

مطالعه ژئوشیمی رسوبات رودخانه مولید، جنوب شرق قائن به منظور تعیین نرخ هوازدهی، میزان آلودگی رسوبات و ارزیابی خطر زیست‌محیطی عناصر فلزی

مریم مرتضوی‌مهریزی^{۱*}، مرضیه فیاضی بروجنی^۲ و محمد خانه‌باد^۳

۱- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲- کارشناس ارشد زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۳- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

نویسنده مسئول: mmortazavi@birjand.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۹۹/۳/۶

دریافت: ۹۸/۱۲/۲۷

چکیده

حوضه آبریز رودخانه مولید در جنوب شرقی شهرستان قاین، استان خراسان جنوبی واقع شده است. در این مطالعه، اختصاصات ژئوشیمیایی رسوبات رودخانه مولید به منظور بررسی شرایط هوازدهی و نرخ آلودگی رسوبات ارائه شده است. ۳۰ موقعیت در طول رودخانه مولید از بالادست تا پایین‌دست به منظور ارزیابی مشخصه‌های ژئوشیمیایی برداشت شده است. استفاده از نمودارهای تفکیکی، دوتایی و مثلثی، برخاستگاه آذرین مافیک و جایگاه زمین‌ساختی را احتمالاً جزایر کم‌ان اقیانوسی برای این رسوبات تداعی می‌نماید. داده‌های یاد شده پیشنهادکننده سنگ مادر آذرین مافیک برای رسوبات است. محاسبه برخی شاخص‌ها نظیر *ICV* و *PIA*، *CIA* نشان می‌دهد که رسوبات مربوط به سیکل اول رسوب‌گذاری بوده و هوازدهی کمی را متحمل شده‌اند. بررسی میزان آلودگی رسوبات رودخانه مورد مطالعه توسط اندیس‌های فلزات سنگین نشان می‌دهد که منبع آلودگی رسوبات عوامل طبیعی بوده و خطر زیست‌محیطی این آلودگی‌ها بسیار کم است.

واژه‌های کلیدی: ژئوشیمی، نرخ هوازدهی، اندیس‌های عناصر فلزی، میزان آلودگی، رودخانه مولید، جنوب شرق قائن

پیشگفتار

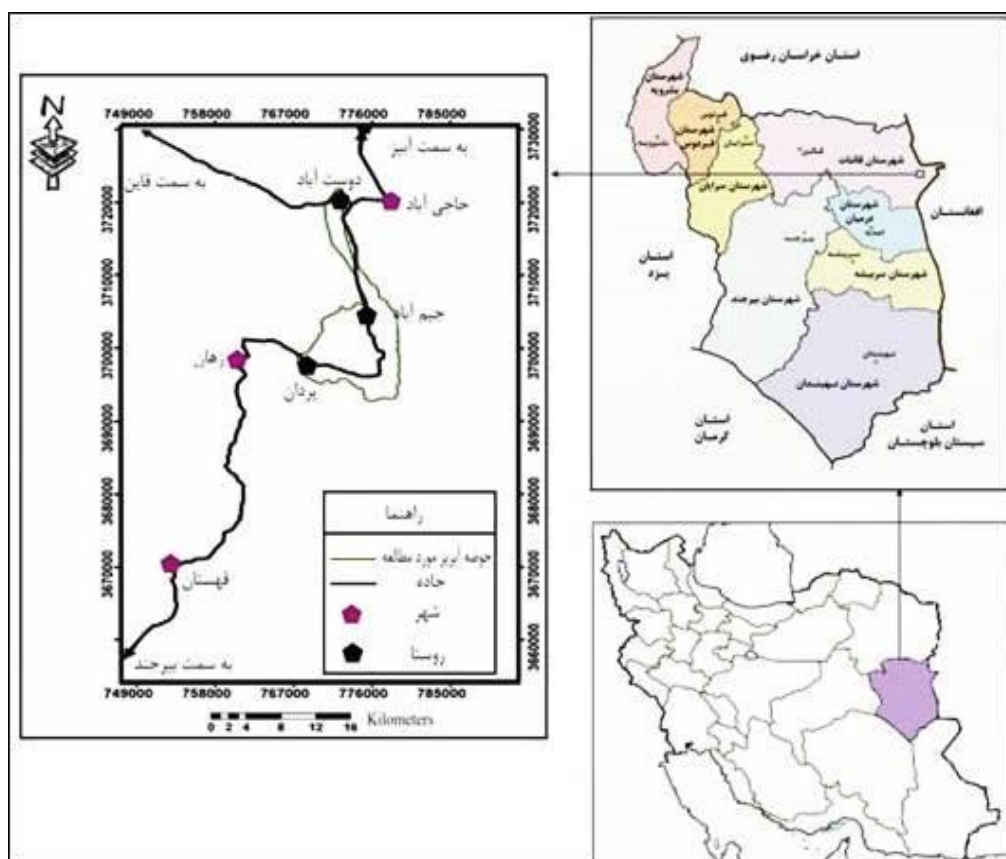
سیستم‌های رودخانه‌ای از جمله مهم‌ترین سیستم‌های رسوبی فعال هستند که واکنش آن‌ها با پوسته قاره‌ای منجر به چرخه ثابت مواد از پوسته زمین می‌شود. به عبارتی، رودخانه‌ها اولین حمل‌کنندگان مواد رسوبی از سطح قاره‌ها به اقیانوس‌ها هستند که از برهنه‌سازی قاره یعنی فعالیت همزمان هوازدهی سنگ و فرسایش حاصل شده‌اند. رسوبات نهشته شده در این سیستم‌ها، آثار تمام فرآیندهایی را که در گذر از منشأ به حوضه رسوبی اتفاق افتاده، در خود ثبت می‌کنند (گیو و همکاران، ۲۰۱۰؛ شروتی و همکاران، ۲۰۱۷؛ ماندنگ و همکاران، ۲۰۱۹). امروزه ترکیب ژئوشیمیایی رسوبات رودخانه‌ای به عنوان ابزاری مفید در درک روند هوازدهی، شناسایی منشأ رسوبات و تشخیص منابع آلودگی در ناحیه بکار برده می‌شود (ماندنگ و همکاران، ۲۰۱۹). ترکیب ژئوشیمیایی رسوبات رودخانه‌ای ترکیب متوسط یک حوضه آبریز کامل را ارائه می‌کند. بخوبی اثبات شده است که هوازدهی شیمیایی ترکیب رسوبات را کنترل کرده و

ژئوشیمی عنصری و کانی‌شناسی رسوبات را متأثر می‌سازد (ماندنگ و همکاران، ۲۰۱۹). جائیکه کاتیون‌های بزرگ‌تر (*Al2O3*, *Ba*, *Rb*) در پروفیل هوازدهی تثبیت شده و ترجیحاً کاتیون‌های کوچک‌تر (*Ca*, *Na*, *Sr*) به طور انتخابی از پروفیل هوازده شسته می‌شوند. این مشخصه‌های ژئوشیمیایی نهایتاً در رسوبات باقی مانده و به منظور تعیین منشأ و شرایط هوازدهی ناحیه منشأ مورد استفاده قرار می‌گیرند (ناگاراچان و همکاران، ۲۰۱۴؛ آرمسترانگ-آلترین و همکاران، ۲۰۱۵). آلودگی رودخانه‌ای توسط فلزات فرعی^۱ تهدیدی جدی در سلامت انسان و سیستم‌های زیستی همراه با این محیط آبی است. آلودگی منابع آبی توسط فلزات فرعی از عوامل طبیعی و انسانی نظیر هوازدهی و فرسایش واحدهای زمین‌شناسی منطقه، ریزش‌های جوی، دسترسی پساب‌های مایع، کودها و آفت‌کش‌ها، جریان‌های سطحی و مواد شیمیایی حاصل از فعالیت‌های شهری، صنعتی و کشاورزی، منشأ می‌گیرد (حنیف و همکاران، ۲۰۱۶؛

¹ Trace metals

منطقه مورد مطالعه (حوضه آبریز رودخانه مولید) بخشی از حوضه آبریز سد حاجی‌آباد در استان خراسان جنوبی، در ۱۲۰ کیلومتری جنوب‌شرقی قاین، در موقعیت جغرافیایی $33^{\circ}24'44''$ تا $33^{\circ}35'11''$ عرض شمالی و $59^{\circ}42'56''$ تا $59^{\circ}44'58''$ طول شرقی است (شکل ۱). مساحت و محیط این حوضه به ترتیب $135/22$ کیلومتر مربع و $186/9$ کیلومتر و شکل کلی آن کشیده است. این حوضه از جنوب به کوه گریانه، از سمت غرب و شمال به رودخانه افین ختم می‌گردد. گستردگی منطقه شمالی- جنوبی و غالب لیتولوژی منطقه از رسوبات آبرفتی کواترنر تشکیل شده است. رودخانه مولید با طول $66/45$ کیلومتر از نوع رودخانه‌های فصلی است.

