Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Summer 2026, Vol. 16(2): 55 - 80

Research Article

Integrated source rock evaluation of the Dalichai Formation based on Organic Geochemistry and Palynofacies analysis: A case study from the Vana stratigraphic section (Central Alborz)

Afsaneh Dehbozorgi[1]*, Bijan Beiranvand[2]

1- Department of Geology, Faculty of Science, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
2- Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

Abstract

This study provides the first evaluation of the source rock potential of the Dalichai Formation at the Vana stratigraphic section (Central Alborz) by integrating palynofacies analysis and organic geochemical data. Based on the identified biozones and key dinocyst species, the age of the Dalichai Formation in this section is determined as late Bajocian to late Callovian. Source rock potential was evaluated using Rock-Eval pyrolysis data and organic geochemical indices, including Total Organic Carbon (TOC), S_1, S_2, S_3, Hydrogen Index (HI), and Oxygen Index (OI). Due to the low TOC and S2 values, this formation is classified as significantly poor in organic matter content. The distribution of samples on the relevant diagrams indicates that the organic matter predominantly consists of Type IV kerogen, with no effective potential for hydrocarbon generation. Although some intervals of the studied succession show a relative decrease in terrestrial organic input, a relative increase in AOM abundance, and an increase in marine components based on palynofacies analysis, indicating a relative improvement in preservation conditions, this state was likely the result of a combination of low sedimentation rates and prolonged oxygen exposure. Under slow sedimentation conditions, organic matter remains in contact with oxygen for an extended period, facilitating gradual oxidation and the loss of hydrocarbon-generating components. Consequently, even in intervals of this formation characterized by slower deposition, the sedimentary environment was unsuitable for preserving organic matter and converting it into productive kerogen. From an applied perspective, these findings conclusively rule out the hydrocarbon-generating potential of the Dalichai Formation and, consequently, its possible role as a source rock in the Alborz Basin. They further indicate that additional investigations into its source rock potential are not warranted. Accordingly, the Dalichai Formation may be excluded from subsequent regional source rock assessments.

Keywords*: Dalichai Formation, Organic geochemistry, Rock-Eval pyrolysis, Source rock potential, palynofacies*

1- Introdution

The Dalichai Formation is extensively distributed along the Alborz Mountain Range. It predominantly consists of grey shale, marl, and marly limestone, containing ammonites, benthic foraminifers, dinocysts, and continental palynomorphs (spores and pollen). The formation has been comprehensively studied across the Alborz Basin with respect to its palynostratigraphy, paleoenvironmental conditions, and palynological content (e.g., Ghasemi-Nejad et al., 2012; Dehbozorgi et al., 2013; Sajjadi et al., 2023; Dehbozorgi et al., 2024; Dehbozorgi and Senemari, 2020; Hashemi Yazdi et al., 2020; Kalanat and Raoufian, 2023). Despite extensive paleontological work on the Dalichai Formation, its organic geochemical and hydrocarbon

* Corresponding author: Dehbozorgi@SCI.ikiu.ac.ir
DOI: 10.22055/aag.2026.53101.2589
Received: 2026-09-04
Accepted: 2026-09-20

potential remains understudied. In this study, the first integrated assessment combining Rock-Eval pyrolysis, dinocyst palynostratigraphy, and palynofacies analysis is presented to constrain its age, paleoenvironment, and hydrocarbon-generative potential.

2- Material and methods

The 48 m-thick Dalichai Formation at the Vana stratigraphic section (Central Alborz; 35°56′ 31″N, 52°15′ 48′ E) predominantly comprises alternating marls, limestones, and marly limestones. It unconformably overlies the Shemshak Formation and is conformably overlain by the cliff-forming Lar Formation. Twenty-one samples were processed for palynology using standard non-oxidative techniques (Phipps and Playford, 1984), including hydrochloric (10 - 50%) and hydrofluoric (ca. 40%) acids for the dissolution of carbonates and silicates, respectively. Thereafter, the silica gel produced during the HF treatment was removed using 10% hot HCl. The resulting solution was then neutralized and centrifuged in $ZnCl_2$ solution (specific gravity of 1.9 g/cm³) to separate the components based on density. Neither oxidative nor alkali treatments were applied. Residues were sieved through a 20µm mesh and mounted on glass slides using liquid Canada balsam. Sedimentary organic matter was quantitatively logged across 15 fields of view per slide and projected onto the Tyson (1993) ternary diagram for paleoenvironmental reconstruction. Rock-Eval 6 pyrolysis was performed on five representative samples at the Research Institute of Petroleum Industry (RIPI) to evaluate source rock potential and kerogen type. To enhance the objectivity and reliability of the interpretation, palynofacies data (AOM, Phytoclasts, and Marine Palynomorphs) were statistically evaluated using Principal Component Analysis (PCA) and Hierarchical Cluster Analysis (HCA; Ward's 1963 method). All the samples, slides, and figured specimens were stored at the Laboratory of Paleontology of the Department of Geology, Faculty of Science, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

