

## برخاستگاه سازند سیلیسی-آواری پسته‌لیق (پالئوسن زیرین) در برش چهلچله شمال شرق ایران

امین سعیدی<sup>۱</sup>، اسداله محبوبی<sup>۲\*</sup>، سیدرضا موسوی حرمی<sup>۳</sup> و محمدحسین محمودی قرائی<sup>۴</sup>

۱، ۲، ۳ و ۴- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد

نویسنده مسئول: \*mahboubi@um.ac.ir

دریافت: ۹۶/۷/۱۹ پذیرش: ۹۶/۱۰/۱۳

## چکیده

سازند پسته‌لیق (پالئوسن زیرین) در برش چهلچله از ۹۴/۵ متر ماسه‌سنگ، شیل و واحدهای تبخیری تشکیل شده است. شیل‌های این سازند به منظور تفسیر برخاستگاه مورد مطالعه قرار گرفتند. این شیل‌ها نسبت به پوسته‌ی قاره‌ای فوقانی (UCC) از نظر اکسیدهای اصلی  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  و عناصر فرعی Sr, Ba, Nb, Ce تهی‌شدگی و از نظر U و CaO غنی‌شدگی را نشان می‌دهند. با رسم نمودار دوتایی  $\text{TiO}_2$  در مقابل  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و نمودار دوتایی Zr در مقابل  $\text{Al}_2\text{O}_3$  از نظر سنگ‌منشا، آذرین حد واسط برای شیل‌های پسته‌لیق پیشنهاد می‌شود. برای تعیین موقعیت تکتونیکی از نمودارهای  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  در مقابل  $\text{SiO}_2$  و هم‌چنین نمودارهای سه‌تایی  $\text{Th}/\text{Sc}/\text{Zr}$ ,  $\text{La}/\text{Th}/\text{Sc}$ ,  $\text{Th}/\text{Co}/\text{Zr}$  استفاده شد که نشان‌دهنده‌ی موقعیت تکتونیکی جزایر کمان قاره‌ای است. اندیس CIA محاسبه شده برای این شیل‌ها بیانگر شدت هوازدگی ضعیف تا متوسط و شرایط آب و هوایی خشک تا نیمه‌خشک بوده است. شاخص‌های U/Th, Ni/Co نیز حاکم بودن شرایط اکسیدی در محیط رسوب‌گذاری را نشان می‌دهند. آغاز پالئوسن در بسیاری از نقاط دنیا از جمله کپه‌داغ با شروع حرکات تکتونیکی و پسروری دریا همراه بوده که درحوزه‌ی کپه‌داغ منجر به تن‌نشینی رسوبات سیلیسی آواری پسته‌لیق شده است به گونه‌ای که ضخامت این سازند با پسروری دریا از سمت جنوب شرق به شمال غرب کاهش پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: سازند پسته‌لیق، ژئوشیمی، سنگ‌منشا، موقعیت تکتونیکی، هوازدگی دیرینه

## مقدمه

استفاده قرار می‌گیرند (سمنپانیا و همکاران، ۲۰۱۴؛ تائو و همکاران، ۲۰۱۶؛ سرباز و همکاران، ۱۳۹۶) از رفتار ژئوشیمیایی عناصر فرعی حساس به اکسایش-احیا نیز برای پی بردن به شرایط محیطی حاکم بر حوضه استفاده می‌شود (آلژئیو و مینارد، ۲۰۰۴). شیل‌ها یکی از واحدهای سنگی هستند که نزدیک‌ترین ارتباط را با ناحیه‌ی منشا نشان می‌دهند و مطالعات ژئوشیمی آن‌ها به دلیل هم‌وزن بودن و غیرقابل نفوذ بودن، نسبت به ماسه‌سنگ‌ها نتایج بهتری دارد (خانه‌باد همکاران، ۲۰۱۱؛ زند مقدم، ۲۰۱۳). هدف این مطالعه استفاده از عناصر اصلی و فرعی شیل‌های سازند پسته‌لیق در برش چهلچله به منظور تفسیر سنگ‌منشا، موقعیت تکتونیکی، هوازدگی و شرایط اکسایش دیرینه است که می‌تواند به بازسازی جغرافیای دیرینه پالئوسن زیرین در ناحیه شمال شرق ایران و منطقه مورد مطالعه کمک نماید.

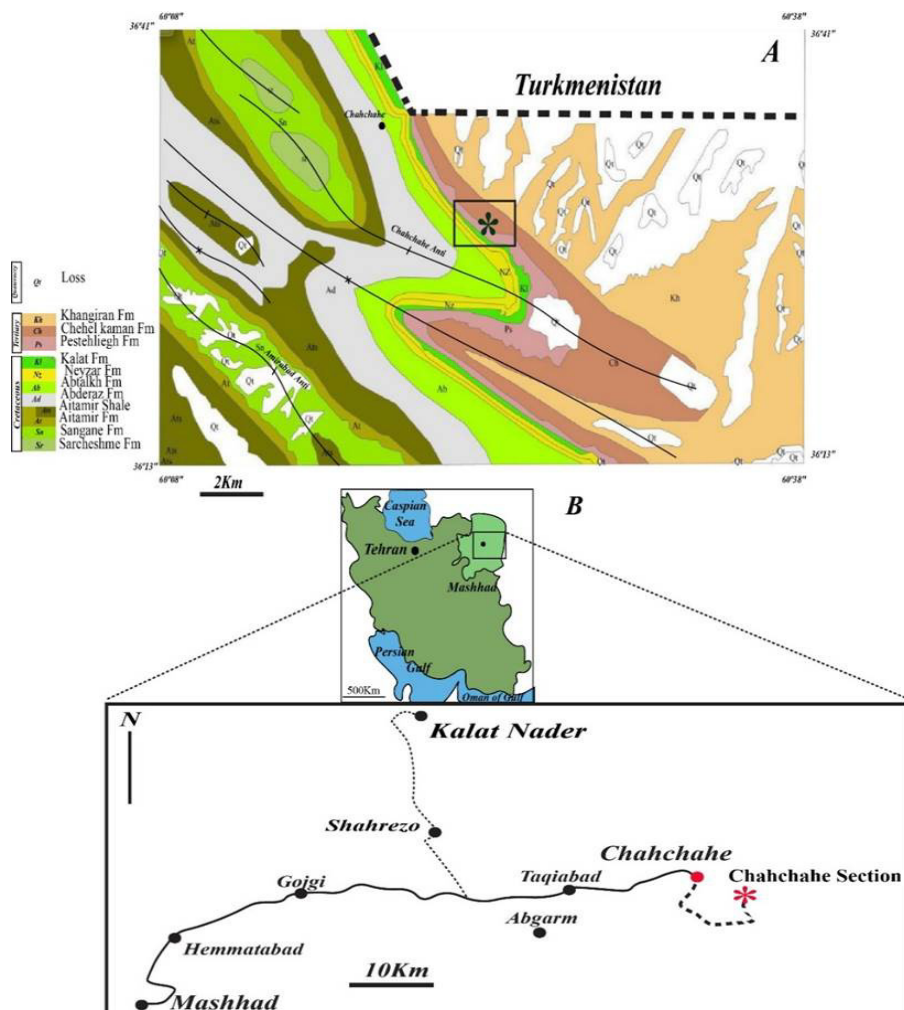
## زمین‌شناسی

از لحاظ زمین‌ساختی، کمربند چین‌خورده کپه‌داغ مشخص‌کننده‌ی قسمت شمال کوهزایی آلپ-همالیا و

هدف مطالعات برخاستگاه بازسازی و تفسیر تاریخچه‌ی رسوبات از فرسایش ابتدایی سنگ‌منشا تا تدفین نهایی تخریبی‌ها می‌باشد که مطالعات گوناگونی در این مبحث صورت گرفته، مرتضوی و همکاران (۲۰۱۳) برخاستگاه ماسه‌سنگ‌های سازند شوربچه و خانه‌باد و همکاران (۲۰۱۱) شیل‌های سازند سردر را مورد مطالعه قرار دادند علاوه بر آن تائو و همکاران (۲۰۱۶) و وثوقی مرادی (۲۰۱۶) به ترتیب برخاستگاه شیل‌های نفتی شیجانکو (جنوب چین) و سازند هانسلی (مرکز ترکیه) را بررسی نمودند. ترکیب کانی‌شناسی و شیمیایی سنگ‌های رسوبی آواری منعکس‌کننده‌ی ترکیب سنگ و موقعیت تکتونیکی ناحیه‌ی منشا و پارامترهای محیطی شامل نوع و مدت زمان هوازدگی، مکانیسم‌های حمل و نقل، محیط رسوبی و هم‌چنین فرآیندهای پس از رسوب‌گذاری است (ژو و همکاران، ۲۰۱۵؛ مینگ و همکاران، ۲۰۱۶) پارامترهای ژئوشیمی از قبیل عناصر اصلی و فرعی و نسبت‌های آن‌ها به طور وسیع برای تفسیر برخاستگاه و موقعیت تکتونیکی سنگ‌های سیلیسی آواری مورد

سنوزوئیک در حاشیه جنوبی آسیا، این توالی‌ها دچار بالاآمدگی شده‌اند. در آغاز ترشیاری حرکات زمین‌ساختی هم‌ارز لارامین در این حوضه سبب پسروی دریا از جنوب به شمال شده است به گونه‌ای که توالی‌های آغازین ترشیاری از نوع قاره‌ای بوده (پسته‌لیق) و در یک محیط رودخانه‌ای نهشته شده‌اند (موسوی حرمی، ۱۹۹۳). برش مورد مطالعه در ۱۰ کیلومتری روستای چهچه و در ۱۱۰ کیلومتری شمال شرق مشهد در طول شرقی  $60^{\circ} 24' 14''$  و عرض‌شمالی  $36^{\circ} 35' 47''$  واقع شده که بخشی از محدوده‌ی نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ سرخس (افشار حرب، ۱۹۸۲) را در بر می‌گیرد (شکل ۱).

