

برخاستگاه شیل‌های سازند کشف‌رود در برش ناویا (باختر بجنورد) بر پایه داده‌های ژئوشیمیایی

ندا سرباز^۱، اسداله محبوبی^۲، رضا موسوی حرمی^۲ و محمد خانه‌باد^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۰۸

چکیده

حوضه رسوبی کپه‌داغ، پس از بسته شدن اقیانوس پالئوتتیس، در جنوب صفحه توران تشکیل شد. سازند کشف‌رود در برش ناویا (باختر بجنورد) با ستبرای ۷۴۹ متر از سنگ‌های سیلیسی آواری (کنگلومر، ماسه‌سنگ و شیل) تشکیل شده است. به منظور تفسیر برخاستگاه سازند کشف‌رود در برش مورد مطالعه، شیل‌های این سازند تجزیه ژئوشیمیایی شدند. این شیل‌ها غنی از کوارتز و کانی رسی (ایلیت و کلریت) هستند و نسبت به پوسته قاره‌ای بالایی (UCC)، تخلیه در میزان Sr و Na₂O، CaO، MgO، Cu، Nb و غنی‌شدگی در Co و Ni، U، Y، V را نشان می‌دهند. با رسم نمودارهای Al₂O₃ در برابر TiO₂، TiO₂ در برابر Zr و نمودارهای سه‌تایی (MgO+TiO₂+FeO)، (K₂O+Na₂O)، (SiO₂/20) و (FeO + MgO) (CaO + Na₂O + K₂O)، Al₂O₃ یک سنگ منشا آذرین حد واسط برای شیل‌های این سازند پیشنهاد می‌شود. CIA و PIA محاسبه شده بیانگر هوازنگی شیمیایی شدید و آب‌وهوای گرم و نیمه‌مرطوب در ناحیه منشأ است. نمودارهای تابعی با استفاده از اکسیدهای عناصر اصلی و SiO₂ در برابر K₂O/Na₂O و همچنین نمودار سه‌تایی (SiO₂/20)، (TiO₂+MgO+Fe₂O₃)، (Na₂O+K₂O) شیل‌های این سازند بیشتر در جایگاه قاره‌ای غیر فعال قرار می‌گیرند. بازسازی جغرافیای دیرینه برای این سازند در طی ژوراسیک میانی نشان می‌دهد که رسوب‌گذاری این سازند در یک حوضه درون قاره‌ای بزرگ که در حال فرونشینی بوده کنترل شده است و منشأ این رسوبات از سوی جنوب خاور حوضه کپه‌داغ بوده است.

کلیدواژه‌ها: ژئوشیمی، سنگ منشأ، موقعیت زمین‌ساختی، هوازنگی دیرین، سازند کشف‌رود.

***نویسنده مسئول:** اسداله محبوبی

E-mail: mahboubi@um.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

مطالعه برخاستگاه سنگ‌های رسوبی آواری، بررسی جغرافیای دیرینه است (Mondal et al., 2012). ترکیب رسوبات آواری وابسته به نوع سنگ‌های ناحیه منشأ، آب‌وهوا و پستی و بلندی است که همگی تحت کنترل زمین‌ساخت هستند (Armas et al., 2014; Mahavaraju, 2015). اگر چه با مطالعات سنگ‌نگاری می‌توان برخاستگاه سنگ‌های آواری را تفسیر کرد؛ اما مطالعات ژئوشیمیایی و استفاده از نمودارهای تفکیکی می‌تواند ابزار قدرتمندی برای تشخیص برخاستگاه این سنگ‌ها باشد (Khanehbad et al., 2012; Zand-moghadam et al., 2013). شیل‌ها به علت همگن و غیر قابل نفوذ بودن نسبت به سنگ‌نگاری ماسه‌سنگ‌ها، کاربرد بهتری در مطالعات ژئوشیمی برخاستگاه دارند (Cullers, 2000; Hessler and Lower, 2006; DaPeng et al., 2012). رسوبات سیلیسی آواری سازند کشف‌رود به سن باژوسین- باتونین نماینده اولین نگاهت‌های رسوبی در ناحیه کپه‌داغ است (Afshar-Harb, 1979; Madani, 1977) و به‌طور چیره از شیل، ماسه‌سنگ و کنگلومر و در یک محیط رودخانه‌ای-دلتایی تا دریایی بر جای گذاشته شده است (Taheri et al., 2009; Poursoltani et al., 2007). هدف از این پژوهش استفاده از داده‌های عنصری شیل‌های سازند کشف‌رود در تعیین برخاستگاه (تعبیر و تفسیر سنگ منشأ، محیط زمین‌ساختی و آب‌وهوای دیرین) و شرایط زمین‌شناسی حاکم بر ایران در طی زمان ژوراسیک میانی است.

۲- زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه در حوضه رسوبی کپه‌داغ (شمال خاور ایران) جای دارد (شکل ۱-ا). این حوضه پس از فرورانش اقیانوس پالئوتتیس به زیر صفحه توران، در اواخر تریاس و هم‌زمان با کوهزایی سیمیرین پیشین به وجود آمده است (Ramazani et al., 2008; Taheri et al., 2009; Wilmsen et al., 2009; Robert et al., 2014; Sardar Abadi et al., 2014). برش الگو این سازند توسط Madani (1977) در خاور روستای بیغوغ (در مسیر جاده مشهد به معدن زغال‌سنگ آق‌در بند) با ستبرای ۱۸۰۰ متر اندازه‌گیری شده است (آقاباتی، ۱۳۸۳). این سازند در نقاط مختلف به‌صورت ناپیوسته روی سنگ‌های

کهن‌تر یا چین‌خورده تریاس قرار گرفته است (Taheri et al., 2009). در این مطالعه سازند کشف‌رود در برش ناویا در ۵۹ کیلومتری باختر بجنورد و ۳۵ کیلومتری شمال باختر سنخواست و در عرض جغرافیایی ۲۱° ۳۷' شمالی و طول جغرافیایی ۴۲° ۵۶' خاوری بررسی شده است (شکل ۱-ب). این سازند در برش مورد مطالعه ۷۴۹ متر ستبرای دارد و بیشتر شامل سنگ‌های سیلیسی آواری (کنگلومر، ماسه‌سنگ و شیل) بوده (شکل ۱-ج) و به‌صورت ناپیوسته روی سنگ‌آهک‌های تریاس جای گرفته است. این ناپیوستگی بازتابی از فاز برخوردی میان صفحات ایران و توران است که در مرز تریاس-ژوراسیک رخ داده است و کنگلومرای قاعده نشانگر فرونشست و تشکیل یک حوضه رسوبی جدید (کشف‌رود) است (Fürsich et al., 2009b). سنگ‌های سیلیسی آواری سازند کشف‌رود به‌صورت تدریجی به مارن‌های خاکستری‌رنگ سازند چمن‌بید تبدیل می‌شود. رئوفیان (۱۳۹۳) بر پایه مطالعه آمونیت‌ها، سن باژوسین پسین را برای ابتدای چمن‌بید مشخص کرده و آن را سازند دلچای نام نهاده است؛ اما در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سنخواست (سهیلی و سهندی، ۱۳۷۵) سازند چمن‌بید معرفی شده است (شکل‌های ۲-ا و ۲-ب).

۳- روش کار

از برش ناویا در مجموع ۱۳۹ نمونه کنگلومر، ماسه‌سنگ و شیل برداشت شد که از این میان، ۱۲ نمونه شیل انتخاب شده‌اند که نشان‌دهنده کل برش مورد مطالعه است. میزان کربنات کلسیم در سیمان می‌تواند در نمونه‌ها خطا ایجاد کند؛ از این رو نمونه‌هایی انتخاب شده‌اند که کمترین مقدار کربنات کلسیم را دارند. سپس نمونه‌ها پس از پودر شدن توسط دستگاه فلورسانس پرتو ایکس (XRF) فیلیپس مدل Philips PW 1480 به منظور تعیین اکسیدهای اصلی و فرعی در آزمایشگاه تجزیه‌کنندگان کانسارهای بلورین آمتیس خاور تجزیه شدند. در مطالعات میکروسکوپی الکترونی (SEM) ۲ نمونه شیل در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد ابتدا در ابعاد کوچک شکسته و با روکش طلا پوشیده شد و سپس با میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل LEO 1450Vp (made in Germany) مجهز به تجزیه‌گر EDX مورد مطالعه قرار گرفت.

با ناحیه منشأ تفسیر کرده‌اند (Kalsbeek and Frei, 2010; Mishra and Sen, 2010; Moosavirad et al., 2011; Salehi et al., 2014). برای تمایز میان رسوباتی که منشأ اولیه آنها سنگ‌های آذرین مافیک، حد واسط یا فلیسیک و یا رسوباتی هستند که کوارتز دارند؛ نمودار متمایزکننده تابعی را پیشنهاد کرده‌اند (Roser and Korsch, 1988) که توابع مورد استفاده در این نمودار به صورت زیر است:

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

$$\text{Discriminant function 2} = (0.445 \times \text{TiO}_2\%) + (0.07 \times \text{Al}_2\text{O}_3\%) + (-0.25 \times \text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}\%) + (-1.142 \times \text{MgO}\%) + (0.432 \times \text{Na}_2\text{O}\%) + (1.426 \times \text{K}_2\text{O}\%) + (-6.861).$$

با رسم داده‌های اکسیدهای نمونه‌های مورد مطالعه بیشتر نمونه‌ها در محدوده آذرین حدواسط قرار می‌گیرند (شکل ۷-۱). از سوی دیگر رسم نمودار Al_2O_3 در برابر TiO_2 برای تعیین ترکیب سنگ منشأ (Scheiber, 1992) نشان‌دهنده ترکیب گرانودیوریتی و کمتر بازالتی است (شکل ۷-۲). ارتباط مثبت میان Zr و TiO_2 در این شیل‌ها در شکل ۷-۳ (Paikaray et al., 2008) بیانگر کنترل عنصر زیرکن توسط کانی‌های سنگین است و بیشتر یک سنگ با منشأ آذرین حد واسط را تأیید می‌کند. افزون بر این میانگین نسبت وزنی TiO_2 در برابر Zr ، ۶۰ بوده که نشان‌دهنده سنگ منشأ حد واسط است. رسم نمودار سه‌تایی $(\text{SiO}_2/20), (\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}), (\text{MgO}+\text{TiO}_2+\text{FeO})$ (Hayashi et al., 1997)؛ (شکل ۷-۴) نمونه‌های شیلی با یک روند خطی از آندزیت تا داسیت رسم شده‌اند، که بیانگر یک سنگ منشأ حدواسط است. همچنین نمودار $(\text{e}-\text{v})$ $\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - (\text{FeO} + \text{MgO})$ (Hayashi et al., 1997) قرارگیری نمونه‌ها در نزدیکی کانی رسی ایلیت و اسمکتیت را نشان می‌دهند. از این رو به‌طور کلی یک سنگ منشأ آذرین حد واسط برای شیل‌های سازند کشف‌رود پیشنهاد می‌شود.

