

بازسازی رویداد بارشی کارنین و شرایط اکسیژن دیرینه، با استفاده از داده‌های کانی‌شناسی: مثالی از سازند میانکوهی (تریاس بالایی) منطقه آق دربند، شمال شرق ایران

مهناز کشمیری^۱، محمد خانه باد^{۲*}، بهنام رحیمی^۳

^۱ دانشجوی دکتری رسوب شناسی، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ دانشیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ استاد گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

mkhanehbad@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

این پژوهش به بررسی شیل‌های سازند میانکوهی در برش کال‌جمعه، واقع در محدوده آق‌دربند در شمال‌شرق ایران می‌پردازد. نتایج تحلیل‌های پتروگرافی نشان می‌دهد که اغلب نمونه‌ها گل‌سنگ توده‌ای و شیل سیلتی بوده و برخی از آنها غنی از مواد آلی هستند. وجود لامیناسیون‌های تیره و روشن به همراه حضور حفره‌های کوچک، رگه‌های آلی و پیریت فرامبوئیدی، بیانگر رسوبگذاری معلق در محیطی کم‌انرژی با نرخ پایین رسوبگذاری است. آنالیزهای XRD و SEM حضور غالب کانی‌های کائولینیت، کوارتز و پیریت را نشان می‌دهند. فراوانی کائولینیت بیانگر حاکمیت شرایط اقلیمی مرطوب و گرمسیری است. رنگ تیره لایه‌ها به همراه حضور کانی پیریت نشانه شرایط احيایی تا نیمه احيایی در زمان نهشت است. مجموعه این ویژگی‌ها، در کنار داده‌های میدانی و شواهد رسوبی، گواه وقوع رویداد بارشی کارنین در منطقه مورد مطالعه است. این پژوهش، با بازسازی شرایط دیرینه اقلیمی و محیطی، نقش تغییرات کانی‌شناسی و ویژگی‌های رسوبی را در تفسیر این رویداد و بازسازی شرایط اکسیژن دیرینه را روشن می‌سازد.

کلیدواژه‌ها: آق دربند، سازند میانکوهی، تریاس بالایی، کارنین، پیریت، کائولینیت.

Reconstruction of the Carnian Pluvial Episode and paleo-oxygenation conditions using mineralogical data: An example from the Miankuhi Formation (Upper Triassic), Aghdarband area, Northeastern Iran

Mahnaz Keshmiri¹, Mohammad Khanehbad^{2*}, Behnam Rahimi³

¹ PhD student in sedimentology, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad

² Associated Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad

³ Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad
mkhanehbad@ferdowsi.um.ac.ir

Abstract

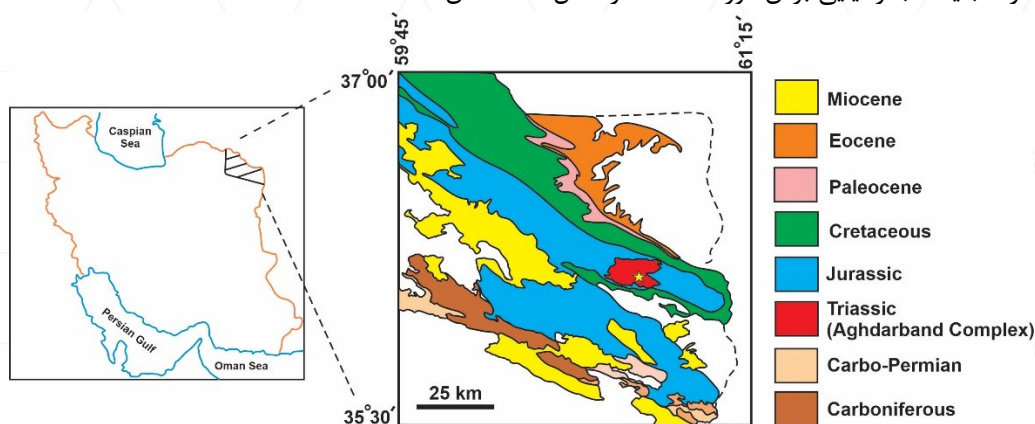
This study examines the shales of the Miankuhi Formation at the Kale-Jomeh section, located in the Aghdarband area of northeastern Iran. The results of petrographic studies show that most of the samples are massive mudstone and silty shale, and some of them are rich in organic matter. The presence of dark and light laminations, along with small pores, organic streaks, and framboidal pyrite, suggests suspension settling in a low-energy depositional environment with a low sedimentation rate. XRD and SEM analyses reveal the dominance of kaolinite and quartz minerals. The abundance of kaolinite indicates warm and humid climatic conditions during deposition. The dark coloration of the layers, their horizontal orientation, and the presence of pyrite all indicate anoxic to suboxic