نشان‌دهنده مرز بین ایران و ترکمنستان است (رابرت و همکاران، ۲۰۱۴). کپه‌داغ به عنوان یک حوضه‌ی درون قاره‌ای با یک روند شمال‌غربی - جنوب‌شرقی است که بین دو پلاتفرم پایدار ایران مرکزی و توران (ترکمنستان) قرار گرفته است. این حوضه پس از برخورد شمال شرق ایران با صفحه‌ی توران در مزوزوئیک پیشین و سپس بر اثر ریفتینگ ایجاد شده است. حرکات صفحه ایران به سمت توران نقش اساسی در چین‌خوردگی سازندهای مزوزوئیک و سنوزوئیک این منطقه داشته است (رمضانی و همکاران، ۲۰۰۸). حوضه کپه‌داغ دارای بیش‌تر از ۷ کیلومتر رسوب پس از تریاس در شرق حوضه است (موسوی حرمی و برنر، ۱۹۹۲). در طول وقایع برخوردی



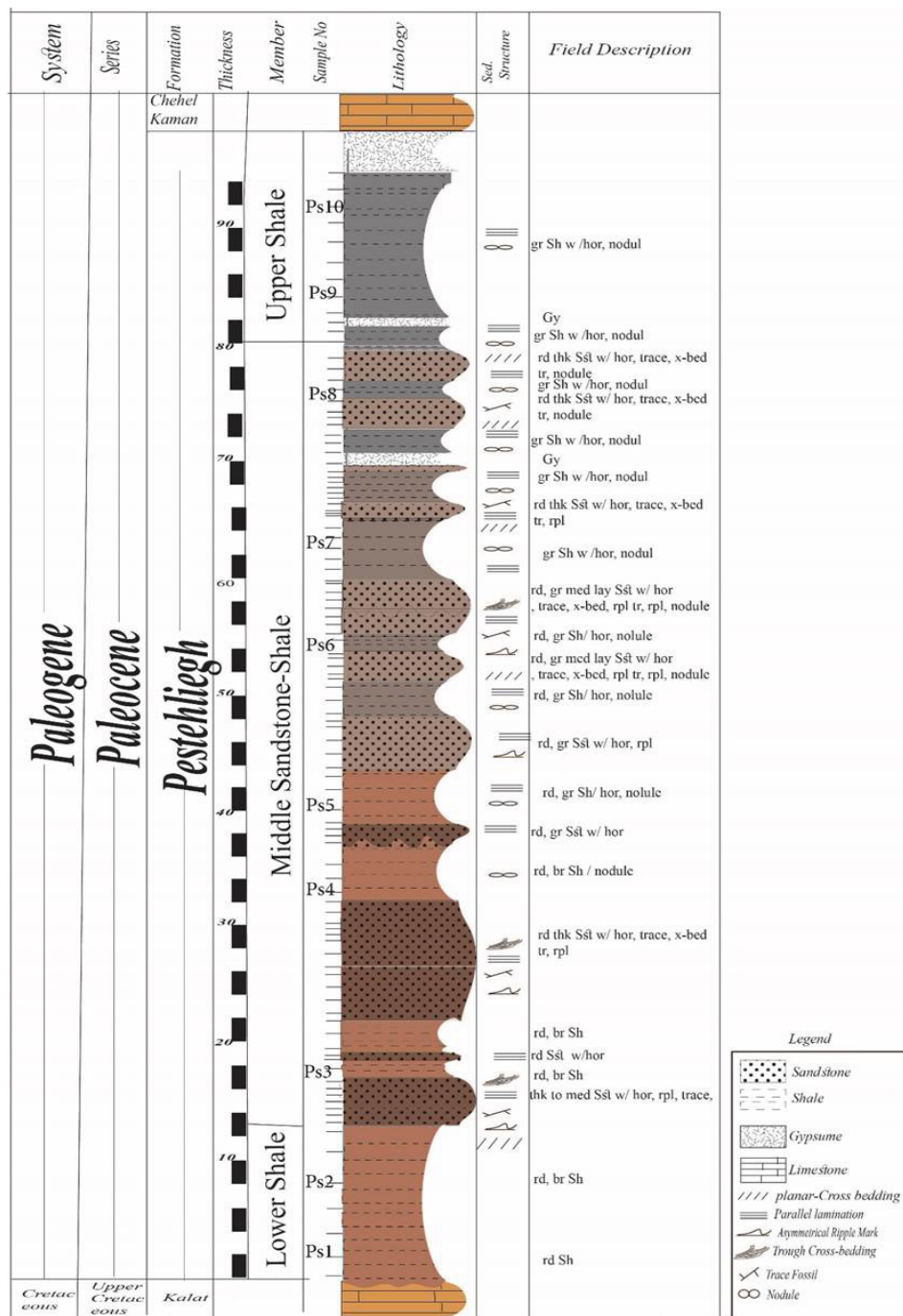
شکل ۱. A) قسمتی از نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ سرخس که برش مورد مطالعه (ستاره) در آن مشخص شده است. B) راه‌های دسترسی به منطقه

ولی لایه‌های ماسه‌سنگی نازک لایه نیز در این قسمت مشاهده می‌شوند. قسمت میانی و فوقانی برش از تناوب شیل و ماسه‌سنگ حاوی نودول تبخیری (ژیپس) تشکیل

در برش چهچه این سازند از ۹۴/۵ متر ماسه‌سنگ، شیل و واحدهای تبخیری تشکیل شده است. قسمت زیرین برش عمدتاً از شیل‌های قرمز رنگ ژیبس‌دار تشکیل شده

نشده است (افشارحرب، ۱۳۷۳) ولی با توجه به اینکه سازند پسته‌لیق بر روی سازند کلات به سن مایستریشتین پسین و در زیر سازند چهل‌کمان به سن تانین تا ایپرزین قرار گرفته است، سن این سازند تنها بر اساس موقعیت چینه‌شناسی دانین در نظر گرفته شده است (محبوبی و همکاران، ۲۰۰۱).

شده است ولی در قسمت فوقانی واحدهای تبخیری دارای گسترش قابل‌توجهی هستند (شکل ۲). شیل‌ها در برش مورد مطالعه غالباً از نوع سیلتی و به رنگ قرمز مشاهده می‌شوند، اغلب این شیل‌ها حاوی لامیناسیون‌های مسطح هستند. ماسه‌سنگ‌های قسمت زیرین و میانی حاوی آثار فسیلی هستند (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۵). بر اساس مطالعات صورت گرفته هیچ فسیلی از این سازند گزارش



شکل ۲. ستون چینه‌سنگی سازند پسته‌لیق در برش چه‌چه

## روش مطالعه

در این مطالعه یک برش سطحی به ضخامت ۹۴/۵ متر اندازه‌گیری و بر اساس تغییرات سنگ‌شناسی ۴۰ نمونه ماسه‌سنگی، ۲۴ نمونه شیلی و ۸ نمونه تخییری برداشت شد. به منظور تشخیص کانی‌شناسی رس‌های موجود در شیل‌ها از آنالیز XRD استفاده شده است که تعداد ۲ نمونه (Bulk) با توجه به کمترین میزان کربنات در آن‌ها انتخاب و پس از پودر شدن در آزمایشگاه رسوب‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد، جهت آنالیز به آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی ارسال گردید و توسط دستگاه Explorer Tcu 2000N مورد آنالیز قرار گرفتند. جهت مطالعه و آنالیز نمونه‌های شیلی ۱۰ نمونه به منظور تعیین مقدار اکسیدهای اصلی و فرعی به روش طیف‌سنجی جرمی با پلاسمای مضاعف القایی (ICP-MS) با استفاده از دستگاه ELAN 9000 در آزمایشگاه مواد معدنی ACME کانادا آنالیز شدند که نتایج آن‌ها در بخش بعدی ارائه خواهد شد. تعیین میزان عناصر اصلی با دقت نسبی ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۴ درصد عناصر فرعی (ppm) ۰/۳-۰/۰۵ انجام شده است. برای تعیین سنگ منشأ و موقعیت تکتونیکی از نسبت اکسیدهای اصلی از قبیل  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  و  $SiO_2$  و عناصر فرعی (Co, Th, Sc) و (Zr) و عناصر نادر خاکی (REEs) نظیر La استفاده شده است. در این مطالعه برای محاسبه اندیس هوازُدگی شیمیایی (CIA) و اندیس تنوع ترکیبی (ICV) از روش McLennan استفاده شده است به نحوی که به دلیل مقادیر بالای CaO، جهت اصلاح مقادیر  $Na_2O$  در فرمول جایگزین  $CaO^*$  می‌گردد.

