲۳	۰.۱۱۷	۰.۰۵۵	۰.۶۵۹	۲.۰۸	۲.۳۸	۰.۴۰	۱۱.۹۹	۴.۹۰	۱۲.۲۰	۵۰.۵۶
۲۴	۰.۱۰۴	۰.۰۹۵	۰.۵۳۰	۱.۸۶	۱.۴۴	۰.۹۷	۲۱.۰۰	۴.۷۱	۸.۰۰	۴۱.۶۵
۲۵	۰.۰۸۳	۰.۰۶۳	۰.۴۹۳	۱.۷۵	۱.۴۴	۰.۷۳	۱۵.۱۳	۴.۱۹	۷.۷۱	۵۵.۸۷
۲۶	۰.۰۸۶	۰.۰۸۷	۰.۵۳۴	۱.۷۸	۱.۴۷	۰.۶۸	۱۸.۰۳	۴.۳۷	۷.۴۲	۴۹.۹۹
۲۷	۰.۱۰۲	۰.۰۴۹	۰.۶۱۶	۲.۵۸	۱.۸۱	۰.۸۷	۱۲.۶۸	۵.۹۲	۹.۶۹	۵۱.۱۷
۲۸	۰.۰۶۸	۰.۰۳۳	۰.۳۲۴	۱.۰۹	۰.۹۴	۰.۶۷	۲۵.۴۳	۵.۱۸	۶.۱۵	۴۲.۱۵
۲۹	۰.۱۲۰	۰.۰۴۷	۰.۶۴۳	۲.۳۳	۲.۵۷	۰.۳۱	۱۰.۷۴	۴.۹۰	۱۲.۴۰	۵۰.۸۵
۳۰	۰.۱۱۱	۰.۰۴۷	۰.۶۵۰	۱.۹۹	۲.۶۹	۰.۳۹	۹.۷۵	۴.۹۱	۱۲.۵۲	۵۳.۹۵
مجموع	۲.۸۵۲	۲.۰۹۷	۱۶.۲۲۴	۶۲.۸۶	۵۰.۵۴	۲۲.۴۶	۴۹۳.۱۴	۱۴۹.۵۷	۲۸۲.۹۷	۱۴۱۸.۸۵

جدول ۲ نتایج تجزیه عناصر فرعی شیل‌های منطقه.

شماره نمونه	so3 %	L.O.I %	cl ppm	Ba ppm	Sr ppm	Cu ppm	Zn ppm	Pb ppm	Ni ppm	Cr ppm
۱	۰.۰۰۵	۱۷.۲	۱۲۸	۳۳	۴۳۷	۱۲	۵۲	۱۵	۴۶	۱۰
۲	۰.۰۰۲	۱۴.۹۷	۶۶	۹۷	۴۷۶	۳۰	۷۸	۱۶	۷۷	۵۷
۳	۰.۰۰۳	۱۴.۵۱	۱۱۷	۶۴	۳۳۹	۱۵	۶۵	۳۲	۵۲	۹
۴	۰.۰۱۵	۱۳.۵۵	۱۵۹	۱۶۲	۴۴۵	۱۹	۶۱	۲۵	۴۷	۲۳
۵	۰.۰۰۳	۱۵.۱۵	۲۵۶	۷۷	۲۹۶	۲۳	۶۵	۲۰	۵۹	۲۲
۶	۰.۳۸۸	۱۳.۹۸	۱۶۵	۹۲	۲۶۹	۲۶	۷۱	۲۷	۵۰	۲۲
۷	۰.۰۰۳	۱۳.۵۷	۱۳۸	۱۰۱	۲۹۴	۲۳	۷۹	۱۷	۵۹	۲۴
۸	۰.۹۵	۱۸.۲۱	۱۴۶	۸۲	۲۷۴	۲۷	۱۱۸	۲۵	۸۳	۷۱
۹	۰.۰۰۳	۱۴.۷	۲۰۹	۹۳	۳۵۳	۲۸	۸۷	۱۵	۶۴	۴۸
۱۰	۰.۰۰۳	۲۰.۱۷	۱۱۵	۳۱	۳۹۲	۱۶	۵۵	۸	۴۸	۱۸
۱۱	۰.۰۰۳	۱۲.۲۴	۱۱۸	۷۰	۹۳۷	۳۱	۸۷	۱۵	۸۹	۷۱
۱۲	۰.۰۰۳	۱۶.۵۲	۶۸	۸۹	۳۶۹	۲۱	۵۸	۱۸	۶۳	۲۷
۱۳	۰.۰۰۷	۱۳.۳۴	۶۷	۱۰۴	۲۷۶	۱۱	۳۶	۱۸	۴۴	۱۹
۱۴	۰.۰۰۲	۱۸.۰۹	۱۰۲	۸۴	۸۵۱	۲۰	۴۸	۱۳	۵۹	۳۹
۱۵	۰.۰۰۴	۱۶.۲۷	۶۱	۸۰	۲۸۹	۱۶	۶۶	۱۴	۵۶	۳۳
۱۶	۰.۰۰۷	۱۵.۵۸	۴۵۴	۶۷	۳۳۵	۲۹	۷۰	۲۱	۵۶	۱۹
۱۷	۰.۲۰۵	۱۳.۱۸	۲۰۸	۹۲	۳۲۱	۲۵	۸۶	۱۴	۶۸	۳۲
۱۸	۰.۰۰۳	۱۴.۸۶	۳۶۲	۵۹	۳۴۴	۲۲	۷۸	۱۶	۶۳	۲۹
۱۹	۰.۳۶۳	۱۵.۵۱	۲۷۰	۱۰۱	۴۵۸	۲۲	۴۹	۷	۴۷	۳۲
۲۰	۰.۰۰۳	۱۵.۷۲	۲۴۱	۶۹	۳۰۷	۲۱	۶۵	۱۲	۵۶	۲۷
۲۱	۰.۰۰۵	۱۳.۵۵	۶۳۸	۸۰	۳۰۶	۲۹	۷۷	۱۷	۶۲	۳۵
۲۲	۰.۱۱۹	۳.۶۸	۲۳۳	۱۰۵	۳۲۴	۲۸	۷۶	۲۸	۵۸	۲۶
۲۳	۰.۰۰۳	۱۴.۳۴	۱۲۱	۱۰۵	۳۸۶	۲۸	۷۶	۲۲	۵۵	۴۱
۲۴	۰.۰۰۳	۱۹.۳۸	۱۳۹	۳۵	۴۹۱	۲۲	۵۹	۱۱	۵۱	۱۲
۲۵	۰.۳۵۸	۱۱.۶۷	۸۶	۷۶	۳۱۱	۱۶	۵۸	۱۲	۵۴	۲۱
۲۶	۰.۰۰۳	۱۵.۳۴	۱۱۰	۱۲۸	۳۸۶	۲۰	۵۷	۱۷	۵۴	۱۶
۲۷	۰.۰۰۸	۱۴.۱	۳۰۵	۸۸	۲۷۱	۲۵	۷۷	۱۷	۶۲	۳۵
۲۸	۰.۰۰۳	۱۷.۴۳	۷۰	۵۹	۶۶۳	۱۷	۲۷	۱۷	۴۹	۳۳
۲۹	۰.۰۰۳	۱۴.۷۴	۲۹۵	۱۳۳	۴۱۵	۳۵	۷۹	۲۴	۵۷	۴۲
۳۰	۰.۰۰۲	۱۴.۵۸	۱۴۶	۱۲۸	۳۰۱	۳۵	۷۷	۱۴	۶۴	۴۰



شکل ۶ الگوی XRD شیل‌های منطقه مورد بررسی که نشان دهنده فازهای اصلی کوارتز، فلدسپار و کانی‌های فرعی ایلیت و کلریت است.