3- Results and discussions

The presence of some index species of dinoflagellate cysts leads to the identification of three of the northwestern European biozones (Riding and Thomas, 1992; Poulsen and Riding, 2003), i.e., Cribroperidinium crispum Total Range Biozone (late Bajocian), the Dichadogonyaulax sellwoodii Interval Biozone (Bathonian to early Callovian), and the Ctenidodinium continuum Interval Biozone (early to middle Callovian). Moreover, the presence of such dinoflagellate species as Mendicodinium groenlandicum and Systematophora areolata has been used to attribute a late Callovian age to the upper part of this studied section. The late Bajocian - late Callovian age is collectively attributed, therefore, to the studied section.

Quantitative distribution of particulate organic components on the Tyson (1993) ternary plot identifies four distinct palynofacies; i.e., Palynofacies I (sample 1) is dominated by phytoclasts with scarce proximate dinocysts, indicating a very shallow, nearshore setting. Palynofacies II (samples 2, 4-7, 10-13, 17-18) comprises 65-84% phytoclasts, 7-26% AOM, and <13% marine palynomorphs, reflecting a marginal shallow-marine realm under dysoxic to anoxic conditions (Tyson, 1993). Palynofacies I/II (sample 3) represents an intermediate transition marked by slight AOM enrichment and dominant phytoclasts, indicating short-term shoreline shifts. Palynofacies IVa (samples 8-9, 14-16, 19-21), characterized by 27-33% AOM, 24-30% marine palynomorphs, and 40-47% phytoclasts, reflects an intermediate to distal shelf regime (Tyson, 1993).

Principal Component Analysis (PCA) performed on phytoclasts, AOM, and marine palynomorphs successfully discriminated the samples along a landward to basinward gradient. It confirmed a clear environmental shift from phytoclast-dominated nearshore settings (Palynofacies I) to AOM- and dinocyst-enriched distal shelf regimes (Palynofacies IVa) with enhanced preservation under lower oxygen conditions. Hierarchical Cluster Analysis (HCA; Ward's 1963 method) based on quantitative organic constituents classified the samples into three primary clusters that validate the defined palynofacies framework. The statistical separation clearly captured a continuous, gradual paleoenvironmental evolution from proximal terrigenous-dominated facies (Palynofacies I and I/II) to distal marine facies with enhanced AOM content (Palynofacies IVa).

Geochemical analysis via Rock-Eval 6 pyrolysis demonstrates that the Dalichai Formation at the Vana stratigraphic section is organically poor, with TOC values remaining consistently below 0.5 wt. % (averaging 0.2 - 0.4 wt. %) and pyrolyzable hydrocarbon yields are negligible (S_2<0.1 mg HC/g rock)

(Peters and Cassa, 1994; Hunt, 1996). Cross-plots of HI versus Tmax and OI indicate that the sedimentary organic matter is entirely dominated by oxidized, reworked Type IV kerogen with virtually no generative capacity (Welte and Tissot, 1984). Vitrinite reflectance analysis is a well-established proxy for assessing the thermal maturity of organic matter and evaluating source-rock potential (Eskandari et al., 2026). In this study, reflectance measurements of the identified solid bitumen particles in sample D21 indicate a relatively high level of thermal maturity (Ro = 1-1.1%). However, the extreme scarcity of these particles and their exclusive occurrence along fracture networks suggest that the hydrocarbons were not generated in situ. Rather, they likely resulted from secondary migration from a more organically rich source rock (e.g., coal-bearing sediments and organic-rich shales of the Shemshak Formation; Shekarifard et al., 2012; Hamidi et al., 2018) located elsewhere. Accordingly, this stratigraphic interval primarily acted as a migration pathway or a site of secondary hydrocarbon accumulation, rather than as an effective generative source rock. Furthermore, the anomalously high Tmax value of 604°C recorded for sample D21 is interpreted as an analytical artifact, resulting from the very low and broad S_2 peak and the presence of trace amounts of veinlet-filling solid bitumen, rather than from true overmaturity of the host organic matter.