## نتایج

نتایج آنالیز شیل‌های پسته‌لیق در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. این شیل‌ها به طور میانگین دارای ۴۲/۲ درصد  $SiO_2$ ، ۹/۷ درصد  $Al_2O_3$ ، ۰/۷۲ درصد  $Na_2O$ ، ۴/۳ درصد  $MgO$ ، ۲/۴۳ درصد  $K_2O$ ، ۰/۴۵ درصد  $TiO_2$ ، ۰/۶۲۳ درصد  $MnO$ ، ۱۱/۴ درصد  $CaO$ ، ۰/۹۳۱ درصد  $P_2O_5$  و ۳/۸ درصد  $Fe_2O_3$  هستند و میانگین مقدار LOI نمونه‌های مورد مطالعه ۱۶/۹۱ است. مقادیر نسبت‌های  $SiO_2/Al_2O_3$  (۳ تا ۶) و بطور میانگین ۴/۳ (درصد)،  $K_2O/Al_2O_3$  (۰/۲۲ تا ۰/۲۷) میانگین ۰/۲۴ (درصد)،  $K_2O/Na_2O$  (۲/۱ تا ۶/۷) با میانگین ۳/۳ (درصد)،

$Al_2O_3/TiO_2$  (۲۰ تا ۲۳، با میانگین ۲۲ درصد)، اندیس هوازُدگی شیمیایی<sup>۱</sup> (CIA) (معادله ۱) مقدار اندیس هوازُدگی شیمیایی از ۶۷ تا ۷۵ با میانگین ۷۰ است. اندیس تنوع ترکیبی<sup>۲</sup> (ICV) (معادله ۲) در شیل‌های مورد مطالعه ۱/۸ تا ۳/۵ با میانگین ۲/۱ بوده در جدول ۳ نشان داده شده است.

$$(1) \quad CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + CaO + K_2O) * 100$$

$$(2) \quad ICV = Fe_2O_3(T) + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + MnO + TiO_2 / Al_2O_3$$

## بحث

ترکیب اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی نسبت به پوسته قاره‌ای فوقانی<sup>۳</sup> (UCC) بهنجار شده‌اند (تیلور و مک لنون، ۱۹۸۵) (شکل ۳). طبق این نمودار شیل‌های سازند پسته‌لیق نسبت به UCC، از عناصر  $Na_2O$ ,  $P_2O_5$ , Ba, Nb, Th, Ce و  $K_2O$  غنی‌شدگی و در عناصر Co, Ni و CaO غنی‌شدگی نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۳ تهی‌شدگی عناصر  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$  ناشی از عدم هوازُدگی شدید و هم‌چنین عدم حمل مجدد رسوبات است (داس و همکاران، ۲۰۰۶) تهی‌شدگی  $SiO_2$  نشان دهنده‌ی بلوغ پایین شیل‌های پسته‌لیق است. تهی‌شدگی زیاد  $Na_2O$  به دلیل پایداری کم در فرایندهای حمل و نقل بوده که سبب از بین رفتن آن‌ها شده است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۴). میانگین  $CaO$  نمونه‌ها (۱۱/۴) تقریباً ۳ برابر مقدار  $CaO$  پوسته قاره‌ای فوقانی (۴/۱۹) است که نشان از سیمان کربناته در نمونه‌هاست به نحوی که باعث کاهش مقادیر  $SiO_2$  و  $Al_2O_3$  در نمونه‌ها شده است. پایداری  $Al_2O_3$  در طول هوازُدگی و دیاژنز بالا است، بنابراین می‌توان از آن به عنوان عاملی برای مقایسه با دیگر عناصر اصلی استفاده کرد. در شکل ۴ ارتباط بین  $Al_2O_3$  با سایر اکسیدهای اصلی نشان داده شده است.  $Al_2O_3$  با  $SiO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$  و  $K_2O$  همبستگی مثبت و با  $MnO$  همبستگی منفی را نشان می‌دهد. ارتباط مستقیم  $Al_2O_3$  با  $K_2O$  ( $R^2=0.90$ ) و سایر اکسیدهای اصلی به دلیل تمرکز زیاد کانی‌های رسی بوده و نشان‌دهنده فاز غنی از آلومینیوم مانند کانی رسی ایلیت باشد (شکل ۵) (لی، ۲۰۰۰؛ خانه‌باد و کاران، ۲۰۱۲؛ رضایی و همکاران، ۱۳۹۵). باید توجه داشت به دلیل بالا

<sup>1</sup> Chemical index of Alteration: CIA

<sup>2</sup> Index of chemical variability: ICV

<sup>3</sup> Upper Continental Crust: UCC

می‌توان به حضور کانی‌های رسی یا تجزیه کانی‌های مافیک موجود در سنگ‌های آذرین حدواسط نسبت داد (خانه‌باد و همکاران، ۲۰۱۲). همبستگی مثبت بین  $TiO_2$  و  $Al_2O_3$  نشان از همراهی  $TiO_2$  با فیلوسیلیکات‌هایی نظیر ایلیت دارد (دابارد، ۱۹۹۰) (شکل ۵). ارتباط مثبت بسیار قوی بین  $Al_2O_3$  و Rb ( $R^2=0.93$ ) حاکی از ارتباط Rb با کانی‌های رسی و فلدسپار پتاسیم است (لیو و همکاران، ۲۰۱۳) (شکل ۴).

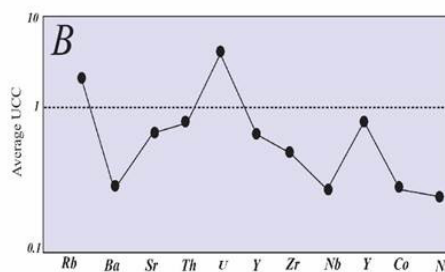
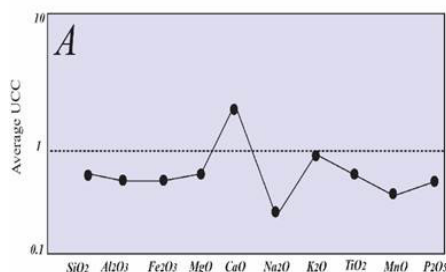
بودن مقدار فلدسپات پتاسیم در نمونه‌های مورد مطالعه می‌تواند منشأ کانی‌های رسی را نیز می‌توان فلدسپات پتاسیم دانست. میانگین نسبت  $K_2O/Al_2O_3$  در نمونه‌ها (۰/۲۵) حاکی از غلظت زیادتر کانی‌های رسی نسبت به فلدسپات‌ها است (کاکس و همکاران، ۱۹۹۵؛ موسوی‌راد، ۲۰۱۱). (جدول ۳). با توجه به ارتباط مستقیم  $TiO_2$  با  $Al_2O_3$  ( $R^2=0.93$ ) و ارتباط منفی آن با MnO ( $R^2=0.34$ ) (شکل ۴، A, C)، منشأ تیتانیوم موجود در نمونه‌ها را

جدول ۱. مقادیر اکسیدهای اصلی (% w) شیل‌های سازند پسته‌لیق در برش چهچه

Sample/No	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ps1	43.3	14.2	5.7	2.7	13	0.53	3.6	0.6	0.13	0.1	0.013
Ps2	42.3	13.9	5.62	3	13	0.52	3.5	0.6	0.12	0.1	0.013
Ps3	46.4	11.6	4.5	2.3	15	0.91	2.6	0.6	0.1	0.1	0.011
Ps4	50.7	10.1	4.5	3.1	13	0.9	2.5	0.5	0.09	0.1	0.009
Ps5	51.4	11.2	4.33	2.9	11	0.89	2.8	0.5	0.1	0.1	0.01
Ps6	49.1	11	4.16	4.5	11	0.87	2.7	0.5	0.1	0.1	0.01
Ps7	51.1	9.64	3.39	3.6	13	1.09	2.3	0.5	0.09	0.1	0.008
Ps8	40.5	6.68	2.32	10	14	0.63	2	0.3	0.08	0.1	0.007
Ps9	43.1	8.02	3.34	11	11	0.82	1.9	0.4	0.11	0.1	0.007
Ps10	46.7	11.6	4.37	5.2	12	0.76	3.2	0.5	0.11	0	0.011
Mean	42.3	9.74	3.83	4.4	11	0.72	2.4	0.4	0.093	0.1	0.009