ماندنگ و همکاران، ۲۰۱۹). یکی از بهترین روش‌ها در ارزیابی پتانسیل آلودگی رودخانه‌ها و اکوسیستم‌های آبی، آنالیز ژئوشیمیایی رسوبات رودخانه‌ای است. نمونه‌های رسوب کانال رودخانه‌ای فعال و دشت‌سیلابی نشان دهنده میانگین ترکیب ژئوشیمیایی کل حوضه آبریز هستند. ترکیب شیمیایی ریزترین رسوبات کانال فعال به ترکیب شیمیایی مواد معلق حمل شده در رودخانه بسیار نزدیک است. بنابراین، آنالیز ژئوشیمیایی این رسوبات روشی مناسب برای ارزیابی بار معلق رودخانه محسوب شده و به تشخیص سلامت سیستم رودخانه‌ای کمک می‌کند (گیو و همکاران، ۲۰۱۰؛ ویلا و مارتینز- لادو، ۲۰۱۵؛ شروتی و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ۱. راه‌های دسترسی و موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز مولید در خراسان جنوبی (نقشه برگرفته از نقشه 1:250000 راه‌های کشور از <http://www.ngdir.com>)

این رودخانه بر اساس تقسیمات حوضه آبریز ایران، بخشی از حوضه‌ی آبریز مرزی شرق ایران (حوضه آبریز دق پترگان - نمکزار خواف) است. شیب متوسط $3/7$ درصد است؛ بنابراین از جمله رودخانه‌های با شیب زیاد محسوب می‌گردد. در این مطالعه، ترکیب عناصر اصلی و فرعی رسوبات رودخانه مولید به منظور بررسی

اختصاصات برخاستگاه و جایگاه زمین‌ساختی، شرایط هوازدهی ناحیه منشأ رسوبات و میزان آلودگی رسوبات ارائه شده است. به منظور ارزیابی کیفیت آب رودخانه و تشخیص اثرات محیطی اندیس‌های ژئوشیمیایی نظیر فاکتور غنی‌شدگی^۱ (EF)، اندیس تجمع زمین^۲ (Igeo)،

¹Enrichment factor (EF)

اندیس بار آلودگی^۳ (PLI) و اندیس‌های مرتبط با ارزیابی خطر زیست‌محیطی^۴ (ERA) محاسبه شده است.

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

با توجه به تقسیمات زمین‌شناسی ایران این حوضه بخشی از کمربند فلش و مخلوط درهم شرق ایران است که در شرق بلوک لوت قرار گرفته است. در حوضه فلشی خاور ایران سنگ‌های قدیمی‌تر از کرتاسه رخنمون ندارد. پوسته‌های اقیانوسی، آتشفشانی‌های کرتاسه بالا، نهشته‌های فلشی پالئوسن-ائوسن و سرانجام سنگ‌های ماگمایی (درونی-بیرونی) این ناحیه، به دلیل قرارگیری در یک زون برخوردی نظم‌چینه‌ای ندارند و در یک نگاه کلی تیروول و همکاران (۱۹۸۳) سنگ‌های این پهنه را شامل دو مجموعه‌ی افیولیتی مجموعه رتوک در باختر و مجموعه‌ی نه در خاور و یک مجموعه رسوبی سفیدابه می‌دانند. جدا از پوسته‌های اقیانوسی، رخساره‌های سنگی بیش‌تر از نوع شیل و ماسه‌سنگ‌های دریایی کرتاسه‌ی پسین تا اواخر ائوسن است. نبود ردیف‌های رسوبی دریایی جوان‌تر از ائوسن، به حرکت‌های کوهزایی ائوسن-الیگوسن نسبت داده می‌شود که با رخداد زمین‌ساختی پیرنه قابل قیاس است. تکاپوهای آتشفشانی کم است ولی مقداری سنگ آذرین بیرونی از نوع آندزیت با سنگ نهشته‌های فلشی همراه است که رخساره‌های آتشفشانی رسوبی را تداعی می‌کنند. فعالیت‌های ماگمایی ناحیه از زمان نئوژن تا کواترنر ادامه داشته است (آقانباتی، ۱۳۸۵). وضعیت زمین‌شناسی حوضه آبریز مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. در منطقه مورد مطالعه مجموعه‌ای از واحدهای سنگی ژوراسیک و کرتاسه (دوران دوم)، ترشیری و کواترنری (دوران سوم) رخنمون دارند. گرچه برخی از واحدهای سنگی در مسیر رودخانه رخنمون ندارند ولی در ترکیب رسوبات رودخانه می‌توانند نقش موثری داشته باشند (شکل ۲A).

روش مطالعه

تعداد ۳۰ نمونه رسوب از بالادست تا پایین‌دست و از کف کانال اصلی رودخانه (با طول ۳۰ کیلومتر) از عمق حدود ۲۰ سانتی‌متری به صورت غیرسیستماتیک برداشت شده

و موقعیت نمونه‌ها با GPS ثبت گردیده است (شکل ۲B). سپس نمونه‌ها با دقت ۰/۰۱ توزین گردیده و با استفاده از روش غربال خشک و با فواصل ۰/۵ فی (از ۴- تا ۴ فی) الک شده و درصد وزنی ذرات در اندازه‌های گراول، ماسه و گل محاسبه شده است. جهت مطالعه پتروگرافی و بررسی ترکیب رسوبات بستر رودخانه مولید و ارتباط آن با ترکیب سنگ‌های ناحیه منشأ، تعداد ۷ برش نازک میکروسکوپی از رسوبات در اندازه ماسه متوسط (۰/۵ تا ۰/۲۵ میلی‌متر) از نمونه‌های برداشت شده از کف کانال اصلی رودخانه انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات پتروگرافی مقاطع نازک تهیه شده از رسوبات توسط میکروسکوپ پلاریزان مدل لایتز انجام شده است. ۱۰ نمونه با اندازه ذرات کوچک‌تر از ۶۳ میکرون برای آنالیز ژئوشیمیایی به روش XRF انتخاب و توسط هاون آگات کاملاً پودر شده است. آنالیز عناصر اصلی و فرعی در شرکت تجزیه‌کنندگان کانسارهای بلورین آمیتیس شرق مشهد توسط دستگاه فلورسانس پرتو ایکس (XRF) مدل Phelix 1480 انجام شده است. دقت دستگاه مورد نظر برای اندازه‌گیری اکسیدهای عناصر اصلی در ۰/۰۱ درصد و برای ارزیابی عناصر فرعی بیش‌تر از ۵ درصد است. میزان LOI از وزن کل بعد از اشتعال در ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد برای ۲ ساعت تعیین شده است.

نتایج ژئوشیمیایی

نتایج تجزیه اکسیدهای عناصر اصلی و نیز عناصر فرعی (کمیاب) ۱۰ نمونه رسوب رودخانه مولید به ترتیب در جدول ۱ آورده شده است.

اکسیدهای عناصر اصلی

مقدار SiO_2 بین ۴۵/۴۸٪ تا ۴۷/۸۳٪، Al_2O_3 بین ۸/۵۵٪ تا ۹/۳۴٪، MgO بین ۱۱/۳٪ تا ۱۳/۵۴٪، CaO بین ۱۰/۳۵٪ تا ۱۲/۰۵٪، Fe_2O_3 بین ۵/۳۴٪ تا ۶/۳۴٪، Na_2O بین ۱/۵۱٪ تا ۱/۸۳٪، K_2O بین ۱/۰۶٪ تا ۱/۲۸٪، TiO_2 بین ۰/۳۴٪ تا ۰/۴۴٪، MnO بین ۰/۱۱٪ تا ۰/۱۳٪ و P_2O_5 بین ۰/۱۲٪ تا ۰/۱۶٪ در تغییر است (جدول ۱).

عناصر فرعی

مقادیر عناصر فرعی باریم (۱۸۷-۱۱۸ ppm)، نیکل (۳۶۶-۲۸۸ ppm)، استرانسیوم (۲۴۳-۲۰۷ ppm)، مس (۶۵-۶ ppm)، توریم (۳۳-۲ ppm)، سرب (۲۴-۲ ppm)،

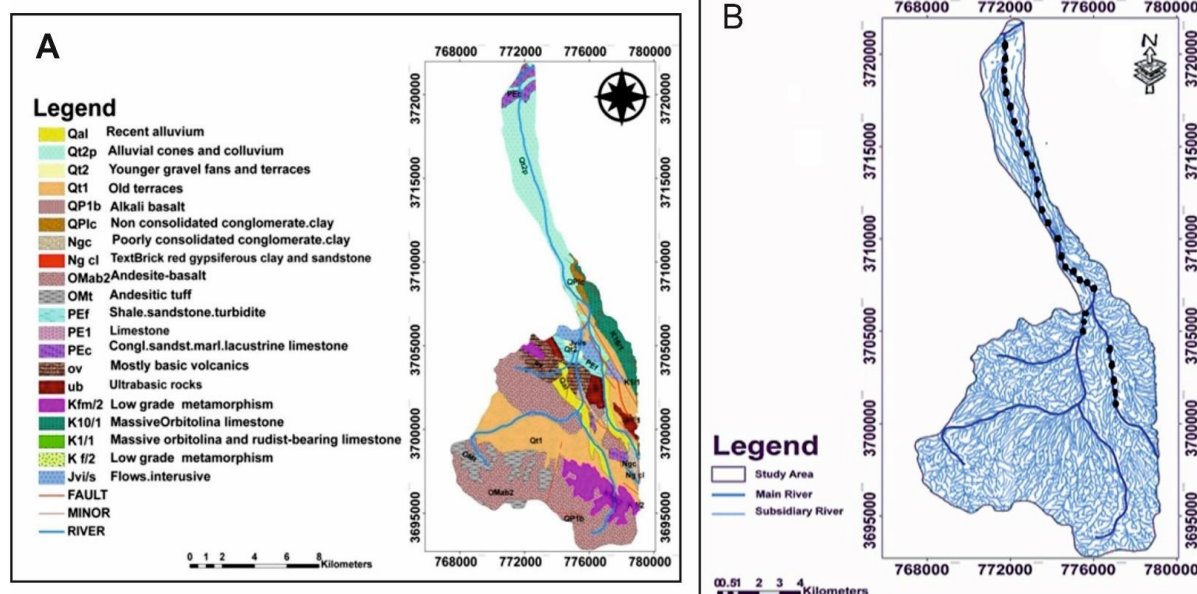
^۲ Geo-accumulation index (Igeo)

^۳ Pollution load index (PLI)

^۴ Ecological risk assessment (ERA)

روی (۶۰-۲۷ ppm)، کبالت (۳۱-۱۶ ppm)، نئوبیوم (۶۶-۶۲ ppm)، سلیوم (۴۷-۱۵ ppm)، وانادیوم (۶۶-۶۲ ppm)، ریدیم (۳۶-۲۸ ppm) و زیرکونیوم (۹۲-۸۲ ppm) است (جدول ۱).