From an applied perspective, these findings conclusively rule out the hydrocarbon-generating potential of the Dalichai Formation and, consequently, its possible role as a source rock in the Alborz Basin. They further indicate that additional investigations into its source rock potential are not warranted. Accordingly, the Dalichai Formation may be excluded from subsequent regional source rock assessments.

4- Conclusion

Dinoflagellate cyst palynostratigraphy and key species of dinocysts constrain the age of the Dalichai Formation at the Vana stratigraphic section to the late Bajocian - late Callovian through the identification of three biozones calibrated with standard Tethyan/Subboreal zonation schemes. Integrated palynofacies analysis reveals a progressive, transgressive transition from a proximal, terrigenous-dominated nearshore setting to deeper, distal marine environments, punctuated by minor, short-term relative sea-level fluctuations. Organic geochemical analysis (Rock-Eval 6) and organic petrography demonstrate that the succession is consistently organic-poor, characterized by low TOC, negligible S_1 and S_2 yields, and low HI values. The organic matter is dominated by Type IV (inert) kerogen, indicating a poor to non-generative source rock. This severe organic depletion resulted from slow sedimentation rates and prolonged exposure to oxygenated waters during transport and deposition, which led to the degradation and oxidation of reactive organic compounds despite transient dysoxic bottom-water episodes. Furthermore, the presence of mature solid bitumen along microfractures indicates that certain intervals acted as potential pathways or carrier beds for secondary hydrocarbon migration rather than an active, indigenous petroleum source rock. In conclusion, the Dalichai Formation at the Vana stratigraphic section holds no effective in-situ hydrocarbon generative potential, and its petroleum geological significance in this area is limited to its prospective role as a migration conduit.

5- References

Dehbozorgi, A., Sajjadi, F., Hashemi. H., 2013. Middle Jurassic palynomorphs of the Dalichai Formation, central Alborz Ranges, northeastern Iran: Paleoecological inferences. Science China Earth Sciences 56, 2107-2115. https://doi.org/10.1007/s11430-013-4697-z

Dehbozorgi, A., Senemari, S., 2020. Palynostratigraphy, paleoclimate, and paleoenvironment of the Dalichai Formation in the Bashm stratigraphic section (Eastern Alborz). Scientific Semiannual Journal of Sedimentary Facies 13(1), 1-21. https://doi.org/10.22067/sed.facies.v13i1.87380

Dehbozorgi, A., Hashemi Yazdi, F., Sajjadi, F., Hashemi, H., 2024. The importance of Sporomorph EcoGroups and palynofacies in recognition of paleoenvironments and paleoecology of the Middle Jurassic strata of the central and eastern Alborz. Advanced Applied Geology 14(1), 23-43. https://doi.org/10.22055/AAG.2023.44363.2389.

Eskandari, M., Khosravi, M., Jahangard, A.A., Salehi, M.A., Tabaei, M., 2026. Hydrocarbon generation potential of the Upper Triassic - Middle Jurassic coal - bearing strata in the Parvadeh mine, Tabas, east-central Iran. Advanced Applied Geology 16 (1), 38-56. https://doi.org/10.22055/aag.2026.51483.2555.

Ghasemi-Nejad, E., Sabbaghiyan, H., Mosaddegh, H., 2012. Paleobiogeographic implications of late Bajocian-late Callovian (Middle Jurassic) dinoflagellate cysts from the Central Alborz Mountain, northern Iran. Journal of Asian Earth Sciences 43, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.08.006

Hamidi, Z., Fardoust, F., Jafarzadeh, M., Rabbani, A.R., 2018. Organic geochemistry of the Upper Triassic–Middle Jurassic Shemshak Group (Alborz Mountains, NE Iran). Petroleum Science and Technology 36(21), 1764–1770. https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1511587

Hashemi Yazdi, F., Bashiri, N., Sajjadi, F., 2020. Palynofacies and Sporomorph EcoGroups-based paleoecology implications for the Dalichai Formation, Andariyeh, central Alborz. Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches, 36(1), 39-60. https://doi.org/10.22108/jssr.2020.118759.1116

Hunt, J.M., 1996. Petroleum Geochemistry and Geology. W. H. Freeman, New York. p. 743.

Kalanat, B., Raoufian, A., 2023. Palynological evidence for the Middle Jurassic environmental evolution in the eastern part of the Alborz Mountains (northern Iran). Review of Palaeobotany and Palynology 312. 104874. https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2023.104874

Peters, K.E., Cassa, M.R., 1994. Applied source rock geochemistry. In: Magoon, L.B., Dow, W.G. (Eds.), The Petroleum System-From Source to Trap. American Association of Petroleum Geologists 60, pp. 93-120.