جدول ۲. مقادیر عنصرهای فرعی (ppm) در شیل‌های سازند پسته‌لیق در برش چهچه

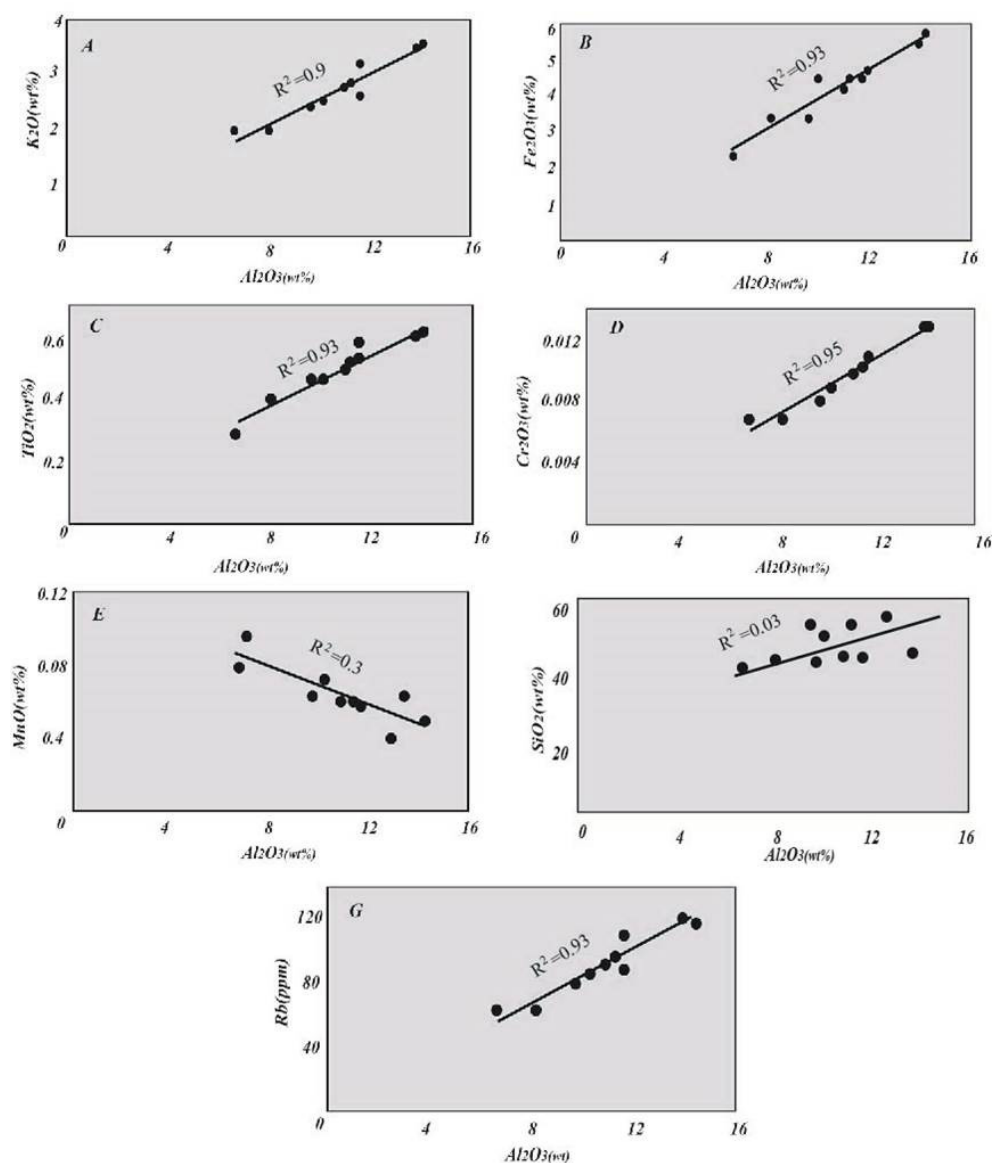
Sample/No	Ba	Ni	Sc	Co	Nb	Rb	Sr	Th	Zr	La	V	Ce	Ga	Dy
1	233	32	14	13	9.2	120	302	9.8	118	25	120	49	15	3.6
Ps2	267	38	14	14	9.6	124	296	9.5	121	25	125	50	15	3.8
Ps3	253	34	11	12	9.9	92	323	7.9	122	22	100	43	12	3.5
Ps4	273	20	9	9.3	7.2	84.3	251	7	163	19	80	39	10	3.1
Ps5	283	24	10	11	7.8	94.1	238	7.7	163	21	89	39	12	3.3
Ps6	270	26	10	10	7.7	91.6	218	7.4	136	20	89	40	12	3.2
Ps7	245	18	8	9	7.7	78.3	259	7.2	193	20	72	38	9	3.2
Ps8	194	18	5	5.3	5	62.3	299	4.6	92.5	14	50	29	6	2.4
Ps9	190	18	7	7.8	6.8	65.2	298	5.8	103	18	59	35	6	2.9
Ps10	220	28	11	10	9.1	110	304	8.1	139	22	97	46	12	3.7
Mean	243	26	9.9	10	8	92.2	279	7.5	135	21	88	41	11	3.3

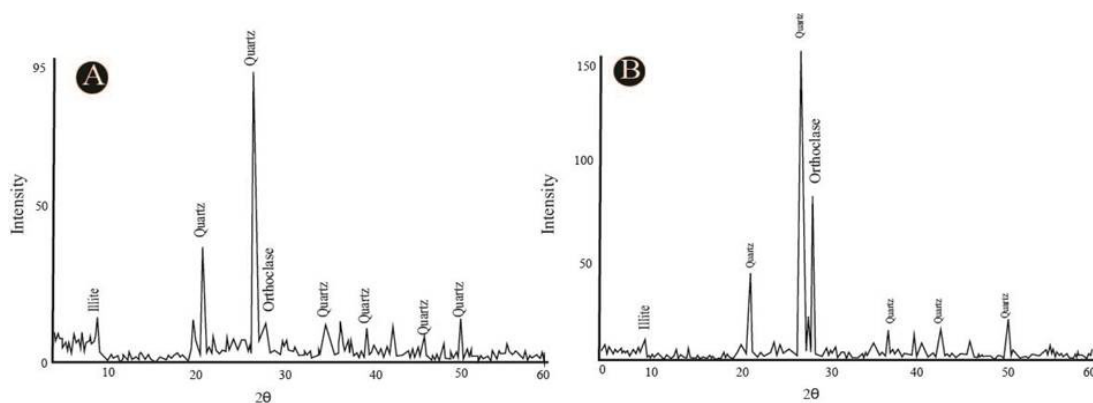


شکل ۳. مقایسه میانگین A-اکسیدهای اصلی B-عناصر فرعی در نمونه‌های شیلی پسته‌لیق در برش چهچه نسبت به پوسته قاره‌ای (تیلور و مک‌نون، ۱۹۸۵)

جدول ۳. نسبت‌های عناصر اصلی شیل‌های سازند پسته‌لیق در برش چهچهه

Sample/No	K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>	CIA	ICV
ps1	0.25	3	6.7	23	75	1.8
ps2	0.25	3	6.7	23.2	75	1.9
ps3	0.22	4	2.8	20	72	2.1
ps4	0.24	5	2.7	21	70	2.4
ps5	0.25	4.5	3.1	22	70	2
ps6	0.25	4.4	3.1	22	70	2.1
ps7	0.24	5.3	2.1	20	68	2.4
ps8	0.29	6	3.1	23	67	4.3
ps9	0.23	5.3	2.3	20	69	3.5
ps10	0.27	4	4.1	22	71	2.2
Mean	0.24	4.3	3.3	22	70	2.4

شکل ۴. نمودار همبستگی دوتایی عناصر با یکدیگر و تغییرات عنصر Rb نسبت به Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در شیل‌های سازند پسته‌لیق در برش چهچهه



شکل ۵. نتایج آنالیز XRD شیل‌های سازند پسته‌لیق در برش چپ‌چپه Ps34/3:B Ps2/1:A

TiO<sub>2</sub> در مقابل Zr و از سوی دیگر نسبت این عناصر، نشان‌دهنده‌ی سنگ منشا آذرین حدواسط برای شیل‌های پسته‌لیق است (شکل ۶).

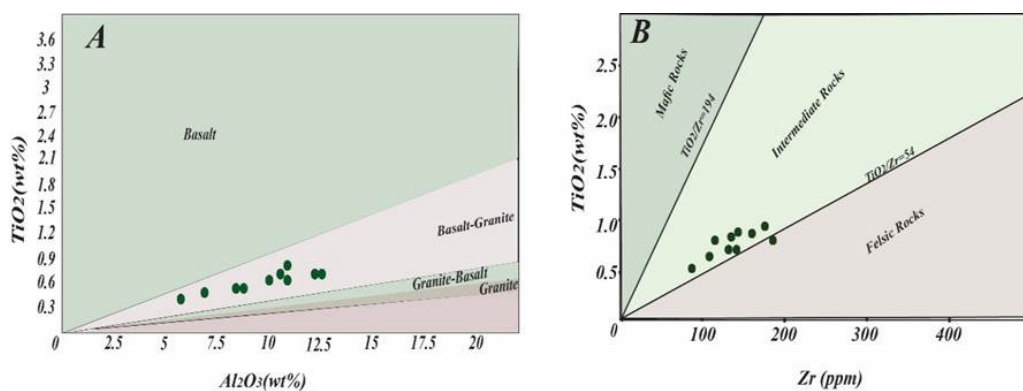
#### موقعیت تکتونیکی

به طور کلی موقعیت تکتونیکی رسوبات ناحیه منشا عامل کلیدی برای کنترل ترکیب شیمیایی و اختصاصات ژئوشیمی سنگ‌های رسوبی است (باتیا و کروک، ۱۹۸۶؛ بی و همکاران، ۲۰۱۵؛ رضایی و همکاران، ۱۳۹۵). روزر و کورش (۱۹۸۸) تقسیم‌بندی بر اساس مقادیر SiO<sub>2</sub> در مقابل Log K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O را ارائه داد که یکی از شاخص‌ترین نمودارها برای تعیین موقعیت تکتونیکی است که نشان‌دهنده‌ی منطقه‌ی غیرفعال، فعال قاره‌ای و جزایر اقیانوسی است. بر اساس این تقسیم‌بندی نمونه‌ها در قسمت فعال و حاشیه قاره‌ای قرار می‌گیرند (شکل ۷). بعضی از عناصر فرعی (Zr و Co, Th, Sc) و عناصر نادر خاکی (REEs) نظیر La عناصری بی‌حرکت بوده و در طول فرآیند حمل و نقل و رسوب‌گذاری تحت کنش بسیار کمی قرار می‌گیرند و می‌توان از دقت بالای این عناصر برای تعیین موقعیت تکتونیکی استفاده کرد (باتیا و کروک، ۱۹۸۶؛ وثوقی مرادی و همکاران، ۲۰۱۵). دیگرام‌های سه‌تایی Th/Sc/Zr/10 و La/Th/Sc و Th/Co/Zr/10 موقعیت تکتونیکی جزایر کمان قاره‌ای را برای نمونه‌ها نشان می‌دهد (شکل ۸). به طور کلی از بررسی نمودارهایی که برای مطالعه جایگاه تکتونیکی شیل‌های پسته‌لیق استفاده شده است می‌توان به فعال بودن موقعیت تکتونیکی پی برد که نمونه‌ها در محدوده‌ی جزایر کمان قاره‌ای و حاشیه فعال قاره‌ای قرار می‌گیرند.