شکل ۷ نمودار تهی شدگی و غنی شدگی اکسید عناصر اصلی (الف) و فرعی (ب) نسبت به شیل میانگین.

نشان‌دهنده قرارگیری آنها در گستره ترکیب شیل‌های پیدا زیستی است (شکل ۹). کانی‌های رسی در این شیل‌ها کنترل کننده ترکیب عناصر اصلی هستند که با افزایش مقدار سیلیس، رقیق شدگی در آنها ایجاد می‌شود.

#### سنگ خاستگاه

بسیاری از پژوهشگران ترکیب شیمیایی سنگ‌های رسوبی سیلیسی آواری را در ارتباط با ناحیه خاستگاه تفسیر کرده‌اند [۱۳-۱۸]. برای تفکیک رسوب‌هایی که خاستگاه اولیه آنها سنگ‌های آذرین مافیک، حد واسط یا فلسیک و یا رسوب‌های دارای کوارتز هستند از نمودار تفکیک‌کننده تابعی مرجع [۱۹] استفاده شد. توابع تفکیکی مورد استفاده در این نمودار به صورت زیر است:

$$\text{func 1} = (-1.773 \times \text{TiO}_2\%) + (0.607 \times \text{Al}_2\text{O}_3\%) + (0.76 \times \text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}\%) + (-1.5 \times \text{MgO}\%) + (0.616 \times \text{CaO}\%) + (0.509 \times \text{Na}_2\text{O}\%) + (-1.22 \times \text{K}_2\text{O}\%) + (-9.09).$$

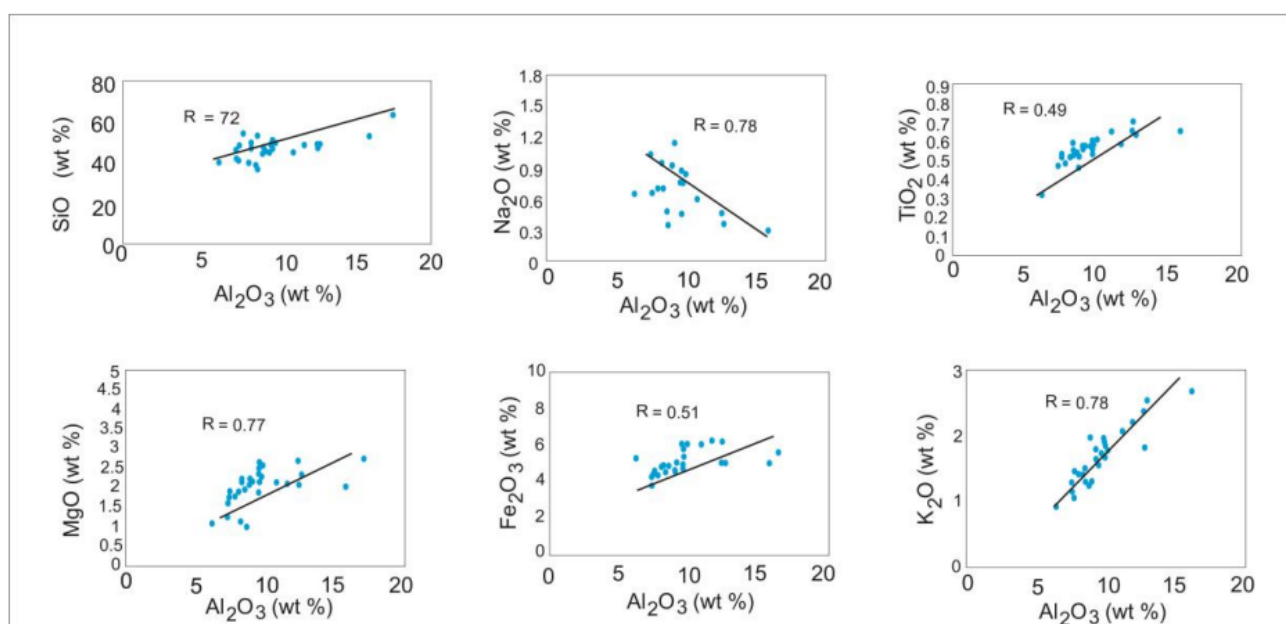
(۱)

پایداری  $\text{Al}_2\text{O}_3$  طی هوازدگی و درونزایی بالاست. بنابراین می‌توان از آن به عنوان عاملی برای مقایسه با اکسید دیگر عناصر اصلی استفاده کرد. تغییرات عناصر اصلی نسبت به  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در نمونه‌های مورد بررسی در شکل ۸ نشان داده شده است.  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{K}_2\text{O}$ ،  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  با  $\text{Al}_2\text{O}_3$  انطباق مثبت و  $\text{Na}_2\text{O}$  با  $\text{Al}_2\text{O}_3$  انطباق منفی نشان می‌دهند. افزایش  $\text{SiO}_2$  با افزایش  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ناشی از وجود کم کوارتز و نبود بلوغ ترکیبی بالاست. حضور  $\text{Na}_2\text{O}$  به علت حضور پلاژیوکلازهای سدیم‌دار در سنگ خاستگاه است [۵، ۶]. پیروی بیشتر اکسیدها از روند  $\text{Al}_2\text{O}_3$  نشان دهنده تمرکز و فراوانی کانی‌های رسی چون ایلیت است که با نتایج XRD نیز تایید شده است. با توجه به ارتباط مستقیم  $\text{TiO}_2$  با  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ، خاستگاه تیتانیوم در نمونه‌ها را می‌توان به حضور کانی‌های رسی یا تجزیه کانی‌های مافیک موجود در سنگ‌های آذرین حدواسط نسبت داد [۱۳، ۶]. همبستگی مثبت بین  $\text{TiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  نشان از همراهی  $\text{TiO}_2$  با فیلوسیلیکات‌هایی چون ایلیت دارد. نمودار  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  نسبت به  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  برای شیل‌های منطقه،