Phipps, D., Playford, G., 1984. Laboratory techniques for extraction of palynomorphs from sediments. Department of Geology, University of Queensland, Papers 11(1), 1-23.

Poulsen, N.E., Riding, J.B., 2003. The Jurassic dinoflagellate cyst zonation of Subboreal Northwest Europe. In: Ineson, J.R., Surlyk, F., (Eds.), The Jurassic of Denmark and Greenland. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 1, 115-144.

Riding, J.B., Thomas, J.E., 1992. Dinoflagellate cysts of the Jurassic System. In: Powell, A.J. (Ed.), A stratigraphic index of dinoflagellate cysts. British Micropalaeontological Society Publications Series. Chapman and Hall, London, pp. 7-97.

Sajjadi, F., Hashemi Yazdi, F., Hashemi, H., 2023. Palynostratigraphy and palaeoecology of the Dalichai Formation at the Yonjehzar stratigraphic section, northeastern Tehran, central Alborz. Scientific Quarterly Journal of Geosciences 33(2), 128, 259-282. https://doi.10.22071/gsj.2023.350092.2013

Shekarifard, A., Baudin, F., Seyed-Emami, K., Schnyder, J., Rahimpour-Bonab, H., 2012. Organic Matter Characterization and Thermal Modeling of the Basal Black Shale from the Shemshak Group (Upper Triassic- Middle Jurassic) in the Tazareh Section, Eastern Alborz, Northern Iran. Scientific Quarterly Journal of Geosciences 21(83), 219-228. https://doi.org/10.22071/gsj.2012.54549

Tyson, R.V., 1993. Palynofacies analysis. In: Jenkins, D.G. (Ed.), Applied Micropaleontology. Dordrecht. pp. 153-172.

Ward, J.H., 1963. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. Journal of the American Statistical Association 58, 236-244. https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845

Welte, D.H., Tissot, P.B., 1984. Petroleum formation and occurrence. Springer-verlag. p. 702.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Dehbozorgi, A., Beiranvand, B., 2026. Integrated source rock evaluation of the Dalichai Formation based on Organic Geochemistry and Palynofacies analysis: A case study from the Vana stratigraphic section (Central Alborz). Adv. Appl. Geol. 16 (2), 55-80.
DOI: 10.22055/aag.2026.53101.2589
https://aag.scu.ac.ir/article_20962.html

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

مقاله پژوهشی

ارزیابی پتانسیل سنگ منشأ سازند دلیچای بر پایه ژئوشیمی آلی و تحلیل پالینوفاسیس: مطالعه موردی برش چینه‌شناسی وانا (البرز مرکزی)

افسانه ده‌بزرگی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

بیژن بیرانوند

پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

dehbozorgi@sci.ikiu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۶/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۹

چکیده

در این پژوهش، برای نخستین بار ارزیابی پتانسیل سنگ منشأ سازند دلیچای در برش چینه‌شناسی وانا (البرز مرکزی) با استفاده از تحلیل پالینوفاسیس و داده‌های ژئوشیمی آلی انجام شد. بر اساس بایوزون‌ها و گونه‌های شاخص شناسایی شده، سن سازند دلیچای در این برش، باژوسین پسین تا کالووین پسین تعیین شد. بررسی پتانسیل سنگ منشأ بر پایه داده‌های پیرولیز راک-اول و شاخص‌های ژئوشیمی آلی شامل کربن آلی کل (TOC)، S_1، S_2، S_3، شاخص هیدروژن (HI) و شاخص اکسیژن (OI) انجام شد. با توجه به مقادیر پایین کربن آلی کل و S_2، نمونه‌های سازند دلیچای از نظر محتوای مواد آلی، کاملا فقیر می باشند. همچنین، جایگاه نمونه‌ها در نمودارها بیانگر آن است که ماده آلی کروژن نوع IV بوده و فاقد توان مؤثر برای تولید هیدروکربن است، اگرچه برخی فواصل توالی مورد مطالعه بر اساس تحلیل پالینوفاسیس، کاهش نسبی ورودی مواد آلی خشکی‌زاد، فراوانی نسبی مواد ارگانیکی بی‌شکل و افزایش مؤلفه‌های دریایی را نشان داده و از بهبود نسبی شرایط حفاظتی حکایت دارند. این وضعیت نتیجه نرخ رسوب‌گذاری پایین و افزایش زمان مواجهه ماده آلی با اکسیژن است، به گونه‌ای که در شرایط رسوب‌گذاری کند، ماده آلی مدت طولانی‌تری در تماس با اکسیژن قرار گرفته و می‌تواند شرایط اکسیداسیون تدریجی و حذف بخش‌های مولد هیدروکربن را فراهم نماید. بنابراین، حتی در مورد بخش‌هایی از این سازند که نهشته‌شدگی آرام‌تری را نشان می‌دهند، شرایط محیط رسوبی برای حفظ ماده آلی و تبدیل آن به کروژن مولد مناسب نبوده است. از نظر کاربردی، این یافته‌ها با رد کامل پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازند دلیچای، احتمال ایفای نقش آن به عنوان سنگ منشأ در حوضه البرز را منتفی می‌کنند و نشان می‌دهند که انجام مطالعات بیشتر درباره قابلیت سنگ منشأ بودن این سازند ضرورتی ندارد. بنابراین، سازند دلیچای را می‌توان از ارزیابی‌های بعدی سنگ‌های منشأ در منطقه کنار گذاشت.