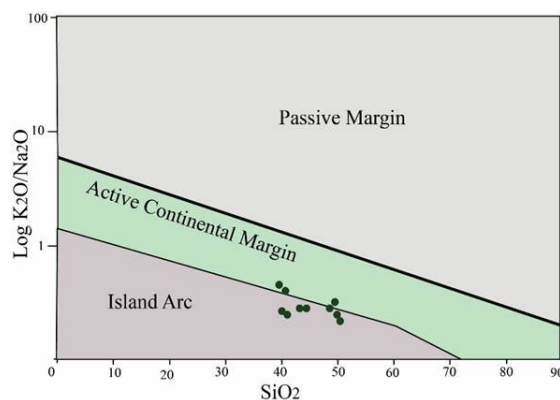
#### سنگ منشا

ترکیب کلی رسوبات توسط اختصاصات سنگ‌شناسی ناحیه منشا کنترل می‌شود (جعفرزاده و همکاران، ۲۰۱۴؛ قبادی و همکاران، ۱۳۹۵؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۳) در طول هوازگی سنگ منشاء عناصری از قبیل Na, Ca, K و تا حد زیادی Mg شسته می‌شوند ولی Al, Ti, Zr به دلیل قابلیت تحرک کم آن‌ها در محلول‌های آبی دمای پایین به عنوان عناصری بی‌حرکت شناخته می‌شوند (ایرس و واتسون، ۱۹۹۳) از همین رو نسبت‌های Al/Ti/Zr در رسوبات تا حد زیادی با نسبت‌های موجود در ناحیه منشا مشابه هستند (ژو و همکاران، ۲۰۱۵). برای تشخیص سنگ منشا اولیه سنگ‌های آذرین مافیک، حدواسط و فلسیک از نسبت Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> استفاده می‌شود، این نسبت در سنگ‌های آذرین دارای مقادیر متفاوتی است به گونه‌ای که دامنه‌ی تغییرات این نسبت در سنگ‌های آذرین مافیک ۳ تا ۸، در سنگ‌های حدواسط ۸ تا ۲۱ و در سنگ‌های فلسیک ۲۱ تا ۷۰ است (هایاشی و همکاران، ۱۹۹۸) این نسبت در نمونه‌های مورد مطالعه از ۲۰ تا ۲۳ در تغییر بوده که مؤید سنگ منشا آذرین حدواسط تا فلسیک است (شکل ۶-۶). همچنین از نسبت TiO<sub>2</sub>/Zr نیز می‌توان برای تعیین سنگ منشا در سنگ‌های سیلیسی آواری استفاده کرد. (هایاشی و همکاران، ۱۹۹۸). مقدار TiO<sub>2</sub> در نمونه‌ها از ۰/۴ تا ۰/۶ در تغییر بوده در حالی که میزان Zr بیش‌تر از ۱۰۰ پی‌پی‌ام است که با توجه به شکل (۶-۶) تمامی نمونه‌ها در محدوده‌ی سنگ آذرین حدواسط قرار می‌گیرند. ارتباط مثبت میان TiO<sub>2</sub> و Zr در این شیل‌ها تایید کننده‌ی سنگ منشا حدواسط برای این شیل‌ها است. بررسی ۲ نمودار Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در مقابل TiO<sub>2</sub> و همچنین

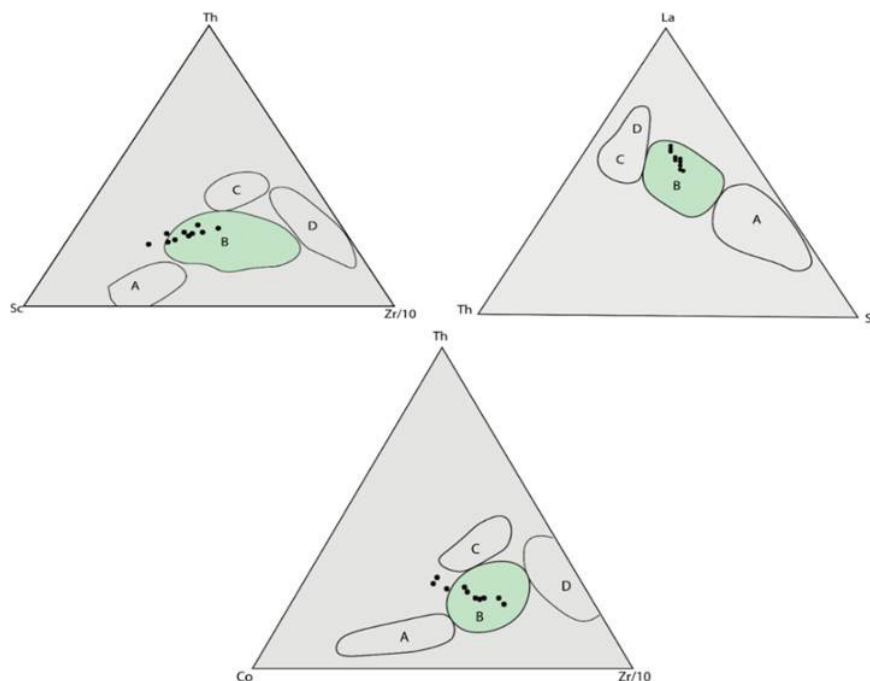




شکل ۶. نمودارهای تعیین سنگ منشأ شیل‌های سازند پسته‌لیق A- نمودار دوتایی  $Al_2O_3$  در مقابل  $TiO_2$  B- نمودار دوتایی  $Zr$  در مقابل  $TiO_2$  (هایاشی و همکاران، ۱۹۹۷)



شکل ۷. نمودار تعیین موقعیت تکتونیکی شیل‌های سازند پسته‌لیق با استفاده از دیاگرام‌های  $Log K_2O/Na_2O$  در مقابل  $SiO_2$  (روزر و کورش، ۱۹۸۸)



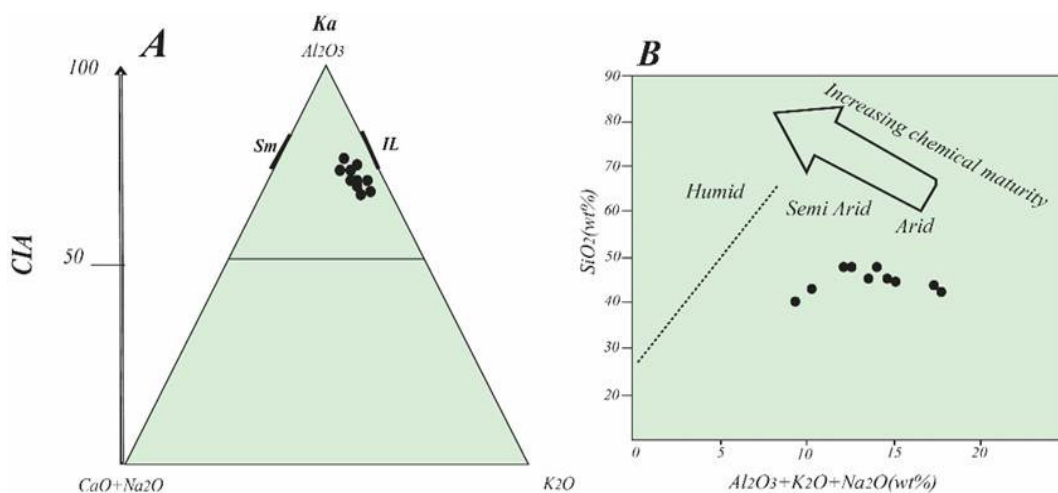
شکل ۸. نمودار تعیین موقعیت تکتونیکی شیل‌های سازند پسته‌لیق با استفاده از دیاگرام‌های مثلثی  $La$  و  $Co, Th, Sc, Zr$  A=جزایر کمانی اقیانوسی B=جزایر کمان C=حاشیه فعال قاره‌ای D=حاشیه غیر فعال قاره‌ای (باتیا و کروک، ۱۹۸۶)