۵-۲. هوازگی ناحیه منشأ

عواملی چون ترکیب سنگ مادر، مدت زمان هوازگی، شرایط آب‌وهوایی و زمین‌ساخت بر هوازگی شیمیایی سنگ منشأ تأثیرگذار است (Moosavirad et al., 2011). یکی از روش‌های تعیین درجه شیمیایی در سنگ‌های ناحیه منشأ استفاده از اندیس هوازگی شیمیایی (CIA: Chemical Index of Alteration) است (Nesbit and Young, 1982). میزان CIA در شیل‌های مورد مطالعه پراکندگی زیادی نشان نمی‌دهد و دارای میانگین ۷۸/۵ درصد است (جدول ۳). این اندیس بالا بازتابی از حذف کاتیون‌های ناپایدار (مانند پتاسیم، سدیم و کلسیم) نسبت به اجزای پایدار (مانند تیتانیم و آلومینیم) است (Araujo et al., 2010)؛ که نشان‌دهنده هوازگی شیمیایی بالا در ناحیه منشأ است. مقادیر به دست آمده نیز با مشاهدات سنگ‌نگاری ماسه‌سنگ‌های سازند کشف‌رود همخوانی دارد که بلوغ ترکیبی بالایی دارند و شامل کوارتزهای تک‌بلور و دانه‌های چرت گرد شده با کمی پلاژیو کلاز و فلدسپار پتاسیم هستند (سرباز و همکاران، ۱۳۹۴). روند هوازگی نمونه‌های مطالعه شده روی نمودار سه‌تایی C-N-K (Paikaray et al., 2008) با یک روند خطی از A-CN به سوی ایلیت گسترش یافته است (شکل ۸-۱). تعیین درجه دگرسانی پلاژیو کلازها در ناحیه منشأ توسط PIA (Plagioclase Index Of Alteration) به دست می‌آید. شیل‌های سازند کشف‌رود دارای PIA بالایی (میانگین ۸۳/۸) هستند (جدول ۳). از این رو تقریباً همه پلاژیو کلازهای سنگ منشأ در طی فرایند هوازگی و انتقال از بین رفته‌اند (Alvarez and Roser, 2007). در نمودار (A-K)-C-N (Fedo et al., 1997) بیشتر نمونه‌ها در محدوده وسط و سمت راست قرار گرفته‌اند. در شکل ۸-۲ وجود پلاژیو کلازهای لابرادوریت، آندزین و الیگو کلاز نشان می‌دهد آنها در نتیجه هوازگی به ایلیت تبدیل شده‌اند. اندیس تنوع ترکیبی (ICV: index of compositional variability) نیز برای تعیین هوازگی در ناحیه منشأ استفاده می‌شود و توسط فرمول $\text{ICV} = \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{t}) + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ به دست می‌آید. مقدار این اندیس با افزایش میزان هوازگی کاهش می‌یابد. اندیس

به منظور کانی‌شناسی و شناسایی فسیل‌ها ۱۰ نمونه پس از خیس کردن با آب و افزودن آب اکسیژنه، توسط الک ۲/۵ و ۴/۵ فی شسته، سپس خشک و سرانجام با میکروسکوپ دوچشمی مطالعه شده‌است. افزون بر این، برای تحلیل جریان دیرینه، ۴۴ سوی شیب و امتداد لایه‌بندی و لایه‌بندی مورب در مطالعات صحرایی قرائت شد (جدول ۴) و با استفاده از استریونت رسم و در پایان پس از اصلاح با استفاده از نمودار گل سرخی رسم گردیده‌است.

۴- نتایج

۴-۱. تجزیه اکسیدها

نتایج تجزیه شیل‌های سازند کشف‌رود در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده‌است. این شیل‌ها دارای ۵۹/۵ درصد SiO_2 ، ۱۸/۷۸ درصد Al_2O_3 ، ۰/۶ درصد Na_2O ، ۲/۰۸ درصد MgO ، ۲/۹۰ درصد K_2O ، ۱/۱۳ درصد TiO_2 ، ۰/۰۸ درصد MnO ، ۱/۱۱ درصد CaO ، ۰/۱ درصد P_2O_5 و ۶/۱۴ درصد Fe_2O_3 هستند. مقادیر نسبت‌های $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (۲/۳۳ تا ۳/۶۹)؛ میانگین ۲/۸۷ (درصد)، $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (۲/۸۴ تا ۷/۳۱)؛ میانگین ۵/۱۲ (درصد)، $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (۳/۱۵ تا ۴/۳۵)؛ میانگین ۳/۵۶ (درصد)، اندیس هوازگی شیمیایی $(\text{CIA} = \text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \times 100$) (۷۳/۳ تا ۸۳/۳)؛ میانگین ۷۸/۵ (درصد)، و نیز اندیس دگرسانی پلاژیو کلازها $(\text{PIA} = \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}) + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} \times 100$) (۸۱/۱ تا ۸۶/۵۶)؛ میانگین ۸۳/۸ (درصد) در شیل‌های مورد مطالعه به دست آمده و در جدول ۳ نشان داده شده‌است.

۴-۲. کانی‌شناسی

کانی‌های سازنده شیل‌های کشف‌رود در نمونه‌های مطالعه شده به ترتیب فراوانی شامل کوارتزهای زاویه‌دار تا نیمه‌زاویه‌دار، فلدسپار و کانی‌های ورقه‌ای (میکا و مسکوویت) هستند. همچنین مطالعه این شیل‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مجهز به تجزیه گر (EDX)، نشان‌دهنده وجود کوارتز (شکل‌های ۶-۲ و ۶-۳)، زیرکن و نیز کانی‌های رسی ایلیت و به میزان کمتر کلریت است (شکل‌های ۶-۴ و ۶-۵). ترکیب اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی شیل‌های کشف‌رود با ترکیب پوسته قاره‌ای بالایی (UCC) (Taylor and McLennan, 1985) بهنجار شده و در نمودارهای عنکبوتی رسم شده است (شکل‌های ۳-۱ و ۳-۲). بر این اساس شیل‌های سازند کشف‌رود نسبت به UCC، افت در میزان Nb ، Cu ، MgO ، CaO ، Na_2O ، Sr و غنی‌شدگی در میزان U ، Y ، V ، CO ، Ni برابر Al_2O_3 در شکل ۴ نشان داده شده‌است. Fe_2O_3 ، TiO_2 ، K_2O و MgO با Al_2O_3 و SiO_2 انطباق مثبت و Na_2O با Al_2O_3 انطباق منفی نشان می‌دهند. تخلیه کم Na_2O و CaO به تحرک زیاد این عناصر در طی هوازگی شیمیایی در پلاژیو کلازهای منشأ نسبت داده می‌شود (Rashid, 2002). افزون بر این، دانه‌های پلاژیو کلاز در طی مراحل اولیه هوازگی و در طی حمل‌ونقل زیادی از بین رفته‌اند (Nesbitt, 2003; Moosavirad et al., 2011; Wang et al., 2014). افزایش SiO_2 با کاهش Al_2O_3 ناشی از وجود کوارتز و بلوغ ترکیبی بالاست و Na_2O به علت حضور پلاژیو کلازهای سدیم‌دار در سنگ منشأ است (Das et al., 2006; Salehi et al., 2014). پیروی بیشتر اکسیدها از روند Al_2O_3 نشان‌دهنده تمرکز و فراوانی کانی‌های رسی همچون ایلیت است (Yong, 2009; Khanehbad et al., 2012). از آنجایی که عنصر تیتانیم بیشتر در سنگ‌های مافیکی آتشفشانی وجود دارد (Khanehbad et al., 2012) مقدار کم آن می‌تواند ناشی از مشتق شدن آنها از سنگ‌های حد واسط باشد. نمودار $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ در برابر $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ برای شیل‌های سازند کشف‌رود، نشان‌دهنده قرارگیری آنها در محدوده ترکیب شیل‌های فانروزوییک است (شکل ۵). کانی‌های رسی در این شیل‌ها کنترل‌کننده ترکیب عناصر اصلی است که با افزایش میزان سیلیس دقیق‌شدگی در آنها ایجاد می‌شود (Deru et al., 2007; Khanehbad et al., 2012).