مولیبدن (۹-۱۷ ppm)، اورانیوم (۱۴-۹ ppm)، کرم (۷۴۶-۲۰۸۶ ppm)، وانادیوم (۴۰-۲۷ ppm)، کبالت (۳۱-۱۶ ppm)، نئوبیوم (۶۶-۶۲ ppm)، سلیوم (۴۷-۱۵ ppm)، وانادیوم (۶۶-۶۲ ppm)، ریدیم (۳۶-۲۸ ppm) و زیرکونیوم (۹۲-۸۲ ppm) است (جدول ۱).



شکل ۲. A) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و B) موقعیت نمونه‌های برداشت شده از کانال اصلی رودخانه مولید

بحث

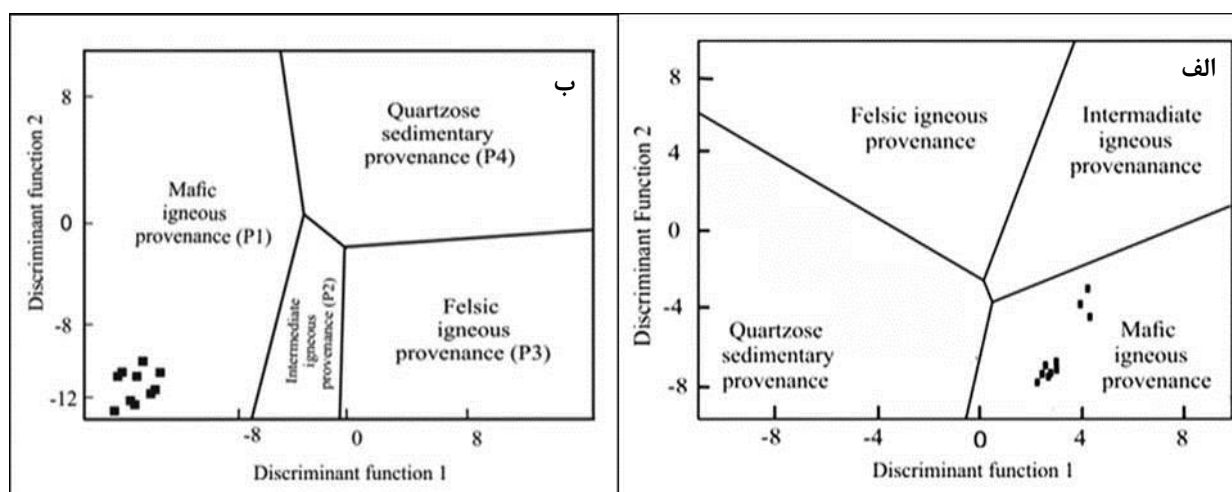
برخاستگاه و جایگاه زمین‌ساختی رسوبات رودخانه‌ای مولید

بررسی ژئوشیمیایی رسوبات آواری به عنوان ابزاری قدرتمند در بررسی موقعیت زمین‌ساختی ناحیه منشأ رسوبات رودخانه‌ای به کار گرفته می‌شود (حسینی‌برزی، ۱۳۹۰). با استفاده از اکسیدهای اصلی مانند CaO ، MgO ، SiO_2 ، Fe_2O_3 ، Al_2O_3 ، K_2O می‌توان اطلاعاتی در مورد منشأ رسوبات و موقعیت زمین‌ساختی به دست آورد (زیمرن و بالبرگ، ۲۰۰۳). در این بین نسبت عناصر Fe_2O_3 / K_2O و $SiO_2 / Al_2O_3, K_2O / Na_2O$ جهت بررسی موقعیت زمین‌ساختی و منشأ رسوبات، بیش‌ترین کاربرد را دارند (راسر و کورش، ۱۹۸۶؛ هرون، ۱۹۸۸). در نمودارهای تابعی راسر و کورش (۱۹۸۸) برای تمایز بین رسوباتی که منشأ اولیه آن‌ها سنگ‌های آذرین مافیک، حدواسط یا فلسیک و یا رسوبات دارای کوارتز است، چهار محدوده برخاستگاهی معرفی شده است که شامل مافیک (P_1)، حدواسط (P_2)، فلسیک (P_3) و رسوبی کوارتزی (P_4) است. این نمودار بر اساس اکسیدهای آلومینیوم، تیتانیوم، سدیم، کلسیم، منیزیم، آهن و پتاسیم چهار

منشأ یاد شده را از یکدیگر جدا می‌سازد. داده‌های اکسیدی نمونه‌های مورد بررسی در نمودارهای تابعی فوق، در ناحیه با منشأ سنگ‌های آذرین مافیک یا P_1 واقع شده است (شکل ۳). در مطالعات پتروگرافی مقاطع نازک تهیه شده از رسوبات رودخانه مورد مطالعه، ترکیب این رسوبات به طور عمده از ذرات آواری کوارتز (۲۵٪)، فلدسپات (۱۵٪)، خرده‌سنگ‌های رسوبی (۳۰٪) و ولکانیکی (۲۵٪) و میکا (۳٪) تشکیل شده است. خرده‌سنگ‌های رسوبی مورد مطالعه به ترتیب فراوانی شامل خرده‌سنگ‌های چرتی (۱۵٪)، ماسه‌سنگی (۱۰٪) و کربناته (۵٪) می‌باشد. در مقاطع مورد بررسی، کوارتزهای با خاموشی مستقیم و موجی نسبت به کوارتزهای با خاموشی مستقیم فراوانی بیش‌تری دارند. با توجه به اختصاصات میکروسکوپی منشأ کوارتزهای حوضه آبریز رودخانه مولید احتمالاً از سنگ‌های آذرین درونی (پلوتونیک) است. هم‌چنین در نمونه‌های مورد مطالعه، فلدسپات‌ها عمدتاً پلاژیوکلاز هستند. فلدسپارها از نظر نوع متنوع می‌باشند که هر یک، از سنگ منشأ خاصی ناشی می‌شوند. بنابراین تشخیص نوع فلدسپارها در منشأیابی مهم است (فیض‌نیا، ۱۳۸۷).

جدول ۱. مقادیر اکسیدهای عناصر اصلی (درصد وزنی) و عناصر فرعی (پی‌پی‌ام) و میزان شاخص‌های دگرسانی شیمیایی (CIA)، دگرسانی پلاژیوکلاز (PIA) و تنوع ترکیبی (ICV) در نمونه‌های مورد مطالعه، علامت N نشانه ناچیز بودن مقدار مورد نظر است.

Sample number	4	6	8	10	13	15	19	22	25	27
Major oxides (wt%)										
SiO ₂	47.58	47.41	47.35	47.40	47.07	47.15	47.83	46.13	46.94	45.48
Al ₂ O ₃	9.12	8.93	9.04	9.19	9.04	9.27	9.34	8.72	8.56	8.55
Na ₂ O	1.77	1.72	1.51	1.75	1.65	1.83	1.74	1.73	1.70	1.57
MgO	11.67	11.30	11.27	11.44	11.11	11.41	11.40	12.72	13.57	13.04
K ₂ O	1.14	1.18	1.28	1.12	1.22	1.10	1.14	1.06	1.08	1.07
TiO ₂	0.41	0.47	0.42	0.40	0.44	0.43	0.40	0.37	0.34	0.41
MnO	0.12	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.11	0.11	0.12
CaO	10.68	11.22	11.43	11.50	12.05	11.73	10.99	11.80	10.35	11.87
P ₂ O ₅	0.13	0.13	0.15	0.14	0.16	0.14	0.13	0.12	0.14	0.13
Fe ₂ O ₃	5.73	6.34	5.82	5.45	5.95	5.61	5.59	5.34	5.42	5.96
SO ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LOI	11.39	10.85	11.39	11.31	11.01	10.94	11.05	11.67	11.62	11.51
CIA	40.16	38.74	38.86	36.00	37.73	38.74	40.24	39.46	37.10	38.56
PIA	37.46	36.52	39.06	36.15	37.60	37.85	39.18	38.30	35.57	37.52
ICV	3.62	3.60	3.46	3.80	3.50	3.46	3.36	3.52	3.80	4.00
Trace elements (ppm)										
Cu	65	38	46	6	11	38	54	49	37	32
Co	20	31	16	22	16	18	16	22	20	21
Nb	4	6	2	2	N	1	4	7	3	6
Mo	12	9	15	16	16	14	17	9	17	12
U	N	8	N	5	8	N	7	12	2	14
Th	13	10	27	13	6	2	21	30	33	22
Cl	40	45	61	63	51	53	59	72	62	76
Ni	296	328	318	288	312	311	307	324	366	333
Sr	212	207	216	214	231	240	243	236	243	229
Cr	1665	2086	1120	749	998	1576	1622	1062	746	1625
V	63	66	63	62	64	64	63	62	63	62
Ce	47	N	16	25	34	45	26	32	N	15
Zr	84	84	88	84	92	89	84	84	84	82
Y	16	16	16	15	15	16	15	14	15	15
Rb	33	28	34	29	36	35	34	29	34	31
Zn	52	48	47	41	27	51	38	60	38	51
Pb	2	16	18	24	14	14	6	19	6	12