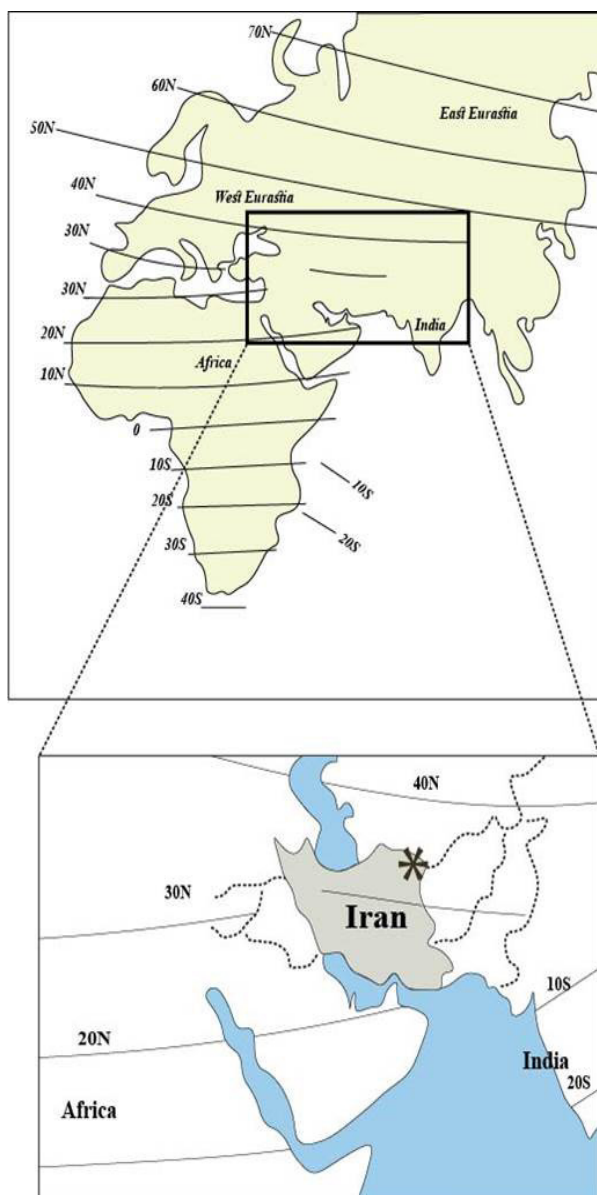
محاسبه می‌شود، طبق معادله فوق اگر میزان CaO نمونه‌ها بیش‌تر از Na<sub>2</sub>O باشد مقدار CaO برابر با مقدار Na<sub>2</sub>O در نظر گرفته می‌شود، هر چه اندیس CIA از ۵۰ بیش‌تر و به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشند نشان‌دهنده‌ی شدت هوازدگی بالا در ناحیه منشا است. اندیس CIA محاسبه شده برای نمونه‌های مورد مطالعه پراکندگی زیادی را نشان نمی‌دهند و دارای میانگین ۷۰٪ است که نشان دهنده‌ی شدت هوازدگی ضعیف تا متوسط در ناحیه منشا بوده است (شکل ۹-A). اندیس تنوع ترکیبی ICV برای تعیین درجه بلوغ ذرات حمل شده به حوضه رسوبی استفاده می‌شود (ICV). مقادیر بالای ICV حاکی از منشا نابالغ است در حالی که مقادیر پایین ICV نشان‌دهنده‌ی بلوغ بالای سنگ منشا است. در طی فرایند هوازدگی کانی‌های فلدسپاته تجزیه و به کانی‌های رسی تبدیل شده و باعث کاهش این اندیس می‌شود. مقدر ICV برای نمونه‌های شیلی به طور میانگین ۲/۲ بوده که نشان دهنده‌ی بلوغ پایین سنگ منشا است. علاوه بر این با استفاده از دیاگرام SiO<sub>2</sub> در مقابل Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O برای پی بردن شرایط آب و هوایی دیرینه در ناحیه منشا استفاده شده است که نشان‌دهنده‌ی شرایط آب و هوایی خشک تا نیمه‌خشک در ناحیه منشا است (شکل ۹-B). طبق نقشه‌های جغرافیای دیرینه، ایران در زمان پالئوسن تقریباً در عرض جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی قرار داشته که تایید کننده‌ی نتایج فوق است (شکل ۱۰).

### هوازدگی سنگ منشا

درجه هوازدگی سنگ مادر نقش بسیار مهمی در تعیین ترکیب سنگ‌های سیلیسی آواری ایفا می‌کند (وثوقی مرادی، ۲۰۱۶). فاکتورهای متعددی از جمله شرایط آب و هوایی و فعالیت‌های تکتونیکی (بالا زدگی منطقه منشا) در کنترل شدت هوازدگی در ناحیه منشا تاثیرگذار است (ورونکوویچ و کوندی، ۱۹۸۹). در طی هوازدگی شیمیایی کاتیون‌های متحرک از قبیل Na و Ca ناپایدار بوده و به راحتی حذف می‌شوند صورتی که کاتیون‌هایی از قبیل Zr و Al و Ti دارای پایداری بیش‌تری هستند. افزایش درجه هوازدگی شیمیایی ممکن است نشانه‌ای از کاهش فعالیت تکتونیکی یا تغییر شرایط آب و هوا باشد (فدو و نسبیت، ۱۹۹۵؛ جیکوبسن، ۲۰۰۳). شاخص‌های مختلفی برای هوازدگی ارائه شده است برای مثال شاخص هوازدگی شیمیایی (CIW) یا شاخص هوازدگی دگرسانی شیمیایی (CIA) هستند که اغلب به عنوان شاخص‌های هوازدگی درجه بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند (نسبیت و یانگ، ۱۹۸۲). در محاسبه اندیس هوازدگی CIA، تنها مقادیر CaO موجود در کانی‌های سیلیکاته مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای محاسبه‌ی CaO\* نمونه‌هایی مانند نمونه‌های مورد مطالعه که دارای سیمان کربناته‌ی زیادی هستند از روش McLennan استفاده شده است که طبق فرمول  $Mol\ CaO_{(corrected)} = mol\ CaO - (10/3\ mol\ P_2O_5)$



شکل ۹. A- نمودار سه تایی A-CN-K برای شیل‌های سازند پسته‌لیق در برش چهچهه Ka; Kaolinite, Sm; Smectite, IL; Illite (دوتا و سوتنر، ۱۹۸۶) (نسبیت و یانگ، ۱۹۸۲) B: تعیین شرایط آب و هوایی ناحیه منشا شیل‌های سازند پسته‌لیق در برش چهچهه (دوتا و سوتنر، ۱۹۸۶)



شکل ۱۰. نقشه خطوط عرض جغرافیای دیرینه ایران در زمان پالتوسن-اتوسن که برش مورد مطالعه (ستاره) بر روی آن نشان داده شده است (هبیش، ۱۹۷۹).

### اکسیداسیون-احیای محیط

شرایط اکسیداسیون-احیا دیرینه در طول رسوب‌گذاری سنگ‌های سیلیسی آواری را می‌توان از طریق تجزیه و تحلیل شیمیایی ارزیابی نمود (موسوی‌راد و همکاران، ۲۰۱۱). به همین منظور از نسبت عناصری از قبیل U/Th و Ni/Co برای پی بردن به وضعیت آب‌های حوضه می‌توان استفاده کرد (ویگنال و مایرز، ۱۹۸۸؛ لی، ۲۰۰۹). نسبت U/Th برای محیط‌های احیایی بیش‌تر از ۱/۲۵ و برای محیط‌های اکسیدی این نسبت به کمتر از ۰/۷۵ می‌رسد، میانگین نسبت U/Th برای نمونه‌های

مورد مطالعه ۰/۲۷ بوده که به اکسیدی بودن محیط اشاره دارد. نسبت Ni/Co برای محیط‌های احیایی بیش‌تر از ۵ و برای محیط‌های اکسیدی کمتر از ۵ است، میانگین این نسبت برای نمونه‌های مورد مطالعه ۲/۵ بوده که مجدداً تایید کننده‌ی شرایط اکسیدی محیط است. عناصر Sr و Ba رفتار ژئوشیمی متفاوتی از خود نشان می‌دهند و می‌توانند از آن‌ها برای پی بردن به تغییرات شوری دیرینه استفاده نمود (کاو و همکاران، ۲۰۱۵). با افزایش درجه شوری آب، نسبت Sr/Ba در رسوبات افزایش می‌یابد. این نسبت در نمونه‌های مورد مطالعه

