

کاربرد پتروگرافی و ژئوشیمی رسوبات پادگانه‌ای دیرینه در تعیین ناحیه منشأ و نرخ هوازدهی، بیرجند، خراسان جنوبی

مریم مرتضوی‌مهریزی^{۱*}، عالیبه اشرفی^۲ و غلامرضا میراب‌شبهستری^۳

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

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

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

نویسنده مسئول: mmortazavi@birjand.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۲/۱۲ پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۲۸

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

محدوده مورد مطالعه شامل نهشته‌های آبرفتی نئوژن شهر بیرجند است که از نظر زمین‌شناسی به عنوان بخشی از پهنه ساختاری شرق ایران در نظر گرفته می‌شود. در مطالعات پتروگرافی، از ۲۰۰ قطعه گراولی و ۱۰ نمونه ماسه‌سنگی کمک گرفته شده است در حالی که، برای مطالعات شیمی رسوبات از ۱۳ نمونه گل‌سنگی و ۲ نمونه ماسه‌سنگی استفاده شده است. بررسی پتروگرافی نمونه‌های فوق نشان‌دهنده حضور ذرات با کانی‌شناسی متفاوت در رسوبات آبرفتی موردنظر است که علاوه بر کوارتز در آن‌ها فراوانی خرده‌سنگ‌های آذرین و رسوبی قابل توجه است. ترسیم نتایج آنالیز اکسیدهای عناصر اصلی و عناصر فرعی نمونه‌های فوق در نمودارهای ارائه شده در این زمینه، وجود سنگ‌های آذرین مافیک تا حدواسط و سنگ‌های رسوبی در ناحیه منشأ رسوبات را منعکس می‌کند. بررسی واحدهای سنگی اطراف محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که منشأ قطعات گراولی ذرات ماسه‌ای احتمالاً از واحدهای افیولیتی کرتاسه، واحدهای فلیشی کرتاسه پسین تا آئوسن، سنگ‌های رسوبی آواری-کربناته پالئوژن و سنگ‌های ولکانیکی و رسوبی جوان‌تر که در اطراف محدوده مورد نظر رخنمون دارند. بررسی کانی‌شناسی، بلوغ بافتی و ترکیبی رسوبات به همراه ارزیابی شاخص‌های هوازدهی شیمیایی نشان می‌دهد که رسوبات آبرفتی ذکر شده در نزدیک منشأ برجای گذاشته شده و هوازدهی متوسط تا ضعیفی را متحمل شده‌اند.

واژگان کلیدی: کانی‌شناسی، تجزیه عنصری، نهشته‌های آبرفتی، کواترنری، بیرجند

پیشگفتار

شاخصی از مواد رسوبی مشخص است (کولر و پودکوپروف، ۲۰۰۲؛ آرمسترانگ-آلترین و همکاران، ۲۰۱۵ الف؛ آرمسترانگ-آلترین و همکاران، ۲۰۱۵ ب؛ راموس وازکز و همکاران، ۲۰۱۷). به عبارتی، ژئوشیمی رسوبات آواری بویژه رسوبات ماسه‌ای و گلی منعکس‌کننده ترکیب منشأ، هوازدهی شیمیایی، جورشدگی هیدرولیکی و سایش است (بیگونهی و همکاران، ۲۰۱۷؛ هاک و روی، ۲۰۲۰). ارزیابی جایگاه زمین‌ساختی، نوع سنگ‌های والد، عوامل تعیین کننده ترکیب و بافت رسوبات، شدت فرآیندهای هوازدهی و شرایط اقلیمی با استفاده از ترکیب و شیمی نهشته‌های سیلیسی‌آواری، به درک روند تکامل حوضه‌های رسوبی و بازسازی شرایط جغرافیای دیرینه ناحیه منشأ کمک خواهد کرد. در ایران نیز مطالعات متعددی در این زمینه و با تأکید بر نهشته‌های ماسه‌سنگی و گل‌سنگی توالی‌های رسوبی

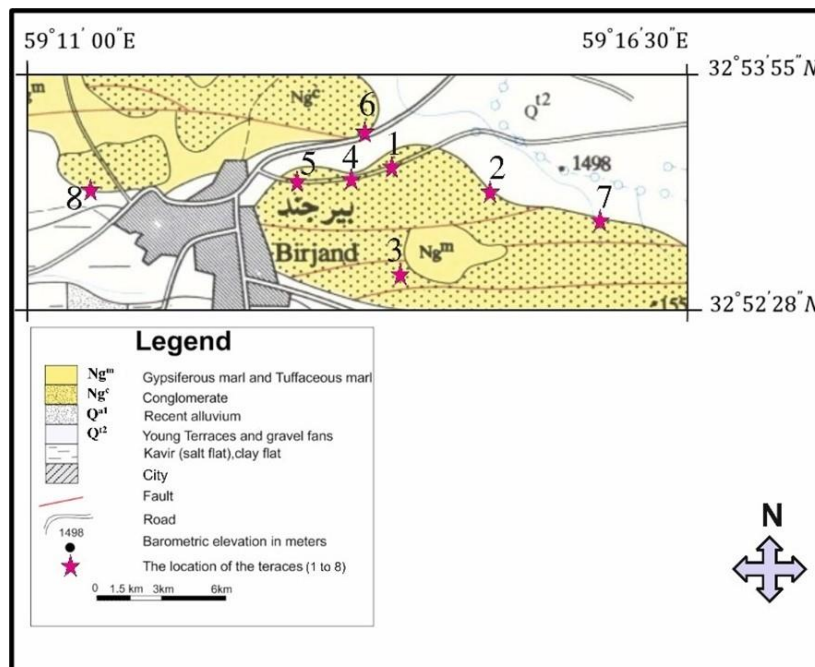
رسوبات تخریبی شواهد قابل توجهی از تغییرات در تأمین مواد از منابع مختلف در طول زمان را در خود ثبت کرده‌اند. ترکیب و ژئوشیمی رسوبات تخریبی ابزار قدرتمندی در تعیین جایگاه زمین‌ساختی و ترکیب سنگ منشأ است (روداز و همکاران، ۱۳۹۰؛ آرمسترانگ آلترین و همکاران، ۲۰۱۵ الف؛ هرماندز-هینوجوسا و همکاران، ۲۰۱۸). ویژگی‌های سنگ‌های منشأ، فرآیندهای هوازدهی شیمیایی و جورشدگی در حین انتقال، رسوب‌گذاری و دیاژنز ترکیب شیمیایی رسوب را اصلاح می‌کنند (بیگونهی و همکاران، ۲۰۱۷؛ توفیق و همکاران، ۲۰۱۸؛ اکوآبسا و همکاران، ۲۰۱۸؛ نجیگوئی و همکاران، ۲۰۱۸؛ بوکاندا و همکاران، ۲۰۱۹؛ نگویدچوآ و همکاران، ۲۰۱۹؛ لی و همکاران، ۲۰۲۲) و ژئوشیمی عناصر اصلی و فرعی

قلیایی‌خاکی می‌توان تا حدی تاریخچه هوازده‌گی رسوبات تخریبی دیرینه را ارزیابی کرد (زید و گاهانی، ۲۰۱۵؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰). این مقاله بر منشأ، تاریخچه هوازده‌گی، شرایط آب و هوایی و بلوغ رسوبات آبرفتی نئوژن بیرجند بر اساس کانی‌شناسی و ژئوشیمی تمرکز دارد. با توجه به اینکه تاکنون مطالعه جامعی در خصوص ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی نهشته‌های آبرفتی شهر بیرجند صورت نگرفته است، نتایج این مطالعه می‌تواند در تفسیر شرایط جغرافیای دیرینه منطقه کارگشا باشد.

موقعیت زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

شهر بیرجند مرکز استان خراسان جنوبی می‌باشد که در ۴۸۶ کیلومتری جنوب غربی مشهد واقع شده است. منطقه مورد نظر شامل پادگانه‌های آبرفتی شهر بیرجند با سن نئوژن است که در موقعیت جغرافیایی $30^{\circ} 16' 59''$ تا $32^{\circ} 53' 55''$ عرض شمالی قرار گرفته است. ارتفاع این منطقه نسبت به سطح دریای آزاد ۱۴۸۸ متر بوده که مرتفع‌ترین نقطه آن (با ارتفاع ۱۵۰۵ متر)، شمال شرق محدوده مورد نظر است (شکل ۱).

قدیمه (برای مثال، جعفرزاده و حسینی‌برزی، ۲۰۰۸؛ خانه باد و همکاران، ۲۰۱۲، زدمقدم و همکاران، ۲۰۱۳؛ جعفرزاده و همکاران، ۲۰۱۳، مرتضوی و همکاران، ۲۰۱۳؛ جعفرزاده و همکاران، ۲۰۱۴؛ مرتضوی و همکاران، ۲۰۱۴؛ حسنی و همکاران، ۱۳۹۷، سعیدی و همکاران، ۱۳۹۷؛ قاسملو و همکاران، ۱۳۹۹؛ شرفی و همکاران، ۱۴۰۱) و نیز رسوبات سیلیسی‌آواری عهد حاضر (به عنوان مثال، مرتضوی مهریزی، ۱۳۹۸؛ خسروی چنار و همکاران، ۱۳۹۸) صورت گرفته است. رسوبات آواری رودخانه‌ای از این قاعده مستثنی نیستند. بنابراین، ترکیب کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی رسوبات رودخانه‌ای متأثر از ویژگی‌های سنگ‌شناسی ناحیه منشأ رسوبات یا همان حوضه آبریز است. به عبارتی، ترکیب و شیمی رسوبات تخریبی رودخانه‌ای تاریخچه فرسایش کمربند کوهزایی مجاور را منعکس می‌کند. پس، تلفیق داده‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمی رسوبات آبرفتی رودخانه‌ای به درک اختصاصات ناحیه منشأ رسوبات و نیز جایگاه زمین‌ساختی آن کمک خواهد کرد (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰). از آنجایی که هوازده‌گی نیز توسط تکتونیک، آب و هوا و مجموعه منشأ کنترل می‌شود، با بررسی روابط بین عناصر قلیایی و



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند (افتخارنژاد، ۱۹۸۶) با ترسیم مجدد.

نامیده شده و در مجاورت حاشیه شمال غربی بلوک لوت قرار دارد (آقنابتی، ۱۳۸۳). پهنه ساختاری شرق ایران بین دو بلوک افغان در شرق و لوت در غرب واقع شده و در

منطقه مورد مطالعه، بخشی از پهنه ساختاری شرق ایران است که در تقسیم بندی پهنه‌های رسوبی - ساختاری ایران توسط آقنابتی تحت عنوان حوضه فلیشی شرق ایران

قدیمی‌تر را می‌پوشاند. از جمله رسوبات نئوژن این محدوده پادگانه‌های آبرفتی (واحد Ng^c ، شکل ۱) مورد مطالعه است که با توپوگرافی کم ارتفاع و به شکل تپه‌ماهوری با روندی شمال غربی- جنوب شرقی در منطقه گسترش دارد. ۸ موقعیت برداشت از این واحد انتخاب شده که اکثراً در محل برش جاده‌ها قرار دارند. موقعیت جغرافیایی نیمرخ‌های برداشت شده در جدول ۱ و تصاویر صحرایی آن‌ها در شکل ۲ ارائه شده است.

راستای شمالی- جنوبی حدود ۷۰۰ کیلومتر امتداد دارد (تیرول و همکاران، ۱۹۸۳). محدوده مورد نظر بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند (افتخارنژاد، ۱۹۸۶) است که شامل واحدهای مختلفی چون آمیزه‌های افیولیتی (سنگ‌های الترامافیک و مافیک، سنگ‌های دگرگونی و سنگ‌های رسوبی)، رخساره‌های فلیشی، سنگ‌های آذرین ولکانیکی و رسوبات کواترنری است. رسوبات کواترنری این محدوده شامل رسوبات پالئوژن و نئوژن است که رسوبات نئوژن به صورت دگرشیب رسوبات



شکل ۲. تصاویر صحرایی از ۸ نیمرخ رسوبی برداشت شده، (A) نیمرخ رسوبی پادگانه شماره ۱، دید به سمت شمال غرب، (B) نیمرخ رسوبی پادگانه شماره ۲، دید به سمت غرب، (C) نیمرخ رسوبی پادگانه شماره ۳، دید به سمت شرق، (D) نیمرخ رسوبی پادگانه شماره ۴، دید به سمت شمال غرب، (E) نیمرخ رسوبی پادگانه شماره ۵، دید به سمت شرق، (F) نیمرخ رسوبی پادگانه شماره ۶، دید به سمت جنوب، (G) نیمرخ رسوبی پادگانه شماره ۷، دید به سمت غرب، (H) نیمرخ رسوبی پادگانه شماره ۸، دید به سمت شمال غرب.