conditions during sedimentation. These characteristics, along with field observations and sedimentological evidence, support the occurrence of the **Carnian Pluvial Episode (CPE)** in the study area. This study highlights the role of mineralogical variations and sedimentary features in interpreting the CPE and reconstructing past oxygenation conditions by reconstructing the paleoclimatic and paleoenvironmental conditions.

Keywords: Aghdarband, Miankuhi Formation, Upper Triassic, Carnian, Kaolinite, Pyrite

۱- مقدمه

رویداد بارشی کارنین با مجموعه‌ای از تغییرات عمده محیطی و اقیانوسی همراه بوده است که از آن جمله می‌توان به نوسانات سطح دریا (Franz et al., 2015)، گرمایش جهانی (Jin et al., 2020)، افزایش فرسایش قاره‌ای (Mazaheri-Johari et al., 2022)، نابودی سکوی کربناته (Franz et al., 2019)، عمیق‌تر شدن عمق موازنه کربنات (Rigo et al., 2007) و رویداد کم اکسیژنی در محیط‌های دریایی حاشیه‌ای (Soua, 2014) اشاره کرد. ثبت محلی پدیده‌ای که با عنوان «رویداد بارشی کارنین» (Carnian Pluvial Episode; CPE) شناخته می‌شود، بیانگر یک اختلال اقلیمی کوتاه‌مدت است (Dal Corso et al., 2018). این رویداد در طیفی از محیط‌ها، از دریایی حاشیه‌ای تا قاره‌ای، با افزایش رواناب، ورود ناگهانی رسوبات آواری، بریدگی رودخانه‌ها، توسعه پالئوسول‌های شاخص اقلیم مرطوب (Kozur and Bachmann, 2010) و همچنین کاهش چشمگیر سطح آب دریا مشخص می‌شود (Barrenchea et al. 2018). این مطالعه به بررسی این رویداد در سازند میانکوهی در برش کال‌جمعه، واقع در محدوده آق‌دربند، اختصاص دارد. جایگاه جغرافیایی برش مورد مطالعه در شکل ۱ مشخص شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی برش مورد مطالعه که در پنجره تکتونیکی آق‌دربند با علامت ستاره مشخص شده است

(Afshar-Harb, 1982)

این سازند در ناودیس آق‌دربند رخنمون یافته و ستبرای آن در حدود ۱۵۰ متر برآورد می‌شود. از دیدگاه سنگ‌شناسی، سازند میانکوهی شامل یک توالی نسبتاً یکنواخت از شیل‌های قهوه‌ای‌رنگ است که میان‌لایه‌هایی از ماسه‌سنگ‌های دانه‌ریز درون آن مشاهده می‌شود. در بخش قاعده‌ای این واحد، یک افق زغالی با ستبرای بیش از ده متر توسعه یافته که در قاعده آن، شواهدی از یک خاک دیرینه از نوع هیستوسول تشخیص داده شده است. در سطوح بالاتر سازند، که عمدتاً از شیل تشکیل شده‌اند، بقایای گیاهی، ذرات زغال و ندول‌های سپتاریا به‌طور پراکنده مشاهده می‌شوند. بر پایه نتایج مطالعات پالینولوژیکی انجام‌شده توسط مظاهری‌جوهری و همکاران (۲۰۲۲)، سن نهشته‌های سازند میانکوهی در برش کال‌جمعه به تریاس پسین، در بازه زمانی کارنین تا نورین، نسبت داده شده است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی و تفسیر رویداد بارانی کارنین در سازند میانکوهی با تکیه بر داده‌های کانی‌شناسی است. نتایج حاصل از این مطالعات امکان شناسایی تغییرات کانی‌شناسی، و شرایط محیطی حاکم بر زمان