بالا همراه با قاعده فرسایشی، گسترش جانبی اندک رخساره‌های سنگی، وجود آثار فسیلی مربوط به خشکی و ساختمان‌های رسوبی یک جهتی همچون ریپل‌مارک، طبقه‌بندی مورب، نبود فسیل نشان‌دهنده تهنشست رسوبات سیلیسی آواری سازند پسته‌لیق در سیستم رودخانه‌ای است (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۵). در بخش‌های جنوب‌شرقی، لایه‌های کنگلومرا در سازند ظاهر می‌شوند و از جنوب حوضه به سمت شمال از درشتی دانه‌های آواری کاسته می‌شود به گونه‌ای که منطقه‌ی مورد مطالعه (شمال‌غرب دشت سرخس) فاقد لایه‌های کنگلومرا است (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۵). اغلب پیل‌های کنگلومرا را خرده‌سنگ‌های آهکی تشکیل داده‌اند که حاصل فرسایش سازنده‌های آهکی قدیمی‌تر بوده است. تغییر ضخامت سازند پسته‌لیق در بخش‌های مختلف کپه‌داغ به دلیل پسروری دریا به سمت شمال غرب در اواخر کرتاسه-پالئوسن بوده به گونه‌ای که ضخامت این سازند در بخش جنوب‌شرق حوضه در برش پادها-پدعلی ۴۲۴ متر و به سمت شمال‌غرب در برش تنگ چهل کمان ضخامت آن به ۲۲۵ متر کاهش می‌یابد (موسوی‌حرمی، ۱۹۹۳). در برش چپ‌چپه در شمال‌غربی دشت سرخس ضخامت این سازند به ۹۴/۵ متر کاهش می‌یابد و لایه‌های تبخیری در سازند پدیدار می‌گردد. (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۵). این واحدهای تبخیری دارای بافت لامینه‌ای و کانی‌های موجود در آن عمدتاً ژبیس و مقادیر اندکی نیز انیدریت است که نشان‌دهنده‌ی منشا غیر دریایی و احتمالاً مربوط به محیط پلایا می‌باشد (رمضانی و همکاران، ۱۳۸۷). البته در قسمت غرب کپه‌داغ روند کلی این تغییر ضخامت توسط گسل‌های فعال در هنگام رسوب‌گذاری تغییر یافته است (افشارحرب، ۱۳۷۳) در زمان‌های کوتاهی در اوایل پالئوسن، مناطق پستی در ناحیه مورد مطالعه (شمال غربی دشت سرخس) شکل گرفته و منجر به تشکیل واحدهای تبخیری شده است (موسوی‌حرمی، ۱۹۹۳). با توجه به واحدهای تبخیری و اندیس هوازدهگی شیمیایی (CIA) ضعیف نمونه‌های مورد مطالعه می‌توان به حاکم بودن شرایط آب و هوایی خشک و نیمه‌خشک در ناحیه منشا اشاره کرد که با توجه به جایگاه ایران در عرض جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی می‌تواند موید شرایط آب و هوایی فوق باشد (هبیش، ۱۹۷۹) (شکل ۱۰).

دارای میانگین ۱/۱ است و شیل‌های فوقانی بیش‌ترین نسبت را دارا هستند (۱/۶). باتوجه به نسبت Sr/Ba شیل‌های قسمت زیرین و میانی سازند پسته‌لیق در محیطی با تغییرات شوری تقریباً یکنواخت تشکیل شده‌اند ولی شیل‌های قسمت فوقانی تحت تاثیر تغییرات شوری بیش‌تری قرار گرفته‌اند. بنابراین می‌توان چنین استنباط کرد که سازند پسته‌لیق در یک محیطی اکسیدان نظیر شرایط قاره‌ای و نیز در یک شرایط آب و هوای گرم و خشک تشکیل شده است که تاییدی بر مطالعات قبلی انجام شده نظیر موسوی‌حرمی (۱۹۹۳) می‌باشد.

### جغرافیای دیرینه

بازسازی دقیق‌تر جغرافیای دیرینه در طی پالئوسن زیرین در منطقه‌ی مورد مطالعه نیازمند اطلاعاتی از الگوی رسوب‌گذاری، سنگ منشا، موقعیت تکتونیکی و شدت هوازدهگی در ناحیه منشا دارد (معلمی و همکاران، ۱۳۹۵). آغاز پالئوسن در بسیاری از مناطق جهان مانند کپه‌داغ با شروع حرکات تکتونیکی و تهنشست رسوبات قاره‌ای همراه بوده است (لوزون، ۲۰۰۵). بر اثر حوادث زمین‌ساختی لارامین، ارتفاعاتی در قسمت جنوب‌شرقی حوضه (آق‌در بند) تشکیل شده که سازندهای قدیمی نظیر تیرگان، مزدوران را در معرض فرسایش قرار داده، که احتمالاً به دلیل بالاآمدگی جنوب منطقه مورد مطالعه در محدوده مشهد و حتی در منطقه آق‌در بند است (موسوی‌حرمی و محبوبی، ۱۳۷۸). بر اساس مطالعات انجام شده رسوبات سازند پسته‌لیق از ارتفاعات شکل گرفته در جنوب‌شرقی منشا گرفته‌اند که از جنوب شرق به سمت شمال‌غرب از درشتی ذرات کاسته می‌شود (موسوی‌حرمی، ۱۹۹۳). اندیس هوازدهگی شیمیایی (CIA) که بیانگر هوازدهگی ضعیف تا متوسط رسوبات در ناحیه منشا است، گویای موقعیت تکتونیکی فعال در ناحیه منشا و علاوه بر آن نشان‌دهنده‌ی چرخه‌ی مجدد رسوبی ناچیز باشد. همانگونه که در بخش هوازدهگی سنگ منشا اشاره شد مقادیر بالای اندیس تنوع ترکیبی (ICV) که اشاره به بلوغ پایین رسوبات مورد مطالعه دارد، می‌توان پیشنهاد کرد که رسوب‌گذاری این سازند در محیط فعال و بالاآمدگی سریع ناحیه منشا بوده است. وجود شواهدی از قبیل چرخه‌های ریز شونده به سمت

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه شیل‌های سازند پسته‌لیق (پالئوسن زیرین) در برش چهچهه، شمال‌شرق مشهد، جهت تفسیر برخاستگاه مورد آنالیز ژئوشیمیایی عناصر اصلی و فرعی قرار گرفتند. شیل‌های سازند پسته‌لیق نسبت به UCC، تهی‌شدگی در میزان  $\text{Ce}$ ،  $\text{Ba}$ ،  $\text{Nb}$ ،  $\text{Th}$ ،  $\text{Na}_2\text{O}$ ،  $\text{P}_2\text{O}_5$  و غنی‌شدگی در  $\text{CaO}$ ،  $\text{Co}$ ،  $\text{Ni}$ ،  $\text{K}_2\text{O}$  را نشان می‌دهند. این مطالعه نشان‌دهنده‌ی سنگ منشا آذرین حدواسط برای سازند پسته‌لیق است. بررسی موقعیت تکتونیکی نشان از موقعیت کمان قاره‌ای دارد. شرایط آب و هوایی در ناحیه برخاستگاه حاکی از هوازگی نسبتاً ضعیف تا متوسط ( $\text{CIA} = 70\%$ ) و مرتبط با شرایط آب و هوایی خشک و نیمه‌خشک در ناحیه منشا دارد که موقعیت ایران در عرض جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی تأیید کننده‌ی نتایج فوق است. منشا رسوبات سازند پسته‌لیق از سنگ‌های قدیمی‌تر در قسمت جنوب‌شرقی حوضه پیشنهاد می‌شود.

## سپاسگزاری

از دانشگاه فردوسی مشهد جهت در اختیار گذاشتن امکانات صحرایی و آزمایشگاهی (طرح پژوهشی با کد ۳/۴۲۱۹۷) سپاسگزاری می‌شود. هم‌چنین از داوران محترم این مقاله بابت حسن توجه و نظرات ارزنده‌شان که به ارتقا سطح علمی این مقاله کمک نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

## منابع

- افشارحرب، ع (۱۳۷۳) زمین‌شناسی کپه‌داغ، طرح تدوین کتب زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، ۲۷۵ص.
- افشارحرب، ع (۱۳۶۲) نقشه زمین‌شناسی سرخس با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات کشور.
- آقباتی، ع (۱۳۸۵) زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ص.
- رضایی، خ، فروغی شاه‌آباد، ش، اسدی، الف (۱۳۹۵) پتروگرافی و ژئوشیمی ماسه‌سنگ‌های سازند سرخ بالای در برش منطقه حسن‌آباد (جنوب‌غرب تهران)، رسوب‌شناسی کاربردی، شماره ۶، ۴۳-۵۶.
- رضایی، ن، رضایی، خ، فیاضی، ف (۱۳۹۵) تعیین برخاستگاه زمین‌ساختی و هوازگی سنگ منشا ماسه‌سنگ‌های سازند داهو (کامبرین پیشین) به روش پتروگرافی و ژئوشیمی عناصر اصلی در برش ایبانه غرب نطنز، رسوب‌شناسی کاربردی، شماره ۶، ۲۶-۴۲.
- رضانی، ش، ذاکریان مقدم، م، موسوی‌حرمی، ر، محمودی‌قرائی، م، محبوبی، الف (۱۳۸۷) مکانیزم تشکیل تبخیری‌های سازند پسته‌لیق در برش چهچهه کمان، شرق حوضه کپه‌داغ، شانزدهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران.
- سرباز، ن، محبوبی، الف، موسوی‌حرمی، خانه‌باد، م، ماهانی‌پور، الف (۱۳۹۶) خاستگاه و جایگاه تکتونیکی سازند کشف‌رود در برش ناویا (باختر جنورد) بر مبنای بررسی‌های پتروگرافی و ژئوشیمی ماسه‌سنگ‌ها، رسوب‌شناسی کاربردی، شماره ۸، ۸۹-۱۰۲.
- سعیدی، الف، محبوبی، الف، موسوی‌حرمی، ر، محمودی‌قرائی، م، ح (۱۳۹۵) چینه‌سنگی و رخساره‌های سنگی سازند پسته‌لیق در برش چهچهه شمال‌شرقی مشهد یازدهمین همایش انجمن دیرینه‌شناسی ایران، طبس.
- قبادی، م، رفیعی، ب، حیدری، م، موسوی، س، اسفندیاری (۱۳۹۳) ژئوشیمی و خاستگاه ماسه‌سنگ‌های آجاجاری در استان خوزستان، رسوب‌شناسی کاربردی، شماره ۳، ۴۸-۶۱.
- معلمی، ع، صالحی، م، زهدی، الف (۱۳۹۵) ژئوشیمی ماسه‌سنگ‌های سازند رازک، جنوب خاور حوضه رسوبی زاگرس: کاربرد در تعیین جایگاه زمین‌ساختی، سنگ مادر و هوازگی دیرینه، علوم‌زمین ۱۰۳، ۲۸۶-۲۶۵.
- موسوی‌حرمی، ر، محبوبی، ا (۱۳۷۸) تفسیر تاریخچه و جغرافیایی دیرینه پالئوسن در شمال‌شرق ایران، هجدهمین گردهمایی علوم‌زمین ۹۸-۱۰۵.
- Algeo, T. J., Maynard, J. B (2004) Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems. *Chemical Geology*. 206, 289e318.
- Ayers, J. C., Watson, E. B (1993) Rutile solubility and mobility in supercritical aqueous fluids. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 114: 321-330.
- Bai, Y., Liu, Z., Sun, P., Liu, R., Hu, X., Zhao, H., Xu, Y (2015) Rare earth and major element geochemistry of Eocene fine-grained sediments in oil shale- and coal-bearing layers of the Meihe Basin, northeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97 (A): 89-101.
- Bhatia, M. R., Crook, K. A (1986) Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins.