شکل ۳. الف) نمودار تابعی مشخص کننده برخاستگاه رسوبات آواری با استفاده از اکسیدهای عناصر اصلی (برگرفته از راسر و کورش، ۱۹۸۸)

$$\text{Discrimination function 1} = -1.773 \text{ TiO}_2 + 0.607 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.76 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 1.5 \text{ MgO} + 0.616 \text{ CaO} + 0.509 \text{ Na}_2\text{O} - 1.224 \text{ K}_2\text{O} - 9/09$$

$$\text{Discrimination function 2} = 0.445 \text{ TiO}_2 + 0.07 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 0.25 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 1.142 \text{ MgO} + 0.438 \text{ CaO} + 1.475 \text{ Na}_2\text{O} + 1.426 \text{ K}_2\text{O} - 6.861$$

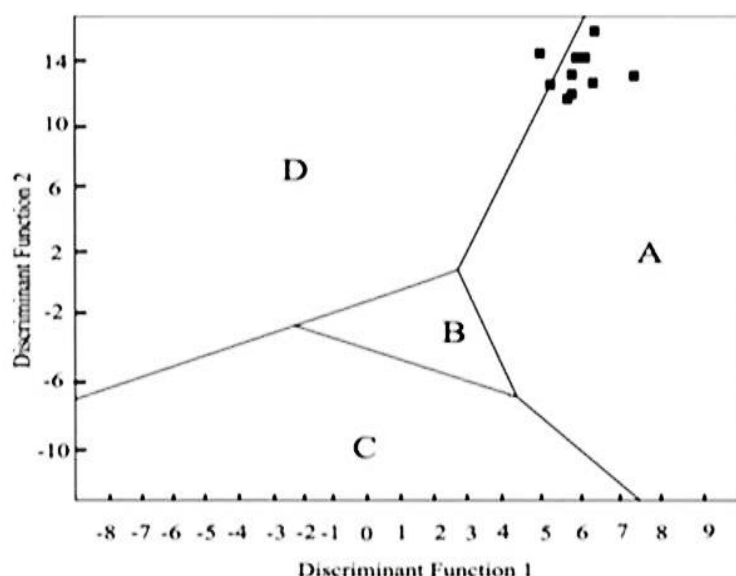
ب) نمایش داده‌های رسوبات رودخانه مولید بر روی نمودار تفکیک کننده تابعی بر اساس نسبت اکسیدهای اصلی (برگرفته از راسر و کورش، ۱۹۸۸)

$$\text{Discriminant function 1} = 30.638 \text{ TiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 - 12.541 \text{ Fe}_2\text{O}_3 (\text{total}) / \text{Al}_2\text{O}_3 + 7.329 \text{ MgO} / \text{Al}_2\text{O}_3 + 12.031 \text{ Na}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3 + 35.402 \text{ K}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3 - 6.382$$

$$\text{Discriminant function 2} = 56.500 \text{ TiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 - 10.879 \text{ Fe}_2\text{O}_3 (\text{total}) / \text{Al}_2\text{O}_3 + 30.875 \text{ MgO} / \text{Al}_2\text{O}_3 - 5.404 \text{ Na}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3 + 11.112 \text{ K}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3 - 3.89$$

شده است. باتیا (۱۹۸۳) معیارهای ژئوشیمیایی عناصر اصلی را برای تفکیک جایگاه‌های زمین‌ساختی حوضه‌های رسوبی ارائه داد. بر این اساس، وی جایگاه زمین‌ساختی حوضه‌های رسوبی را به چهار نوع اصلی تقسیم‌بندی می‌کند که شامل جزایر کمانی اقیانوسی (A)، جزایر کمانی قاره‌ای (B)، حاشیه قاره‌ای فعال (C) و حاشیه قاره‌ای غیرفعال (D) است. با رسم نمودن داده‌های حاصل از تجزیه رسوبات آواری بر روی نمودار تفکیکی باتیا (۱۹۸۳) بیش‌تر نمونه‌ها در محدوده جزایر کمانی اقیانوسی (A) قرار گرفته‌اند (شکل ۴).

با توجه به فراوانی پلاژیوکلازها در نمونه‌های رودخانه مولید، منشأ احتمالی این ذرات می‌تواند سنگ‌های آذرین مافیک (آلکالی بازال، آندزیت-بازالت و آندزیت توف) باشد. وجود خرده‌سنگ‌های ولکانیکی فراوان شامل خرده‌سنگ‌های با بافت میکرولیستی-شیشه‌ای و خرده‌سنگ‌های با پلاژیوکلازهای ریزبلور در زمینه شیشه‌ای نیز تایید کننده منشأ آذرین مافیک برای این رسوبات است که با نتایج ژئوشیمیایی فوق همخوانی دارد. اگرچه حضور منشأ رسوبی در کنار منبع آذرین مافیک برای این رسوبات با توجه به داده‌های پتروگرافی تأیید



شکل ۴. نمودار تفکیکی باتیا (۱۹۸۳) با استفاده از اکسیدهای عناصر اصلی، جزایر کمانی اقیانوسی (A)، جزایر کمانی قاره‌ای (B)، حاشیه قاره‌ای فعال (C) و حاشیه قاره‌ای غیر فعال (D)

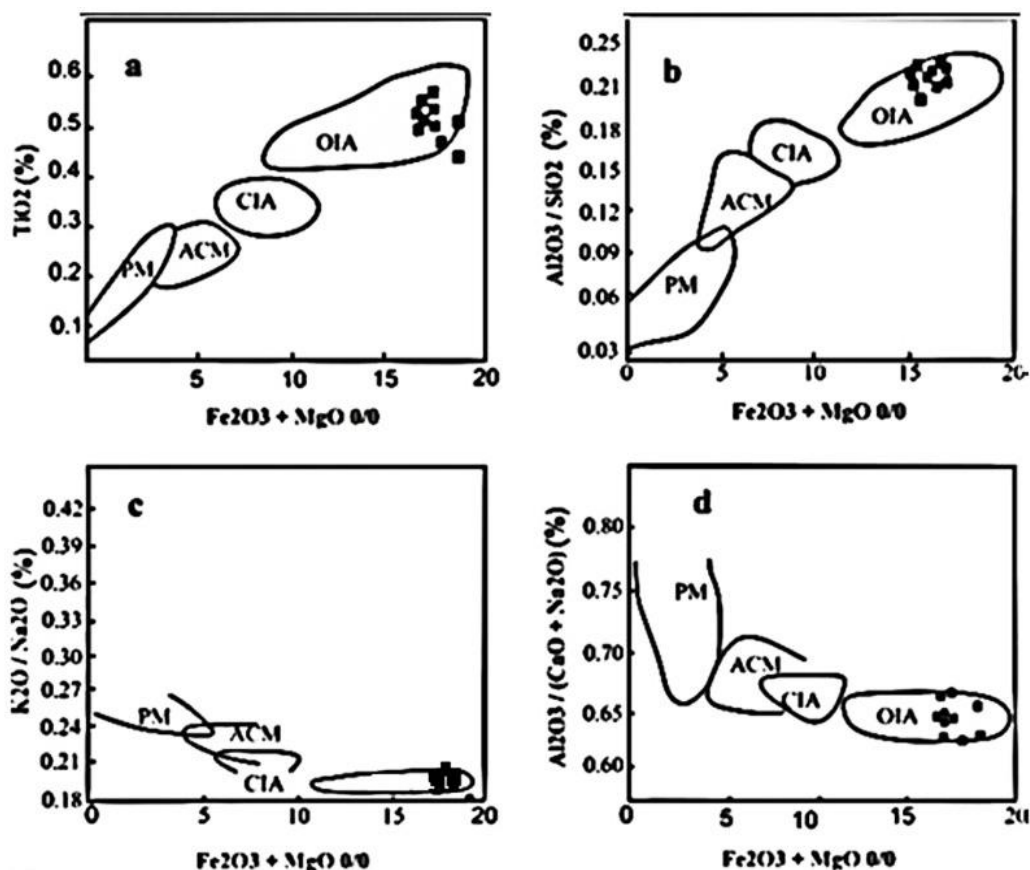
Discrimination function 1: $-0.0447 \text{ SiO}_2 - 0.972 \text{ TiO}_2 + 0.008 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 0.267 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + 0.208 \text{ FeO} - 3.082 \text{ MnO} + 0.140 \text{ MgO} + 0.195 \text{ CaO} + 0.719 \text{ Na}_2\text{O} - 0.032 \text{ K}_2\text{O} + 7.510 \text{ P}_2\text{O}_5 + 0.303$
 Discrimination function 2: $0.421 \text{ SiO}_2 + 1.988 \text{ TiO}_2 - 0.526 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 0.551 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 1.610 \text{ FeO} + 2.720 \text{ MnO} + 0.881 \text{ MgO} - 0.907 \text{ CaO} - 0.177 \text{ Na}_2\text{O} - 1.840 \text{ K}_2\text{O} + 7.244 \text{ P}_2\text{O}_5 + 43.57$