۵- بحث

۵-۱. سنگ منشأ

بسیاری از پژوهشگران ترکیب شیمیایی سنگ‌های رسوبی سیلیسی آواری را در ارتباط

در یک حوضه درون قاره‌ای بزرگ و در حال فرونشینی رسوب گذاری کرده است (Wilmsen et al., 2009) (شکل ۱۱). تغییرات قابل توجه در ستبرای سازند کشف‌رود در بخش‌های مختلف کپه‌داغ به دلیل فعالیت‌های زمین‌ساختی همزمان با رسوب گذاری است و فرونشست حوضه توسط گسل‌هایی عادی کنترل می‌شود که امتداد شمال باختری- جنوب خاوری دارند (Poursoltani et al., 2007; Taheri et al., 2009). در خاور حوضه کپه‌داغ (آق‌دریوند) در حوضه‌های ژرف (بخش بالای سازند کشف‌رود) توسط جریان توربیدیت رسوب گذاری و با سازند مزدوران با سن ژوراسیک بالایی پوشیده شده است. در باژوسین تا باتونین هنگامی که البرز شمالی، کپه‌داغ و ایران مرکزی روی صفحه ایران تشکیل شد؛ رسوب گذاری دریایی آغاز و نهشته‌های سیلیسی آواری آغازین (گروه شمشک) با رسوب گذاری کربنات‌های مارنی (سازند دلچجای) دنبال می‌شود که احتمالاً نشان‌دهنده نرخ پایین فرونشینی است (Fürsich et al., 2009a). موقعیت بلوک ایران در این زمان (ژوراسیک میانی) در بخش شمالی اقیانوس نوتتیس و بخش جنوب صفحه توران و نیز در عرض جغرافیایی میان ۲۵ تا ۳۰ درجه شمالی (Thierry, 2000) و در محدوده آب‌وهوای گرم و نیمه‌مرطوب قرار گرفته است (شکل ۱۱- a). اندیس هوازدگی شیمیایی (CIA) بالای شیل‌های سازند کشف‌رود، اندیس تنوع ترکیبی (ICV) این شیل‌ها که کمتر از یک است و نیز وجود آثار گیاهی در منطقه بر آن تأکید دارد. رسم نمودارهای تفکیکی برای رسوبات کشف‌رود نشان می‌دهد که این رسوبات از سنگ‌های کهن تر که در طی کوهزایی بالا آمده‌اند و همچنین سنگ‌های آذرین حد واسط مشتق شده‌اند و با مطالعات سنگ‌نگاری ماسه‌سنگی بر پایه رسم نمودارهای سه‌تایی (Dickinson et al., 1983) همخوانی دارند که حاشیه غیر فعال قاره‌ای و بلوغ ترکیبی بالا را نشان می‌دهند (سرباز و همکاران، ۱۳۹۴). با توجه به تحلیل داده‌های جریان‌های دیرینه (Paleocurrent) (جدول ۴) که سوی شمال- شمال باختری (شکل ۱۲) را برای رسوبات رودخانه‌ای و دلتایی در آن زمان نشان می‌دهد؛ منشأ این رسوبات از سنگ‌های آواری کهن تر از زمان ژوراسیک در نظر گرفته می‌شود که از سوی جنوب- جنوب خاور کپه‌داغ و طی مسافتی به محل ته‌نشینی حمل شده‌اند که با این نتایج (Poursoltani et al., 2007; Taheri et al., 2009) نیز همخوانی دارد.

۷- برداشت

در این مطالعه، شیل‌های سازند کشف‌رود به سن ژوراسیک میانی در برش ناویا، باختر بجنورد برای تفسیر برخاستگاه مورد آنالیز ژئوشیمی عناصر اصلی و فرعی قرار گرفته‌اند. شیل‌های سازند کشف‌رود نسبت به UCC، تهی‌شدگی در میزان Sr, Nb, Cu, MgO, CaO, Na₂O, Ni, Y, V, CO₂ و غنی‌شدگی در U و Y, V, CO₂ را نشان می‌دهند. این مطالعه نشان می‌دهد که سنگ‌های منشأ سازند کشف‌رود از انواع سنگ آذرین حدواسط است. شرایط آب‌وهوایی و هوازدگی در ناحیه برخاستگاه نشان از هوازدگی به نسبت شدید و مرتبط با آب‌وهوایی گرم و نیمه‌مرطوب و قرار داشتن ایران در زمان ژوراسیک میانی در عرض جغرافیایی تقریباً ۲۵ تا ۳۰ درجه شمالی دارد که این موقعیت نتایج بالا را تأیید می‌کند. در بررسی جایگاه زمین‌ساختی بیشتر نمونه‌ها در موقعیت حاشیه قاره‌ای غیر فعال با چرخه کوهزایی دوباره قرار گرفته‌اند و منشأ رسوبات کشف‌رود از سنگ‌های آواری کهن تر از ژوراسیک در جنوب- جنوب خاور حوضه پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

از جناب آقای دکتر نارام بایت‌گل برای کمک‌های فراوانشان در معرفی سازند کشف‌رود، از گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد به سبب فراهم کردن امکانات مورد نیاز برای انجام این مطالعه (طرح مصوب شماره ۳ کد ۳۳۸۳۹۴ دانشگاه) و همچنین از داوران محترم این مقاله برای حسن توجه و نظرات ارزنده‌شان در ارتقای سطح علمی این مقاله سپاسگزاری می‌شود.

بیشتر از ۱ بیانگر شیل‌های نابالغ همراه با درصد بالای کانی‌های سیلیکاته و بدون کانی‌های رسی است؛ در حالی که برای سنگ‌های رسی بالغ با کانی رسی فراوان این اندیس کمتر از ۱ است (Cox et al., 1995). میانگین ICV به دست آمده برای شیل‌های سازند کشف‌رود ۰/۷۵ است که نشان‌دهنده سنگ‌های رسی بالغ و دارای کانی‌های رسی احتمالاً از نوع ایلیت است. رسم نمودار ICV در برابر CIA نشان می‌دهد که شیل‌های سازند کشف‌رود با این درجه از هوازدگی از سنگ‌های آذرین حد واسط منشأ گرفته‌اند (شکل ۹).

۵-۳. جایگاه زمین‌ساختی

به تازگی مطالعات زیادی در ایران برای برقراری ارتباط میان ترکیب سنگ‌های سیلیسی آواری و وضعیت زمین‌ساختی ناحیه برخاستگاه صورت گرفته است (Moosavirad et al., 2011; Khanehbad et al., 2012; Nowrouzi et al., 2013; Zand-moghadam et al., 2013; Jafarzadeh et al., 2014; Salehi et al., 2014). استفاده از داده‌های سنگ‌نگاری و ژئوشیمی نشان می‌دهد هر موقعیت زمین‌ساختی، ترکیب کانی‌شناسی و شیمیایی متفاوتی دارد (Ziad and Gahtani, 2015). نمودار K₂O/Na₂O در برابر SiO₂ (Roser and Korsch, 1988) کاهش روند کانی رسی همراه با افزایش سیلیس در ارتباط با یک موقعیت زمین‌ساختی حاشیه غیر فعال با مقدار بسیار جزئی فعال را نشان می‌دهد (شکل ۱۰- a). با توجه به نمودار تابعی ارائه شده توسط Bhatia (1983) شیل‌های کشف‌رود در جایگاه غیر فعال زمین‌ساختی قرار دارند (شکل ۱۰- b). توابع مورد استفاده در این نمودار به صورت زیر به دست می‌آید:

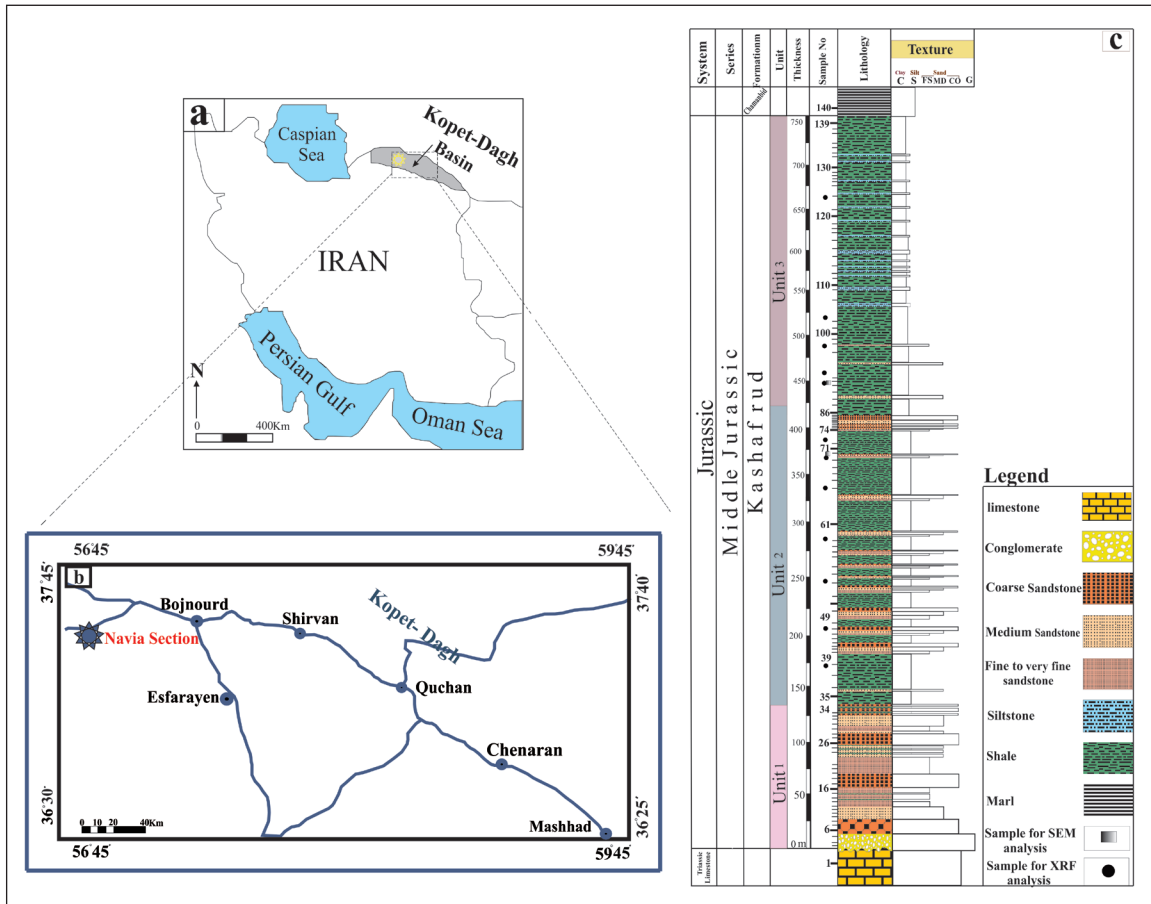
$$\text{Discriminant function 1} = (-0.0447 \times \text{SiO}_2\%) + (-0.972 \times \text{TiO}_2\%) + (0.008 \times \text{Al}_2\text{O}_3\%) + (-0.267 \times \text{Fe}_2\text{O}_3\%) + (0.208 \times \text{FeO}\%) + (-3.082 \times \text{MnO}\%) + (0.140 \times \text{MgO}\%) + (0.195 \times \text{CaO}\%)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