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی ۸ برش انتخاب شده به همراه ارتفاع از سطح دریا و ضخامت پادگانه.

پادگانه	موقعیت جغرافیایی (GPS)	ارتفاع از سطح دریا (بر حسب متر)	ضخامت پادگانه (بر حسب متر)
۱	32° 53' 19"N, 59° 14' 44"E	۱۵۰۷	۴/۹۸
۲	32° 52' 58" N, 59° 15' 00" E	۱۵۱۳	۴/۲۰
۳	32° 52' 33" N, 59° 14' 27"E	۱۵۱۵	۲/۸۲
۴	32° 53' 15" N, 59° 14' 10"E	۱۵۱۳	۴/۶۵
۵	32° 53' 09" N, 59° 13' 48" E	۱۵۰۲	۴/۶۳
۶	32° 53' 29" N, 59° 14' 34"E	۱۴۹۸	۱/۶۷
۷	32° 52' 53" N, 59° 16' 37"E	۱۵۱۴	۳/۱۵
۸	32° 52' 58" N, 59° 11' 49"E	۱۴۴۵	۲/۸۲

مواد و روش‌ها

۸ موقعیت برداشت از واحد آبرفتی نئوژن انتخاب شده که اکثراً در محل برش جاده‌ها قرار داشته است. موقعیت جغرافیایی نیمرخ‌های برداشت شده در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است. در پیمایش صحرایی پروفیل‌های انتخابی و بررسی ویژگی‌های اصلی رخساره‌های رسوبی نظیر اختصاصات بافتی، فابریک رسوبات و ساختمان‌های رسوبی اصول ارائه شده توسط استو (۲۰۰۵) بکار برده شده است. انواع رخساره‌های سنگی بر اساس اندازه دانه‌ها، ساختارهای رسوبی، شکل هندسی توده‌های رسوبی و سطوح محصورکننده آن‌ها و بر مبنای طبقه‌بندی میال (۲۰۰۶) در سه مجموعه رخساره‌های سنگی کنگلومرای (۵ رخساره سنگی: Gp, Gh, Gcm, Gmg, Gmm)، ماسه‌سنگی (۴ رخساره سنگی: St, Sm, Sl, Sh) و گل‌سنگی (۲ رخساره سنگی: Fl و Fm) مرتب شده است. توصیف و شرح مختصر شرایط رسوبگذاری رخساره‌های سنگی شناسایی شده (شکل ۳)، در سیستم رودخانه‌ای بریده بریده نزدیک به منشأ، در جدول ۲ ارائه شده است. مطالعات آزمایشگاهی شامل مطالعات پتروگرافی و ژئوشیمی می‌باشد. در مطالعات پتروگرافی از نمونه‌های گراولی و ماسه‌ای به منظور بررسی ترکیب رسوبات استفاده شده است. طبق معیار استو (۲۰۰۵) از هر رخساره کنگلومرای در مقیاس یک مربع ۰/۵ در ۰/۵ متر، تعداد ۵۰ گراول انتخاب و حدود ۲۰۰ قطعه گراولی از ۸ پروفیل انتخابی جمع‌آوری شده است. بعد از جدایش نمونه‌های مشابه، تعداد ۳۰ نمونه متفاوت برای تهیه برش نازک میکروسکوپی و بررسی ترکیب کانی‌شناسی آماده شده

است. درصد فراوانی این قطعات به صورت دانه شماری محاسبه شده است. از رخساره‌های ماسه‌سنگی نیز تعداد ۱۰ مقطع میکروسکوپی تهیه شده است. درصد فراوانی اجزاء تشکیل‌دهنده این رسوبات با استفاده از چارت‌های مقایسه‌ای فلوگل (۲۰۱۰) و به صورت چشمی تعیین شده و نام‌گذاری ترکیب آن‌ها بر اساس طبقه‌بندی فولک (۱۹۸۰) انجام شده است. مجوریتی ترکیبی^۱ (تاگر، ۲۰۰۱) نمونه‌های ماسه‌سنگی فوق از نسبت دانه‌های پایدار (کوارتز + تک‌بلور + چرت) به دانه‌های ناپایدار (کوارتز چندبلور + فلدسپات + خرده‌سنگ) محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است. مقادیر عنصری (اکسیدهای عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی و مقادیر عناصر فرعی بر حسب ppm) نمونه‌های آبرفتی مورد مطالعه، با استفاده از دستگاه XRF شرکت تجزیه‌کنندگان کانسارهای بلورین آمیتیس شرق مشهد و توسط دستگاه Philips (Uniquant- Software) PW XRF Spectrometer به همراه نرم‌افزار And X40 بر مبنای روش احمدعلی (۱۹۸۹) انجام شده است. برای این آزمایش، ۱۳ نمونه گل‌سنگی و ۲ نمونه ماسه‌سنگی انتخاب شده است. نمونه‌های به‌طور جداگانه با آگات مورتار پودر شده است. در نمونه‌های ماسه‌سنگی، به‌دلیل حضور سیمان کربناته، قبل از پودرشدن، نمونه‌ها در چند مرحله با اسیدکلریدریک رقیق و آب مقطر شستشو داده شده و سپس در آون خشک شده است. Loss on Ignition (LOI) برای ۱ گرم نمونه خشک شده قبل و بعد از حرارت °C ۱۰۰۰ و برای مدت زمان ۱ ساعت بدست آمده است. آنالیز XRD ۳ نمونه گلی، به منظور تعیین ترکیب کانی‌شناسی، نیز توسط دستگاه Philips X-ray

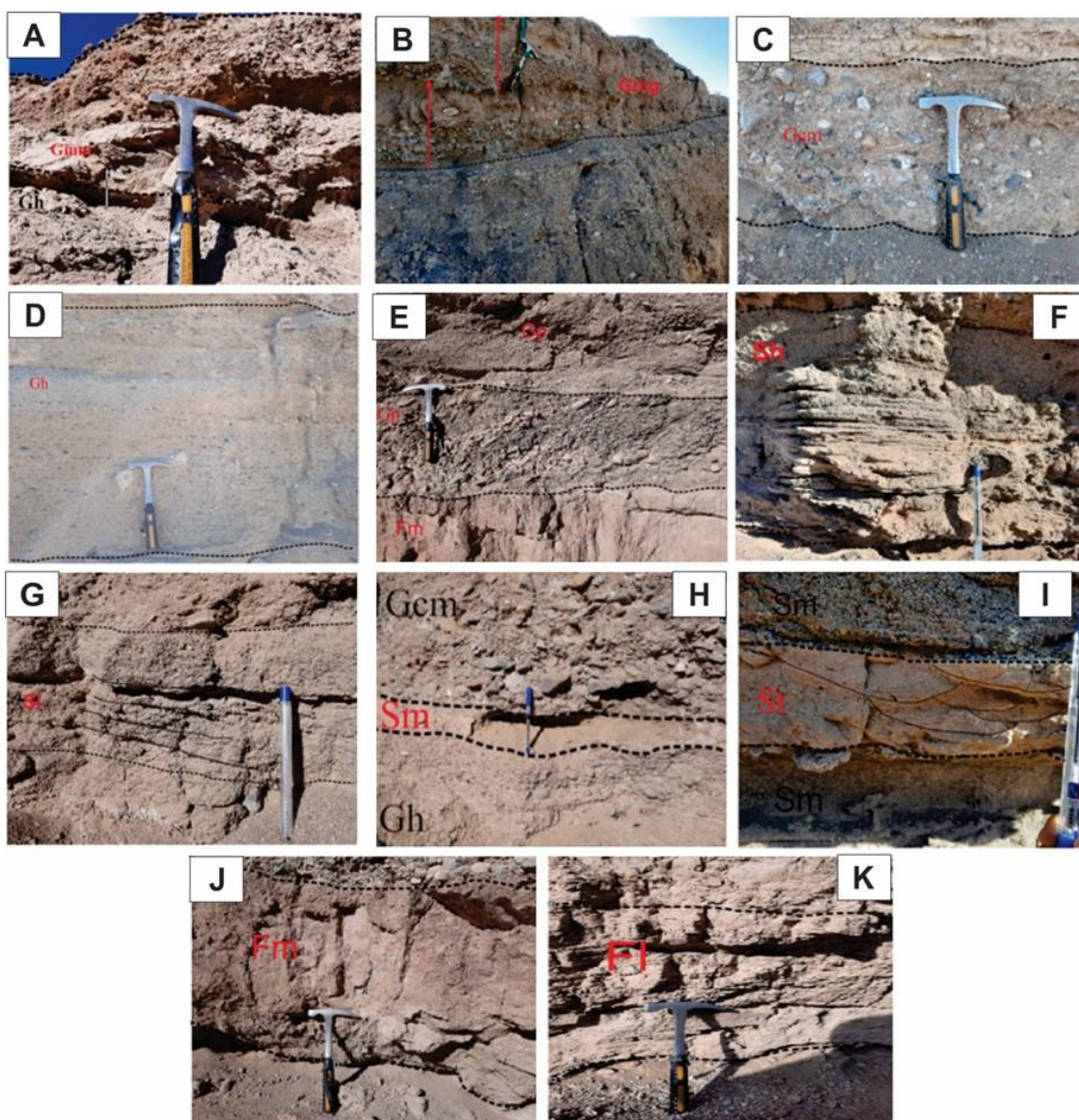
^۱ Compositional Maturity: CM

کنگلومرایی منطقه است. از بین ۲۰۰ قطعه گراول جمع‌آوری شده ۱۷۰ قطعه آذرین و ۳۰ قطعه رسوبی بوده است. نتایج مطالعات کانی‌شناسی و درصد فراوانی قطعات نامبرده در جدول ۳ خلاصه شده است. اندازه رسوبات گراولی در رخساره‌های مختلف از ۲ میلی‌متر تا حدود ۳۰ سانتی‌متر متغیر می‌باشد که بر پایه طبقه‌بندی اودون-ونتورث در رده گرانول و بولدر ریز قرار می‌گیرند. قطعات گراولی عموماً نیمه‌زاویه‌دار تا نیمه‌گردشده بوده و شکل قطعات از کروی، دیسکی تا تیغه‌ای شکل در تغییر می‌باشد. جورشدگی قطعات در اکثر رخساره‌های گراولی ضعیف می‌باشد.

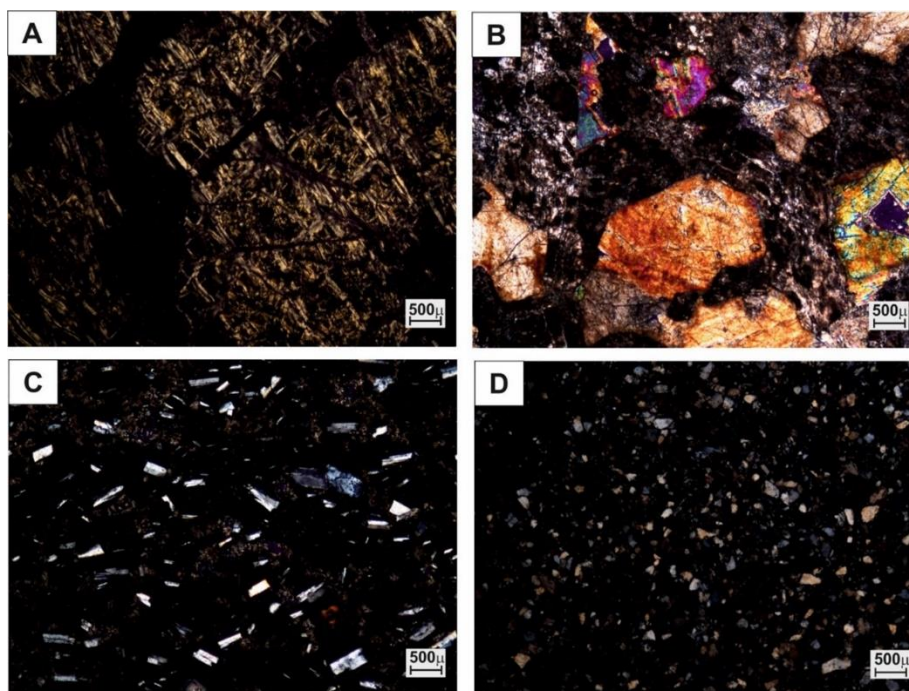
Diffraction PW 1840 شرکت فوق در مشهد و بر مبنای روش آمروسی و همکاران (۲۰۰۲) انجام شده است.