عناصر اصلی نمونه‌های رسوب در نمودار کرومبرگ (۱۹۹۴)، در نزدیکی جزایر کمانی اقیانوسی (A)، قرار می‌گیرند (شکل ۶ الف). البته رسم داده‌های رسوبات رودخانه مورد مطالعه بر روی این نمودار میزان تقریباً بالایی از $\text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ را نشان می‌دهند (جابه‌جایی به سمت قطب $\text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) که چنین جابه‌جایی نشان‌دهنده میزان بالای $\text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ در رسوبات با منشأ سنگ‌های آذرین مافیک رودخانه مولید است (واناس و عبدل مجید، ۲۰۰۶). نسبت $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ نیز می‌تواند برای تأیید برخاستگاه شیمیایی به کار رود. مقدار پایین این نسبت

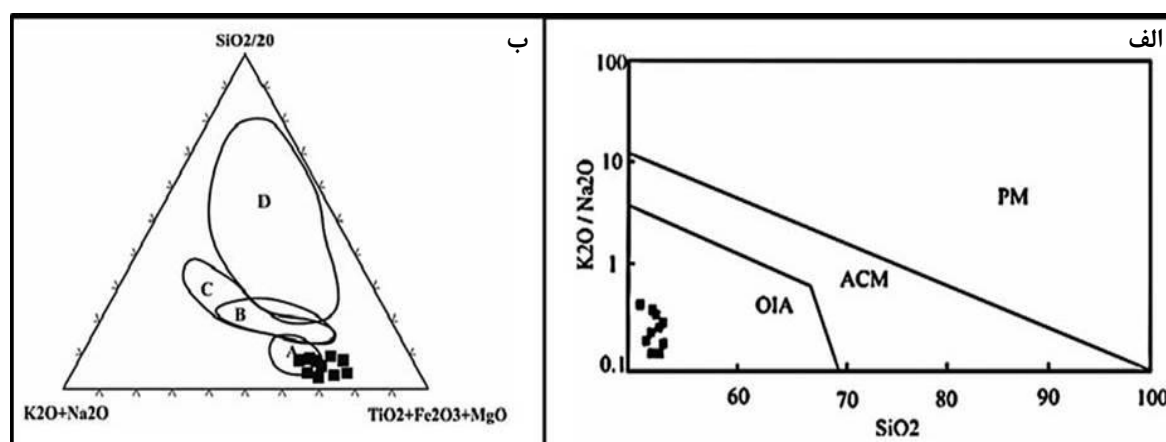
رسوبات عهد حاضر که در محیط‌هایی چون جزایر کمانی اقیانوسی و قاره‌ای و حاشیه‌های قاره‌ای فعال و غیرفعال نهشته شده‌اند، از نظر $\text{Fe}_2\text{O}_3(t) + \text{MgO}$ و نسبت $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ و $\text{K}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{O}$ و $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$ دارای ترکیب متفاوتی هستند (باتیا، ۱۹۸۳). باتیا (۱۹۸۳) از ترکیب شیمیایی یاد شده برای تفکیک محیط‌های زمین‌ساختی استفاده نمود و بر این اساس یک سری نمودارهای دو بعدی ارائه کرد. با رسم نمودن داده‌های حاصل از تجزیه رسوبات آواری رودخانه مولید بر روی این نمودارها بیش‌تر نمونه‌ها در محدوده جزایر کمانی اقیانوسی (OIA) قرار گرفته‌اند (شکل ۵). مقادیر اکسید

نشان‌دهنده منشأ بازالتی به جای گرانیتی است (پاتر، ۱۹۷۸). به عقیده پتی‌جان و همکاران (۱۹۸۷)، میزان بالای K و فراوانی آن نسبت به Na در رسوبات نشان‌دهنده فراوانی بیش‌تر میکا نسبت به فلدسپار در رسوبات بدون رس و فراوانی ایلیت نسبت به مونت‌موریلونیت در رسوبات رس‌دار است. همچنین مقادیر بالای نسبت

به وجود کانی‌های پتاسیم‌دار همچون فلدسپار پتاسیم‌دار و میکا، ایلیت، مسکوویت و بیوتیت نسبت داده شده است (نه و همکاران، ۲۰۰۰). رسم نسبت K_2O/Na_2O در برابر SiO_2 نیز نشان‌دهنده جایگاه زمین‌ساختی جزایر کمائی اقیانوسی برای رسوبات رودخانه مولید است (شکل ۶ ب).



شکل ۵. نمودارهای دوعبده (باتیا، ۱۹۸۳) با استفاده از اکسیدهای اصلی، حاشیه قاره‌ای غیر فعال (PM)، جزایر کمائی اقیانوسی (OIA)، حاشیه قاره‌ای فعال (CIA)، حاشیه قاره‌ای غیر فعال (ACM).



شکل ۶. الف) نمودار سه‌تایی کرونینبرگ (۱۹۹۴)، جزایر کمائی اقیانوسی (A)، جزایر کمائی قاره‌ای (B)، حاشیه قاره‌ای فعال (C) و حاشیه قاره‌ای غیر فعال (D). ب) ترسیم نمودار K_2O/Na_2O در مقابل SiO_2 برای رسوبات رودخانه مولید (اقتباس با تغییراتی از راسر و کورش (۱۹۸۸)). PM: حاشیه غیر فعال، ACM: حاشیه قاره‌ای فعال و OIA: جزایر کمائی اقیانوسی.

پلاژیوکلاز، نمودار دوتایی ساتنر و داتا (۱۹۸۶) و نیز رسم نمودار مثلثی $(Al_2O_3 - CaO + Na_2O - K_2O) A-CN-K$ استفاده شده است.

با توجه به درصد اکسیدهای عناصر اصلی، اندیس شیمیایی دگرسانی^۱ (CIA) بر اساس معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$CIA = 100 (Al_2O_3 / Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O) \quad (۱)$$

افزایش CIA با درجه هوازگی شیمیایی رابطه مستقیم دارد. مقدار پایین CIA نشان‌دهنده این است که دگرسانی وجود نداشته و یا خیلی کم بوده و منعکس کننده شرایط آب و هوایی خشک است، در حالی که CIA متوسط و بالا نشان‌دهنده درجه هوازگی متوسط و شدید است (نسبیت و یانگ، ۱۹۸۴؛ فیدو و همکاران، ۱۹۹۵). شاخص دگرسانی شیمیایی رسوبات رودخانه‌ای منطقه مورد مطالعه از ۳۷/۰۸٪ تا ۴۰/۲۴٪ (با میانگین ۳۸/۷۳٪) (جدول ۱) در تغییر می‌باشد، این میزان بیانگر هوازگی پایین و قرار داشتن حوضه مورد مطالعه در یک موقعیت آب و هوایی خشک است. ترسیم نمونه‌های مورد مطالعه بر روی نمودار دوتایی ساتنر و داتا (۱۹۸۶) شرایط خشک حاکم بر منطقه را تأیید می‌کند (شکل ۷). شاخص آلتراسیون پلاژیوکلاز^۲ (PIA) نیز در تعیین شرایط هوازگی پیشین رسوبات آواری کاربرد زیادی دارد (فیدو و همکاران، ۱۹۹۵). این اندیس از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$PIA = [(Al_2O_3 - K_2O) / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O - K_2O)] \quad (۲)$$

میزان اندیس دگرسانی پلاژیوکلاز در حدود ۵۰، مربوط به سنگ‌های غیرهوازده و تازه و میزان PIA نزدیک به ۱۰۰، نشان‌دهنده تبدیل کامل فلدسپارها به کانی‌های رسی آلومینیوم‌دار ثانویه از قبیل کائولینیت، ایلیت و ژپسیت است (فیدو و همکاران، ۱۹۹۵). شاخص PIA به دست آمده برای رسوبات آواری رودخانه مولید از ۳/۳۶٪ تا ۴/۰۰٪ (با میانگین ۳/۶۱٪) (جدول ۱) در تغییر است که مویده هوازگی کم موثر بر سنگ‌های منطقه است. این مقدار با مقادیر به دست آمده برای شاخص دگرسانی شیمیایی (CIA) مطابقت دارد، یعنی در آب و هوای خشک، وجود سنگ‌های غیرهوازده و تازه دور از ذهن