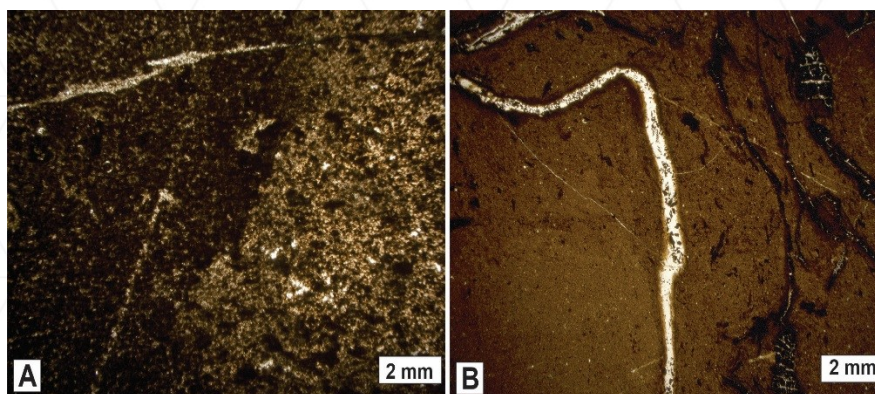
نهشت را فراهم می‌کند و نقش این عوامل را در ارتباط با این رویداد روشن می‌سازد. این رویکرد، چارچوبی مناسب برای بازسازی شرایط دیرینه اقلیمی و دیرینه محیطی حاکم بر منطقه مورد مطالعه در زمان وقوع این رویداد ارائه می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها

در مرحله‌ی ابتدایی پژوهش و بر پایه‌ی بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه، برش کال جمعه از سازند میانکوهی، به‌عنوان مناسب‌ترین رخنمون جهت انجام نمونه‌برداری انتخاب شد. در این رخنمون، ۵۰ نمونه‌ی دستی به‌صورت ترکیبی از واحدهای ماسه‌سنگی و شیلی جمع‌آوری گردید. طی فرآیند برداشت نمونه‌ها، خصوصیات فیزیکی رسوبات شامل رنگ، اندازه‌ی دانه و الگوی لایه‌بندی به‌طور دقیق مشاهده و ثبت گردید. به منظور افزایش دقت داده‌ها و جلوگیری از تأثیر عوامل مزاحم، آلودگی‌های سطحی موجود بر روی نمونه‌های شیلی پیش از انجام مراحل بعدی به‌دقت پاک‌سازی شدند. ویژگی‌های بافتی شامل دانه‌بندی بسیار ریز و همگنی بالای شیل‌ها سبب شده است که این واحدهای سنگی برای آنالیزها به منظور مطالعات کانی‌شناسی، از قابلیت و اعتبار بالایی برخوردار باشند. نمونه‌های شیلی به منظور بررسی‌های دقیق‌تر، به صورت مقطع نازک تهیه شدند. به منظور تکمیل داده‌ها، آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با دستگاه LEO 1450 VP در دانشگاه فردوسی مشهد برای تهیه تصاویر با قدرت تفکیک بالا از نمونه‌های شیلی انجام شد. در ابتدا، دو قطعه از هر نمونه با ابعاد 1×1 سانتی‌متر به روش اولتراسونیک و با استفاده از حلال مناسب پاک‌سازی شدند تا آلودگی‌های سطحی حذف گردد. سپس نمونه‌ها به منظور افزایش رسانایی، با لایه‌ای نازک از فلز پوشش داده شدند و در نهایت تحت تابش پرتوی متمرکز الکترون‌ها قرار گرفتند که برهم‌کنش آن‌ها با نمونه، ویژگی‌های ریزساختاری را آشکار ساخت. به منظور شناسایی کانی‌های رسی موجود در نمونه‌های شیلی، آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) با استفاده از دستگاه SIEMENS D-5000 در آزمایشگاه آمیتیس شرق بر روی پنج گرم از هر نمونه انجام شد. شرایط عملکرد دستگاه شامل ولتاژ ۴۰ کیلوولت، جریان ۴۰ میلی‌آمپر و بازه اسکن ۴ تا ۶۰ درجه بود. این روش بر پایه‌ی ساختار بلوری و فاصله‌ی بین اتم‌ها در فضای سه‌بعدی برای شناسایی کانی‌ها استوار است. در طی فرآیند آنالیز، پرتوهای ایکس تولیدشده توسط لوله کاتدی پس از فیلتر شدن به سمت نمونه‌ها هدایت شدند. برهم‌کنش پرتوهای تابشی با نمونه‌ها منجر به ایجاد تداخل سازنده گردید که سپس ثبت و شمارش شد. در نهایت، با مقایسه مقادیر زاویه 2θ (زاویه بین پرتو تابشی و پرتو پراش‌یافته) و فاصله‌ی بین‌صفحه‌ای (d-spacing) با الگوهای استاندارد، کانی‌های موجود در هر نمونه شناسایی شدند.