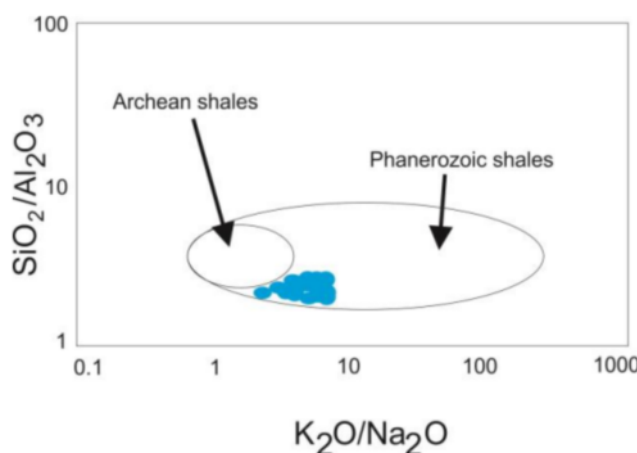
[۲۰] نشان دهنده ترکیب گرانودیوریتی و کمتر بازالتی است (شکل ۱۰ ب). همچنین نمودار سه تایی  $Al_2O_3$ -( $CaO+Na_2O+K_2O$ )-(FeO+MgO) نمونه‌ها در نزدیکی کانی رسی ایلیت و اسمکتیت را نشان می‌دهد (شکل ۱۰ پ). از این رو، به طور کلی یک سنگ خاستگاه آذرین حد واسط برای شیل‌های منطقه پیشنهاد می‌شود [۴]. در نمودار سه تایی  $(K_2O+Na_2O)$ -(MgO+TiO<sub>2</sub>+FeO)-(SiO<sub>2</sub>/20) (SiO<sub>2</sub>/20)، نمونه‌های شیلی با یک روند خطی از آندزیت تا داسیت قرار دارند که بیانگر یک سنگ خاستگاه حدواسط و تا حدی بازیک است (شکل ۱۰ ت).

$$\text{func} = (0.445 \times TiO_2\%) + (0.07 \times Al_2O_3\%) + (-0.25 \times Fe_2O_3T\%) + (-1.142 \times MgO\%) + (0.432 \times Na_2O\%) + (1.426 \times K_2O\%) + (-6.861). \quad (2)$$

با رسم داده اکسیدهای نمونه‌های مورد بررسی، بیشتر نمونه‌ها در گستره آذرین حدواسط و تا حدی فلسیک قرار می‌گیرند (شکل ۱۰ الف). از سوی دیگر، از آنجا که دو عنصر آلومینیوم و تیتانیوم نسبت به دیگر عناصر نامتحرک‌تر هستند، بنابراین از نمودار دو متغیره  $TiO_2$ - $Al_2O_3$  برای تعیین میزان مشارکت دو خاستگاه تشکیل گرانیت یا بازالت استفاده می‌شود. نمودار  $Al_2O_3$  نسبت به  $TiO_2$  برای تعیین ترکیب سنگ خاستگاه

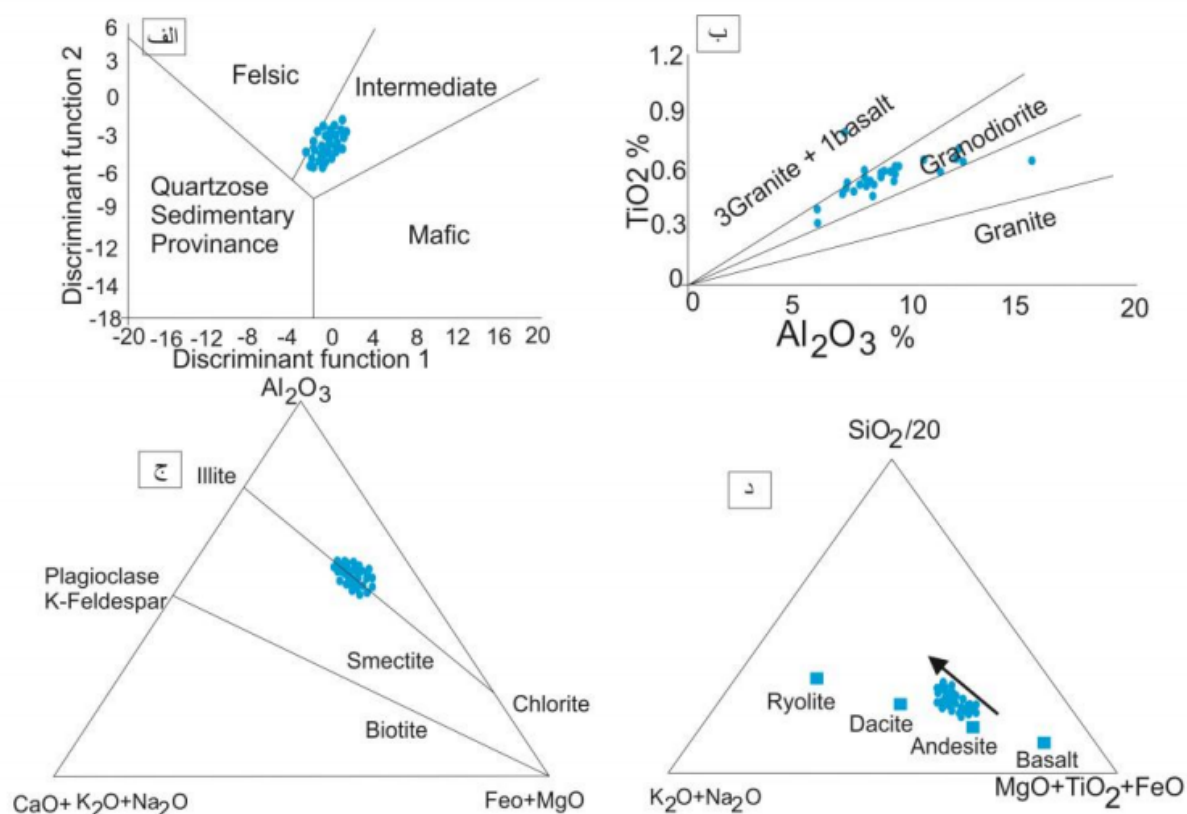


شکل ۸ نمودارهای پراکندگی تغییرات اکسیدهای اصلی نسبت به  $Al_2O_3$  در شیل‌های منطقه.



شکل ۹ نمودار  $K_2O/Na_2O$  نسبت به  $SiO_2/Al_2O_3$  برای شیل‌های منطقه [۱۴].





شکل ۱۰ الف) نمودار تابعی مشخص کننده برخاستگاه شیل با استفاده از اکسیدهای عناصر اصلی [۱۹]. ب) نمودار  $TiO_2$  نسبت به  $Al_2O_3$  [۱۹]. پ) نمودار سه تایی  $(FeO+MgO)$ ,  $(CaO+Na_2O+K_2O)$ ,  $Al_2O_3$  [۲۰]. ت) نمودار سه تایی  $(SiO_2/20)$ ,  $(K_2O+Na_2O)$ ,  $(MgO+TiO_2+FeO)$  [۲۰].