با توجه به رسم نمودارهای فوق احتمالاً جایگاه زمین‌ساختی حوضه جزایر کمانی اقیانوسی است. در ارتباط با تاریخچه شکل‌گیری این مجموعه‌های رسوبی، افتخارنژاد (۱۳۵۲) معتقد به وجود حوضه فیلیشی ناشی از کافت قاره‌ای بین دو بلوک لوت و هلمند بوده که در کرتاسه زیرین شکل گرفته است. وی معتقد است که با پایان یافتن اشتقاق خاور ایران، پوسته اقیانوسی مذکور به زیر بلوک لوت فروورانش کرده است. تیروول و همکاران (۱۹۸۳) معتقد به جدایش بلوک افغان (هلمند) از بلوک لوت در سنومانین (آغاز کرتاسه فوقانی) است که منجر به تشکیل پوسته اقیانوسی و انباشت رسوبات فیلیشی شده است. آنان معتقد به شروع فروورانش پوسته اقیانوسی به زیر بلوک افغان در ماستریشتین و برخورد نهایی دو بلوک در ائوسن میانی هستند. فتوحی‌راد (۱۳۸۳) معتقد است سرگذشت زمین‌شناسی کلی منطقه با ریفتینگ در بلوک قاره‌ای واحدی، آغاز شده است که با گسترش ریفت و تبدیل آن به ریفت اقیانوسی، تشکیل بخش‌های مختلف یک لیتوسفر اقیانوسی را داده و نهایتاً مجموعه افیولیتی منطقه شرق بیرجند را در سرحد ژوراسیک و کرتاسه و احتمالاً مطابق با حوضه مکران یا در ابتدای کرتاسه زیرین بوجود آورده است. متعاقب آن (والاثرین-هاتریوین در کرتاسه زیرین)، بر اثر تغییر حرکات تکتونیکی، بازشدگی متوقف شده و پوسته اقیانوسی تشکیل شده، فروورانش خود را آغاز نموده است. ادامه این حرکت همگرا در کرتاسه فوقانی تا احتمالاً پالئوژن منجر به برخورد دو بلوک لوت و افغان شده است.

تعیین میزان هوازگی شیمیایی رسوبات رودخانه مولید و شرایط آب و هوایی ناحیه منشأ رسوبات

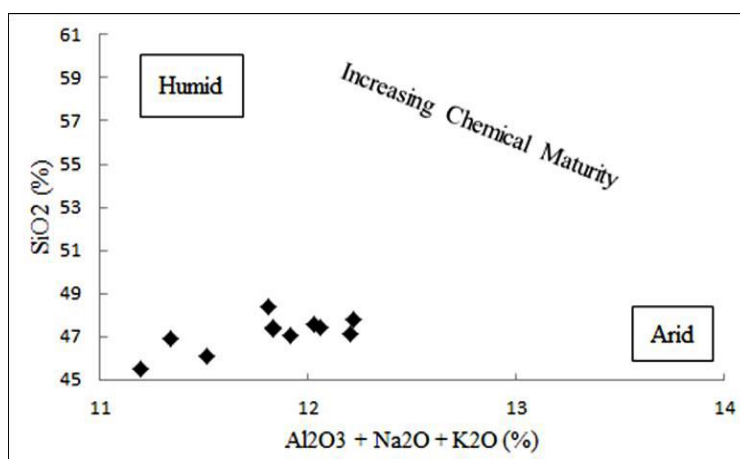
هوازگی شیمیایی تأثیر زیادی بر ژئوشیمی عناصر اصلی و کانی‌شناسی رسوبات سیلیسی‌آواری می‌گذارد (نسبیت و یانگ، ۱۹۸۴). هوازگی سنگ‌ها در طول زمان سبب تخلیه عناصر خاکی و قلیایی و به نسبت آن سبب افزایش نسبی Al_2O_3 می‌شود. هوازگی سنگ‌های آواری را می‌توان از طریق محاسبه نسبت اکسید غیرمتحرک Al_2O_3 به اکسیدهای متحرک Na_2O و CaO و K_2O تخمین زد (نسبیت و یانگ، ۱۹۸۴). در این بررسی جهت تعیین میزان هوازگی و آب و هوای ناحیه منشأ رسوبات از اندیس شیمیایی دگرسانی، شاخص آلتراسیون

^۱ Chemical Index off Alteration (CIA)

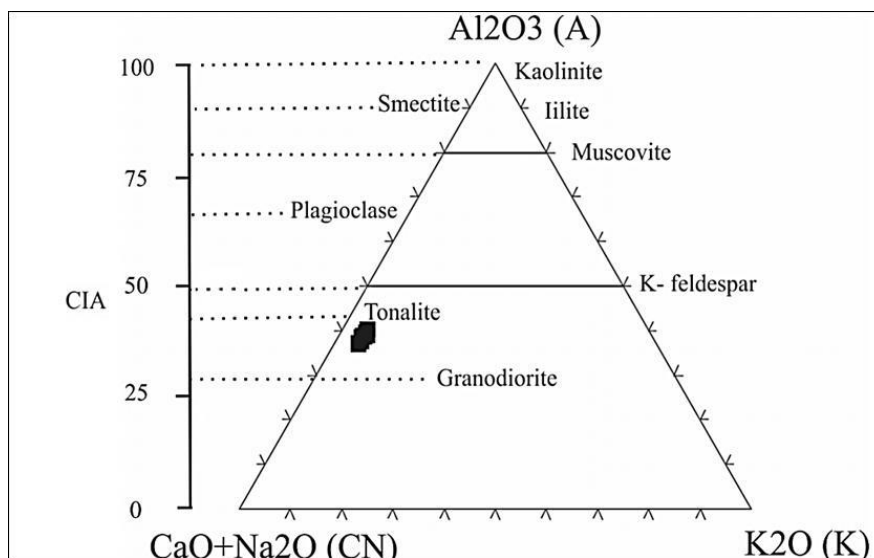
^۲ Plagioclale Index Iteration (PIA)

پتاسیم به دلیل تخریب فلدسپارها (پلاژیوکلازها)، کاسته می‌شود، با ادامه روند هوازدگی فلدسپار پتاسیم‌دار، مقدار یون پتاسیم کاهش یافته و روند هوازدگی به سمت ترکیب Al_2O_3 تغییر مکان می‌دهد یعنی در هوازدگی پیشرفته، کاهش چشم‌گیری در میزان K_2O و افزایش میزان Al_2O_3 صورت می‌گیرد (نسبیت و یانگ، ۱۹۸۴).

نیست. نمودار مثلثی $A-CN-K$ به همراه اندیس شیمیایی دگرسانی شیمیایی، میزان هوازدگی رسوبات رودخانه مولید را نشان می‌دهد (شکل ۸) که رسوبات رودخانه مورد مطالعه از دگرسانی شیمیایی پایینی برخوردار هستند. بر روی این نمودار، مراحل آغازین هوازدگی، روندی موازی با ضلع $A-CN$ را خواهند داشت. زیرا در طول مراحل اولیه هوازدگی از میزان یون‌های سدیم و



شکل ۷. نمودار دوتایی SiO_2 در مقابل $(Al_2O_3 + K_2O + Na_2O)$ رسوبات رودخانه مولید (اقتباس با تغییراتی از ساتنر و داتا (۱۹۸۶)).



شکل ۸. روند هوازدگی در مثلث $A-CN-K$ در نمونه‌های رسوب رودخانه مولید (نسبیت و یانگ، ۱۹۸۴؛ فیدو و همکاران، ۱۹۹۵).

به باور کاکس و همکاران (۱۹۹۵)، نمونه‌های فاقد رس، ICV بالاتری نسبت به نمونه‌های رسی دارند و نمونه‌هایی که دارای کانی‌های رسی فراوان هستند، ICV کمتری داشته (کمتر از ۱) و در نواحی با بالآمدگی خیلی کم، همراه با هوازدگی شیمیایی نهشته می‌شوند. نمونه‌های با ICV بالاتر از ۱، رسوبات چرخه اول در نظر گرفته می‌شوند در حالی که نمونه‌های با ICV کمتر از ۱ رسوبات

کاکس و همکاران (۱۹۹۵) جهت تعیین رسوبات مربوط به چرخه اول رسوبی یا رسوبات حاصل از چرخه مجدد، اندیس تنوع ترکیبی^۱ (ICV) را بر اساس عناصر به صورت زیر تعریف کرده‌اند (رابطه ۳):

$$ICV = [(Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + MnO + TiO_2) / Al_2O_3] \quad (3)$$

¹ Index Combination Variety (ICV)

در این معادله، C نمونه مقدار غلظت اندازه‌گیری شده فلزات (بر حسب mg/kg) در نمونه رسوب است و B نمونه مقادیر ژئوشیمیایی عناصر در نمونه زمینه بر حسب mg/kg است و عدد $1/5$ برای به حداقل رساندن اثر تغییرات احتمالی در مقادیر زمینه بکار برده شده است که ممکن است به اثرات لیتولوژیکی مربوط باشد. مقادیر ژئوشیمیایی زمینه از تیلور و مک‌لنن (۱۹۸۵) گرفته شده و به صورتی که در جدول ۲ گزارش شده، تفسیر شده است.