واژه های کلیدی: *سازند دلیچای، ژئوشیمی آلی، پیرولیز راک-اول، پتانسیل سنگ منشأ، پالینوفاسیس*

۱- مقدمه

سازند دلیچای به طور گسترده در امتداد کوه‌های البرز گسترش دارد. این سازند عمدتا از شیل خاکستری، مارن و سنگ آهک مارنی تشکیل شده و حاوی آمونیت‌ها، روزنبران بنتیک، سیست‌های داینوفلاژله (داینوسیست‌ها) و پالینومورف‌های قاره‌ای (اسپورها و پولن‌ها) است. سازند دلیچای در حوضه البرز به طور گسترده‌ای از نظر پالینوستراتیگرافی، محیط دیرینه و محتویات پالینولوژیکی مورد مطالعه قرار گرفته است (e.g., Ghasemi-Nejad et al., 2012; Dehbozorgi et al., 2013; Skupien et al., 2015; Sajjadi et al., 2018, 2023; Dehbozorgi and Senemari, 2020; Hashemi Yazdi et al., 2020; Kalanat and Raoufian, 2023; Dehbozorgi et al., 2024). این سازند به علت تغییرات ضخامت و رخنمون بسیار مناسب، توسط فسیل‌شناسان بسیاری از جهات مختلف مورد توجه قرار گرفته است. ولیکن جای خالی مطالعات ژئوشیمی آلی و ارزیابی پتانسیل هیدروکربن‌زایی آن همواره محسوس بوده است، از این رو در پژوهش حاضر، برای نخستین بار ارزیابی ژئوشیمیایی سازند دلیچای با هدف تعیین ویژگی‌های سنگ منشأ، کیفیت و کمیت ماده آلی و سنجش پتانسیل سنگ منشأ آن با استفاده از داده‌های پیرولیز راک-اول (Rock-Eval) انجام گرفته است. علاوه بر آن، تعیین سن سازند بر اساس داینوسیست‌ها و همچنین مطالعات پالینوفاسیس با هدف بازسازی شرایط دیرینه محیطی، تعیین

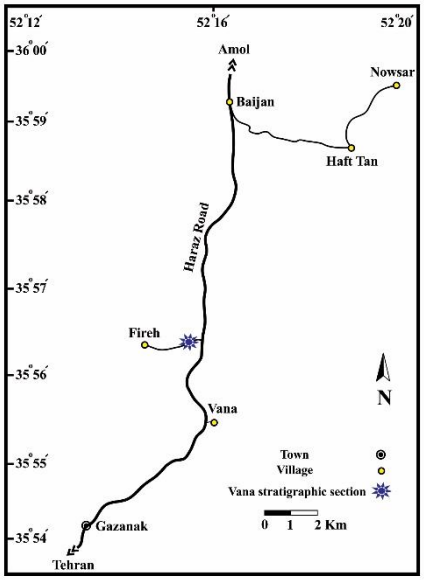
منشأ و میزان حفظ شدگی ماده آلی و تفسیر محیط رسوب‌گذاری نهشته‌های مورد مطالعه انجام گرفته است.