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

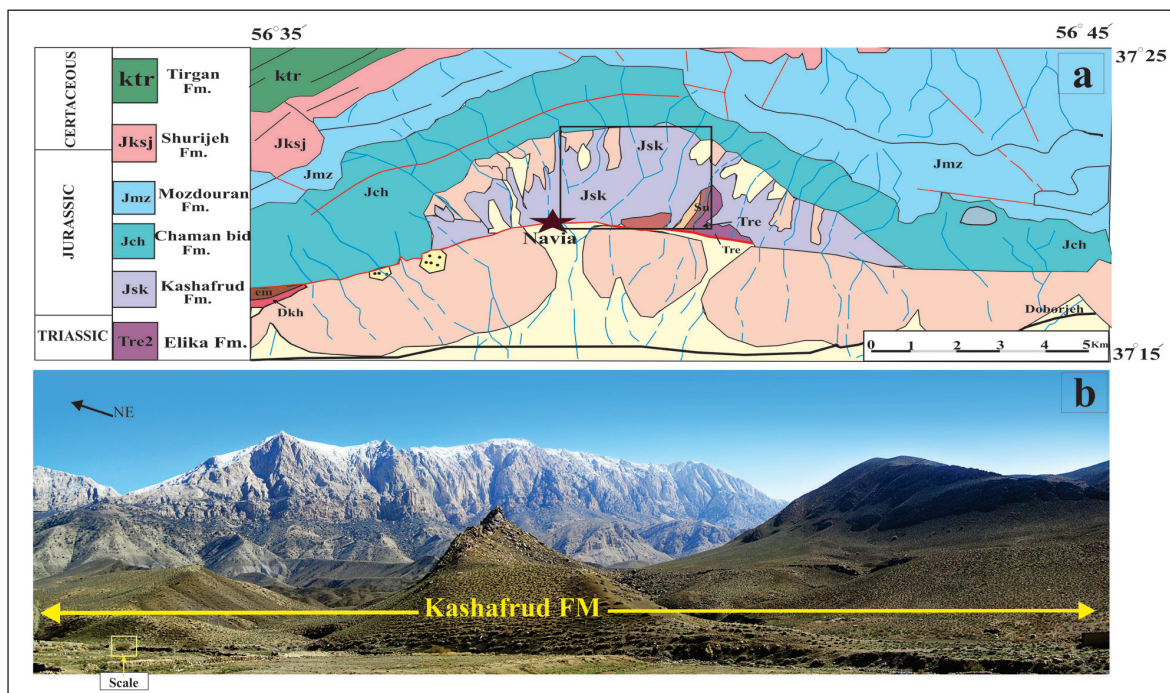
با قرار دادن داده‌های ژئوشیمیایی عناصر اصلی روی نمودار سه تایی (Kroonenberg, 1994) (شکل ۱۰- c)؛ TiO₂ + MgO + Fe₂O₃ / Na₂O + K₂O + SiO₂ / 20 شیل‌های سازند کشف‌رود در محدوده قاره‌ای غیر فعال قرار می‌گیرند. بنابراین مطالعه شیل‌های سازند کشف‌رود نشان‌دهنده حمل و نقل اجزای تشکیل‌دهنده آنها تا محل ته‌نشست پایانی در حوضه رسوبی کپه‌داغ و همچنین هوازدگی شدید تحت شرایط به نسبت پایدار زمین‌ساختی در ناحیه برخاستگاه است که اجزای ناپایدار در اثر طی کردن مسافت طولانی و هوازدگی شدید از بین رفته‌اند.

۶- جغرافیای دیرینه

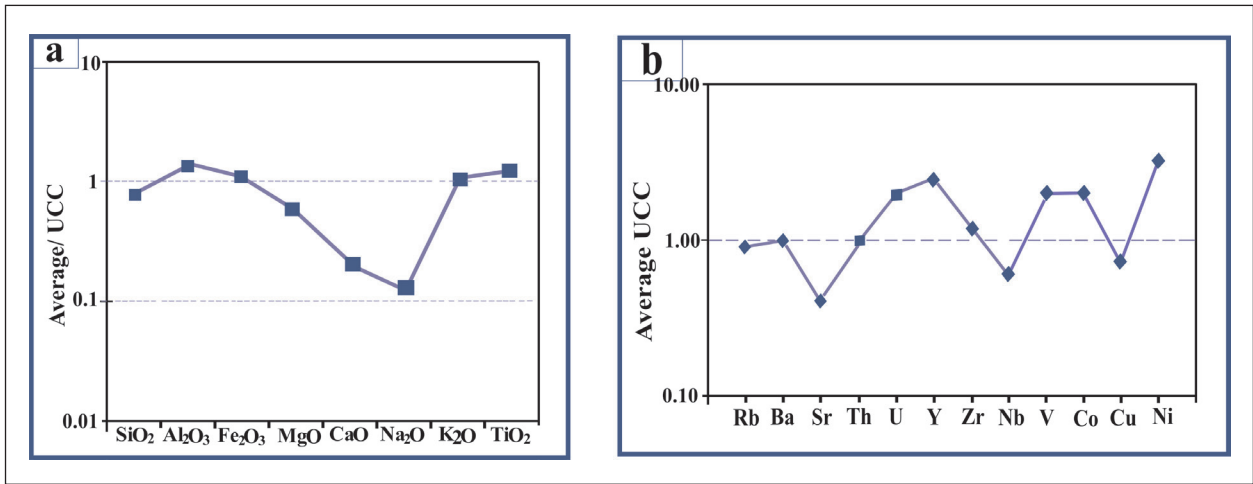
بسته شدن اقیانوس پالئوتتیس در شمال ایران به دلیل حرکات کوهزایی سیمیرین پیشین را می‌توان به عنوان یک گام ساختاری مهم به شمار آورد که این خط درز میان البرز، کپه‌داغ و کوه‌های بینالود قرار دارد (Aghaei et al., 2012; Parent et al., 2014). افزون بر این، رویداد کوهزایی سیمیرین میانی که تقریباً در حدود مرز باژوسین است؛ سبب چینه‌شناسی، فعالیت ماگمایی و دگرگونی نسبی در بخش‌های مختلف ایران شده است (Fürsich et al., 2009a and b). بخش گسترده‌ای از ایران که شامل خردقاره ایران مرکزی و خاوری، شمال باختر ایران و کوه‌های البرز است، صفحه ایران را تشکیل می‌دهد. از زمان ژوراسیک حوضه کپه‌داغ باختری همراه با حوضه کاسپین جنوبی در حال فرونشینی و در این مدت دو حوضه به هم مرتبط بوده‌اند. در دوران تریاری در ناحیه کپه‌داغ و البرز بالاآمدگی رخ می‌دهد؛ اما حوضه کاسپین جنوبی همچنان در حال فرونشینی بوده است و ارتباط این دو حوضه قطع می‌شود (پورتقوی و همکاران، ۱۳۹۰). به‌طور کلی سازند کشف‌رود



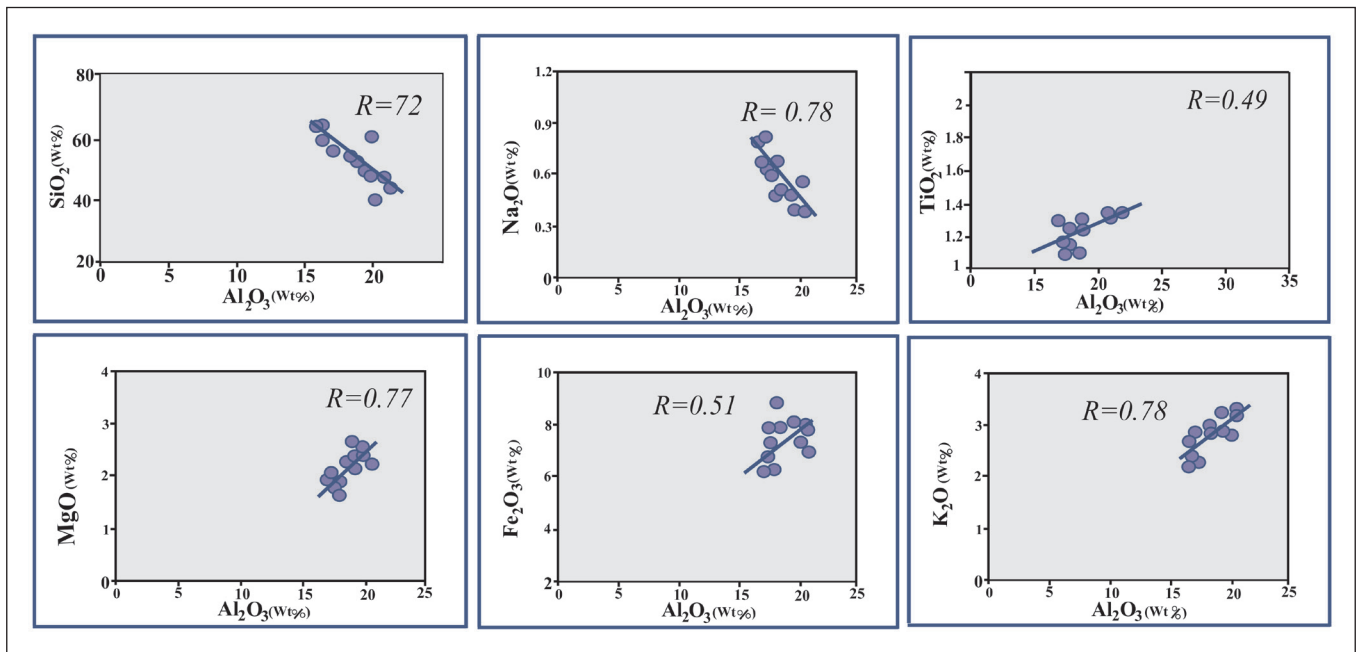
شکل ۱- (a) موقعیت ناحیه مورد مطالعه (ستاره) و حوضه رسوبی کپه‌داغ در شمال خاور؛ (b) راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه (c) ستون چینه‌سنگی سازند کشف‌رود.