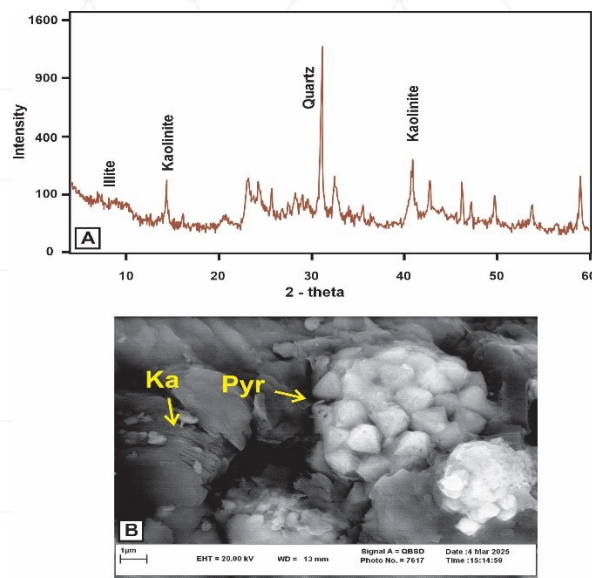
۳- بحث

تمرکز اصلی این پژوهش بر روی نمونه‌های شیلی سازند میانکوهی بوده است. مطالعات پتروگرافی نشان می‌دهد که شیل‌های سازند میانکوهی شامل نمونه‌های ریزدانه گلسنگی و شیل سیلتی است. اندازه متوسط دانه‌ها حدود ۵۰ تا ۷۰ میکرومتر و شکل آن‌ها از نیمه زاویه‌دار تا کروی متغیر است. برخی از نمونه‌ها غنی از مواد آلی هستند. در گلسنگ‌های توده ای، دانه‌ها بدون جهت‌یافتگی ترجیحی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، در حالی که شیل‌های لایه‌لایه با لامیناسیون‌های نازک تیره و روشن مشخص می‌شوند (شکل ۲A). لامیناسیون‌های تیره شامل کانی‌های رسی و مواد آلی هستند و لامیناسیون‌های روشن عمدتاً از کانی‌های سیلیسی متراکم تشکیل شده‌اند. گاهی به‌طور موضعی، این لامیناسیون‌ها به تدریج محو می‌شوند. در برخی نمونه‌ها، حفره‌های کوچک بیضوی و کروی شکل هم‌راستا با لامینه‌ها قابل مشاهده است. رگه‌های آلی در نمونه‌های شیلی به فراوانی مشاهده می‌شوند (شکل ۲B).