ارزیابی خطر زیست‌محیطی (ERA)

در این مطالعه ERA توسط پتانسیل اندیس خطر^۲ زیست محیطی یا RI محاسبه شده است. RI فلزات سنگین به صورت مجموع فاکتورهای خطر شناخته می‌شود و برای ۶ فلز سمی با استفاده از معادلات زو و همکاران (۲۰۰۸) (رابطه ۶) و هاکانسون (۱۹۸۰) (رابطه ۷) قابل محاسبه است:

$$RI = \sum_{i=1}^n ER \quad (۶)$$

$$Er = Tr \times C \quad (۷)$$

در معادله فوق، Er اندیس منفرد فاکتور خطر زیست محیطی و n مقدار رده فلزات سنگین است. Tr فاکتور میزان سمیت است که توسط هاکانسون (۱۹۸۰) برای ۶ فلز Cd (۱۰)، Pb (۵)، Hg (۴۰)، Cu (۵)، Ni (۵)، Zn (۱) پیشنهاد شده است. اصطلاحات و مقادیر استفاده شده برای تفسیر Er و RI در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. اندیس بار آلودگی (PLI): اندیس بار آلودگی یک موقعیت منفرد، تعداد ریشه‌های n ام مقادیر چند فاکتور آلودگی با یکدیگر است (رابطه ۸):

$$PLI = \sqrt[n]{(CF1 \times CF2 \times CF3 \times \dots \times CFn)} \quad (۸)$$

در این فرمول، n تعداد فلزات و CF فاکتور آلودگی است. اندیس بار آلودگی توسط هاریکومار (۲۰۰۹) تفسیر شده است. مقدار PLI زیر صفر خاک‌های غیرآلوده یا رسوبات غیرآلوده را نشان می‌دهد. مقدار ۱ موید وجود سطوح پایه آلودگی است و مقادیر بالای ۱ نشان‌دهنده از بین رفتن تدریجی کیفیت موقعیت مورد نظر است (سشان و همکاران، ۲۰۱۰).

چرخه مجدد یا رسوبات به شدت هوازده از چرخه اول رسوبی تفسیر می‌شوند. با توجه به میزان ICV محاسبه شده برای رسوبات مورد مطالعه (با میانگین $3/60$) (جدول ۱)، رسوبات فوق به عنوان رسوبات چرخه اول در نظر گرفته می‌شوند.

بررسی آلودگی‌های فلزی در رسوبات رودخانه مورد مطالعه

یکی از اهداف این مطالعه ارزیابی مقدار فلزات فرعی و سنگین در رسوبات رودخانه مولید به منظور تعیین غنی‌شدگی طبیعی یا مصنوعی آن‌ها توسط منابع انسانی با استفاده از اندیس‌های فلزات سنگین و ارزیابی خطر زیست‌محیطی فلزات سنگین در ناحیه مورد بررسی است. اندیس‌های فوق شامل موارد زیر است:

فاکتور غنی‌شدگی (EF): فاکتور غنی‌شدگی (EF) روشی تقریبی برای تفکیک منابع طبیعی آلودگی از منابع انسانی است که حالت آلودگی محیطی را با استفاده از یک عنصر نرمال شده منعکس می‌کند که این امر بدلیل بهبود تغییرات ناشی از ناهمگنی رسوبات است (حنیف و همکاران، ۲۰۱۶). غلظت فلزات در رسوبات نسبت به Al و با استفاده از یک منبع نرمال شده سنجیده می‌شود. در مطالعه اخیر، EF فلزات/شبه‌فلزات در رسوبات و در همه محل‌های نمونه‌برداری بر طبق کار سالاتی و مور (۲۰۱۰) و به صورت رابطه ۴ محاسبه شده است:

$$EF = \frac{\left(\frac{M}{Al}\right)_{Sample}}{\left(\frac{M}{Al}\right)_{Background}} \quad (۴)$$

در این معادله، M نمونه و M زمینه مقدار فلزات بررسی شده ($Ni, Cr, Cu, Co, Pb, Zn, Al, Mn, Fe, Mo$) به ترتیب در نمونه‌های رسوب و زمینه غیرآلوده هستند و Al نمونه و Al زمینه به ترتیب شامل مقدار Al در نمونه‌های رسوب و نمونه زمینه غیرآلوده می‌باشند. در این مطالعه مقادیر پایه برای M و Al زمینه از تیلور و مک‌لنن (۱۹۸۵) اقتباس شده است. مقادیر EF به صورتی که در جدول ۲ گزارش شده است، تفسیر شده‌اند.

اندیس تجمع زمین ($Igeo$): اندیس تجمع زمین در نمونه‌های مورد مطالعه برای غلظت فلزات فوق طبق معادله مولر (۱۹۶۹) (رابطه ۵) محاسبه شده است:

$$Igeo = \log_2 \left(\frac{C_{sample}}{1.5 B_{sample}} \right) \quad (۵)$$

^۲ Risk Index (RI)

جدول ۲. رده‌های مختلف مقادیر فاکتور غنی‌شدگی (EF) و اندیس تجمعی زمین ($Igeo$)

EF classes	Enrichment level	I-geo value; classes	Pollution level
$EF < 1$	No enrichment	$I-geo \leq 0; 0$	Unpolluted
$EF = 1-3$	Minor enrichment	$I-geo = 0-1; 1$	Unpolluted to moderately polluted
$EF = 3-5$	Moderate enrichment	$I-geo = 1-2; 2$	Moderately polluted
$EF = 5-10$	Moderately severe enrichment	$I-geo = 2-3; 3$	Moderately to strongly polluted
$EF = 25-50$	Very severe enrichment	$I-geo = 3-4; 4$	Strongly polluted
$EF > 50$	Extremely severe enrichment	$I-geo = 4-5; 5$	Strongly to very strongly polluted

جدول ۳. رده‌های RI و CF در ارتباط با پتانسیل خطر زیست‌محیطی و سطوح آلودگی

RI classes	Risk level	CF classes	Contamination level
$RI < 150$	Low ecological risk	$CF < 1$	Low contamination
$RI = 150-300$	Moderate ecological risk	$CF = 1-3$	Moderate contamination
$RI = 300-600$	Significant ecological risk	$CF = 3-6$	Considerable contamination
$RI > 600$	High ecological risk	$CF > 6$	High contamination

جدول ۴. رده‌های Er و سطوح خطر زیست‌محیطی مرتبط با آن

Er classes	Er level
$Er < 40$	Low potential ecological risk
$Er = 40-80$	Moderate potential ecological risk
$Er = 80-160$	Significant potential ecological risk
$Er = 160-320$	High potential ecological risk
$Er > 320$	Very high potential ecological risk

لیتولوژیکی است که بیش‌تر مربوط به لیتولوژی واحدهای زمین‌شناسی بالادست رودخانه مورد مطالعه (واحدهای اولترابازیکی، بازیکی، آندزیت بازالتی و آندزیتی) است. اندیس تجمع زمین ($Igeo$) یک معیار ژئوشیمیایی معمول برای ارزیابی آلودگی فلزات در رسوبات است. مقادیر $Igeo$ عناصر فلزی $Ni, Cr, Cu, Co, Pb, Zn, Mn$ و Mo از ۰/۱۵- تا ۸۳۹/۰ در تغییر است که این مقادیر در رده ۱ با سطح آلودگی صفر تا متوسط قرار می‌گیرد. مقادیر $Igeo$ عناصر فلزی Al و Fe از ۳/۹۶ تا ۴ در تغییر است که این مقادیر در رده ۴ قرار گرفته و نشان‌دهنده آلودگی شدید رسوبات است. نتایج فوق تقریباً با نتایج

به منظور تعیین کیفیت رسوبات، میزان آلودگی‌های فلزی و ارزیابی‌های محیطی در رسوبات رودخانه مولید ابتدا فاکتور غنی‌شدگی (EF) مورد بررسی قرار گرفته است. مقدار فاکتور غنی‌شدگی فلزات مورد نظر به ترتیب زیر تغییر می‌کند: $Mn > Ni > Fe > Al > Mo > Cu > Co > Pb > Zn > Cr$

مقدار EF عناصر فلزی فوق در نمونه‌های رسوبی مورد مطالعه از ۰/۰۰۱ تا ۹/۳۸ (سطح غنی‌شدگی: بدون غنی‌شدگی تا غنی‌شدگی متوسط) در تغییر است که مقادیر کمتر از ۱۰ این فاکتور در نمونه‌های مورد مطالعه نشان‌دهنده وجود منابع آلودگی طبیعی نظیر آلودگی

بر هوازدهی شیمیایی است. بررسی شاخص‌های عناصر فلزی نظیر $Igeo$, PLI , EF نشان‌دهنده میزان آلودگی کم تا متوسط رسوبات توسط منابع طبیعی نظیر واحدهای زمین‌شناسی منطقه است. ارزیابی خطر زیست‌محیطی (ERA) توسط شاخص‌هایی چون CF , Er , RI نشان می‌دهد که مقدار خطر زیست‌محیطی آلودگی رسوبات این حوضه کم است.