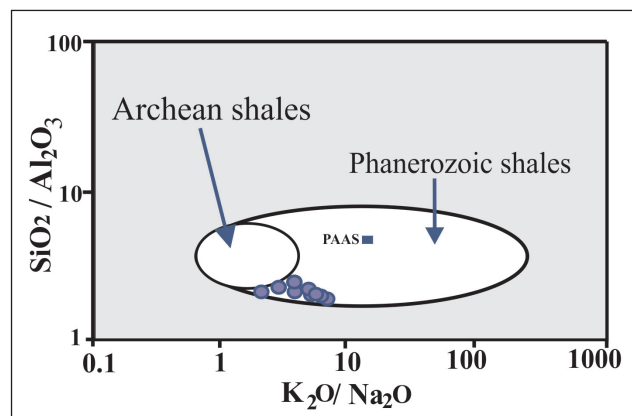
شکل ۲- (a) بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سنخواست که در آن سازند کشف‌رود مشخص شده است (سهیلی و سهندی، ۱۳۷۵)؛ (b) تصویر سراسرنما از سازند کشف‌رود در برش ناویا (دید به سوی خاور) و ارتفاع بوته در بخش چپ تصویر نیم متر است.



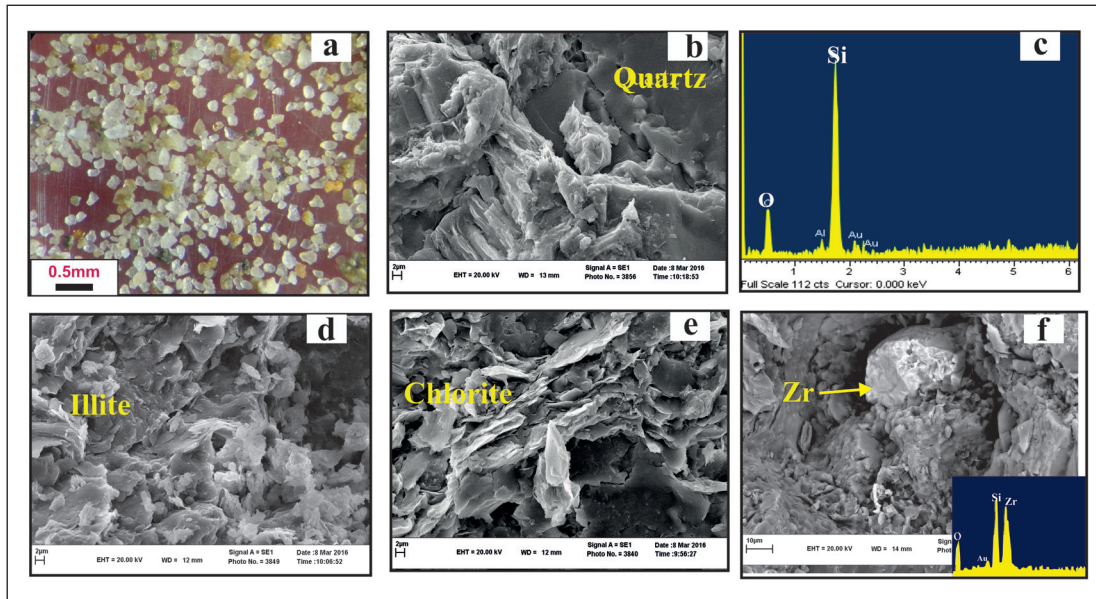
شکل ۳- مقایسه میانگین: (a) اکسیدهای اصلی و (b) عناصر فرعی در نمونه‌های شیلی سازند کشف‌رود نسبت به پوسته قاره‌ای بالایی (Taylor and McLennan, 1985).



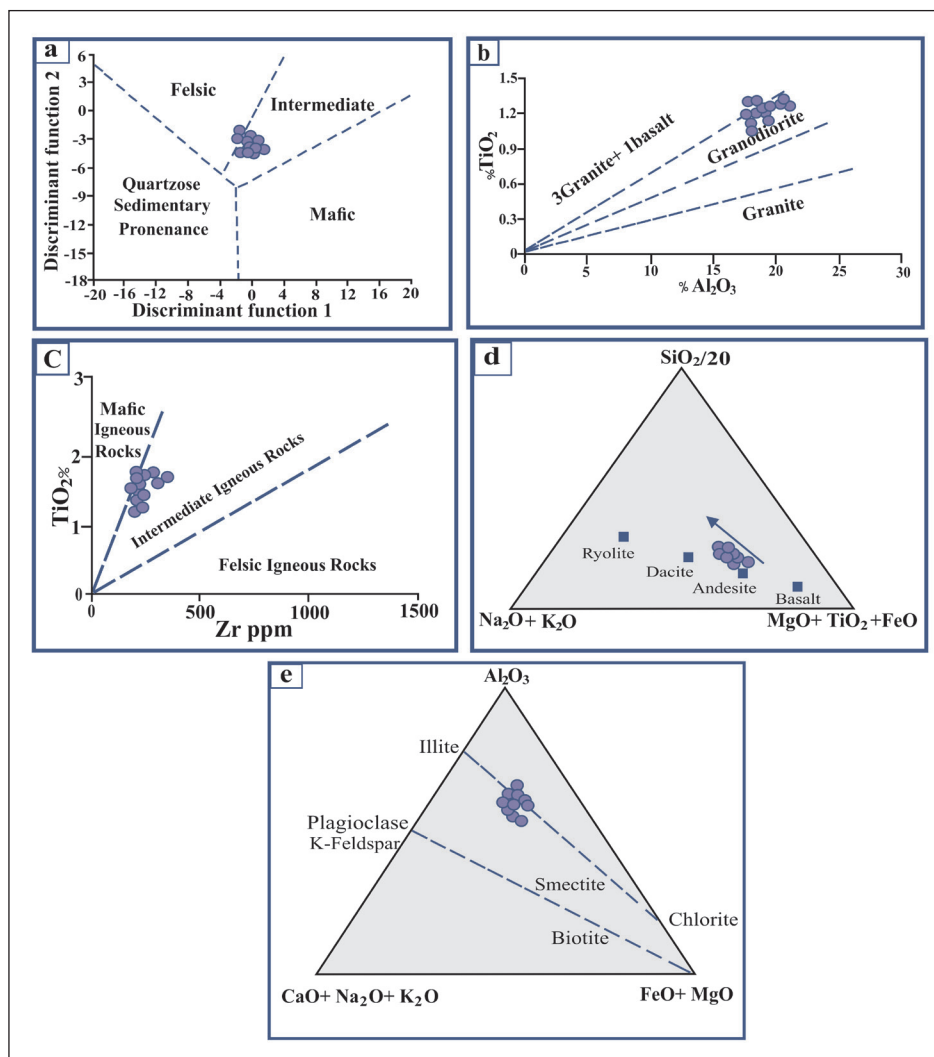
شکل ۴- نمودارهای پراکنندگی تغییرات اکسیدهای اصلی نسبت به Al_2O_3 در شیل‌های سازند کشف‌رود.



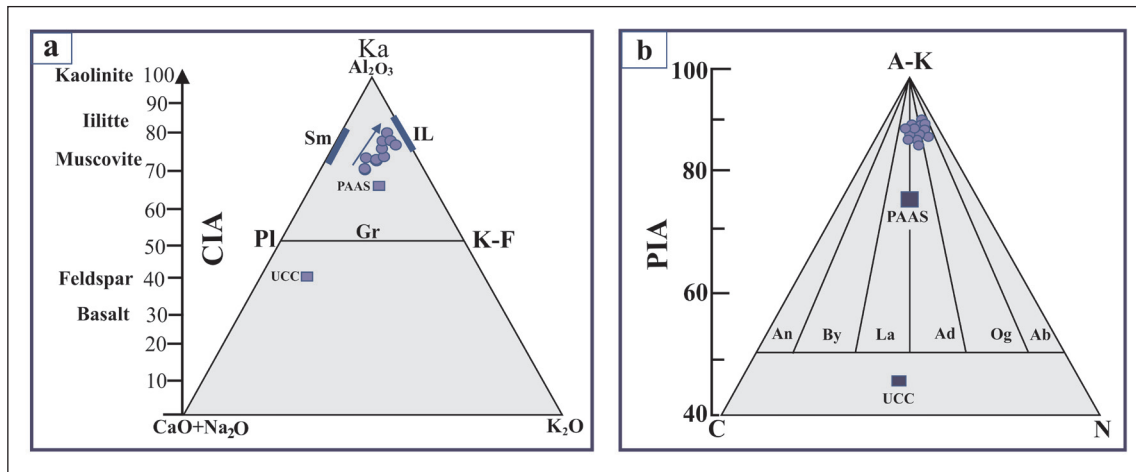
شکل ۵- نمودار K_2O/Na_2O در برابر SiO_2/Al_2O_3 برای شیل‌های سازند کشف‌رود (Wronkiewicz and Condie, 1987).



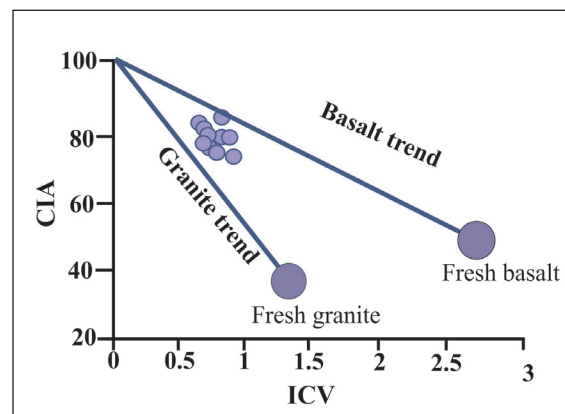
شکل ۶- (a) تصویر میکروسکوپی بلورهای کوارتز زاویه‌دار و نیمه‌زاویه‌دار؛ (b) تصویر SEM از دانه کوارتز؛ (c) تجزیه EDX از دانه کوارتز در تصویر (b)؛ (d) تصویر SEM از کانی‌های رسی ایلیت؛ (e) تصویر SEM از کانی‌های رسی کلریت؛ (f) تصویر SEM به همراه تجزیه EDX از کانی سنگین (زیرکن).