نتایج پتروگرافی

ترکیب و بافت قطعات رخساره‌های کنگلومرایی: بررسی مقاطع میکروسکوپی نمونه‌های گراولی جمع‌آوری شده از پادگانه‌های آبرفتی مورد مطالعه نشان می‌دهد که این قطعات از سنگ‌شناسی متنوعی برخوردارند. قطعات آذرین الترامافیک (شکل ۴A)، مافیک (شکل ۴B)، حدواسط (شکل ۴C) و قطعات رسوبی ماسه‌سنگی (شکل ۴D) فراوان‌ترین قطعات جمع‌آوری شده در واحدهای



شکل ۳. تصاویر صحرایی از مجموعه رخساره‌های کنگلومرایی، (A) رخساره سنگی Gmm، (B) رخساره سنگی Gmg، (C) رخساره سنگی Gcm و (D) رخساره سنگی Gh و (E) رخساره سنگی Gp، مجموعه رخساره‌های ماسه‌سنگی (F) رخساره سنگی Sh، (G) رخساره سنگی Sl، (H) رخساره سنگی Sm و (I) رخساره سنگی St و مجموعه رخساره‌های گل‌سنگی (J) رخساره سنگی Fm و (K) رخساره سنگی Fl.



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی (نور XPL) از انواع قطعات گراولی رسوبات آبرفتی مورد مطالعه، (A) قطعه‌ای الترامافیک که شدیداً سرپانتینی شده است. (B) قطعه گابروی حاوی بلورهای پیروکسن و پلاژیوکلاز، (C) آندزیت با بلورهای پلاژیوکلاز و زمینه شیشه‌ای و (D) قطعه رسوبی ماسه‌سنگی.

جدول ۲. رخساره‌های سنگی شناسایی شده در نهشته‌های آبرفتی نئوژن و تفسیر شرایط رسوبگذاری (کدهای رخساره ای برگرفته از (میال، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۰)).

تفسیر شرایط رسوبگذاری	کد رخساره‌ای	رخساره سنگی
رخساره‌های کنگلومرای		
رسوبگذاری از جریان‌های خرده‌دار با ویسکوزیته و بار رسوبی زیاد	Gmm	کنگلومرای ماتریکس پشتیبان توده‌ای
رسوبگذاری از جریان‌های خرده‌دار با پلاستیسیته کاذب	Gmg	کنگلومرای دانه‌پشتیبان دارای دانه‌بندی تدریجی
رسوبگذاری از جریان‌های خرده‌دار با پلاستیسیته کاذب	Gcm	کنگلومرای دانه‌پشتیبان توده‌ای
مهاجرت سدهای طولی یا رسوبگذاری به شکل رسوبات باقیمانده در کف کانال	Gh	کنگلومرای دانه‌پشتیبان با چینه‌بندی افقی
مهاجرت سدهای متقاطع زبانه‌ای	Gp	کنگلومرای دارای طبقه‌بندی مورب مسطح
رخساره‌های ماسه‌سنگی		
رسوبگذاری در رژیم‌های جریان‌ی بالا و پایین به شکل طبقات مسطح	Sh	ماسه‌سنگ دارای طبقه‌بندی افقی
رسوبگذاری در رژیم جریان‌ی بالا و بر روی سطوح رسوبگذاری کمی شیب‌دار	Sl	ماسه‌سنگ دارای لامیناسیون مورب با زاویه کم
رسوبگذاری سریع در طی فروکش کردن سیلاب	Sm	ماسه‌سنگ دارای طبقه‌بندی توده‌ای
مهاجرت ریپل‌های بزرگ مقیاس سه‌بعدی با خط‌الرأس پیچیده	St	ماسه‌سنگ دارای طبقه‌بندی مورب عدسی شکل
رخساره‌های گل‌سنگی		
رسوبگذاری سریع از جریان معلق در دشت سیلابی	Fm	سیلتستون و گل‌سنگ توده‌ای
رسوبگذاری ذرات معلق در محیط آرام خارج کانال	Fl	سیلتستون و رس‌سنگ لامینه

جدول ۳. قطعات گراولی شناسایی شده در رخساره‌های سنگی کنگلومرای پادگانه‌های آبرفتی.

کانی‌های شاخص	نام سنگ	درصد فراوانی	تعداد قطعات (از ۲۰۰ قطعه)	سنگ‌شناسی قطعات گراولی
الیون، پیروکسن	الترامافیک اکثراً سرپانتینی شده	۲۰	۴۰	آذرین الترامافیک
پلاژیوکلاز، هورنبلند، پیروکسن	بازالت، بازالت‌شیشه‌ای، آندزیت‌بازالتی، گابرو	۲۵	۵۰	آذرین مافیک
شیشه، پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپات، هورنبلند	آندزیت، تراکی‌آندزیت، دیوریت‌پورفیری	۴۰	۸۰	آذرین حدواسط
کوارتز، ارتوکلاز، پلاژیوکلاز، میکا، کانی‌سنگین اپک	ماسه‌سنگ، ماسه‌سنگ آهکی	۱۵	۳۰	رسوبی

جدول ۴. درصد فراوانی، اندازه و مچوریتی ترکیبی نمونه‌های ماسه‌سنگی مورد مطالعه.

Sample N.	Q		F		RF			Mica	Heavy M.	Opaque M.	Calcite Cement	Porosity	Size	Compositional Maturity (CM)
	Qm	Qp	K	P	SRF	VRF	MRF							
S ₁	40	5	2	1	3	-	-	5	<1	5	10	29	Very fine	3.9
S ₂	45	6	2	2	6	-	-	4	1	7	7	20	Fine	3.2
S ₃	42	4	1	1	8	-	1	5	<1	11	5	19	Fine	3.1
S ₄	30	5	3	4	3	2	-	6	1	12	7	27	Fine to medium	1.9
S ₅	25	3	2	6	5	2	-	7	1	8	10	31	Fine to medium	1.7
S ₆	32	5	2	5	4	2	1	5	1	9	8	26	Fine to medium	1.9
S ₇	28	3	3	4	5	2	1	5	1	10	10	28	Medium to coarse	1.7
S ₈	18	6	1	6	3	2	1	4	1	5	11	42	Medium to coarse	1.1
S ₉	20	7	3	5	8	4	2	2	1	8	9	31	Medium to coarse	0.82
S ₁₀	15	6	5	10	6	8	5	3	<1	5	7	29	Coarse to very coarse	0.42

ژپیس، پالی‌گورسکیت، ایلیت، آنتی‌گوریت و کلینوکریزوتیل به عنوان فاز فرعی در این نمونه‌ها حضور دارند (شکل ۷).

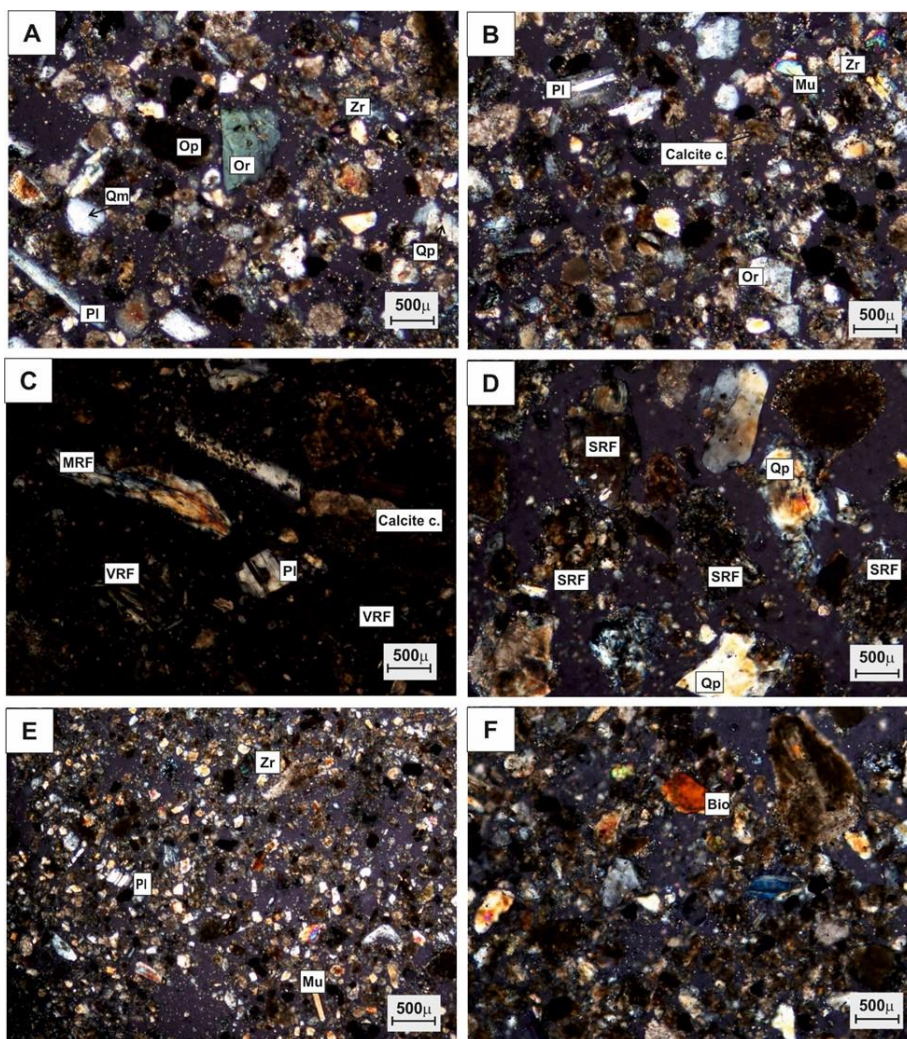
نتایج ژئوشیمی

نتایج تجزیه عناصر اصلی ۱۵ نمونه انتخاب شده به صورت درصد در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول فوق مشخص شده است میزان اکسید سیلیسیم (SiO₂) از ۲۵/۰۷ تا ۵۶/۳۹ درصد (با میانگین ۴۸/۰۷ درصد) و میزان اکسید آلومینیم (Al₂O₃) از ۴/۸۴ تا ۱۲/۹۸ درصد (میانگین ۱۰/۷۹ درصد) و میزان اکسید کلسیم (CaO) از ۸/۷۰ تا ۱۵/۱۲ درصد (میانگین ۱۰/۳۴ درصد) از بقیه فراوان‌تر هستند. اکسید منیزیم (MgO) با میانگین ۶/۱۵ درصد و اکسید آهن (Fe₂O₃) با میانگین ۵/۸۶ درصد در مرتبه دوم قرار می‌گیرند. در مرتبه سوم هم اکسید پتاسیم (K₂O) با میانگین ۱/۷۳ درصد و اکسید سدیم (Na₂O) با میانگین ۱/۲۹ درصد قرار می‌گیرند.

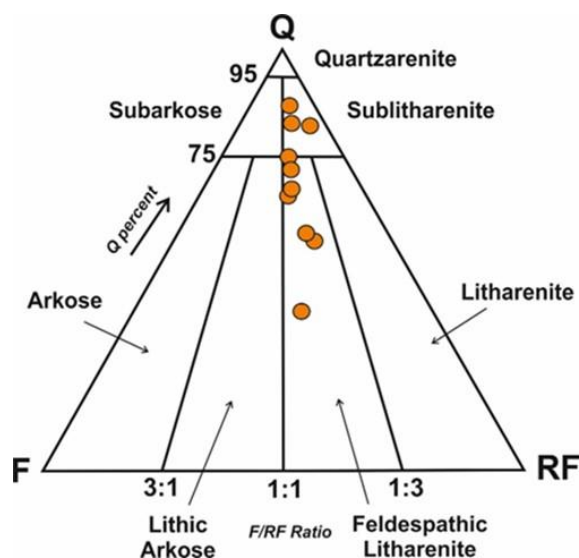
فراوانی MnO, TiO₂ و P₂O₅ کمتر از یک درصد است به طوری که مقدار میانگین هریک از این اکسیدها در نمونه‌های مورد مطالعه به ترتیب ۰/۵۵، ۰/۰۹ و ۰/۱۲ درصد است. نتایج آنالیز عناصر فرعی و خاکی کمیاب ۱۵ نمونه برداشت شده به صورت ppm در جدول ۵ ارائه شده است. نمونه‌ها حاوی مقادیر زیادی Ba (با میانگین ۲۴۸/۰۷ درصد)، Cr (با میانگین ۱۸۲/۸ درصد)، Ni (با میانگین ۲۲۵/۸۷ درصد)، Sr (با میانگین ۴۲۲/۲ درصد)، V (با میانگین ۱۱۰/۰۷ درصد)، Zr (با میانگین ۱۸۳/۱۳ درصد) می‌باشند. اما مقادیر Cu, Co, Th, U, Nb, La, Pb, Mo و Zn در اکثر نمونه‌ها کم می‌باشد.