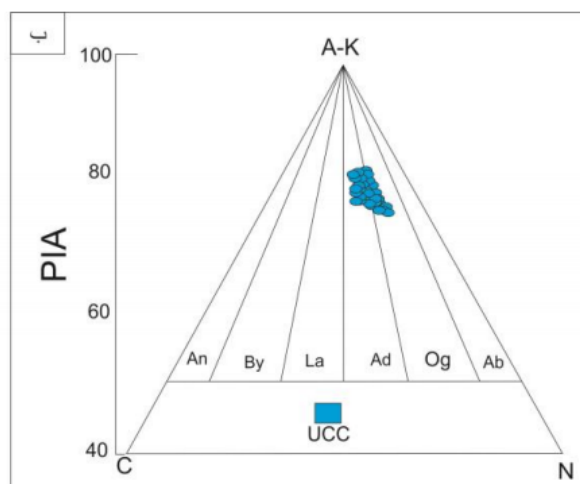
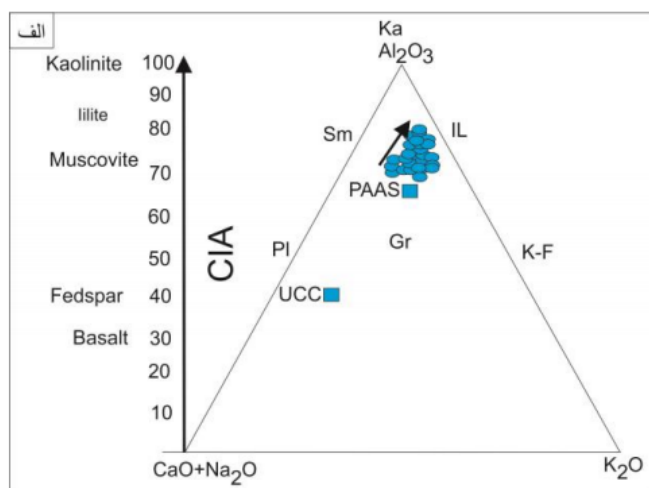
#### هوازگی ناحیه خاستگاه

یکی از روش‌های تعیین درجه شیمیایی در سنگ‌های ناحیه خاستگاه استفاده از شاخص هوازگی شیمیایی (CIA) است [۲۲، ۲۱]. مقدار CIA در شیل‌های مورد بررسی پراکندگی چندانی نشان نمی‌دهد و دارای میانگین ۷۱/۵ درصد است. این شاخص بازتابی از حذف نشدن کاتیون‌های ناپایدار (مانند پتاسیم، سدیم و کلسیم) نسبت به اجزای پایدار (مانند تیتانیوم و آلومینیم) [۲۴، ۲۳] و نشان‌دهنده هوازگی شیمیایی ضعیف تا متوسط در ناحیه خاستگاه است. مقادیر به دست آمده نیز با مشاهدات سنگ نگاری ماسه سنگ‌های منطقه که بلوغ ترکیبی بالایی ندارند و شامل کوارتزهای بسبلور با پلاژیوکلاز و فلدسپار پتاسیم هستند همخوانی دارد. روند هوازگی نمونه‌های مورد بررسی بر نمودار سه تایی C-N-K [۲۵] با یک روند خطی از A-CN به سوی ایلیت گسترش یافته است (شکل ۱۱ الف). طی مراحل اولیه هوازگی به خاطر تجزیه پلاژیوکلاز و حذف

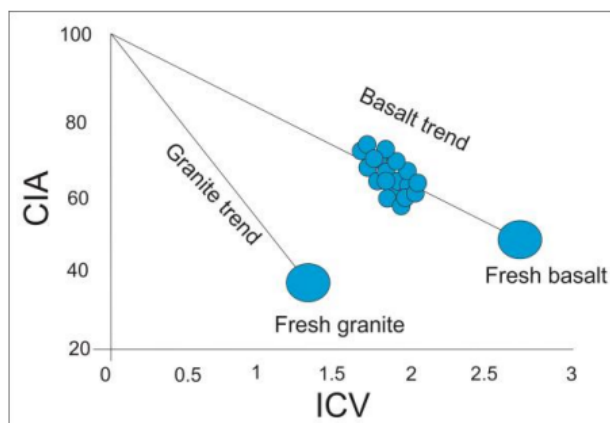
عناصر سدیم و پتاسیم، راستا موازی خط A-CN است [۲۵]. با ادامه هوازگی، فلدسپات پتاسیم تجزیه شده و پتاسیم آزاد می‌گردد و ترکیب باقی مانده به سمت  $Al_2O_3$  کشیده می‌شود. در هر حال، همه نمونه‌های مورد بررسی در نزدیکی خط  $Al_2O_3-K_2O$  و به سمت  $Al_2O_3$  قرار دارند که بیانگر شرایط هوازگی متوسط در ناحیه خاستگاه است. نسبت  $Al_2O_3/TiO_2$  کمتر از ۲۰ برای شرایط آب و هوایی خشک و نیمه خشک و بیشتر از ۳۰ برای شرایط آب و هوایی مرطوب به عنوان یک شاخص آب و هوایی برای ناحیه خاستگاه در نظر گرفته می‌شود [۲۶]. میانگین این نسبت برای شیل‌های منطقه ۱۰/۷۸ بوده که بیانگر شرایط آب و هوایی خشک و نیمه خشک برای ناحیه خاستگاه است. بنابراین شرایط هوازگی بازتاب دهنده پایداری یا ناپایداری زمین‌ساختی حوضه و شرایط رطوبت نسبی اقلیمی است [۲۶]. تعیین درجه دگرسانی پلاژیوکلازها در ناحیه خاستگاه توسط شاخص دگرسانی

با درصد بالای کانی‌های سیلیکاتی و بدون کانی‌های رسی است؛ در حالی که برای سنگ‌های رسی بالغ با کانی رسی فراوان، این شاخص کمتر از ۱ است [۲۹]. میانگین ICV به دست آمده برای شیل‌ها ۲/۱ است که نشان‌دهنده سنگ‌های رسی نابالغ و دارای کانی‌های رسی به احتمال بسیار از نوع ایلیت و کلریت است که پراش پرتوی ایکس نیز آن را تأیید کرده است. میانگین این شاخص برای گرانیت و بازالت‌های کاملاً تازه به ترتیب برابر با ۰/۹۵ تا ۲/۲ است [۳۰]. نمودار ICV نسبت به CIA نشان می‌دهد که شیل‌های با این درجه از هوازدگی از سنگ‌های آذرین فلسیک تا حد واسط تشکیل شده‌اند (شکل ۱۲).

پلاژیوکلاز (PIA) به دست می‌آید. شیل منطقه دارای PIA با میانگین ۷۳/۸ هستند. از این رو، تقریباً پلاژیوکلازهای سنگ خاستگاه طی فرآیند هوازدگی و انتقال از بین نرفته‌اند [۲۷]. در نمودار A-K-C-N [۲۸] بیشتر نمونه‌ها در گستره وسط و تا حدی سمت راست قرار دارند. در شکل ۱۱ ب، وجود پلاژیوکلازهای لابرادوریت، آندزین و الیگوکلاز نشان می‌دهد که آنها در نتیجه هوازدگی به ایلیت تبدیل شده‌اند. شاخص تنوع ترکیبی  $ICV = Fe_2O_3(t) + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + TiO_2/Al_2O_3$  نیز برای تعیین هوازدگی در ناحیه خاستگاه استفاده می‌شود. مقدار این شاخص با افزایش میزان هوازدگی کاهش می‌یابد. شاخص بیش از ۱ بیانگر شیل‌های نابالغ همراه



شکل ۱۱ نمودارهای مثلی هوازدگی برای شیل‌ها. الف) نمودار سه تایی A-K-N (Ka: کائولینیت، Sm: اسمکتیت، IL: ایلیت، Gr: گرانیت، Pl: پلاژیوکلاز، K-F: فلدسپار پتاسیم) [۲۴]. ب) نمودار سه تایی AK-C-N (A-K=  $Al_2O_3 - K_2O$ ; C= CaO; N=Na<sub>2</sub>O) (La: لابرادوریت، By: بایتونیت، An: آنورتیت، Ab: آلبیت، Og: الیگوکلاز، Ad: آندزین).