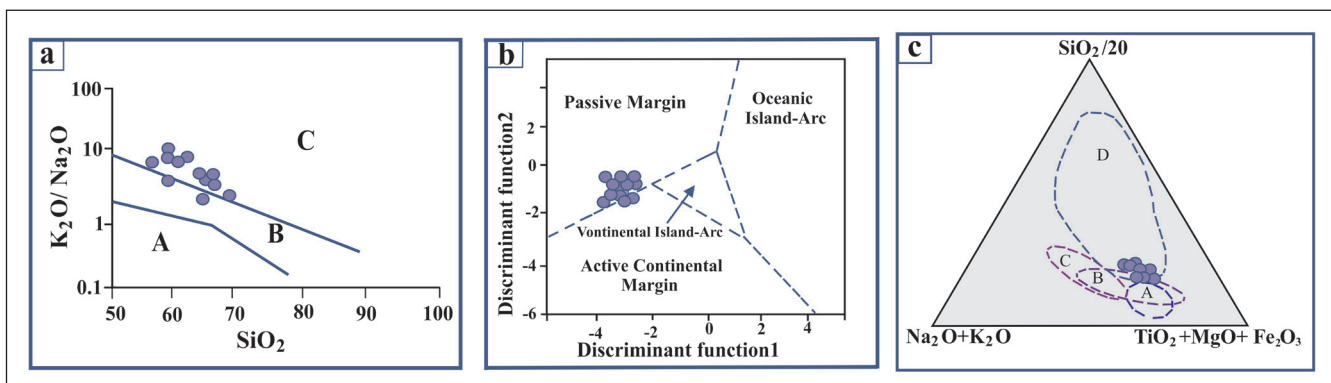
شکل ۷- (a-v) نمودار تابعی مشخص‌کننده برخاستگاه شیل‌های سازند کشف‌رود با استفاده از اکسیدهای عناصر اصلی (Roser and Korsch, 1988)؛ (b) نمودار Al_2O_3 در برابر TiO_2 (Scheiber, 1992)؛ (c) نمودار TiO_2 در برابر Zr (Paikaray et al., 2008)؛ (d) نمودار سه‌تایی Al_2O_3 , $(CaO+Na_2O+K_2O)$, $(FeO+MgO)$ ؛ (e) نمودار سه‌تایی $(SiO_2/20)$, (K_2O+Na_2O) , $(MgO+TiO_2+FeO)$ (Hayashi et al., 1997) (Hayashi et al., 1997).



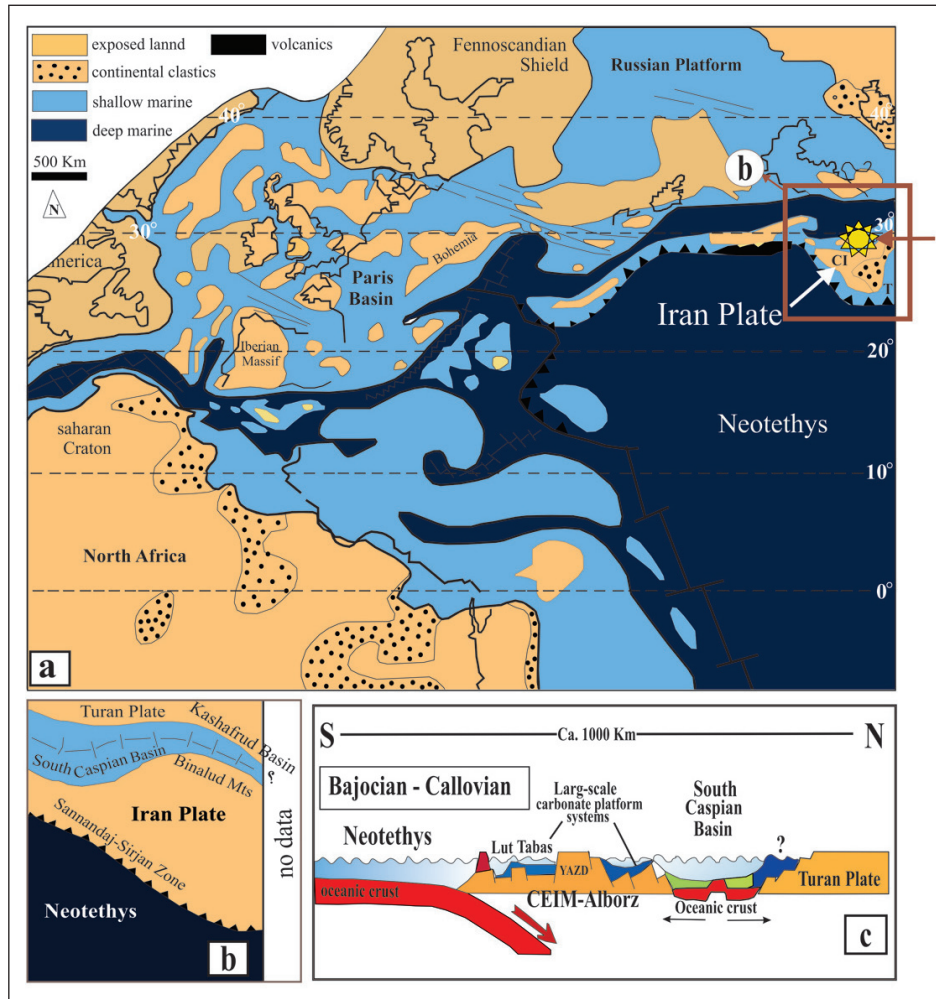
شکل ۸- نمودارهای مثلثی هوازدگی برای شیل‌های سازند کشف‌رود؛ (a) نمودار سه‌تایی A- CN- K (Ka: Kaolinite, Sm: Smectite, Il: Illite; Gr: Granite,) (Fedo et al., 1997)؛ (b) نمودار سه‌تایی A-K- C- N (A-K= $Al_2O_3-K_2O$; C= CaO; N= Na_2O) (Paikaray et al., 2008)؛ (PI: Plagioclase, K-F: K-Feldspar؛ نشانه‌های اختصاری: PAAS؛ UCC)



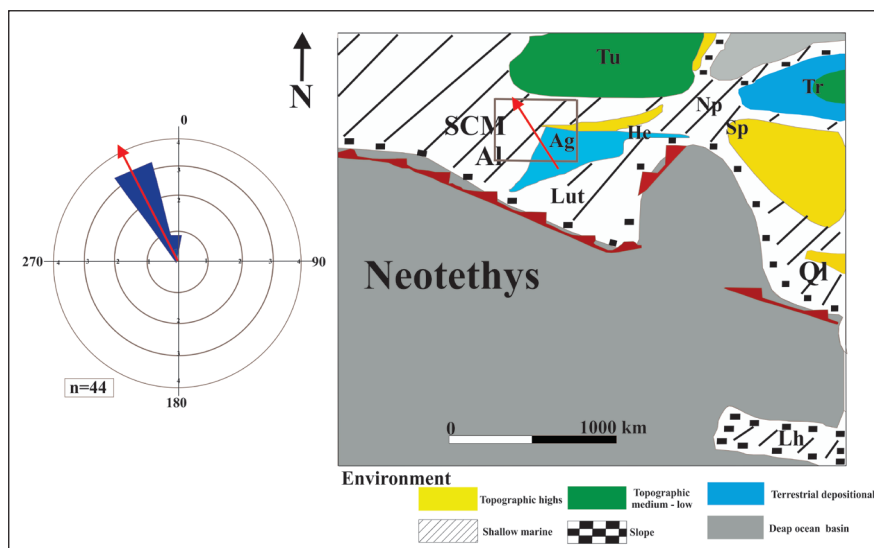
شکل ۹- نمودار CIA در برابر ICV برای شیل‌های سازند کشف‌رود (Lee, 2002).



شکل ۱۰- نمودارهای مشخص کننده موقعیت زمین‌ساختی شیل‌های سازند کشف‌رود؛ (a) نمودار K_2O/Na_2O در برابر SiO_2 (Roser and Korsch, 1988)؛ (b) نمودار تبعی با استفاده از اکسیدهای عناصر اصلی؛ (c) نمودار سه‌تایی $(SiO_2/20)$, $(Na_2O+ K_2O)$, $(TiO_2+MgO+ Fe_2O_3)$ (Kroonenberg, 1994)؛ (Bhatia, 1983)؛ نشانه‌های اختصاری: A: Oceanic island arc؛ B: Active continental margin؛ C: Passive margin continental؛ D: Passive continental margin.



شکل ۱۱- (a) موقعیت جغرافیای دیرینه و صفحات زمین‌ساختی ایران در طول زمان ژوراسیک میانی که در آن عرض‌های جغرافیایی دیرینه نشان داده شده است (برگرفته با تغییرات از Thierry, 2000)؛ نشانه‌های اختصاری: Tb: Tabas, Ya: Yazd, (برگرفته از Fürsich et al., 2009a)؛ (c) موقعیت ژئودینامیکی ایران در زمان باژوسین-کالوین (برگرفته با تغییرات از Wilmsen et al., 2009). نشانه‌های اختصاری: CEIM, Central- East Iranian Microcontinent.



شکل ۱۲- نقشه جغرافیای دیرینه در زمان ژوراسیک میانی که روی آن موقعیت ایران همراه با نمودار گل‌سرخ جهت جریان دیرینه رسم شده (برگرفته با تغییرات از Golonka, 2004)؛ نشانه‌های اختصاری: Ag: Aghdarband (southern Kopet Dagh), Al: Alborz, He Herat, Np: North Pamir, SP: South Pamir, Tr: Transcaucasus, Tu: Turan

جدول ۱- نتایج تجزیه اکسیدهای اصلی شیل‌های سازند کشف‌رود (wt %).