ترکیب و بافت نمونه‌های ماسه‌سنگی: بررسی ترکیب نمونه‌های ماسه‌سنگی (۱۰ مقطع نازک میکروسکوپی) رسوبات پادگانه‌ای شهر بیرجند نشان می‌دهد که این رسوبات از کانی‌های اصلی کوارتز (تک‌بلور و چندبلور)، فلدسپات (ارتوکلاز و پلاژیوکلاز)، خرده‌سنگ (خرده‌سنگ‌های رسوبی، آذرین و دگرگونی)، کانی‌های فرعی مثل میکاها (مسکویت و بیوتیت) و کانی‌های سنگین تیره و روشن (زیرکان و مگنتیت) و سیمان سست کربناته (کلسیتی) تشکیل شده است (شکل ۵). درصد فراوانی ذرات تشکیل‌دهنده نمونه‌های فوق در جدول ۴ آورده شده است. از نظر بافتی اندازه ذرات تشکیل‌دهنده نمونه‌های ماسه‌ای از ۰/۰۸ (ماسه خیلی ریز) تا ۱/۹۱ میلی‌متر (ماسه خیلی درشت) (با میانگین ۰/۴ میلی‌متر (ماسه متوسط)) در تغییر است. این ذرات نیمه‌زاویه‌دار تا نیمه‌گردشده‌اند و از کرویت پایینی برخوردارند. جورشدگی این رسوبات متوسط تا خوب است و از نظر بلوغ بافتی ساب‌مچور تا مچورند. بررسی نسبت ذرات پایدار (کوارتز تک‌بلور + چرت) به ذرات ناپایدار (کوارتز چندبلور + فلدسپات + خرده‌سنگ) نشان می‌دهد که مقدار مچوریتی ترکیبی این رسوبات از ۰/۴۲ تا ۳/۹ (با میانگین ۱/۹) در تغییر است. ترسیم درصد کوارتز، فلدسپات و خرده‌سنگ نمونه‌های ماسه‌سنگی فوق در نمودار طبقه‌بندی ترکیبی ماسه‌سنگ‌ها (فولک، ۱۹۸۰) نشان‌دهنده ترکیب فلدسپاتیک‌لیتارنایتی تا ساب‌لیتارنایتی آن‌هاست (شکل ۶).

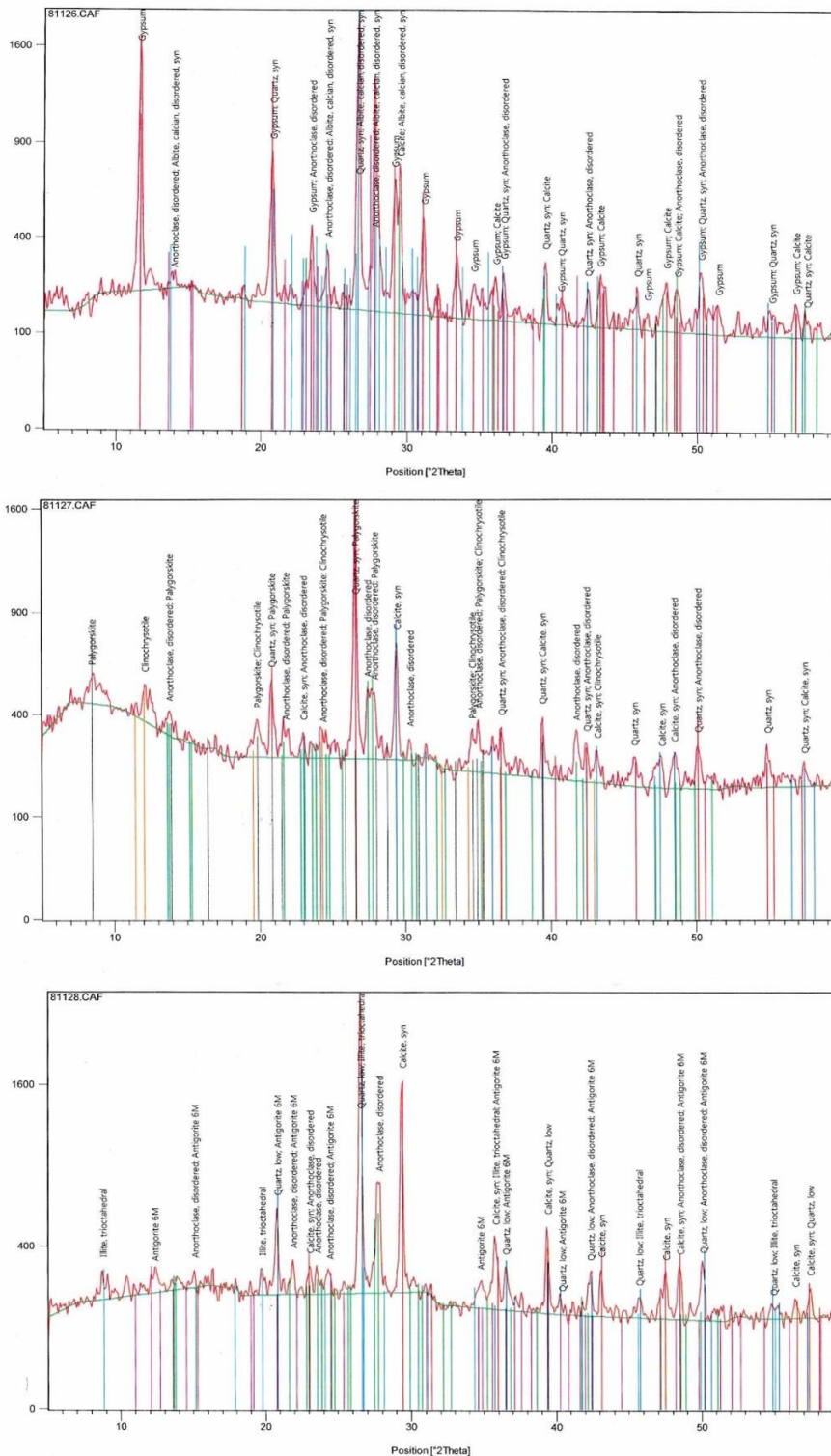
ترکیب نمونه‌های گل‌سنگی: بررسی ترکیب کانی‌شناسی ۳ نمونه گل‌سنگی توسط پراش اشعه ایکس (XRD) نشان می‌دهد که فازهای اصلی کانی‌شناسی شامل کانی‌های کوارتز، آنورتوکلاز و کلسیت بوده و کانی‌های آلبیت،



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی (نور XPL) از اجزاء تشکیل دهنده نمونه‌های ماسه‌سنگی مورد مطالعه، اختصارات معرف: Qm کوارتز تک‌بلور، Qp کوارتز چندبلور، Or ارتوکلاز، Pl پلاژیوکلاز، SRF خرده‌سنگ رسوبی، MRF خرده‌سنگ دگرگونی، VRF خرده‌سنگ ولکانیکی، Zr کانی سنگین شفاف زیرکان، Op کانی سنگین تیره مگنتیت، Mu مسکویت، Bio بیوتیت، Calcite C. سیمان کلسیتی که به صورت پراکنده بین ذرات تشکیل شده‌است. فراوانی بالای فضای خالی بین ذرات به دلیل سست بودن آن‌ها است.



شکل ۶. ترسیم داده‌های دانه‌شماری نمونه‌های ماسه‌سنگی نهشته‌های آبرفتی مورد مطالعه در نمودار مثلثی فولک (۱۹۸۰). نمونه‌های مورد مطالعه از نظر ترکیب در دو محدوده فلدسپاتیک‌لیتارنایتی و ساب‌لیتارنایتی قرار می‌گیرند.



شکل ۷. نتایج آنالیز XRD سه نمونه گل‌سنگی مربوط به پادگانه‌های آبرفتی مورد مطالعه.

بالک رسوبات تخریبی دانه‌ریز بوژه گل‌سنگ‌ها حفظ شده است (هاک و روی، ۲۰۲۰). برای پی‌بردن به منشأ اولیه رسوبات می‌توان از نمودارهای دو متغیره و نمودارهای مثلی که بر اساس اکسیدهای عناصر اصلی و میزان عناصر فرعی ارائه شده‌اند، استفاده کرد. بر اساس نمودار دو متغیره

ترکیب شیمیایی ناحیه منشأ استفاده از داده‌های سنگ‌شناسی و ژئوشیمی نمایانگر این است که هر موقعیت زمین‌ساختی، ترکیب کانی‌شناسی و شیمیایی متفاوتی دارد (زید و گاهانی، ۲۰۱۵). مشخصه اصلی منشأ و شرایط هوازدگی دیرینه به‌خوبی در شیمی

غیر فعال) در طی هواز دگی و حمل و نقل معمولاً بدون تغییر در رسوب باقی می‌مانند. بنابراین، ترکیب و محتوای عناصر فرعی در رسوبات منعکس‌کننده اختصاصات و ویژگی‌های ساختاری سنگ منشأ است (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰). با نمودار مثلثی $V-Ni-Th^{*10}$ (بر اچپالی و همکاران، ۲۰۰۷) نیز ترکیب سنگ مادر رسوبات مورد مطالعه را حداواوسط تا مافیک نشان می‌دهد (شکل ۹B). نمودار مثلثی $(Na_2O+K_2O)-SiO_2/20-MgO+TiO_2+FeO$ نیز منشأ رسوبات شمال بیرجند را محدوده بین بازالت و آندزیت نشان می‌دهد (شکل ۹C). نمودار دیگری که برای تعیین منشأ رسوبات آواری استفاده شده است نمودار شاخص شیمیایی دگرسانی^۱ در برابر شاخص تنوع ترکیبی^۲ می‌باشد (لی، ۲۰۰۲) که داده‌های رسوبات مورد مطالعه روی این نمودار در نزدیکی محدوده بازالت با هواز دگی کم قرار می‌گیرد (شکل ۸C). با توجه به داده‌های ژئوشیمیایی و نتایج حاصل از نمودارهای ارائه شده، منشأ رسوبات آواری این منطقه را می‌توان بیشتر مافیک تا حدواوسط در نظر گرفت.

تلفیق داده‌های پتروگرافی و ژئوشیمی و تفسیر منشأ رسوبات

همانطور که ذکر شد، ماسه‌سنگ‌های محدوده مورد مطالعه از کانی‌های اصلی کوارتز (تک‌بلور و چندبلور)، فلدسپات (ارتوکلاز و پلاژیوکلاز)، خرده‌های سنگی (رسوبی، ولکانیکی و دگرگونی)، کانی‌های فرعی (میکای مسکویت و بیوتیت، کانی‌های سنگین شفاف و تیره)، سیمان کربناته و فضاهای خالی بین ذرات تشکیل شده‌اند. بر اساس درصد فراوانی دانه‌های چارچوب سنگ و طبقه‌بندی ترکیبی ماسه‌سنگ‌ها (فولک، ۱۹۸۰)، نمونه‌های فوق جزء ماسه‌سنگ‌های ساب‌لیتارنایتی و فلدسپاتیک‌لیتارنایتی هستند که در آن‌ها فراوانی خرده‌سنگ‌ها نسبت به فلدسپات‌ها بیشتر است. همچنین، در این ماسه‌سنگ‌ها درصد فراوانی کوارتز تک‌بلور به چندبلور بالاتر است. دانه‌های کوارتز تک‌بلور و چندبلور در نمونه‌های مورد مطالعه بر اساس طبقه‌بندی‌های ژنتیکی و تجربی انواع کوارتز (فولک، ۱۹۸۰) بررسی شده و دانه‌های کوارتز تک‌بلور از نوع پلوتونیک و دانه‌های کوارتز چندبلور از نوع تبلور مجدد و شیستوز می‌باشند.