شکل ۲: تصاویر پتروگرافی از نمونه‌های مورد مطالعه با استفاده از نور پلاریزان (XPL، A) شیل لامینه (B) رگه‌های مواد آلی در نمونه شیلی به رنگ تیره

الگوی XRD نمونه‌های شیلی سازند میانکوهی در شکل ۳A ارائه شده است. تفسیر الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه‌های شیلی نشان می‌دهد که کانی‌های کوارتز، کائولینیت به عنوان کانی‌های غالب در تمامی نمونه‌ها حضور دارند، هرچند نسبت آن‌ها در نمونه‌های مختلف متفاوت است. الگوی مورفولوژیکی یکی از نمونه‌های شیلی که توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی به تصویر درآمده است، حضور کانی‌های کائولینیت و پیریت را آشکار می‌سازد (شکل ۳B). کائولینیت معمولاً به صورت صفحات شبه شش ضلعی مشاهده می‌شود که اغلب به شکل ساختار کتابی روی هم انباشته شده‌اند. وجود این کانی شرایط اقلیمی مرطوب و گرمسیری را نشان می‌دهد (Vassilev and Vassiliva, 1996; Worden and Morad, 2003). همچنین، پیریت‌های فرامبوئیدی به‌طور گسترده در سراسر نمونه‌ها پراکنده هستند (شکل ۳B). وجود لامیناسیون‌های موازی و حضور پیریت، نشان می‌دهد که ته‌نشینی رسوبات عمدتاً به صورت معلق انجام شده است (Knapp et al., 2017). همراهی مواد آلی با پیریت، نشان می‌دهد که شرایط احیایی تا نیمه احیایی بر محیط حاکم بوده است (Guo et al., 2025). همانطور که گفته شد حضور کانی رسی کائولینیت در رسوبات مورد مطالعه، بیانگر شرایط اقلیمی مرطوب بوده و به عنوان شواهدی بر وقوع رویداد بارشی کارنین تفسیر می‌شود. شواهد میدانی همانند فسیل‌های گیاهی، وجود لایه زغالی و خاک دیرینه هیستوسول نیز تأیید کننده این رویداد است که نتایج این مطالعه با مطالعات قبلی بر پایه داده‌های ژئوشیمیایی (کشمیری و همکاران، ۱۴۰۴) و مطالعات پالینومورفی مظاهری جوهری و همکاران، ۲۰۲۲، مطابقت دارد و تأیید کننده ثبت این رویداد در برش مورد مطالعه در بازه زمانی تریاس بالایی است. نتایج این پژوهش با موقعیت مکانی سازند میانکوهی در تریاس بالایی و موقعیت جغرافیایی دیرینه آن در عرض‌های نزدیک به استوا مطابقت دارد (Golanka, 2007).



شکل ۳: (A) تصویر آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) که فراوانی کانی کائولینیت را در نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد (B) تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از نمونه شیلی مورد مطالعه که نشان دهنده همراهی کانی پیریت و کانی رسی کائولینیت است.

۴- نتیجه‌گیری

مطالعه شیل‌های سازند میانکوهی نشان داده است که توالی‌های شیل، با لامیناسیون‌های تیره و روشن، حضور گسترده پیریت و مواد آلی، بازتاب‌دهنده این موضوع است که رسوب‌گذاری در محیط کم‌انرژی با نرخ پایین و غالباً به فرم معلق بوده‌است. ماهیت افقی و رنگ تیره لایه‌ها به همراه کانی پیریت، گواهِ حاکمیت شرایط احیایی تا نیمه احیایی در زمان نهشت است. حضور کائولینیت شاهد محکمی از وقوع رویداد بارشی کارنین (Carnian Pluvial Episode) ارائه می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که تغییرات کانی‌شناسی و رسوبی، بازتاب‌دهنده تأثیر تغییرات اقلیمی کارنین بر محیط‌های دریایی حاشیه‌ای و قاره‌ای بوده و این عوامل نقش مهمی در شکل‌گیری شرایط کم‌اکسیژنی و کنترل رسوب‌گذاری در سازند میانکوهی داشته‌اند. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به درک بهتر شرایط اقلیمی دیرینه در منطقه آق دربند کمک کند.