منابع

- آقاباتی، ع (۱۳۸۵) زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، ۵۸۶ ص.
- افتخارنژاد، ج (۱۳۵۲) مطالبی چند درباره تشکیل حوضه رسوبی فیلیش در خاور ایران و توجیه آن با تئوری تکتونیک صفحه‌ای. سازمان زمین‌شناسی کشور، ۶۷-۷۱.
- حسینی‌برزی، م (۱۳۹۰) ژئوشیمی عناصر اصلی نهشته‌های سیلیسی آواری سازند شیرگشت، بلوک کلمرد، ایران مرکزی برای تعیین برخاستگاه زمین‌ساختی و هوازدهی سنگ‌منشأ. مجله علوم زمین، ۲۰ (۷۹)، ص ۱۱۲-۱۰۱.
- فتوحی‌راد، غ (۱۳۸۳) پتروولوژی و ژئوشیمی افیولیت‌های دگرگون شده شرق بیرجند. رساله دکتری دانشگاه تربیت معلم تهران، ۳۱۰ ص.
- فیض‌نیا، س (۱۳۸۷) رسوب‌شناسی کاربردی با تأکید بر فرسایش خاک و تولید رسوب. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۳۵۶ ص.
- Armstrong-Altrin, J. S., Machain-Castillo, M. L., Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A., Sanchez-Cabeza, J. A., and Ruiz-Fernández, A. C (2015) Provenance and depositional history of continental slope sediments in the southwestern Gulf of Mexico unraveled by geochemical analysis. *Continental Shelf Research*, 95: 15-26.
- Bhatia, M. R (1983) Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *Journal of Geology*, 91: 611-627.
- Cox, R., Lowe, D. R., and Cullers, R. L (1995) The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919-2940.
- Fedo, C. M., Nesbitt, H. W., and Young, G. M (1995) Unraveling the effects of K-metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23: 921-924.
- Guo, W., Liu, X., Liu, Z., and Li, G (2010) Pollution and Potential Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in the Sediments

EF مطابقت دارد و منشأ آلودگی رسوبات در این حوضه آبریز مربوط به عوامل طبیعی نظیر نوع لیتولوژی سنگ‌های منشأ رسوب است. فعالیت‌های کشاورزی در طول کانال اصلی رودخانه به عنوان عامل انسانی می‌تواند به افزایش آلودگی برخی عناصر در رسوبات منجر شود. متوسط مقدار اندیس بار آلودگی (PLI) در رسوبات مورد مطالعه حدود ۱/۳۶ است. این مقدار نشان می‌دهد که رسوبات به طور متوسط آلوده شده‌اند. برای ارزیابی خطر زیست‌محیطی ابتدا فاکتور آلودگی (CF) برای ۴ عنصر فلزی Pb , Cu , Ni و Zn برای نمونه‌های مورد مطالعه محاسبه شده است. مقدار CF برای عنصر Pb ۰/۹۵، برای عنصر Cu ۰/۵۷، برای عنصر Ni ۱/۵۹ و برای عنصر Zn ۰/۶۲ است. مقادیر کمتر از ۱ این فاکتور برای عناصر Pb , Cu و Zn نشان‌دهنده آلودگی کم و مقدار CF عنصر Ni نشان‌دهنده آلودگی متوسط رسوبات نسبت به این عنصر است. سپس Er و RI فلزات فوق در حوضه آبریز رودخانه مولید بررسی شده است. مقادیر Er برای عنصر Pb ۴/۷۵، برای عنصر Cu ۲/۸۵، برای عنصر Ni ۷/۹۵ و برای عنصر Zn ۰/۶۲ است که موید حداقل پتانسیل خطر زیست محیطی این عناصر در رسوبات مورد مطالعه‌اند. RI عناصر فلزی مورد مطالعه در رسوبات رودخانه مولید ($RI=16/17$) نیز نشان‌دهنده خطر زیست‌محیطی کم این عناصر فلزی است.

نتیجه‌گیری

حوضه آبریز رودخانه مولید محدوده شرقی حوضه آبریز سد حاجی‌آباد می‌باشد. این حوضه در جنوب شرقی شهرستان قاین، استان خراسان جنوبی واقع شده است. با توجه به نتایج ژئوشیمیایی رسوبات رودخانه مولید برخاستگاه رودخانه مورد مطالعه آذرین مافیک ($P1$) و موقعیت زمین‌ساخت ناحیه منشأ رسوبات رودخانه‌ای احتمالاً جزایر کمائی اقیانوسی (OIA) است. با توجه به اندیس شیمیایی دگرسانی (CIA) و شاخص آلتراسیون پلاژیوکلاز (PIA) رسوبات رودخانه‌ای، منطقه مورد مطالعه در یک آب و هوای خشک قرار داشته و رسوبات فوق تحت تأثیر هوازدهی ضعیف قرار گرفته‌اند. ترسیم نمونه‌های مورد مطالعه بر روی نمودار شرایط اقلیمی ساتنر و داتا (۱۹۸۶) نیز شرایط خشک حاکم بر منطقه را تأیید می‌کند. در چنین شرایطی هوازدهی فیزیکی غالب

- Potter, P. E (1978) Petrology and chemistry of big river sands. *Journal of Geology*, 86: 423-449.
- Roser, B. P., and Korsch, R. J (1988) Provenance signatures sandstone - mudstone suites determined using discriminate function analysis of major element data. *Chemical geology*, 67: 119-139.
- Roser, B. P., and Korsch, R. J (1986) Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *Journal of Geology*, 94: 635-650.
- Salati, S., and Moore, F (2010) Assessment of heavy metal concentration in the Khoshk River water and sediment, Shiraz, Southwest Iran. *Environmental Monitoring Assessment*, 164 (1-4): 677-689.
- Seshan, B. R. R., Natesan, U., and Deepthi, K (2010) Geochemical and statistical approach for evaluation of heavy metal pollution in core sediments in southeast coast of India. *International Journal of Environmental Sciences Technology*, 7 (2): 291-306.
- Shruti, V. C., Jonathan, M. P., Rodriguez-Espinosa, P. F., Nagarajan, R., Escobedo-Urias, D. C., Morales-Garcia, S.S., and Martinez-Tavera, H (2017) Geochemical characteristics of stream sediments from an urban-volcanic zone, Central Mexico: Natural and man-made inputs. *Chemie der Erde*, 77: 303-321.
- Taylor, S. R., and McLennan, S. M (1985) *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. London, Blackwell, 312p.
- Tirrulle, R., Bell, L. R., Griffis, R. J., and Camp, V. E (1983) The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America*, 84: 134-150.
- Vilà, M., and Martínez-Lladó, X (2015) Approaching earth surface geochemical variability from representative samples of geological units: The Congost River basin case study. *Journal of Geochemical Exploration*, 148: 79-95.
- Wanas, H. A., and Abdel-Maguid, N. M (2006) Petrography and geochemistry of the Cambro-Ordovician Wajid sandstone, southwest Saudi Arabia: Implications for provenance and tectonic setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27: 416-429.
- Zhu, W., Bian, B., and Li, L (2008) Heavy metal contamination of road-deposited sediments in a medium size city of China. *Environmental Monitoring Assessment*, 147 (1-3): 171-181.
- Zimmermann, U., and Bahlburg, H (2003) Provenance analysis and tectonic setting of the Ordovician clastic deposits in the southern Puna Basin, NW Argentina. *Sedimentology*, 50: 1079-1104.
- around Dongjiang Harbor, Tianjin. *Procedia Environmental Sciences*, 2: 729-736.
- Hakanson, L (1980) An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 14 (8): 975-1001.
- Hanif, N., Eqani, S. A. M. A. S., Ali, S. M., Cincinelli, A., Ali, N., and Katsoyiannis, I. A (2016) Geo-accumulation and enrichment of trace metals in sediments and their associated risks in the Chenab River, Pakistan. *Journal of Geochemistry Exploration*, 165: 62-70.
- Harikumar, P. S., Nasir, U. P., and Rahman, M. M (2009) Distribution of heavy metals in the core sediments of a tropical wetland system. *International Journal of Environmental Sciences Technology*, 6 (2): 225-232.
- Herron, M. M (1988) Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Sedimentary Research*, 58: 820-829.
- Kroonenberg, S (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*, 69-81.
- Mandeng, E. P. B., Bidjeck, L. M. B., Bessa, A. Z. E., Ntomb, Y. D., Wadjou, J. W., Elvine Paternie Edjengte Doumo, E. P. E., and Dieudonn, L. B (2019) Contamination and risk assessment of heavy metals, and uranium of sediments in two watersheds in Abiete-Toko gold district, Southern Cameroon. *Heliyon*, 5: e02591.
- Muller, G (1969) Index of geoaccumulation in sediments of the rhine river. *Geojournal*, 2 (3): 108-118.
- Nagarajan, R., Roy, P. D., Jonathan, M. P., Lozano-Santacruz, R., Kessler, F.L., and Prasanna, M. V (2014) Geochemistry of Neogene sedimentary rocks from Borneo basin, East Malaysia: paleo-weathering, provenance and tectonic setting. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 74 (1): 139-146.
- Nath, N. B., Kunzendorf, H., and Pluger, W. L (2000) Influence of provenance and sedimentary processes on the elemental ratios of the fine-grained fraction of the bedload sediments from the Vemband Lake and the adjoining continental shelf, south-coast of India. *Journal of Sedimentary Research*, 70: 1081-1094.
- Nesbitt, H. W., and Young, G. M (1984) Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on Thermodynamic and Kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 1523-1534.
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., and Siever, R (1987) *Sand and Sandstone* (2nd edition). New York, Springer-Verlag, 553p.