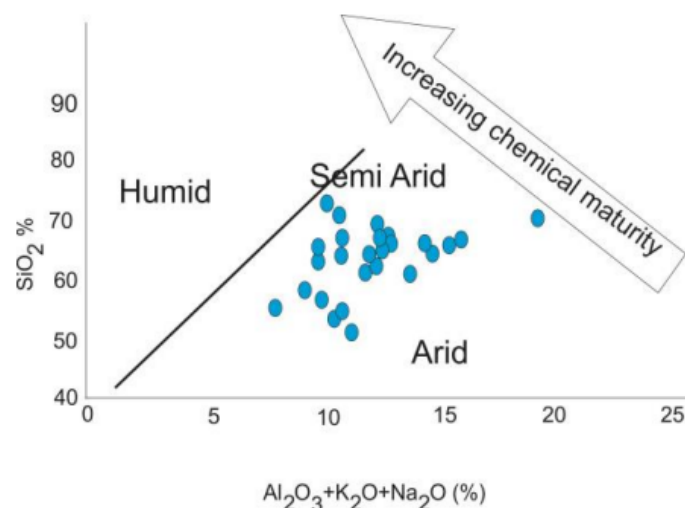


شکل ۱۲ نمودار CIA نسبت به ICV برای شیل‌های منطقه [۲۹].

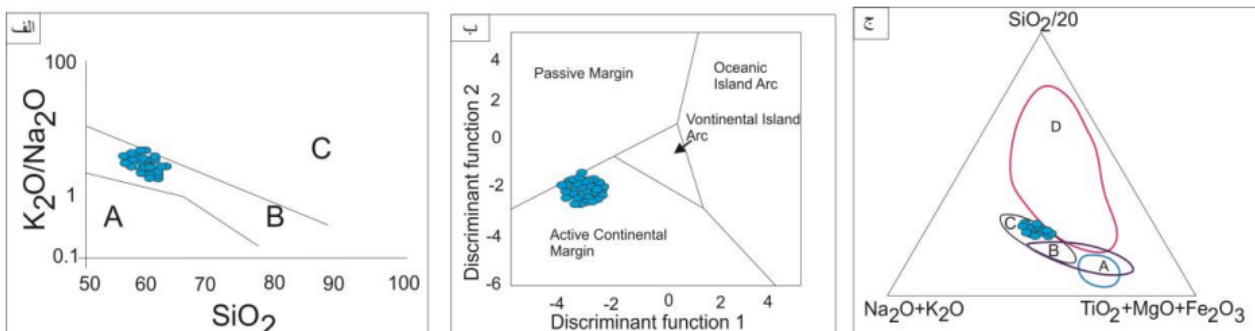
## زمین ساخت

به تازگی پژوهش‌های بسیاری برای برقراری ارتباط میان ترکیب سنگ‌های سیلیسی آواری ایران و وضعیت زمین‌ساختی ناحیه خاستگاه انجام شده است [۴، ۵، ۱۳، ۱۴، ۳۳، ۳۴]. استفاده از داده‌های سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی نشان می‌دهد که هر جایگاه زمین‌ساختی، ترکیب کانی‌شناسی و شیمیایی متفاوتی دارد [۳۵]. نمودار  $K_2O/Na_2O$  نسبت به  $SiO_2$  [۱۹] کاهش روند کانی‌های رسی همراه با افزایش سیلیس در ارتباط با جایگاه زمین‌ساختی کرانه فعال و مقدار بسیار جزئی غیرفعال را نشان می‌دهد (شکل ۱۴ الف). با توجه به نمودار تابعی ارائه شده در مرجع [۳۶]، شیل‌ها در جایگاه فعال زمین‌ساختی قرار دارند (شکل ۱۴ ب). توابع تفکیک مورد استفاده در این نمودار به صورت زیر به دست می‌آید [۴]:

شیل‌های منطقه براساس مقادیر محاسبه شده شاخص هوازدگی از هوازدگی ضعیف تا متوسط در نواحی خاستگاه، برآمده‌اند. باید توجه داشت که مقادیر کمتر شاخص هوازدگی شیمیایی محاسبه شده برای شیل‌ها نسبت به مقادیر ارائه شده در مرجع [۲۲] نشان می‌دهد که به احتمال بسیار منطقه دستخوش هوازدگی شدیدتری نشده و افزون بر این، فلدسپات-ها هم در ناحیه خاستگاه و هم طی ترابری به کانی‌های رسی تبدیل نشده‌اند. نمودار  $SiO_2$  نسبت به  $Al_2O_3+K_2O+Na_2O$  [۳۱] برای این شیل‌ها نشان‌دهنده شرایط آب و هوایی خشک تا نیمه خشک در زمان نهشته شدن آنهاست (شکل ۱۳). بر اساس نقشه‌های جغرافیای دیرینه، ایران در زمان ائوسن در عرض جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی قرار داشته است [۳۲] که تایید کننده نتایج بالاست.



شکل ۱۳ شرایط آب و هوایی در زمان نهشته شدن شیل‌های منطقه مورد بررسی (برگرفته از مرجع [۳۰]).



شکل ۱۴ نمودارهای مشخص کننده جایگاه زمین ساختی شیل‌ها. الف) نمودار  $SiO_2$  نسبت به  $K_2O/Na_2O$  [۱۸]، A: کرانه جزایر اقیانوسی، B: کرانه فعال قاره‌ای، C: کرانه غیر فعال قاره‌ای. ب) نمودار تابعی با استفاده از اکسیدهای عناصر اصلی [۳۵]، پ) نمودار سه تایی  $(SiO_2/20)$ ،  $(Na_2O+K_2O)$ ،  $(TiO_2+MgO+Fe_2O_3)$  [۳۶]، A: جزایر کمان اقیانوسی، B: جزایر کمان قاره‌ای، C: کرانه فعال قاره‌ای، D: کرانه غیر فعال قاره‌ای.