Sample No.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	MnO	CaO	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	SO ₃	LOI
N-Ka39	57.96	18.88	0.68	2.20	2.92	1.30	0.08	1.07	0.13	6.97	0.00	7.63
N-Ka47	62.62	16.94	0.82	1.92	2.33	1.28	0.05	2.28	0.12	4.65	0.00	6.80
N-Ka54	64.65	17.55	0.88	1.87	2.51	1.33	0.05	0.55	0.09	4.92	0.00	5.44
N-Ka60	56.49	20.34	0.45	2.18	3.22	1.31	0.06	0.57	0.09	6.98	0.00	8.12
N-Ka65	56.04	20.47	0.45	2.16	3.29	1.30	0.09	0.61	0.09	3.84	0.00	8.48
N-Ka70	56.94	19.75	0.47	2.26	2.96	1.22	0.07	1.29	0.09	6.32	0.52	7.92
N-Ka73	60.62	20.40	0.59	2.34	2.90	1.31	0.05	0.45	0.11	5.84	0.00	5.21
N-Ka90	54.12	18.96	0.50	2.37	3.05	0.22	0.07	2.19	0.12	8.23	0.00	8.85
N-Ka92	57.52	19.70	0.51	2.15	3.29	1.17	0.18	0.51	0.12	7.20	0.00	7.50
N-Ka98	60.10	17.82	0.61	1.85	2.96	1.11	0.13	1.21	0.11	7.00	0.00	6.92
N-Ka 102	62.94	17.44	0.65	1.77	2.61	1.09	0.08	0.86	0.10	6.27	0.00	6.02
N-Ka123	61.75	17.04	0.66	2.00	2.85	1.02	0.07	1.76	0.12	5.54	0.04	7.01

جدول ۲- نتایج تجزیه عناصر فرعی شیل‌های سازند کشف‌رود (ppm).

Sample No.	Ba	Co	Cr	Cu	Nb	Ni	U	Th	Ce	Cl	Pb	Rb	Sr	V	Y	Zr	Zn	Mo
N-Ka39	360	22	245	12	15	67	5	10	33	158	102	97	167	109	109	232	114	29
N-Ka47	246	12	135	11	16	45	2	9	42	55	194	73	202	96	47	372	157	28
N-Ka54	318	18	143	22	13	70	5	9	58	56	102	78	120	95	52	280	71	28
N-Ka60	487	20	170	35	15	84	10	10	92	141	109	121	156	128	56	215	120	29
N-Ka65	444	20	159	25	17	70	7	18	78	15	107	125	161	127	60	209	118	30
N-Ka70	371	21	154	11	19	84	5	13	144	22	106	121	160	123	54	224	108	30
N-Ka79	412	19	237	21	16	68	9	13	71	35	98	102	125	118	54	235	99	29
N-Ka90	411	25	192	25	18	73	2	4	125	35	97	112	169	132	53	199	129	29
N-Ka92	427	28	155	18	17	69	8	10	85	33	102	128	149	129	58	182	112	29
N-Ka98	516	19	118	17	13	66	10	11	119	59	99	110	131	109	54	206	99	28
N-Ka 102	498	19	110	15	17	46	3	19	16	18	103	96	115	106	52	235	97	30
N-Ka123	336	19	383	9	16	52	2	7	89	72	104	104	169	98	55	213	109	28

جدول ۳- تمرکز عناصر اصلی و نسبت‌های عناصر در شیل‌های سازند کشف‌رود.

Sample No	CIA	PIA	ICV	Al ₂ O ₃ /SiO ₂	K ₂ O/Na ₂ O	K ₂ O+Na ₂ O
N-Ka54	79.2	85.5	0.68	3.68	2.85	3.39
N-Ka39	78.2	83.9	0.80	3.06	4.29	3.6
N-Ka47	74.3	80.2	0.78	3.69	2.84	3.15
N-Ka98	75.3	82.9	0.82	3.37	4.85	3.57
N-Ka123	73.3	81.1	0.80	3.62	4.31	3.51
N-Ka60	83.3	85.5	0.72	2.77	7.15	3.67
N-Ka92	81.9	84.75	0.75	2.91	6.45	3.8
N-Ka102	79.5	84.7	0.75	3.60	4.01	3.26
N-Ka65	82.47	85.2	0.71	2.73	7.31	4.35
N-Ka70	79.5	82.1	0.73	2.97	4.91	3.43
N-Ka79	82.5	84.9	0.65	2.88	6.29	3.49
N-Ka90	75.6	86.56	0.92	2.85	6.1	3.55
Average	78.5	83.8	0.75	2.87	5.12	3.56

جدول ۴- مقادیر به دست آمده از خوانش ۴۴ امتداد و شیب لایه و لایه‌بندی‌های مورب در ماسه‌سنگ‌های سازند کشف‌رود در برش ناویا.

No	Bedding	Sedimentary Structures	Modified Sedimentary Structures	No	Bedding	Sedimentary Structures	Modified Sedimentary Structures
1	N240, 35NW	N350, 2	N355, 36	23	N240, 35NW	N352, 38	N352, 38
2	N215, 45NW	N320, 15	N340, 38	24	N220, 40 NW	N308, 21	N310, 58
3	N240, 35NW	N350, 2	N355, 36	25	N245, 45NW	N345, 6	N345, 48
4	N240, 40NW	N350, 2	N357, 38	26	N250, 38 NW	N315, 20	N300, 50
5	N240, 35NW	N350, 2	N355, 36	27	N210, 45NW	N305, 6	N305, 50
6	N240, 35NW	N350, 2	N355, 36	28	N240, 45NW	N320, 10	N345, 50
7	N220, 42NW	N338, 6	N340, 42	29	N245, 45 NW	N330, 25	N330, 58
8	N245, 45NW	N345, 6	N355, 48	30	N245, 45 NW	N330, 25	N330, 58
9	N220, 45NW	N325, 8	N330, 50	31	N220, 35NW	N340, 15	N350, 32
10	N252, 51NW	N344, 10	N345, 60	32	N240, 45NW	N320, 10	N345, 50
11	N235, 45NW	N340, 6	N350, 48	33	N240, 45NW	N320, 10	N345, 50
12	N220, 40NW	N325, 8	N335, 46	34	N260, 35NW	N320, 6	N310, 38
13	N230, 35NW	N340, 18	N350, 50	35	N200, 44NW	N340, 10	N355, 26
14	N240, 35NW	N348, 6	N352, 38	36	N220, 40 NW	N310, 4	N310, 34
15	N245, 45NW	N345, 6	N355, 48	37	N260, 38NW	N310, 4	N300, 20
16	N200, 50NW	N345, 6	N358, 30	38	N230, 50NW	N310, 2	N305, 48
17	N252, 51NW	N344, 10	N345, 60	39	N260, 40NW	N320, 4	N318, 4
18	N210, 51NW	N300, 25	N299, 76	40	N230, 40NW	N320, 12	N340, 50
19	N220, 40NW	N308, 21	N310, 58	41	N235, 40NW	N330, 14	N330, 54
20	N240, 52NW	N316, 8	N305, 54	42	N220, 40NW	N340, 15	N355, 46
21	N240, 52NW	N235, 28	N235, 28	43	N235, 35NW	N335, 8	N340, 44
22	N230, 50NW	N310, 20	N310, 20	44	N238, 45NW	N340, 6	N345, 48

کتابنگاری

- آقاباتی، س.ع.، ۱۳۸۳- زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، شماره ۱، ۵۸۶ ص.
- پورتقوی، ا.ن.، پورکرمانی، م.، قرابایگی، غ.ر. و شرکتی، ش.، ۱۳۹۰- الگوی چین‌خوردگی در بخش باختری کمربند چین‌خورده کپه‌داغ (شمال‌خاور ایران)، علوم زمین، شماره ۹۱، صص. ۱۵۳ تا ۱۶۰.
- رفوفیان، ا.، ۱۳۹۳- بررسی ردیف‌های رسوبی ژوراسیک میانی تا بالائی در حوضه‌ی ساختاری- رسوبی بینالود بر مبنای مطالعات چینه‌شناسی، فسیل‌شناسی (زیای آمونیتی) و محیط-رسوبی، پایان‌نامه دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، ۴۱۹ ص.
- سرباز، ن.، محبوبی، ا.، موسوی حریمی، ر. و خانه‌باد، م.، ۱۳۹۴- برخاستگاه ماسه‌سنگ‌های سازند کشف‌رود (ژوراسیک میانی) در برش ناویا (غرب بجنورد)، سی و چهارمین گردهمایی و دومین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین.
- سهیلی، م. و سهندی، م.، ۱۳۷۵- نقشه زمین‌شناسی سنخواست به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

References

- Afshar-Harb, A., 1979- The stratigraphy, tectonics and petroleum geology of the Kopet Dagh Region, northern Iran. Unpublished Ph.D. thesis. Imperial College of Science and Technology, University of London, London, England 316p.
- Aghaei, A., Mahboubi, A., Moussavi-Harami, R., Heubeck, C. and Nadjafi, A., 2012- Facies analysis and sequence stratigraphy of an Upper Jurassic carbonate ramp in the Eastern Alborz range and Binalud Mountains, NE Iran, *Facies* 59: 863- 889.
- Alvarez, N. M. and Roser, B. P., 2007- 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 :271–289.
- Araujo, C. E. G., Pineo, T. R. G., Caby, R., Costa, F. G., J. C., Vasconcelos, A. M. and Rodrigues, J. B., 2010- 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: 497-513.