۲- موقعیت جغرافیایی و راه‌های ارتباطی برش چینه‌شناسی مورد مطالعه

برش چینه‌شناسی وانا با عرض جغرافیایی ″۳۱ ′۵۶ °۳۵ N و طول جغرافیایی ″۴۸ ′۱۵ °۵۲ E واقع در البرز مرکزی، ۱۱۰ کیلومتری شمال شرق تهران و سه کیلومتری شمال غرب روستای وانا در ناحیه گزنک - بایجان قرار دارد و دسترسی به آن از طریق جاده هراز امکان پذیر است (شکل ۱). سازند دلیچای در این برش چینه‌شناسی با ضخامت ۴۸ متر عمدتا از تناوب مارن، مارن آهکی، آهک و آهک مارنی تشکیل شده است (شکل ۲). این سازند به طور ناپیوسته روی سازند شمشک و به طور پیوسته در زیر آهک‌های صخره‌ساز سازند لار قرار دارد.

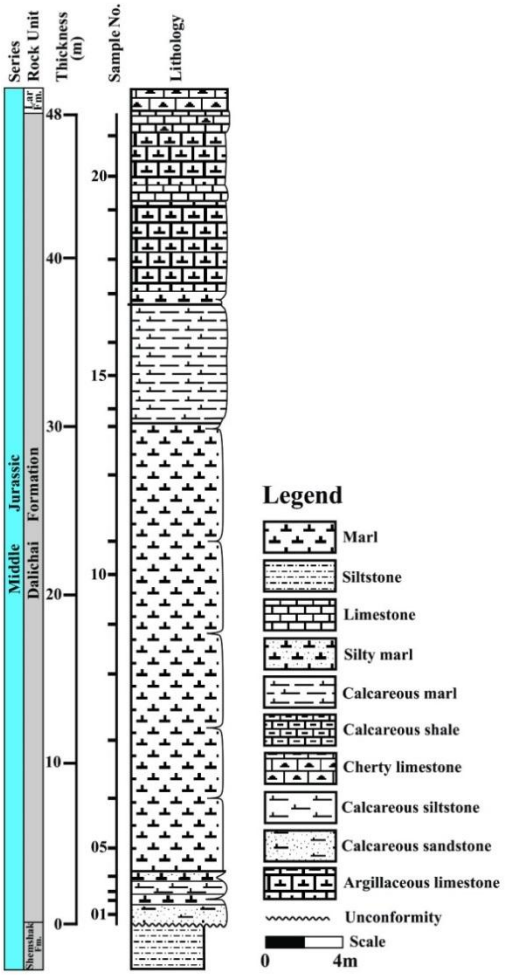
۳- روش کار

از سازند دلیچای در برش چینه‌شناسی وانا ۲۱ نمونه برای مطالعات پالینولوژی از افق‌های مناسب برداشت و عمل آماده‌سازی نمونه‌ها با استفاده از روش Phipps و Playford (۱۹۸۴) انجام گرفت، بدین‌صورت که از اسید کلریدریک (۵۰٪) جهت انحلال ترکیبات کربناته و اکسیدهای آهن و از اسید فلوئوریدریک (۳۳٪) برای انحلال ترکیبات سیلیکاته استفاده شد. جهت جلوگیری از تشکیل ژل‌های سیلیکاته، نمونه‌ها با اسید کلریدریک ۱۰٪ جوشانده و سپس با استفاده از محلول کلرید روی (با چگالی ۱/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب) سانتریفیوژ شدند. پس از عبور مواد باقی‌مانده از الک ۲۰ میکرون، اسلایدهای پالینولوژی تهیه و با استفاده از میکروسکوپ نوری (در بزرگنمایی‌های ۴۰ و ۱۰۰) بررسی شدند. در مجموع ۶۳ اسلاید (سه اسلاید برای هر نمونه) تهیه شد. به منظور بازسازی محیط دیرینه، اجزای آلی در ۱۵ میدان دید از هر یک از سه اسلاید تهیه شده برای هر نمونه بررسی شدند و نتایج پالینوفاسیس‌ها بر اساس دیاگرام سه گانه Tyson (۱۹۹۳) ترسیم و تفسیر شدند. آنالیز راک-اول توسط دستگاه پیرولیز راک-اول ۶ در پژوهشگاه صنعت نفت بر روی پنج نمونه منتخب انجام شد و داده‌های حاصل برای تعیین نوع کروژن و ارزیابی پتانسیل سنگ منشأ مورد استفاده قرار گرفت. تفسیر نوع ماده آلی و کیفیت سنگ منشأ نیز بر پایه معیارهای متداول ژئوشیمی آلی انجام شد. برای بررسی شباهت میان نمونه‌ها و کاهش سوگیری در تفسیر، داده‌های پالینوفاسیس به صورت آماری تحلیل شدند. در این پژوهش، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (Principal Component Analysis: PCA) برای بررسی روابط میان مواد ارگانیکی بی‌شکل (Amorphous Organic Matters: AOM)، فیتوکلاست‌ها (Phytoclast: PH) و پالینومورف‌های دریایی (Marine Palynomorphs: MP) استفاده شد. همچنین، برای گروه‌بندی نمونه‌ها، تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی (Hierarchical Cluster Analysis: HCA) بر پایه روش Ward (۱۹۶۳) انجام گرفت.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به سازند دلیچای در برش چینه‌شناسی وانا.