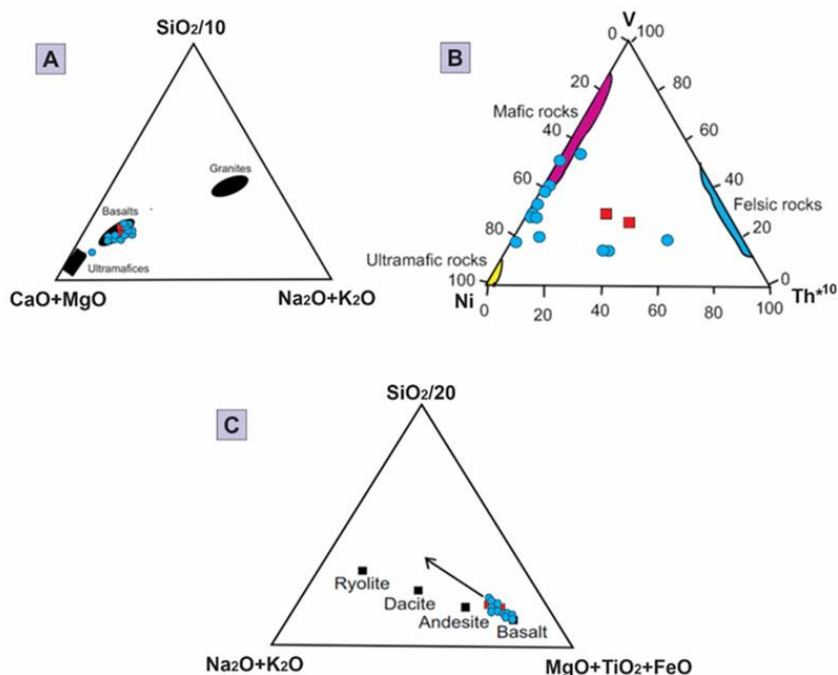
K_2O-Na_2O ، کروک (۱۹۷۴) می‌توان رسوبات را به سه دسته غنی از کوارتز، با کوارتز متوسط و فقیر از کوارتز طبقه‌بندی کرد. با ترسیم داده‌های حاصل از نمونه‌های مورد مطالعه، مشخص می‌شود که تعداد ۹ نمونه در محدوده غنی از کوارتز، ۳ نمونه در محدوده کوارتز متوسط و تعداد ۳ نمونه هم در مرز محدوده غنی از کوارتز و محدوده کوارتز متوسط قرار می‌گیرند (شکل ۸A). علت قرارگیری نمونه‌ها در محدوده غنی از کوارتز احتمالاً به این علت است که کوارتز کانی اصلی نمونه‌های ماسه‌سنگی (درصد کوارتز کل ۳۸/۱۱ تا ۸۸/۲۳ درصد) و گل‌سنگی (شکل ۷) مورد بررسی است. علاوه بر این، متوسط درصد اکسید سیلیسیم در نمونه‌های ماسه‌ای و گلی ۴۸/۰۷ درصد است. از آنجایی که نتایج نمودارهای بعدی بیشتر مؤید حضور سنگ‌های آذرین مافیک تا حدواوسط در ناحیه منشأ است، قرارگیری برخی نمونه‌های فوق در محدوده غنی از کوارتز احتمالاً نشان‌دهنده یک منشأ رسوبی قدیمی همراه با سنگ‌های فوق است. به نظر تیلور و مک لنان (۱۹۸۵)، مقایسه نسبت اکسیدهای اصلی رسوبات آواری با سنگ مادرهای احتمالی مانند گرانیت، بازالت و سنگ‌های اولترامافیک در تعیین منشأ رسوبات مؤثر است. با استفاده از نمودار مثلثی $(Na_2O+K_2O)-(CaO+MgO)-SiO_2/20$ می‌توان در مورد سنگ مادر سنگ‌های رسوبی آواری اظهار نظر کرد. بر این اساس نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده ترکیب بازالتی قرار می‌گیرند (شکل ۹A). نسبت Al_2O_3/TiO_2 در رسوبات سیلیسی آواری بر ترکیب سنگ منشأ تأکید دارد. به طوری که این نسبت از ۳ تا ۸ بر سنگ‌های آذرین مافیک، از ۸ تا ۲۱ بر سنگ‌های آذرین حدواوسط و از ۲۱ تا ۷۰ بر سنگ‌های آذرین فلسیک دلالت می‌کند (هایاشی و همکاران، ۱۹۹۷). نسبت Al_2O_3/TiO_2 در نمونه‌های مورد مطالعه ۱۹/۸۶ می‌باشد که نشان‌دهنده یک سنگ منشأ حدواوسط است (جدول ۵). نمودار Al_2O_3 در مقابل TiO_2 (آماژور، ۱۹۸۷) منشأ رسوبات را چهار دسته سنگ‌های بازالت، بازالت گرانیت، گرانیت بازالت و گرانیت معرفی می‌کند. با ترسیم داده‌های رسوبات مورد مطالعه در این نمودار مشاهده می‌شود که اکثر نمونه‌ها در محدوده بازالت‌گرانیت و نزدیک به محدوده گرانیت‌بازالت قرار می‌گیرند. به احتمال زیاد ترکیب سنگ منشأ، بازالتی تا حدواوسط بوده است (شکل ۸B). عناصر فرعی (بویژه انواع

² Index Compositional Variation: ICV

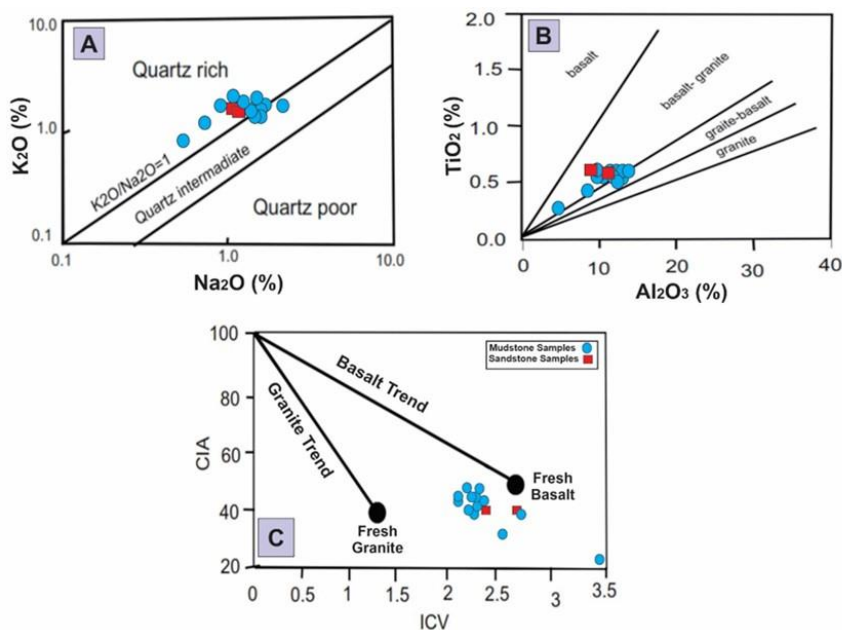
¹ Chemical Index of Alteration: CIA

جدول ۵. مقادیر اکسیدهای عناصر اصلی (برحسب درصد وزنی)، عناصر فرعی (برحسب ppm) و شاخص‌های هوازدگی در نمونه‌های مورد مطالعه.

Sample N.	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	M ₉	M ₁₀	M ₁₁	M ₁₂	S ₁₃	M ₁₄	S ₁₅	Average
SiO ₂	45.18	49.22	52.49	39.71	49.79	53.23	52.18	46.17	49.40	50.14	25.07	50.57	56.39	51.03	50.45	48.07
Al ₂ O ₃	12.91	12.98	10.54	8.26	11.96	10.97	11.33	12.91	11.84	9.72	4.84	11.43	9.81	11.97	10.37	10.79
Na ₂ O	1.05	1.49	1.08	0.73	2.07	1.59	1.38	0.90	1.13	1.54	0.53	1.21	1.47	1.66	1.57	1.23
MgO	8.52	5.29	4.04	3.01	8.60	7.25	5.58	8.20	4.53	8.36	3.08	4.28	4.82	6.96	9.72	6.15
K ₂ O	2.25	2.14	1.71	1.29	1.87	1.71	1.72	1.93	1.72	1.73	0.86	1.99	1.55	1.84	1.59	1.73
TiO ₂	0.55	0.63	0.56	0.40	0.60	0.58	0.61	0.55	0.59	0.55	0.27	0.56	0.60	0.59	0.55	0.55
MnO	0.11	0.10	0.08	0.06	0.10	0.07	0.09	0.12	0.09	0.09	0.04	0.09	0.09	0.10	0.10	0.09
CaO	8.70	9.93	10.70	12.97	6.94	8.96	10.61	8.95	10.35	10.42	15.12	12.12	9.82	9.48	9.98	10.34
P ₂ O ₅	0.12	0.14	0.13	0.10	0.10	0.13	0.12	0.13	0.13	0.11	0.07	0.13	0.11	0.13	0.09	0.12
Fe ₂ O ₃	7.59	6.59	4.98	3.58	7.77	6.16	6.09	7.31	5.60	5.82	2.52	5.46	5.39	6.77	6.21	5.86
SO ₃	0.17	0.16	2.55	14.80	0.51	0.08	0.35	0.95	5.02	0.17	30.66	0.06	0.10	0.16	0.14	3.72
LOI	12.72	11.21	10.96	14.83	9.49	9.11	9.81	11.47	9.47	11.21	16.72	10.82	9.52	9.16	9.04	-
Ba	38	128	49	489	297	325	178	89	198	170	467	290	440	189	374	248.07
Co	78	33	66	41	53	65	53	73	34	42	38	69	60	58	84	56.47
Cr	240	115	91	45	347	202	192	251	134	180	81	117	234	213	300	182.8
Cu	42	18	27	<1	19	24	3	29	8	23	1	6	41	21	19	18.73
Nb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ni	276	168	103	72	359	262	211	354	164	332	112	142	163	227	443	225.87
U	13	29	<1	13	5	4	<1	21	<1	<1	<1	<1	12	0	9	7.07
Th	1	<1	<1	1	4	<1	<1	25	10	21	<1	14	33	<1	<1	7.27
Ce	36	66	31	45	18	8	59	44	22	55	27	63	75	30	93	44.8
Cl	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Pb	<1	30	314	165	241	44	<1	<1	179	42	117	24	350	145	76	115.13
La	31	52	33	22	11	36	26	12	<1	24	39	19	17	<1	10	22.13
Sr	243	191	754	1462	226	214	277	284	291	232	1157	209	301	260	232	422.2
V	119	122	111	100	109	113	113	113	119	110	76	108	124	103	111	110.07
Sb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zr	146	163	209	204	225	161	188	144	179	198	190	129	274	146	191	183.13
Zn	30	55	5	<1	51	87	<1	6	11	8	<1	<1	51	22	<1	21.74
Mo	<1	<1	<1	4	<1	47	<1	<1	<1	<1	1	<1	<1	<1	<1	0.61
CIA	51.02	52.11	46.28	37.40	55.10	50.09	48.12	55.03	50.15	44.71	23.32	45.42	46.32	51.70	46.10	46.82
PIA	42.79	40.84	36.74	29.98	44.17	39.86	38.38	44.47	40.41	34.13	18.64	35.28	36.47	40.60	37.34	37.34
ICV	2.22	2.02	2.19	2.67	2.34	2.40	2.30	2.16	2.03	2.93	3.47	2.25	2.42	2.29	2.86	2.51
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	23.47	20.60	18.82	20.65	19.93	18.91	18.57	23.47	20.07	17.67	20.16	20.41	16.35	20.26	18.85	19.86
K ₂ O/Al ₂ O ₃	0.17	0.16	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.14	0.18	0.18	0.17	0.16	0.15	0.15	0.16



شکل ۸. تعیین ترکیب منشأ رسوبات شمال بیرجند بر اساس (A) نمودار K₂O-Na₂O، کروک (۱۹۷۴)، (B) نمودار Al₂O₃ در مقابل TiO₂ برگرفته از آمازور (۱۹۸۷) و (C) نمودار CIA در برابر ICV اقتباس از لی (۲۰۰۲).