۵- تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در قالب طرح پژوهشی ۳/۶۳۰۶۶ انجام شده است.

۶- مراجع

کشمیری، م.، خانه باد، م.، رحیمی، ب.، ۱۴۰۴. تحلیل ژئوشیمیایی و تفسیر دیرینه‌اقلیمی سازند میانکوهی (تریاس بالایی) در منطقه آق‌دربند، شمال شرق ایران. دهمین همایش ملی انجمن رسوب‌شناسی ایران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، خوراسگان، ایران.

Afshar-Harb, A., 1982. Sarakhs geological quadrangle map: National Iranian Oil Company, scale 1:250,000.

Barrenechea, J. F., López-Gómez, J., De La Horra, R. 2018. Sedimentology, clay mineralogy and palaeosols of the Mid-Carnian Pluvial Episode in eastern Spain: insights into humidity and sea-level variations. *Journal of the Geological Society*, 175(6), 993-1003.

Dal Corso, J., Gianolla, P., Rigo, M., Franceschi, M., Roghi, G., Mietto, P., Manfrin, S., Raucsik, B., Budai, T., Jenkyns, H.C., Reymond, C.E., Caggiati, M., Gattolin, G., Breda, A., Merico, A., Preto, N. 2018. Multiple negative carbon-isotope excursions during the Carnian Pluvial Episode (late Triassic). *Earth-Science Reviews*, 185, 732–750.

Franz, M., Kaiser, S. I., Fischer, J., Heunisch, C., Kustatscher, E., Luppold, F. W., Berner, U., & Röhlings, H. G., 2015. Eustatic and climatic control on the Upper Muschelkalk Sea (late Anisian/Ladinian) in the Central European Basin. *Global and Planetary Change*, 135, 1-27.

Golonka, J., 2007. Late Triassic and Early Jurassic palaeogeography of the world. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 244, 297 - 307.

Guo, L., Fang, Z., Peng, X., Liu, J., 2025. *Major and trace elements in marine black shales from the Lower Cambrian, Yangtze Plate, SW China: implications for depositional environment. Journal of Oceanology and Limnology*, 43, 1769-1791.

Jin, X., Gianolla, P., Shi, Z., Franceschi, M., Caggiati, M., Du, Y., & Preto, N. 2020. Synchronized changes in shallow water carbonate production during the Carnian Pluvial Episode (Late Triassic) throughout Tethys. *Global and Planetary Change*, 184, 103035.

Knapp L J, McMillan J M, Harris N B. 2017. A depositional model for organic-rich Duvernay Formation mudstones. *Sedimentary Geology*, 347, 160-182.

Kozur, H.W. & Bachmann, G.H. 2010. The Middle Carnian Wet Intermezzo of the Stuttgart formation (Schilfsandstein), Germanic Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 290, 107–119.

Mazaheri-Johari, M., Righi, G., Caggiati, M., Kustatscher, E., Ghasemi- Nejad, E., Zanchi, A., Gianolla, P. 2022. Disentangling climate signal from tectonic forcing: The Triassic Aghdarband Basin (Turan Domain, Iran). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 568, 1-21.

Rigo, M., Preto, N., Roghi, G., Tateo, F., Mietto, P. 2007. A rise in the Carbonate Compensation Depth of western Tethys in the Carnian (Late Triassic): deep-water evidence for the Carnian Pluvial Event. *Palaeogeography. Palaeoclimatology. Palaeoecology*. 246, 188–205.

Soua, M., 2014. Early Carnian anoxic event as recorded in the southern Tethyan margin, Tunisia: an overview, *International Geology Review*, 56:15, 1884-1905.

Vassilev, S.V., Vassiliva, C.G. 1996. Occurrence, abundance and origin of minerals in coals and coal ashes. *Fuel processing Technology*. 48, 85-106.

Worden, R. H., Morad, S. 2003. *Clay Mineral cement in sandstones*. Hoboken: Wiley-Blackwell.