Fig. 1. Location map of the Dalichai Formation in the Vana stratigraphic section.



شکل ۲- ستون چینه‌شناسی سازند دلیچای در برش چینه‌شناسی وانا.

Fig. 2. Stratigraphic column of the Dalichai Formation, Vana stratigraphic section.

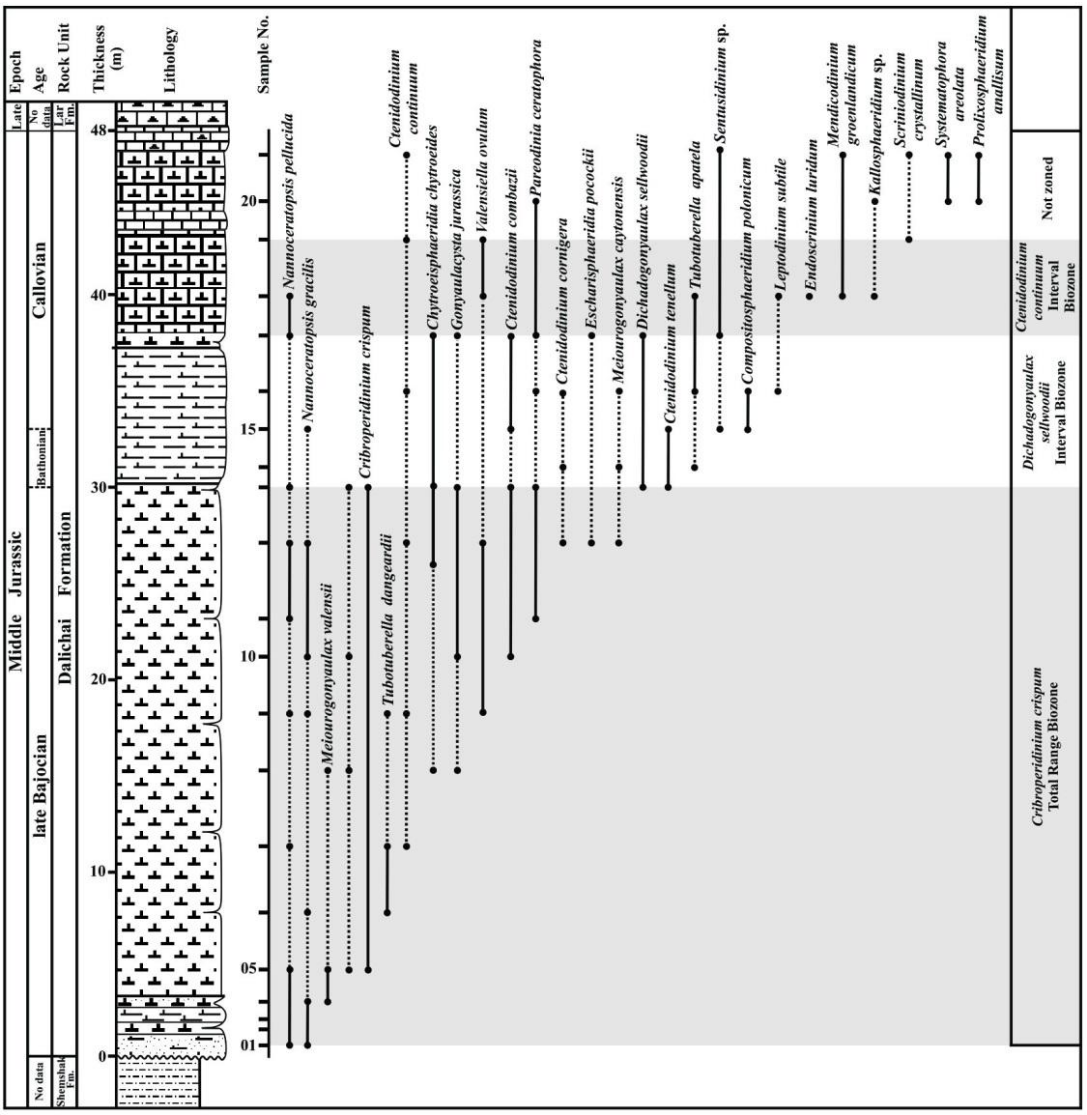
۴- بحث

در این پژوهش، تفسیر شرایط دیرینه محیطی و پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازند دلیچای بر پایه تلفیق شواهد پالینولوژیکی و داده‌های ژئوشیمیایی استوار است. بدین منظور، ابتدا با تکیه بر تحلیل رخساره‌های پالینولوژیکی (Palynofacies Analysis)، ویژگی‌های محیط رسوب‌گذاری از منظر نوسانات سطح آب، مقدار اکسیژن و میزان ورودی مواد آلی خشکی‌زاد ارزیابی شد. به این ترتیب، تحلیل رخساره‌های پالینولوژیکی چارچوب اولیه‌ای را برای درک چگونگی انباشت و حفظ ماده آلی به صورت کیفی فراهم آورده است. سپس، جهت کمی‌سازی این مشاهدات و ارزیابی توان هیدروکربن‌زایی رسوبات مورد مطالعه، نتایج پیرولیز راک-اول مورد بحث قرار گرفت. تلفیق داده‌های حاصل از این دو رویکرد، امکان ارزیابی دقیق کیفیت و کمیت ماده آلی را در پیوند با تحولات محیطی حوضه فراهم ساخته و پتانسیل سنگ منشأ مورد مطالعه را تبیین می‌کند. همچنین، تعیین سن رسوبات مورد مطالعه بر اساس داینوسیست‌ها انجام شده است.

۴- ۱- پالینوستراتیگرافی و تعیین سن

مجموعه داینوسیستی سازند دلیچای در برش چینه‌شناسی وانا شامل ۲۶ گونه داینوفلاژله متعلق به ۲۰ جنس است که شباهت و همبستگی بالایی با مجموعه‌های گزارش شده از بخش‌های غربی و شمال غربی اروپا نشان می‌دهند (e.g., Riding and Thomas, 1992; Poulsen and Riding, 2003). بر اساس گسترش چینه‌شناسی گونه‌های شاخص (شکل ۳) سه بایوزون شناسایی شد که با زون‌های استاندارد جهانی Riding و Thomas (۱۹۹۲) قابل انطباق هستند (جدول ۱).