شکل ۹. تعیین ترکیب سنگ‌های منشأ رسوبات آبرفتی مورد مطالعه براساس (A) نمودار مثلثی $\text{SiO}_2/20 - (\text{CaO} + \text{MgO}) - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ برگرفته از تیلور و مک‌لنن (۱۹۸۵)، (B) نمودار مثلثی Ni-V-Th^{*10} برگرفته از براجیالی و همکاران (۲۰۰۷)، (C) نمودار مثلثی $\text{SiO}_2/20 - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{MgO} + \text{TiO}_2 + \text{FeO}$ اقتباس از هایاشی و همکاران (۱۹۹۷).

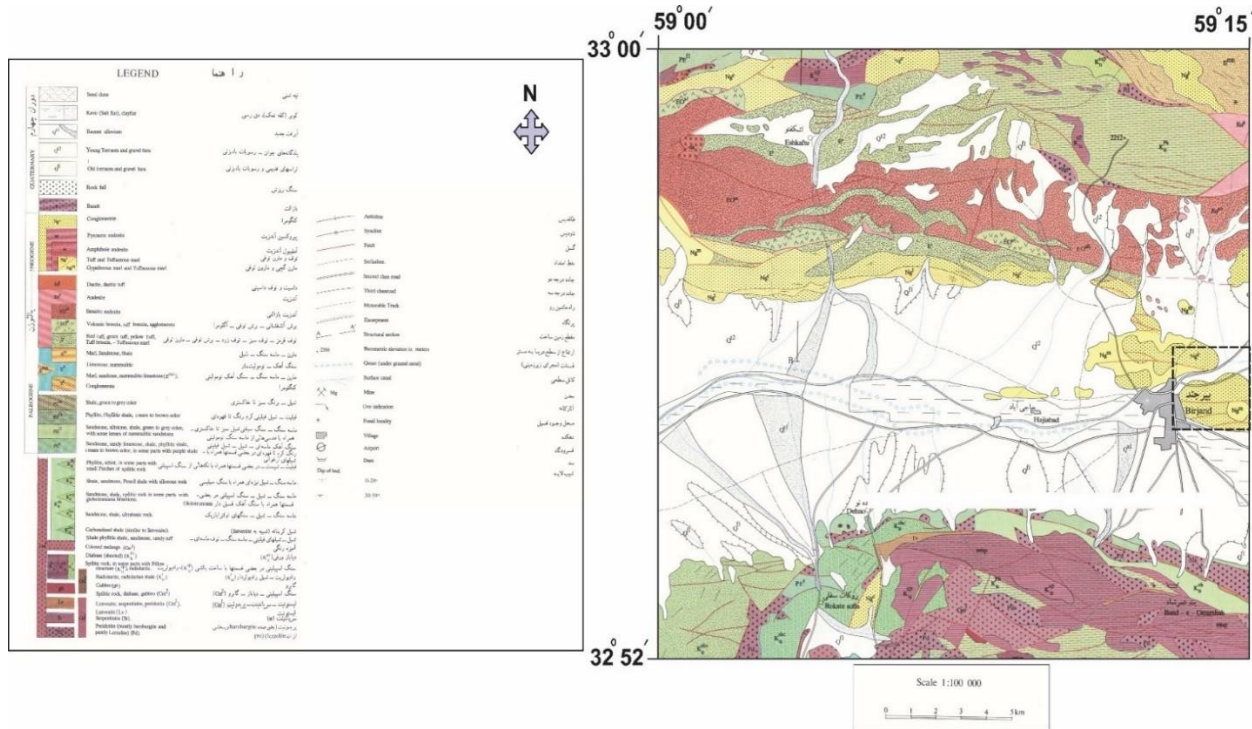
ماسه‌سنگ‌ها پیشنهاد کند. ترکیب فلدسپاتیک‌لیتارنابیتی اغلب نمونه‌های ماسه‌سنگی (بویژه نمونه‌های درشت‌دانه) نیز تأییدکننده این واقعیت است. فراوانی بالای خرده‌سنگ‌های رسوبی همچون ماسه‌سنگی، سیلتستونی، چرتی و کربناته در این نمونه‌ها از نشانه‌های حضور یک سنگ منشأ رسوبی همراه با سنگ‌های آذرین و دگرگونی است. بنابراین، ترکیب ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه حضور سنگ‌های مادر رسوبی، آذرین (نفوذی و ولکانیکی) و به مقدار کمتر دگرگونی را به خوبی منعکس می‌کند. علاوه بر این، نتایج مطالعه پتروگرافی نمونه‌های ماسه‌سنگی توسط نتایج حاصل از مطالعه قطعات گراولی تأیید شده است.

همانطور که قبلاً ذکر شد، قطعات گراولی در رخساره‌های کنگلومرایبی مورد مطالعه اغلب از نوع آذرین (پلوتونیک و ولکانیکی) و رسوبی هستند. بررسی وضعیت زمین‌شناسی منطقه و واحدهای سنگی اطراف محدوده مورد مطالعه (نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ بیرجند، افتخارنژاد، ۱۹۸۶) نشان می‌دهد که منشأ قطعات گراولی در رخساره‌های کنگلومرایبی و ذرات ماسه‌ای در رخساره‌های ماسه‌سنگی احتمالاً از واحدهای افیولیتی کرتاسه، واحدهای فلیشی کرتاسه پسین تا ائوسن، سنگ‌های رسوبی آواری-کربناته پالئوژن و سنگ‌های ولکانیکی و رسوبی جوان‌تر که در اطراف محدوده مورد نظر رخمون دارند (شکل ۱۰). در

اگرچه منشأ کوارتز پلوتونیک تک‌بلور بیشتر از سنگ‌های آذرین پلوتونیک می‌باشد ولی بدلیل احتمال خردشدگی کوارتزهای چندبلور دگرگونی در طی حمل و نقل ممکن است این سنگ‌ها نیز در تأمین کوارتز تک‌بلور شرکت کرده باشند. پس، حضور کوارتزهای تک‌بلور و چندبلور نشان دهنده حضور سنگ‌های منشأ آذرین و دگرگونی در ناحیه منشأ است. علاوه بر این، کوارتزهای تک‌بلور ممکن است از ماسه‌سنگ‌های قدیمی‌تر نیز تأمین شده باشند. حضور مقادیر کم فلدسپات و فراوانی بیشتر پلاژیوکلاز نسبت به آلکالی‌فلدسپات نشان می‌دهد که این دانه‌ها به احتمال زیاد از سنگ‌های آذرین ولکانیکی تأمین شده‌اند. حضور میکاها و فراوانی بیشتر بیوتیت‌های دانه‌درشت نسبت به مسکویت‌های دانه‌ریز، منشأ احتمالی سنگ‌های آذرین ولکانیکی و سنگ‌های دگرگونی را منعکس می‌کند. به عبارت دیگر، در نمونه‌های ماسه‌سنگی مورد مطالعه وجود دانه‌های کوارتز تک‌بلور با خاموشی مستقیم تا موجی ضعیف و کوارتزهای چندبلور تبلور مجدد و شیشستوز همراه با خرده‌سنگ‌های دگرگونی نشان‌دهنده حضور سنگ‌های دگرگونی همراه با سنگ‌های آذرین در ناحیه منشأ رسوبات است. وجود خرده‌سنگ‌های ولکانیکی (خرده آندزیتی)، پلاژیوکلاز، بیوتیت فراوان و کانی سنگین زیرکان می‌تواند یک منشأ آذرین (نفوذی و ولکانیکی) را برای این

و جنوب محدوده مورد مطالعه برونزد دارند. در مجموعه افیولیتی اطراف بیرجند علاوه بر سنگ‌های آذرین و رسوبی، سنگ‌های دگرگونی درجه پایین هم یافت می‌شود که می‌تواند تأمین‌کننده این ذرات در ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه باشد (شکل ۱۰).

واحدهای کنگلومرای منشأ قطعات الترامافیک بعضاً سرپانتینیته شده احتمالاً از پریدوتیت‌ها و قطعات مافیک از افیولیت‌های کرتاسه و قطعات حدواسط از واحدهای آذرین درونی و بیرونی جوان‌تر از افیولیت‌هاست. منشأ قطعات رسوبی از رخساره‌های فلیشی و واحدهای رسوبی به سن پالئوسن-ئوسن است که اکثر این واحدها در شمال



شکل ۱۰. برشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند (افتخارنژاد، ۱۹۸۶) که واحدهای سنگی اطراف محدوده مورد مطالعه (شهر بیرجند، مربع خط‌چین مشکی) را نشان می‌دهد.

فرآیندهای هوازدگی دچار تغییر شوند (نسبیت و یانگ، ۱۹۸۲). آب و هوای گرم و مرطوب، گسترش دگرسانی و تخریب کانی‌های ناپایدار و خرده‌سنگ‌ها را باعث می‌شود اما آب و هوای سرد و خشک باعث حفظ شدن این اجزای ناپایدار می‌شود (سیسیل و ادگار، ۲۰۰۳). برای تعیین درجه هوازدگی رسوبات بر اساس ژئوشیمی، شاخص‌های متفاوتی بر پایه نسبت‌های ملکولی اکسیدهای عناصر مختلف به خصوص عناصر متحرک Na_2O , MgO , CaO و نسبت به اکسیدهای غیر متحرک مانند Al_2O_3 , K_2O و TiO_2 پیشنهاد شده است. یکی از این شاخص‌ها، شاخص شیمیایی دگرسانی است. برای محاسبه این شاخص از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$CIA = 100 \frac{(Al_2O_3 / Al_2O_3 + CaO * + Na_2O + K_2O)}$$

در معادله فوق، $CaO *$ مقدار اکسید کلسیم وارد شده به کسر سیلیکات است که طبق روش مک‌لنن (۱۹۹۳)

با توجه به ویژگی‌های بافتی رخساره‌های کنگلومرای و ماسه‌سنگی مورد نظر و بررسی مچوریتی ترکیبی نهشته‌های ماسه‌ای فوق (شاخص مچوریتی ترکیبی پایین تا متوسط، جدول ۴) که نشان‌دهنده حضور ذرات ناپایدار فراوان در رسوبات است، بنظر می‌رسد میزان حمل و نقل مواد هوازده اندک بوده و این رسوبات در نزدیکی ناحیه منشأ بر جای گذاشته شده‌اند.

میزان هوازدگی رسوبات شمال بیرجند و تشخیص آب و هوای ناحیه منشأ رسوبات

عوامل متعددی از جمله شرایط آب و هوایی و فعالیت‌های تکتونیکی (بالازدگی منطقه منشأ) در کنترل شدت هوازدگی در ناحیه منشأ تأثیرگذار است (رونکیویچ و کاندی، ۱۹۸۷). ژئوشیمی عناصر اصلی و فرعی و کانی‌شناسی رسوبات سیلیسی‌آواری می‌توانند توسط

فلدسپات قرار می‌گیرند (نسبیت و یانگ، ۱۹۸۴؛ آکاریش و ال گوهری، ۲۰۰۸). در مرحله اولیه هوازُدگی، Ca با سرعت بیشتری نسبت به Na و K از سنگ منشأ حاوی فلدسپات شسته می‌شود. با افزایش هوازُدگی، مقدار آکالی کل (Na₂O+K₂O) با افزایش نسبت (Na₂O/K₂O) به علت تخریب فلدسپات‌ها و جدا شدن پلاژیوکلازها از فلدسپات‌های پتاسیم‌دار کاهش می‌یابد (نسبیت و یانگ، ۱۹۸۴). شکل ۱۱ نمودار مثلثی A-CN-K به همراه شاخص دگرسانی شیمیایی، میزان هوازُدگی رسوبات شمال بیرجند را نشان می‌دهد. بر روی این نمودار در مراحل آغازین هوازُدگی، روندی موازی ضلع A-CN داریم زیرا در مراحل ابتدایی هوازُدگی از میزان یون‌های سدیم و پتاسیم به دلیل تخریب پلاژیوکلازها کاسته می‌شود و با ادامه روند هوازُدگی یون‌های پتاسیم فلدسپات‌های پتاسیم‌دار کاهش یافته و روند هوازُدگی به سمت ترکیب Al₂O₃ تغییر مکان می‌دهد. روند هوازُدگی رسوبات شمال بیرجند در نمودار شکل ۱۱ بیانگر این است که این رسوبات از دگرسانی شیمیایی پایینی برخوردار هستند. با استفاده از نمودار SiO₂ در مقابل (Al₂O₃+Na₂O+K₂O) (ساتر و دوتا، ۱۹۸۶) و ترسیم داده‌های ناحیه مورد مطالعه (شکل ۱۲) شرایط آب‌وهوایی خشک را تأیید می‌کند. شاخص تنوع ترکیبی (ICV) برای تعیین بلوغ و چرخه رسوبی شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌ها به کار می‌رود (کاکس و همکاران، ۱۹۹۵) که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$ICV = \frac{[(Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MnO + MgO + TiO_2)]}{Al_2O_3}$$