شکل ۱۶، تغییرات قابل توجه در سترای منطقه در بخش‌های مختلف به دلیل فعالیت‌های زمین‌ساختی همزمان با رسوبگذاری است و فرونشست حوضه توسط گسل‌هایی عادی با راستای شمال غربی- جنوب شرقی کنترل می‌شود. الگوی ساختاری حوضه فلیشی شرق ایران، از نظر جایگیری میان دو ورق قاره‌ای لوت و هیلمند، و به ویژه چیرگی زمین‌ساخت برخوردی، بسیار پیچیده و نشانگر یک کوهزایی درون قاره‌ای است. با این حال، به نظر می‌رسد که در این ناحیه، راندگی‌ها نقش اساسی دارند، به طوری که چین‌خوردگی سنگ‌ها پیامد عملکرد راندگی‌هاست [۵، ۶]. در بخش میانی حوضه، گسل‌های راستا لغز راستگرد روند تقریبی شمالی - جنوبی و به سمت شرق شیب بسیاری دارند، ولی در پایانه‌های شمالی و جنوبی به دلیل چرخش‌های راستگرد قطعه لوت و بلوک هیلمند، ضمن تغییر در روند ساختارها، سرشت گسل‌ها به طور عمده از نوع راندگی‌های همپوشان است. گفتنی است که اگرچه در بخش عمده‌ای از ایران، حرکت رو به شمال و شمال شرقی ورق عربستان - آفریقا دخالت دارد، ولی در حوضه فلیشی شرق ایران، حرکت رو به شمال و شمال غربی ورق هندوستان و پیامدهای ناشی از آن مؤثر است. به بیان دیگر، بیشتر ساختارهای این ناحیه را باید در شکل‌گیری اقیانوس هند جستجو کرد. شاخص هوازدهی شیمیایی، CIA، که بیانگر هوازدهی ضعیف تا متوسط در ناحیه خاستگاه است گویای جایگاه زمین‌ساختی فعال است. چنان که در مورد هوازدهی سنگ خاستگاه اشاره شد، براساس مقادیر بالای شاخص تنوع ترکیبی، ICV، که اشاره به بلوغ پایین رسوب‌ها دارد، می‌توان پیشنهاد کرد که رسوب گذاری این منطقه در محیطی فعال بوده است. نمودارهای تفکیکی برای رسوب‌های منطقه نشان می‌دهد که این رسوب‌ها از سنگ‌های کهنتر که طی کوهزایی بالا آمده‌اند و همچنین سنگ‌های آذرین حد واسطه شکل گرفته‌اند. این امر با نتایج سنگ‌نگاری ماسه سنگی بر پایه نمودارهای سه تایی که کرانه فعال قاره‌ای را نشان می‌دهند همخوانی دارند.

$$\text{func 1} = (-0.0447 \times \text{SiO}_2\%) + (-0.972 \times \text{TiO}_2\%) + (0.008 \times \text{Al}_2\text{O}_3\%) + (-0.267 \times \text{Fe}_2\text{O}_3\%) + (0.208 \times \text{FeO}\%) + (-3.082 \times \text{MnO}\%) + (0.140 \times \text{MgO}\%) + (0.195 \times \text{CaO}\%) + (0.719 \times \text{Na}_2\text{O}\%) + (-0.032 \times \text{K}_2\text{O}\%) + (7.510 \times \text{P}_2\text{O}_5\%). \quad (۳)$$

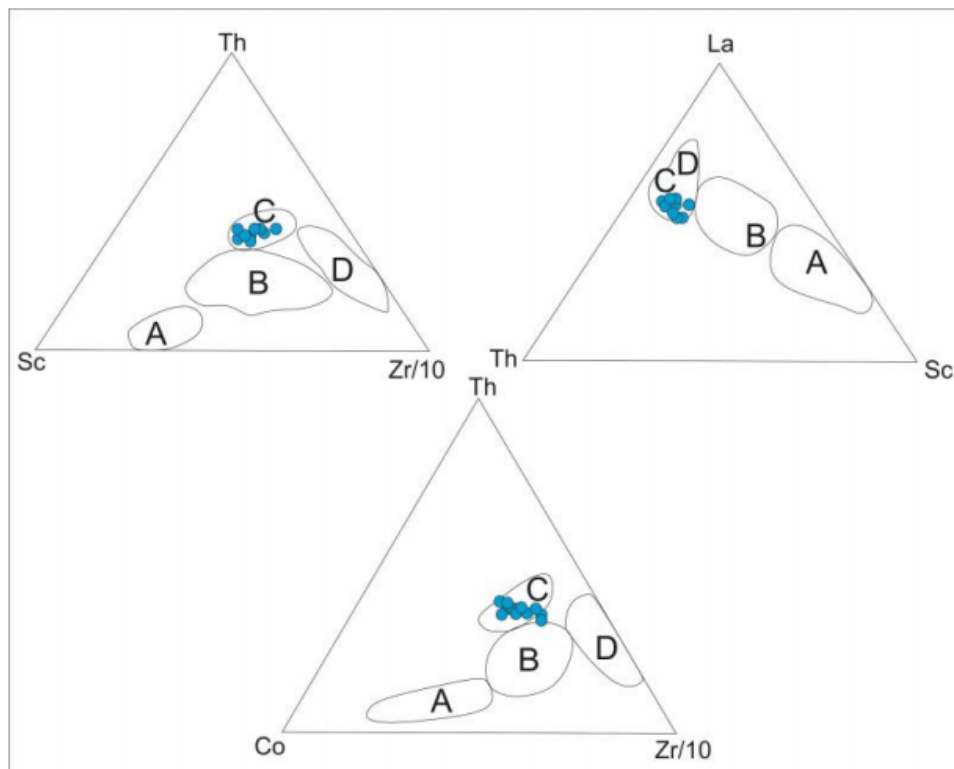
$$\text{func 2} = (-0.421 \times \text{SiO}_2\%) + (1.988 \times \text{TiO}_2\%) + (-0.526 \times \text{Al}_2\text{O}_3\%) + (-0.551 \times \text{Fe}_2\text{O}_3\%) + (-1.610 \times \text{FeO}\%) + (2.720 \times \text{MnO}\%) + (0.881 \times \text{MgO}\%) + (-0.907 \times \text{CaO}\%) + (-0.117 \times \text{Na}_2\text{O}\%) + (-1.840 \times \text{K}_2\text{O}\%) + (7.244 \times \text{P}_2\text{O}_5\%). \quad (۴)$$

با قرار دادن داده‌های زمین شیمی عناصر اصلی بر نمودار سه‌تایی  $\text{SiO}_2/20$ ,  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2+\text{MgO}+\text{Fe}_2\text{O}$  [۳۷]، شیل‌ها در گستره قاره‌ای فعال قرار می‌گیرند (شکل ۱۴ پ). بنابراین بررسی شیل‌ها نشان دهنده ترابرد اجزای تشکیل دهنده آنها تا محل ته نشست پایانی و همچنین هوازدهی شدید در شرایط به نسبت پایدار زمین‌ساختی در ناحیه خاستگاه است که اجزای ناپایدار با طی مسافت طولانی و هوازدهی شدید از بین رفته‌اند. نمودارهای سه تایی  $\text{La/Th/Sc}$  و  $\text{Th/Sc/Zr/10}$  و  $\text{Th/Co/Zr/10}$  جایگاه زمین‌ساختی کرانه قاره‌ای فعال را برای نمونه‌ها نشان می‌دهد (شکل ۱۵). به طور کلی از بررسی نمودارهایی که برای بررسی جایگاه زمین‌ساختی شیل‌های منطقه استفاده شده است می‌توان به فعال بودن جایگاه زمین‌ساختی پی برد که نمونه‌ها در گستره‌ی کرانه قاره‌ای فعال قرار می‌گیرند.