- Armas, P., Moreno, C., Sánchez, M. L. and González, F., 2014- 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: 59-76.
- Bhatia, M. R., 1983- Plate tectonics and geochemical composition of sandstones, *Geology* 91: 611–626.
- Cox, R., Lower, D. R. and 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.
- Cullers, R. L., 2000- The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, U.S.A implications for provenance and metamorphic studies. *Lithos* 51: 305-327.
- DaPeng, L., YueLong, C., Zhong, W., Yu, L. and Jian, Z., 2012- 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 (7): 776-785.
- Das, B. K., AL-Mikhlaifi, A. S. and 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.
- Deru, G., Xuexiang, L., Penghun, C. and Bin, X., 2007- Guanghao, H. Bachinski, Zhuanli and F. Gonggu, "Mesoproterozoic–Neoproterozoic Transition: Geochemistry, Provenance and Tectonic Setting of Clastic Sedimentary Rocks on the SE Margin of the Yangtze Block, South China. *Journal of Asian Earth Science* 29, 637–650.
- Dickinson, W. R., Beard, L. S., Brakenridge, G. R., Erjavece, J. L., Ferguson, R. C., Inman, K. F., Kenep, R. A., Lindberg, F. A. and Ryberg, P. T., 1983- Provenance of North American pherozoic sandstone in relation to tectonic setting. *Geological Society of America Bulletin* 94, 222-235.
- Fedo, C. M., Young, G. M., Nest, H. W. and Hanchar, J. M., 1997- Potassic and sodic metasomatism in the Southern Province of the Canadian Shield: evidence from the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup Canada. *Precambrian Research* 84: 17–36.
- Fürsich, F. T., Wilmsen, M., Seyed-Emami, K. and Majidifard, M. R. 2009a- Lithostratigraphy of the Upper Triassic–Middle Jurassic Shemshak Group of Northern Iran. In: Brunet, M. F., Wilmsen, M. and Granath, J. W. (eds) *South Caspian to Central Iran Basins*. Geological Society of London, Special Publications 312: 129–160.
- Fürsich, F. T., Wilmsen, M., Seyed-Emami, K. and Majidifard, M. R. 2009b- The Mid-Cimmerian tectonic event (Bajocian) in the Alborz Mountains, Northern Iran: evidence of the break-up unconformity of the South Caspian Basin. – In: Brunet, M.-F., Wilmsen, M. and Granath, J.W. (Eds.): *South Caspian to Central Iran Basins*. Geological Society of London Special Publications 312: 189-203.
- Golonka, J., 2004- Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic. *Tectonophysics* 39: 251-252.
- Hayashi, K., Fujisawa, H., Holland, H. D. and Ohmoto, H., 1997- Geochemistry of 1.9 sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61: 4115–4137.
- Hessler, A. M. and Lower, D. M., 2006- Weathering 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: 185-210.
- Jafarzadeh, M., Moussavi-Harami, R., Amini, A., Mahboubi, A. and Farzaneh, F., 2014- Geochemical 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: 4245- 2463.
- Kalsbeek, F. and Frei, R., 2010- Geochemistry of Precambrian sedimentary rocks used to solve stratigraphical problems: an example from the Neoproterozoic Volta basin, Ghana. *Precambrian Research* 176: 66–75.
- Khanehbad, M., Moussavi_Harami, R., Mahboubi, A. and Nadjafi, A., 2012- Geochemistry of Carboniferous Shales of the Sardar Formation, East Central Iran: Implication for Provenance, Paleoclimate and Paleooxygenation Conditions at a Passive Continental Margin. *Geochemistry International* 50:777-790.
- 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.
- Lee, Y. L., 2002- Provenance Derived from the Geochemistry of Late Paleozoic–Early Mesozoic Mudrocks of the Pyeongan Supergroup, Korea. *Sediment. Geolical* 149: 219–235.
- Madani, M. 1977- A study of the sedimentology, stratigraphy and regional geology of the Jurassic rocks of eastern Kopet Dagh (NE Iran). Unpublished Ph.D. thesis, Royal School of Mines, Imperial College, London, 246p.
- Mahavaraju, J. 2015- Geochemistry of Late Cretaceous sedimentary rocks of the Cauvery Basin, South India: Constraints on paleo weathering, provenance, and end Cretaceous environments. *Chemostratigraphy* 8: 185-214.
- Mishra, M. and Sen, S., 2010- Geological signatures of Mesoproterozoic siliciclastic rocks of the Kaimur Group of the Vindhyan Supergroup, Central India. *Chin. Journal Geochemical* 20: 21–32.
- Mondal, M. E. A., Wani, H. and Mondal, B., 2012- Geochemical signature of provenance, tectonics and chemical weathering in the Quaternary flood plain sediments of the Hindon River, Gangetic plain, India. *Tectonophysics* 566: 87- 94.

- Moosavirad, A. M., Janardhana, M. R., Sethumadhav, M. S., Moghadam, M. R. and 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-Geochemistry* 71: 279–288.
- Nesbitt, H. W. and Young, G. M., 1982- Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites, *Nature* 299: 715–717.
- Nesbitt, H. W., 2003- Petrogenesis of siliciclastic sediments and sedimentary rocks. In: Lenz, D.R. (ed.), *Geochemistry of Sediments and Sedimentary Rocks*, Geotext 4. Geological Association of Canada. Newfoundland: 39-51.
- Nowrouzi, N., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Mahmudy Gharai, M. H. and Ghaemi, F., 2013- Petrography and geochemistry of Silurian Niur sandstones, Derenj Mountain, East Central Iran: implications for tectonic setting, provenance and weathering. *Arabian Journal of Geosciences* 7: 2793-2813.
- Paikaray, S., Banerjee, S. and Mukherji, S., 2008- Geochemistry of shales from the Paleoproterozoic to Neoproterozoic Vindhyan Supergroup: Implications on provenance, tectonics and paleoweathering. *Journal of Asian Earth Sciences* 32: 34–48.
- Parent, H., Raoufian, A., Seyed-Emami, K., Ashouri, A. R. and Majidifard, M. R., 2014- The Bajocian- Kimmeridgian Ammonite Fauna of the Dalichai Formation in the SE Binalud Mountains, Iran. *Informes del Instituto de Fisiografía y Geología* 1: 1-60.
- Poursoltani, M. R., Moussavi-Harami, R. and Gibling, M. R., 2007- Jurassic deep-water fans in the Neo-Tethys Ocean: The Kashafrud Formation of the Kopet-Dagh Basin, Iran. *Sedimentary Geology* 198 : 53–74.
- Ramazani, O. R., Shahriari, S., Hafezi, Moghaddas, N., Omid, P. and Efrkharnejhad, J., 2008- A model for active tectonics in Kopet Dagh (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., Müller, C., Verges, J. and Aghababae, A., 2014- Structural evolution of the Kopet Dagh fold-and-thrust belt (NE Iran) and interactions with the South Caspian Sea Basin and Amu Darya Basin. *Marine and Petroleum Geology* 57: 68-87.
- Roser, B. P. and Korsch, R. J., 1988- Provenance signatures of sandstone–mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology* 67: 119–139.
- Salehi, M. A., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Wilmsen, M. and Heubeck, Ch., 2014- 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: 21-48.
- Sardar Abadi, M., Da Silva, A. Ch., Amini, A., Aliabadi, A. A., Boulvain, F. and Sardar Abadi, M. H., 2014- Tectonically controlled sedimentation: impact on sediment supply and basin evolution of the Kashafrud Formation (Middle Jurassic, Kopeh-Dagh Basin, northeast Iran). *International Journal of Earth Sciences* 103: 2233–2254.
- Schieber, J., 1992- A combined petrographical-geochemical provenance study of the Newland formation, Mid- Proterozoic of Montana. *Geological Magazine* 129: 223–237.
- Taheri, J., Fursich, F. T. and Wilmsen, M., 2009- Stratigraphy, depositional environments and geodynamic significance of the Upper Bajocian-Bathonian Kashafrud Formation, NE Iran. *Geological Society, London. Special Publication* 312: 205-218.
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M., 1985- *The Continental Crust: its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford 312.
- Thierry, J., 2000- Middle Callovian (157–155 Ma). In: Dercourt J, Gaetani M, Vrielynck B, Barrier Biju- Duval B, Brunet MF, Cadet JP, Crasquin S, Sandulescu M (eds) *Atlas Peri-Tethys, Palaeogeographical Maps*. CCGM/CGMW, Paris: 1–97.
- Wang, L., Liu, Cg., Gao, X. and 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.
- Wilmsen, M., Fursich, F. T., Seyed-Emami, K., Majidifard, M. R. and Taheri, J., 2009- The Cimmerian Orogeny in northern Iran: tectono-stratigraphic evidence from the foreland. *Terra Nova* 21: 211-218.
- Wronkiewicz, D. J. and Condie, C., 1987- Geochemistry of Archean Shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: Source-Area Weathering and Provenance. *Geochim et cosmochimica Acta* 51: 2401–2416.
- Yong, I. L., 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.
- Zaid, S. M. and Gahtani, F. A., 2015- Provenance, diagenesis, tectonic setting, and geochemistry of Hawkesbury Sandstone (Middle Triassic), southern Sydney Basin, Australia. *Journal of Earth Sciences* 24: 72-98.
- Zand-Moghadam, H., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A. and Bavi, H., 2013- Comparison of tidalites in siliciclastic, carbonate, and mixed siliciclastic-carbonate System: examples from Cambrian and Devonian deposits of East-Central Iran. *ISRN Geology*: 1-21.

Provenance of shales of the Kashafrud Formation in the Navia section (West of Bojnourd), based on geochemical data

N. Sarbaz¹, A. Mahboubi^{2*}, R. Moussavi-Harami² and M. Khanehbad³

¹M.Sc. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

²Professor, , Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³Assistant Professor , Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received: 2016 July 12

Accepted: 2016 October 29

Abstract

The Koppeh-Dagh Basin in the northeast Iran formed after closure of the Paleotethys in the south of Turan plate. Kashafrud Formation in the Navia Section (west of Bojnourd) with a thickness of 749 m is composed of silici-clastic rocks (conglomerate, sandstone and shale). In order to interpret provenance of this formation in the study section, 12 shale samples have been geochemically analyzed. The samples are rich in quartz and clay minerals, with respect to (UCC) depletion in Na₂O, CaO, MgO, Cu, Nb and Sr and enrichment in Ni, Co, V, Y and U. Plotting TiO₂ versus Al₂O₃, Zr versus TiO₂, as well as ternary diagram (SiO₂/20), (K₂O+ Na₂O), (MgO+ TiO₂+ FeO) and diagram Al₂O₃, (CaO+ Na₂O+ K₂O), (FeO + MgO) suggest that the original source of this formation was probably from intermediate igneous rocks. Calculated PIA and CIA indicate high chemical weathering and semi- humid climatic condition in the source area. Prepared discrimination diagram using the major oxides (SiO₂ versus K₂O/Na₂O and ternary diagrams SiO₂/20, Na₂O+ K₂O, TiO₂+ MgO+ Fe₂O₃), shows that the shales of this formation were plotted in the passive continental margin. Paleogeographic reconstruction for this formation, during the Middle Jurassic shows that sedimentation of this formation is mainly controlled by intracontinental subsiding basin and the source of these sediments was from the southeast of the Koppeh-Dagh Basin.

Key words: Geochemistry, Source Rock, Tectonic Setting, Paleoweathering, Kashafrud Formation.

For Persian Version see pages 199 to 210

*Corresponding author: A. Mahboubi; E-mail: mahboubi@um.ac.ir