ICV بیشتر از یک نمایانگر رسوباتی با عدم بلوغ ترکیبی است که در محیط‌های فعال تکتونیکی در چرخه اول رسوب‌گذاری نهشته شده‌اند و ICV کمتر از یک نشان دهنده رسوباتی با بلوغ ترکیبی بالا می‌باشد که در محیط‌های ساکن تکتونیکی یا کراتونی با باز چرخش رسوبی فعال قرار دارند (کولر و پوکوپرو، ۲۰۰۲). مقدار متوسط ICV برای نمونه‌های مورد مطالعه ۲/۵۱ می‌باشد (جدول ۵) که بیانگر تشکیل رسوبات در محیط فعال تکتونیکی در چرخه اول رسوبگذاری است. مقادیر بالای ICV شامل سنگ منشأهای نابالغ غنی از کانی‌های سیلیکاته بدون رس است، درحالی‌که مقادیر پایین نشان دهنده سنگ منشأهای بالغ است. طی فرایند هوازُدگی

تصحیح شده است. CIA درجه دگرسانی فلدسپات به کانی‌های رسی را در طی هوازُدگی اندازه‌گیری می‌کند همان‌طور که فلدسپات دگرسان می‌شود، کلسیم، سدیم و پتاسیم توسط محلول‌های خام انتقال یافته و در نتیجه مقدار نسبی آلومینیم در محصولات هوازُدگی و در نتیجه CIA، افزایش می‌یابد. تحت شرایط آب و هوایی حاره‌ای مرطوب، هوازُدگی شدید موجب تشکیل رس‌های غنی از آلومینیم، نظیر کائولینیت می‌گردد. درحالی‌که هوازُدگی با شدت کمتر، کانی‌های رسی با مقدار آلومینیم کمتر شکل می‌گیرند (نسبیت و یانگ، ۱۹۸۴). درجه هوازُدگی شیمیایی با افزایش CIA رابطه مستقیم دارد. مقدار پایین CIA نشان می‌دهد که دگرسانی وجود نداشته یا خیلی کم بوده است و بیانگر آب و هوای خشک است. CIA متوسط و بالا نشان‌دهنده درجه هوازُدگی متوسط و شدید است (نسبیت و یانگ، ۱۹۸۴؛ فیدو و همکاران، ۱۹۹۵). شاخص دگرسانی شیمیایی رسوبات پادگانه‌های آبرفتی نئوژن شمال بیرجند در جدول ۵ بیان شده است. این شاخص از مقدار ۲۳/۳۲٪ تا ۵۵/۱۰٪ (با میانگین ۴۶/۸۲٪) در تغییر می‌باشد. این مقدار کمتر از مقدار میانگین مربوط به پوسته قاره‌ای بالایی^۱ (CIA=۵۰) است و نشان می‌دهد تأثیر هوازُدگی شیمیایی در سنگ‌های منشأ کم بوده است و شرایط آب و هوایی گرم و خشک بوده است. شاخص دیگری که می‌توان برای شدت هوازُدگی سنگ‌های منشأ استفاده کرد، شاخص دگرسانی پلاژیوکلازها^۲ می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$PIA = \frac{[(Al_2O_3 - K_2O)]}{(Al_2O_3 + CaO + Na_2O - K_2O)}$$

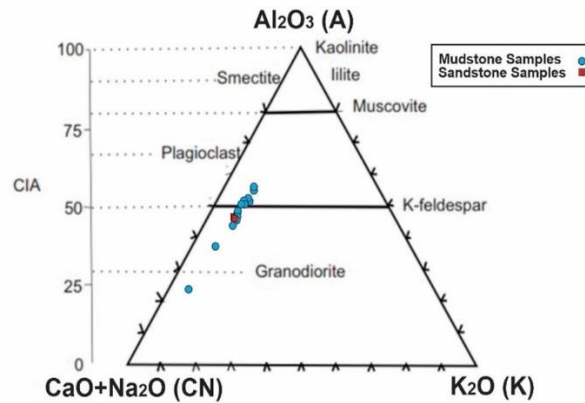
مقادیر حدود ۵۰ برای این شاخص نشانگر سنگ‌های غیرهوازده بوده و با افزایش پیشرفت هوازُدگی از ۵۰ تا ۱۰۰ تغییر می‌کند، به طوری‌که مقادیر PIA حدود ۱۰۰ نشان‌دهنده تبدیل کامل فلدسپات‌ها به کائولینیت، گیبسیت و ایلیت است (فیدو و همکاران، ۱۹۹۵). PIA در نمونه‌های مورد مطالعه بین مقادیر ۱۸/۶۴ و ۴۴/۴۷ (با میانگین ۳۷/۳۴) (جدول ۵) در تغییر است. این مقدار نشان‌دهنده هوازُدگی کم در منطقه است. شرایط هوازُدگی دیرینه با استفاده از نمودار مثلثی نسبیت و یانگ (۱۹۸۴) ارزیابی می‌شود. در نمودار مثلثی (CaO+Na₂O)-Al₂O₃-K₂O سنگ‌های غیرهوازده زیر خط اتصال پلاژیوکلاز-

² Plagioclase Index of Alteration: PIA

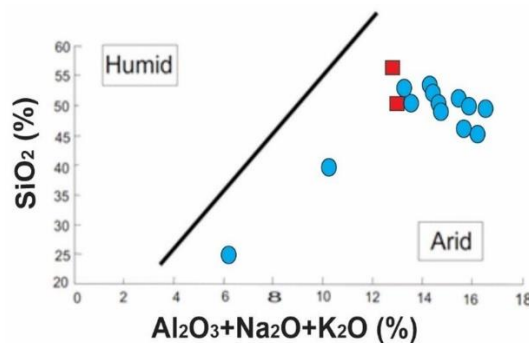
¹ Upper Continental Crust: UCC

دارند و نمونه‌هایی که دارای کانی‌های رسی فراوان هستند، ICV کمتری داشته (کمتر از یک) و در نواحی با بال‌آمدگی خیلی کم، همراه با هوازگی شیمیایی زیاد نهشته می‌شوند (کاکس و همکاران، ۱۹۹۵).

مقدار ICV به علت تبدیل فلدسپات‌ها به کانی‌های رسی آلومینیوم‌دار کاهش می‌یابد بنابراین تغییرات ICV می‌تواند به علت تغییر ترکیب سنگ منشأ یا تغییرات هوازگی باشد (کاکس و همکاران، ۱۹۹۵؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰). نمونه‌های فاقد رس، ICV بالاتری نسبت به نمونه‌های رسی



شکل ۱۱. نمودار مثلثی A-CN-K (اقتباس از نسبیت و یانگ (۱۹۸۴)) که نتایج آنالیز عنصری رسوبات آبرفتی نئوژن روی آن ترسیم شده است.



شکل ۱۲. ترسیم داده‌های مورد مطالعه در نمودار دوتایی SiO₂ در مقابل (Al₂O₃+Na₂O+K₂O)، برگرفته از ساتنر و دوتا (۱۹۸۶).

رسوبات پادگانه‌های آبرفتی نئوژن است که با شرایط آب و هوایی گرم و خشک در زمان تشکیل این رسوبات مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

داده‌های پتروگرافی و ژئوشیمی نهشته‌های پادگانه‌ای نئوژن شهر بیرجند در ارزیابی نوع سنگ منشأ و میزان هوازگی دیرینه رسوبات تأییدکننده یکدیگر هستند. بررسی ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌های گراولی و اجزاء تشکیل‌دهنده رسوبات ماسه‌ای منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده نقش فعال انواع سنگ‌های آذرین الترامافیک، مافیک و حدواسط و انواع سنگ‌های رسوبی و به میزان کمتر سنگ‌های دگرگونی در تأمین رسوبات آبرفتی مدنظر است. بررسی ترکیب کانی‌شناسی، وجود بلوغ بافتی و

در نهایت، این طور می‌توان بیان کرد که داده‌های پتروگرافی و ژئوشیمیایی رسوبات آبرفتی مورد مطالعه تأییدکننده یکدیگرند. به عبارتی، تفسیر نوع منشأ بر اساس داده‌های پتروگرافی نمونه‌های کنگلومرایبی و ماسه‌سنگی، با تفسیر ژئوشیمیایی مطابقت داشته و حضور سنگ‌های متنوع آذرین (الترامافیک، مافیک و حدواسط)، رسوبی و به مقدار کمتر دگرگونی را در ناحیه منشأ این رسوبات منعکس می‌کنند. از طرف دیگر، بررسی اختصاصات بافتی (بلوغ بافتی و ترکیبی نهشته‌های آواری) و مقایسه آن با نتایج حاصل از بررسی ژئوشیمیایی شاخص‌های هوازگی در رسوبات فوق نشان‌دهنده هوازگی متوسط تا ضعیف، فاصله کوتاه حمل و نقل و فراوانی ذرات تشکیل‌دهنده ناپایدار نظیر فلدسپات و خرده‌سنگ‌های مختلف در

- حمزه‌لو (شمال باختر زنجان). مجله رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۸، شماره ۱۵، ص ۶۵-۷۸.
- مرتضوی مهریزی، م.، فیاضی بروجنی، م.، خانه‌باد، م. (۱۳۹۸) مطالعه ژئوشیمی رسوبات رودخانه مولید، جنوب شرق قائن به منظور تعیین نرخ هوازدگی، میزان آلودگی رسوبات و ارزیابی خطر زیست‌محیطی عناصر فلزی. مجله رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۷، شماره ۱۴، ص ۱۰۹-۱۲۱.
- Ahmedali, S. T (1989) X-Ray Fluorescence Analysis in the Geological Sciences. *Advances in Methodology*, vol. 7. Geological Association of Canada, Short Course, 308 p.
- Akarish, A. I. M., and El-Gohary, A. M (2008) Petrography and geochemistry of lower Paleozoic sandstones, East Sinai, Egypt: Implications for provenance and tectonic setting. *Journal of African Earth Sciences*, 52: 43-54.
- Amajor, L. C (1987) Major and trace element geochemistry of Albian and Turonian shales from the Southern Benue trough, Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, 6: 633-641.
- Amorosi, A., Centineo, M. C., Dinelli, E., Lucchini, F., Tateo, F (2002) Geochemical and mineralogical variations as indicators of provenance changes in Late Quaternary deposits of SE Po plain. *Sedimentary Geology*, 151: 273-292.
- Armstrong-Altrin, J. S., Machain-Castillo, M. L., Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A., Sanchez-Cabeza, J. A., Ruíz-Fernández, A. C (2015a) Provenance and depositional history of continental slope sediments in the Southwestern Gulf of Mexico unraveled by geochemical analysis. *Continental Shelf Research*, 95:15-26.
- Armstrong-Altrin, J. S., Nagarajan, R., Balaram, V., Natalhy-Pineda, O (2015b) Petrography and geochemistry of sands from the Chachalacas and Veracruz beach areas, western Gulf of Mexico, Mexico: constraints on provenance and tectonic setting. *Journal of South American Earth Sciences*, 64: 199-216.
- Baiyegunhi, C., Liu, K., Gwavava, O (2017) Geochemistry of sandstones and shales from the Ecca Group, Karoo Supergroup, in the Eastern Cape Province of South Africa: Implications for provenance, weathering and tectonic setting. *Open Geosciences*, 9: 340-360.
- Bokanda, E. E., Philip, F., Emile, E., Konfor, N. I., Betrant, B. S., Florent, A. D., Ekoa Bessa, A. Z (2019) Geochemical characteristics of shales in the Mamfe Basin, South West Cameroon: implication for depositional environments and oxidation conditions. *Journal of African Earth Sciences*, 149: 131-142.
- Bracciali, L., Marroni, M., Pandolfi, L., Rocchi, S (2007) Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): From source

ترکیبی پایین این رسوبات که با فراوانی بالای کانی‌ها و ذرات ناپایدار نیمه‌زاویه‌دار تا نیمه‌گردشده با جورشدگی ضعیف تا خوب همراه است، هوازدگی شیمیایی ضعیف با حمل و نقل کوتاه و نزدیک به منشأ را اثبات می‌کند. نتایج حاصل از تحلیل‌های ژئوشیمیایی (اکسیدهای عناصر اصلی و عناصر فرعی) که به حضور سنگ‌های آذرین مافیک تا حدواسط و سنگ‌های رسوبی با هوازدگی شیمیایی اندک و فاصله کوتاه حمل و نقل اشاره دارد، تشکیل رسوبات پادگانه‌های فوق را از واحدهای سنگی متنوع اطراف محدوده (بویژه شمال بیرجند) تحت شرایط آب و هوایی گرم و خشک اثبات می‌کند.