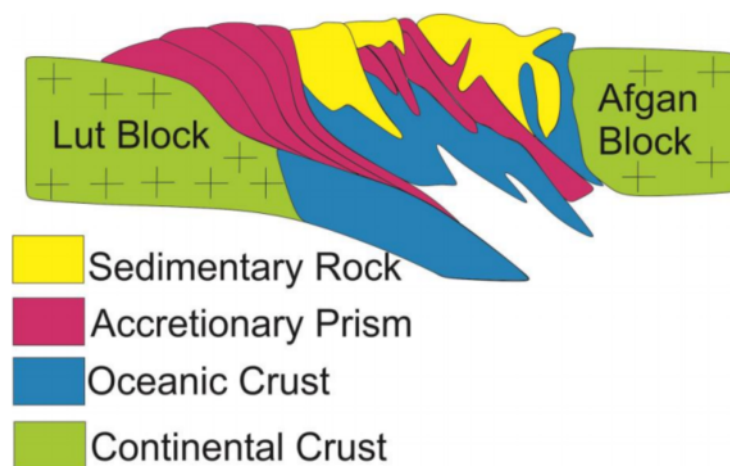
### جغرافیای دیرینه

بسته شدن اقیانوس پالئوتتیس در شمال ایران به دلیل حرکت‌های کوهزایی سیمیرین پیشین را می‌توان به عنوان یک گام ساختاری مهم به شمار آورد که این خط درز در میان البرز، کپه داغ و کوه‌های بینالود قرار دارد [۳۹، ۳۸]. افزون بر این، رویداد کوهزایی سیمیرین میانی که تقریباً در مرز بازوسین است، سبب چین‌شناسی، فعالیت ماگمایی و دگرگونی نسبی در بخش‌های مختلف ایران شده است. بخش گسترده‌ای از ایران که شامل خردقاره ایران مرکزی و شرقی، شمال غرب ایران و کوه‌های البرز است، صفحه ایران را تشکیل می‌دهد. در





شکل ۱۵ تعیین جایگاه زمین‌ساختی شیل‌های سازند شیل‌های کوه کمر با استفاده از نمودارهای مثلثی Th, Sc, Zr, Co, La و A: جزایر کمانی اقیانوسی، B: جزایر کمان قاره‌ای، C: کرانه فعال قاره‌ای، D: کرانه غیر فعال قاره‌ای [۴۰].



شکل ۱۶ تکامل ساختاری قطعه شرق ایران در زمان ائوسن [۱۰].

## برداشت

غنی از کوارتز، آلپیت، کلسیت و به مقدار کمی کانی رسی (ایلپیت و کلریت) هستند. همچنین تصاویر SEM نشان دهنده کانی‌های رسی ایلپیت و کلریت در این شیل‌هاست. شیل‌های منطقه نسبت به UCC تهی‌شدگی در Nb, Cu, MgO, CaO, Sr و Na<sub>2</sub>O و غنی‌شدگی در Y, V, CO, Ni و U را نشان

در این پژوهش، شیل‌های کوه کمر در برش روم برای تفسیر خاستگاه، تجزیه زمین‌شیمی عناصر اصلی و فرعی شدند. نتایج سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که ماسه سنگ‌های این منطقه در دو گروه نیمه آرکوز و آرکوز قرار دارند. از نظر سنگ‌نگاری، شیل‌ها

Journal of African Earth Sciences, 10.1016/j.jafrearsci.2018.07.014.

[7] Cullers R.L., "The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, U.S.A implications for provenance and metamorphic studies", Lithos 51 (2000) 305-327.

[8] Hessler A.M., Lower D.M., "Wethering and sediment generation in the Archean: An integrated study of the evolution of siliciclastic sedimentary rocks of the 3.2 Ga Moodies Group, Barberton Greenstone Belt, south Africa", Precambrian Research 151 (2000) 185-210.

[9] DaPeng L., YueLong C., Zhong W., Yu L., Jian Z., "Paleozoic sedimentary record of the Xing-Meng Orogenic Belt, Inner Mongolia: implications for the provenances and tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt", Chinese Science Bulletin 57 (2012) 776-785.

[11] Shahidi A., Baharfirooz A., "Geological Map of Iran. 1:100,000 Roum", Geological Survey of Iran (1991).

[12] Folk R.L., "Petrology of Sedimentary Rocks", Hamphill, Austin, Texas (1980) 182 p.

[13] Moosavirad A.M., Janardhana M.R., Sethumadhav M.S., Moghadam M.R., Shankara M., "Geochemistry of lower Jurassic shales of the Shemshak Formation, Kerman Province, Central Iran: Provenance, source weathering and tectonic setting", Chemie der Erde Geochemistry 71 (2011) 279-288.

[14] Salehi M.A., Moussavi-Harami R., Mahboubi A., Wilmsen M., Heubeck Ch., "Tectonic and palaeogeographic implications of compositional variations within the siliciclastic Ab-Haji Formation (Lower Jurassic, east central Iran)", Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie – Abhandlungen 271 (2014) 21-48.

[15] Wronkiewicz D.J., Condie K.C., "Geochemistry and provenance of sediments from the Pongola Supergroup, South Africa: evidence for a 3.0-Ga-old continental craton", Geochimica et Cosmochimica Acta 53 (1989) 1537-1549

[16] Kalsbeek F., Frei R., "Geochemistry of Precambrian sedimentary rocks used to solve stratigraphical problems: an example from the Neoproterozoic Volta basin, Ghana", Precambrian Research 176 (2010) 66-75.

می‌دهند. این بررسی نشان می‌دهد که سنگ‌های خاستگاه از انواع سنگ آذرین حدواسط هستند. شرایط آب و هوایی و هوازدگی در ناحیه خاستگاه نشان از هوازدگی متوسط تا ضعیف و مربوط به آب و هوای خشک و نیمه خشک و قرار داشتن ایران در زمان ائوسن در عرض جغرافیایی تقریباً ۳۰ درجه شمالی دارد که این جایگاه نتایج بالا را تأیید می‌کند. همچنین در بررسی جایگاه زمین‌ساختی، بیشتر نمونه‌ها در جایگاه کرانه قاره‌ای فعال قرار دارند.

### مراجع

[1] Mondal M.E.A., Wani H., Mondal B., "Geochemical signature of provenance, tectonics and chemical weathering in the Quaternary flood plain sediments of the Hindon River, Gangetic plain, India", Tectonophysics 566 (2012) 87-94.

[2] Armas P., Moreno C., Sánchez M.L., González F., "Sedimentary palaeoenvironment, petrography, provenance and diagenetic inference of the Anacleto Formation in the Neuquén Basin, Late Cretaceous, Argentina", Journal of South American Earth Sciences 53 (2014) 59-76.