- Conditions at a Passive Continental Margin, *Geochemistry International*, 50: 777-790.
- Lee, Y (2009) Geochemistry of shales of the Upper Cretaceous Hayang Group, SE Korea: Implications for provenance and source weathering at an active continental margin: *Sedimentary Geology*, 215: 1-12.
- Liu, B., Wang, W., Su, X., Zheng, H (2013) Elemental geochemistry of northern slope sediments from the South China Sea: Implications for provenance and source area weathering since Early Miocene. *Chemie der Erde*, 73: 61-74.
- Louzon, A (2005) Oligocene-Miocene alluvial sedimentation northern Ebro basin, NE Spain, Tectonic control and paleogeographic evolution. *Sedimentary Geology*, 177: 19-39.
- Mahboubi, A., Moussavi-Harami, R., Lasemi, R., ernner, L (2001) Sequence stratigraphy and sea level history of the upper Paleocene strata in the Kopet-Dagh basin, northeastern Iran. *AAPG Bulletin*, 85: 839-860.
- McLennan, S. M., Hemming, S., McDaniel, D. K., Hanson, G. N (1993) Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. In: Johnsson, M. J., Basu, A. (Eds.), *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*, Geological Society of America Special Papers, 285: 21-40.
- Ming, M., Li, Ch., Chengfu, L., Chen, G., Yang, F., Zhang, G (2016) Geochemistry and provenance of a multiple-stage fan in the Upper Miocene to the Pliocene in the Yinggehai and Qiongdongnan basins, offshore South China Sea, *Marine and Petroleum Geology*, 79: 64-79.
- Moosavirad, S., Janardhana, M., Sethumadhav, M., Moghadam, M., Shankara, M (2011) Geochemistry of lower Jurassic shales of the Shemshak Formation, Kerman Province, Central Iran: Provenance, source weathering and tectonic setting. *Chemie der Erde*, 71: 279-288.
- Mortazavi, M., Mussavi-Harami, R., Mahboubi, A (2013) Detrital Mode and Geochemistry of the Shurijeh Formation (Late Jurassic-Early Cretaceous) in the Central and Western Parts of the Intracontinental Kopet-Dagh Basin, NE Iran: Implications for Provenance, Tectonic Setting and Weathering Processes. *Acta Geologica Sinica*, 87: 1058-1080.
- Moussavi-Harami, R (1993) Depositional history and paleogeography of lower Paleocene red bed in eastern Kopet-Dagh basin northeast Iran. *Journal of Science Islamic Republic of Iran*, 4 (2): 126-143.
- Moussavi-Harami, R. Brenner, R. L (1992) Geohistory analysis and petroleum reservoir characteristics of Lower Cretaceous (Neocomian) Sandstones, Eastern Kopet-Dagh Contributions to Mineralogy and Petrology, 92: 181-193.
- Cao, H., Guo, W., Shan, X., Ma, L., Sun, P (2015) Paleolimnological environments and organic accumulation of the Nenjiang Formation in the southeastern Songliao Basin. *China, Oil Shale*, 32 (1): 5-24.
- Cox, R., Lowe, D. R., Cullers, R. L (1995) The influence of sediment recycling and basement composition of evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 2919-2940.
- Dabard, M. P (1990) Lower Brioverian Formations (Upper Proterozoic) of the Armorican Massif (France): Geodynamic evolution of source areas revealed by sandstone petrography and geochemistry. *Sedimentary Geology*, 69: 45-58.
- Das, B. K., AL-Mikhlaifi, A. S., Kaur, P (2006) Geochemistry of Mansar Lake sediments, Jammu, India: Implication for source-area weathering, provenance, and tectonic setting. *Journal of Asian Earth Science*, 26: 649-668.
- Dutta, P. K., Suttner, L. J (1986) Alluvial sandstone composition and paleoclimate, I. Framework mineralogy. *Journal of Sedimentary Petrology*, 56: 329-345.
- Fedo, C. M., Nesbitt, H. W., Young, G. M (1995) Unrevealing the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23: 921-924.
- Jacobson, A. D., Blum, J. D., Chamberlain, C. P., Craw, D., Koons, P. O (2003) Climatic and tectonic controls on chemical weathering in the New Zealand Southern Alps. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37: 29-46.
- Jafarzadeh, M., Moussavi-Harami, R. M., Friis, H., Amini, A., Mahboubi, A. and Lenaz, D (2014) Provenance of the Oligocene-Miocene Zivah Formation, NW Iran, assessed using heavy mineral assemblage and detrital clinopyroxene and detrital apatite analyses. *Journal of African Earth Sciences*, 89: 56-71.
- Habicht, J. K. A (1979) Paleoclimate, Paleomagnetism, and Continental Drift. *American Association of Petroleum Geologists*, 9: 1-18.
- Hayashi, K. I., Fujisawa, H., Holland, H. D., Ohmoto, H (1997) Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61: 4115-4137.
- Khanehbad, M., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Nadjafi, A (2012) Geochemistry of Carboniferous Shales of the Sardar Formation, East Central Iran: Implication for Provenance, Paleoclimate and Paleo-oxygenation

- Wignall, P. B., Myers, K. J (1988) Interpreting the benthic oxygen levels in mudrocks, a new approach. *Geology*, 16: 452-455.
- Wang, L., Liu, Cg., Gao, X., Zhang, H (2014) Provenance and paleogeography of the Late Cretaceous Mengyejing Formation, Simao Basin, southeastern Tibetan Plateau: Whole-rock geochemistry, U-Pb geochronology, and Hf isotopic constraints. *Sedimentary Geology*, 304: 44-58.
- Zand-Moghadam, H., Moussavi-Harami, M., Mahboubi, A., Rahimi, B (2013) Petrography and Geochemistry of the Early-Middle Devonian sandstone of the padeha formation in the North of Kerman, SE Iran, Implication for provenance, *Boletin del Instituto de Fisiografia y Geologia*, 83: 1-14.
- Zhou, L., Friis, H., Poulsen, M (2015) Geochemical evaluation of the Late Paleocene and Early Eocene shales in Siri Canyon, Danish-Norwegian Basin, *Marine and Petroleum Geology*, 61: 111-122.
- Basin, Northeastern Iran, *AAPG Bulletin*, 76: 1200-1208.
- Nesbitt, H. W., Young, G. M (1982) Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299: 715-717.
- Ramezani O. R., Shahriari, S., Hafezi Moghadas, N., Omid. P., Eftekharnjad, J (2008) A model for Active tectonics in Kopet (North-East Iran). *World Applied Sciences Journal*, 3: 312-316.
- Rashid, S. A (2002) Chakrata Formation, Lesser Himalaya: implications for crustal evolution and weathering history in the Himalaya, *Journal of Asian Earth Sciences*, 21: 283-293.
- Robert, A. M. M., Letouzey, J., Kavooosi, M. A., Sherkati, S., Muller, C., Vergés, J., Aghababaei, A (2014) Structural evolution of the Kopeh Dagh fold-and-thrust belt (NE Iran) and interactions with the South Caspian Sea Basin and Amu Darya Basin. *Marine Petroleum Geology*, 57: 68-87.
- Roser, B. P., Korsch, R. J (1988) Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data, *Journal of Chemical Geology*, 67: 119-139.
- Saminpanya, S., Duangkrayom, J., Jintasakul, P., Hanta, R (2014) Petrography, mineralogy and geochemistry of Cretaceous sediment samples from western Khorat Plateau, Thailand, and considerations on their provenance. *Jornal Asian Earth Sciences*, 83: 13-34.
- Tao, C., Shan, Y., Tang, D., Li, S., Cui, Y (2016) Mineralogy, major and trace element geochemistry of Shichanggou oil shales, Jimusaer, Southern Junggar Basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 146: 432-445.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M. (1985) *The Continental Crust: its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford 312.
- Tole, M. P (1985) The kinetics of dissolution of zircon ( $ZrSiO_4$ ). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49: 453-458.
- Vosoughi Moradi, A., Sari, A., Akkaya, P (2016) Geochemistry of the Miocene oil shale (Hançili Formation) in the Çankırı-Çorum Basin, Central Turkey: Implications for Paleoclimate conditions, source-area weathering, provenance and tectonic setting. *Sedimentary Geology*, 341: 289-303.
- Wronkiewicz, D. J., Condie, K. C (1989) 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: 1537-1549.