منابع

- آقباتی، ع (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
- افتخارنژاد، ج (۱۹۸۶) نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- حسینی، ز.، مرتضوی مهریزی، م.، رئیس‌السادات، س. ن. (۱۳۹۷) پتروگرافی و ژئوشیمی ماسه‌سنگ‌های پالئوسن شمال بیرجند، خراسان جنوبی: کاربرد آن در تعیین ناحیه منشأ، موقعیت تکتونیکی و شرایط آب‌وهوای دیرینه. مجله پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، دوره ۳۴، شماره ۲، ص ۶۹-۹۴.
- خسروی چنار، ع.، حسین‌زاده، س. ر.، فتاحی، م.، خانه‌باد، م. (۱۳۹۸) ژئوشیمی نهشته‌های کواترنری رودخانه کال‌شور بینالود. مجله پژوهش‌های دانش زمین، دوره ۱۰، شماره ۱، ص ۳۹-۴۹.
- سعیدی، ا.، محبوبی، ا.، موسوی‌حرمی، س. ر.، محمودی‌قرائی، م. ح (۱۳۹۷) برخاستگاه سازند سیلیسی‌آواری پسته‌لیق (پالئوسن زیرین) در برش چپ‌چپه شمال خاور ایران. مجله رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۶، شماره ۱۱، ص ۱-۱۴.
- شرفی، م.، محمدی، پ.، عنایت‌بیدگلی، ا. ح.، میرزایی، م.، فرزانه، ف (۱۴۰۱) ژئوشیمی ماسه‌سنگ‌های سازند اجاق قشلاق (اوسن بالایی- الیگوسن زیرین)، خاور مغان، شمال باختر ایران: کاربرد در تعیین سنگ‌والد، شرایط اقلیمی و موقعیت تکتونیکی. مجله رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۱۰، شماره ۱۹، ص ۱۵۰-۱۶۸.
- قاسملو، آ.، زهدی، ا.، کوهستانی، ح.، مختاری، م. ح (۱۳۹۹) چینه‌نگاری سنگی، پتروگرافی و زمین‌شیمی عناصر کمیاب ماسه‌سنگ‌های بخش میانی سازند قرمز بالایی در منطقه

- Sandstone Member of Asmari Formation, Zagros, Iran: implications on provenance and tectonic setting. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25: 247–260.
- Jafarzadeh, M., Moussavi Harami, R., Mahboubi, A (2013) Sandstone petrography and geochemistry of the Oligo-Miocene Zivah Formation, NW Iran: Implication on provenance and tectonic setting. *Sedimentary Basins Jena-Research, Modelling, Exploration*, 09-23.
- Jafarzadeh, M., Harami, R. M., Amini, A., Mahboubi, A., Farzaneh, F (2014) Geochemical constraints on the provenance of Oligocene–Miocene siliciclastic deposits (Zivah Formation) of NW Iran: implications for the tectonic evolution of the Caucasus. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(10): 4245-42.
- Khanehbad, M., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Nadjafi, M., Mahmudi Gharaie, M. H. M (2012) Geochemistry of Carboniferous Sandstone (Sardar Formation), East-Central Iran: Implication for Provenance and Tectonic setting. *Acta Geologica Sinica*, 86: 1200-1210.
- Lee, Y. I (2002) Provenance derived from the geochemistry of late paleozoic–early mesozoic mudrocks of the pyeongan supergroup, Korea. *Journal of Sedimentary Geology*, 149(4): 219-235.
- Li, P. J., Tian, J., Zhang, X., Liang, Q., Peng, M (2022) Geochemical characteristics and the constraints on paleoenvironment, provenance, and tectonic setting of Precambrian Xifangshan Formation in the northwestern Tarim Basin, NW China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208.
- McLennan, S. M (1993) Weathering and global denudation. *Journal of Geology*, 101: 295–303.
- Miall A. D (2000) *Principle of Sedimentary Basin Analysis*. Springer-Verlag, New York, 668p.
- Miall, A. D (2006) *The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis*. *Petroleum Geology* (4th printing), Springer-Verlag, New York, 582p.
- Mortazavi, M., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Nadjafi, M (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.
- Mortazavi, M., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Nadjafi, M (2014) Geochemistry of the Late Jurassic–Early Cretaceous shales (Shurijeh Formation) in the intracontinental Kopet-Dagh Basin, northeastern Iran: implication for provenance, source weathering, and areas to configuration of margins, In: Arribas, J., Critelli, S. and Johnsson, M. J., (Eds.), *Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspectives from Petrography and Geochemistry*. The Geological Society of America, Special Paper, 420: 73-94.
- Cecil, C. B., and Edgar, N. T (2003) *Climate Controls on Stratigraphy*. SEPM Special Publication, No: 77.
- Cox, R., Lowe, D. R., 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.
- Crook, K. A. W (1974) Lithogenesis and geotectonics, the significance of compositional variations in flysch arenites (graywackes). In: Dott, R.H., Saver, R.H. (Eds.), *Modern and Ancient Geosynclinal Sedimentation*. Society of Economic and Paleontological Mineralogy, Special Publication, 19: 304–310.
- Cullers, R. L., and Podkovyrov, V. N (2002) The source and origin of terrigenous sedimentary rocks in the Mesoproterozoic Uj group, southeastern Russia. *Precambrian Research*, 117 (3 4): 157-183.
- Ekoka Bessa, A. Z., El-Amier, Y. A., Doumo, E. P. E., Nguetochoua, G (2018) Assessment of sediments pollution by trace metals in the Moloundou swamp, southeast Cameroon. *Annual Research and Review in Biology*, 11: 1-13.
- Fedo, C. M., Nesbitt, H. W., Young, G. M (1995) Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23: 921–924.
- Flügel, E (2010) *Microfacies of Carbonate Rocks*. 2nd ed. Springer-Verlag Berlin, 976 p.
- Folk, R. L (1980) *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Co., Austin, Texas, 182p.
- Haque, M. M., and Roy., M. K (2020) Sandstone-shale geochemistry of Miocene Surma Group in Bandarban anticline, SE Bangladesh: implications for provenance, weathering, and tectonic Setting. *Earth Sciences*, 9(1): 35-51.
- Hayashi, K., Fujisawa, H., Holland, H., Ohmoto, H (1997) Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(19): 4115-4137.
- Hernández-Hinojosa, V., Montiel-García, P. C., Armstrong-Altrin, J. S., Nagarajan, R., Kasper-Zubillaga, J. J (2018) Textural and geochemical characteristics of beach sands along the western Gulf of Mexico, Mexico. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 13: 161-174.
- Jafarzadeh, M., Hosseini-Barzi, M (2008) *Petrography and geochemistry of Ahwaz*

- desert, Egypt. *Geological Journal*, 53 (5): 1938-1953.
- Taylor, S. R., and McLennan, S. M (1985) *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, London, 312 p.
- Tirrul, R., Bell, I. R., Griffis, R. J., Camp, V. E (1983) The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 94: 134–150.
- Tucker, M. E (2001) *Sedimentary Petrology: An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks*. 3rd ed., Blackwell Science Lt: Hoboken, NJ, USA, 262p.
- Wronkiewicz, D. J., and Condie, K. C (1987) Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: source-area weathering and provenance. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 51: 2401–2416.
- Zaid, S. M., Al Gahtani, F (2015) Provenance, diagenesis, tectonics, diagenesis, tectonic setting, and geochemistry of Hawkesbury Sandstone (Middle Triassic), southern Sydney Basin, Australia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 24: 72-98.
- Zand-Moghadam, H., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Rahimi, B (2013) Petrography and geochemistry of the Early-Middle Devonian sandstones of the Padeha Formation in the north of Kerman, SE Iran. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología*, 83: 2013.
- Zhang, M., Yanqiu, Y., Jinyoung, C., Cai, K., Mingyuan, S (2020) Petrography and geochemistry of clastic sedimentary rocks as evidence for the provenance of the Jurassic stratum in the Daqingshan area. *Open Geosciences*, 12: 1350- 1368.
- paleoenvironments. *Arabian Journal of Geosciences*, 7: 5353-5366.
- 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., 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.
- Ndjigui, P. D., Onana, V. L., Sababa, E., Bayiga, E. C (2018) Mineralogy and geochemistry of the Lokoundje alluvial clay from the Kribi deposit, Camerounian Atlantic coast: implication for their origin and depositional environment. *Journal of African Earth Sciences*, 143: 102-117.
- Ngueutchoua, G., Ekoa Bessa, A. Z., Eyong, T. J., Demanou, Z. D., Baba, D. H., Tchami, N. L (2019) Geochemistry of cretaceous fine-grained siliciclastic rocks from Upper Mundeck and Logbadjeck Formations, Douala sub-basin, SW Cameroon: implications for weathering intensity, provenance, paleoclimate, redox condition, and tectonic setting. *Journal of African Earth Sciences*, 10.1016/j.jafrearsci.2019.02.021.
- Ramos-Vázquez, M., Armstrong-Altrin, J. S., Rosales-Hoz, L., Machain-Castillo, M. L., Carranza-Edwards, A (2017) Geochemistry of deep-sea sediments in two cores retrieved at the mouth of the Coatzacoalcos River delta, Western Gulf of Mexico, Mexico. *Arabian Journal of Geosciences*, 10 (6): 148.
- Roddaz, M., Said, A., Guillot, S., Antoine, P. O., Montel, J. M., Martin, F., Darrozes, J (2011) Provenance of Cenozoic sedimentary rocks from the Sulaiman fold and thrust belt, Pakistan: implications for the palaeogeography of the Indus drainage system. *Journal of the Geological Society*, 168: 499-516.
- 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.
- Stow, D. A. V (2005) *Sedimentary Rocks in the Field: A Colour Guide*. Manson Publishing, London.
- Suttner, L. J., and Dutta, P. K (1986) Alluvial Sandstones Composition and Paleoclimate, I, Framework Mineralogy. *Journal of Sedimentary Petrology*, 56: 329-345.
- Tawfik, M. H. A., Salah, K., Maejima, W., Armstrong-Altrin, J. S., Abdel-Hameed, A. M. T., El Ghandour, M. M (2018) Petrography and geochemistry of the lower miocene moghra sandstones, Qattara depression, north western

The application of petrography and geochemistry of ancient terrace sediments in determining the provenance and weathering rate, Birjand, South Khorasan

M. Mortazavi Mehrizi^{1*}, A. Ashrafi² and Gh. Mirab Shabestari³

1- Assist. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

2- M. Sc., student. Dept., of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

3- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

* mmortazavi@birjand.ac.ir

Received: 2022/5/2 Accepted: 2022/9/19

Abstract

The studied area includes the Neogene alluvial deposits of Birjand city that is geologically considered as a part of the structural zone of eastern Iran. In petrographic studies, 200 gravel clasts and 10 sandstone samples were used, while for sediment chemistry analysis, 13 mudstone samples and 2 sandstone samples were used. The petrographic examination of the above samples shows the presence of particles with different mineralogy in the studied alluvial sediments, in which, in addition to quartz, the abundance of igneous and sedimentary rocks is significant. Drawing the results of the major oxide and minor elements analysis of the above samples in the presented graphs in this context, reflects the presence of mafic to intermediate igneous rocks and sedimentary rocks in the source area. The examination of the rock units around the studied area shows that the origin of the gravel fragments and the sand particles is probably from the Cretaceous ophiolitic units, Late Cretaceous to Eocene flysch units, Paleogene clastic-carbonate sedimentary rocks and younger volcanic and sedimentary rocks which are exposed around the target area. Study of mineralogy, textural and compositional maturity of sediments along with the evaluation of chemical weathering indicators show that the mentioned alluvial sediments were deposited near the source and suffered moderate to weak weathering.

Keywords: Mineralogy, Elemental analysis, Alluvial deposits, Quaternary, Birjand