[3] Mahavaraju J., "Geochemistry of Late Cretaceous sedimentary rocks of the Cauvery Basin, South India: Constraints on paleo weathering, provenance, and end Cretaceous environments", Chemostratigraphy 8 (2015) 185-214.

[4] Khanehbad M., Moussavi-Harami R., Mahboubi A., Nadjafi A., "Geochemistry of Carboniferous Shales of the Sardar Formation, East Central Iran: Implication for Provenance, Paleoclimate and Paleo\_oxygenation Conditions at a Passive Continental Margin", Geochemistry International 50 (2012) 777-790.

[5] Zand-Moghadam H., Moussavi-Harami R., Mahboubi A., Bavi H., "Comparison of tidalites in siliciclastic, carbonate, and mixed siliciclastic-carbonate System: examples from Cambrian and Devonian deposits of East-Central Iran", ISRN Geology (2013) 1-21.

[6] Oghenekome M.E., Tapas K., Chatterjee T.K., Van Bever Donker J.M., Napoleon N., Hammond Q., "Geochemistry and weathering history of the Balfour sandstone formation, Karoo basin, South Africa: Insight to provenance and tectonic setting",

- to Neoproterozoic Vindhyan Supergroup: Implications on provenance, tectonics and paleoweathering", *Journal of Asian Earth Sciences* 32 (2008) 34–48.
- [26] Akulshina E.P., "Evolution of physicochemical condition of sedimentation in the Riphean and Phanerozoic (with Siberia as example), *Sreda I Zhizn v Geologicheskoy Proshlom (Environment and life in Geological Past)*", Novosibirsk: Nauka (1990) 17–26.
- [27] Alvarez N.M., Roser B.P., "Geochemistry of black shales from the Lower Cretaceous Paja Formation, Eastern Cordillera, Colombia: Source weathering, provenance, and tectonic setting", *Journal of South American Earth Sciences* 23 (2007) 271–289.
- [28] Fedo C.M., Young G.M., Nest H.W., Hanchar J.M., "Potassic and sodic metasomatism in the Southern Province of the Canadian Shield: evidence from the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup Canada", *Precambrian Research* 84 (1997) 17–36.
- [29] Cox R., Lower D.R., Cullers R.L., "The influence of sediment recycling and Basement composition of Evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59 (1995) 2919–2940.
- [30] Lee Y.L., "Provenance Derived from the Geochemistry of Late Paleozoic–Early Mesozoic Mudrocks of the Pyeongan Supergroup, Korea", *Sediment. Geol.* 149 (2002) 219–235.
- [31] Suttner L.J., Dutta P.K., "Alluvial sandstone composition and palaeoclimate: framework mineralogy", *Journal of Sedimentary Petrology*, 56 (1985) 329–345.
- [32] Habicht J.K.A., "Paleoclimate, Paleomagnetism, and Continental Drift", *American Association of Petroleum Geologists*, 9 (1979) 1–18.
- [33] Nowrouzi N., Moussavi-Harami R., Mahboubi A., Mahmudy Gharaie M.H., Ghaemi F., "Petrography and geochemistry of Silurian Niur sandstones, Derenjil Mountains, East Central Iran: implications for tectonic setting, provenance and weathering", *Arabian Journal of Geosciences* 7 (2013) 2793–2813.
- [34] Jafarzadeh M., Moussavi-Harami R., Amini A., Mahboubi A., Farzaneh F., "Geochemical
- [17] Mishra M., Sen S., "Geological signatures of Mesoproterozoic siliciclastic rocks of the Kaimur Group of the Vindhyan Supergroup, Central India. Chin", *Journal Geochemical* 20 (2010) 21–32.
- [18] Quasim M.A., Nath hota R., Ahmad A.H.M., Albaroot M., "An approach to provenance and tectonic setting of the Proterozoic Upper Kaimur Group sandstones, Son Valley: constraints from framework mineralogy and heavy mineral analysis", *Himalayan Geology*, 3 (2018), 145 – 160.
- [19] Roser B.P., Korsch R.J., "Provenance signatures of sandstone–mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data", *Chemical Geology* 67 (1988) 119–139.
- [20] Schieber J., "A combined petrographical-geochemical provenance study of the Newland formation, Mid- Proterozoic of Montana", *Geological Magazine* 129 (1992) 223–237.
- [21] Hayashi K., Fujisawa H., Holland H.D., Ohmoto H., "Geochemistry of 1.9 sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61 (1997) 4115–4137.
- [22] Nesbitt H.W., Young G.M., "Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites", *Nature* 299 (1982) 715–717.
- [23] Araujo C.E.G., Pineo T.R.G., Caby R., Costa, F.G.J.C., Vasconcelos, A.M., Rodrigues J.B., "Provenance of the Novo Oriente Group, Southwestern Ceara Central Boiron, Borborema province (NE Brazil): A dismembered segment of a magma-poor passive margin or a restricted rift-related basin?", *Gondwana Research* 18 (2010) 497–513.
- [24] Velmurugan K., Madhavaraju J., Balaram V., Ramachandran A., Ramasamy S., Ramirez-Montoya E., Saucedo-Samaniego J.C., "Provenance and Tectonic Setting of the Proterozoic Clastic Rocks of the Kerur Formation, Badami Group, Mohare Area, Karnataka, India", *Geological Evolution of the Precambrian Indian Shield*, Society of Earth Scientists Series, 2019, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-89698-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-89698-4_11).
- [25] Paikaray S., Banerjee S., Mukherji S., "Geochemistry of shales from the Paleoproterozoic

- [38] Aghaei A., Mahboubi A., Moussavi-Harami R., Heubeck C., Nadjafi A., "*Facies analysis and sequence stratigraphy of an Upper Jurassic carbonate ramp in the Eastern Alborz range and Binalud Mountains, NE Iran*", *Facies* 59 (2012) 863- 889.
- [39] Parent H., Raoufian A., Seyed-Emami K., Ashouri A.R., Majidifard M.R., "*The Bajocian-Kimmeridgian Ammonite Fauna of the Dalichai Formation in the SE Binalud Mountains, Iran*", *Informes del Insitituto de Fisiografiay Geología* (2014) 1-60.
- [40] Bhatia M.R., Crook K.A., "*Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins*", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 92 (1986) 181–193.
- constraints on the provenance of Oligocene-Miocene siliciclast deposits (Zivah Formation) of NW Iran: implications for the tectonic evolution of the Caucasus*", *Arabian Journal of Geosciences* 7 (2014) 4245- 2463.
- [35] Zaid S.M., Gahtani F.A., "*Provenance, diagenesis, tectonic setting, and geochemistry of Hawkesbury Sandstone (Middle Triassic), southern Sydney Basin, Australia*", *Journal of Earth Sciences* 24 (2015) 72-98.
- [36] Bhatia M.R., "*Plate tectonics and geochemical composition of sandstones*", *Geology* 91 (1983) 611–626.
- [37] Kroonenberg S.B., "*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* (1994) 69-81.