Cribroperidinium crispum Total Range *Biozone*: این بایوزون بر مبنای محدوده گسترش گونه *Cribroperidinium crispum* (نام قبلی: *Acanthaulax crispa*) تعریف شده است که با زون پیشنهادی Riding و Thomas (۱۹۹۲) و Woollam و Riding (۱۹۸۳) برای اشکوب باژوسین در انگلستان مطابقت دارد. این بازه در برش چینه‌شناسی مورد مطالعه با ضخامت ۳۰ متر، از نخستین ظهور (FO) تا آخرین حضور (LO) گونه شاخص *C. crispum* شناسایی شد. مطالعات اخیر تایید کرده‌اند که این تاکسون، یک شاخص کلیدی برای بازه باژوسین است (e.g., Wiggan et al., 2017). علاوه بر گونه شاخص، حضور فراوان *Nannaoceratopsis pellucida* و *N. gracilis* به همراه گونه کلیدی *Meiourogonyaulax valensii* انتساب این بایوزون به باژوسین پسین را تقویت می‌کند. بایوزون‌های DSJ13 و DSJ14 از Poulsen و Riding (۲۰۰۳) معادل این بایوزون هستند (جدول ۱). این گونه اولین بار در نمونه شماره ۵ در عمق ۴/۵ متری ظاهر شده و تا نمونه ۱۳ در عمق ۳۰ متری ادامه می‌یابد. عدم وجود تاکسون‌های شاخص باژوسین پیشین نظیر *Mancodinium semitabulatum* و *Durotrigia daveyi* نشان می‌دهد که قاعده این بایوزون می‌تواند در موقعیت چینه‌شناسی پایین‌تر واقع شده باشد و بخش زیرین سازند دلیچای در طول باژوسین پسین نهشته شده است.



شکل ۳- گسترش چینه‌شناسی داینوسیست‌های سازند دلیچای، برش چینه‌شناسی وانا.

Fig. 3. Stratigraphic range chart of dinocysts in the Dalichai Formation, Vana stratigraphic section.

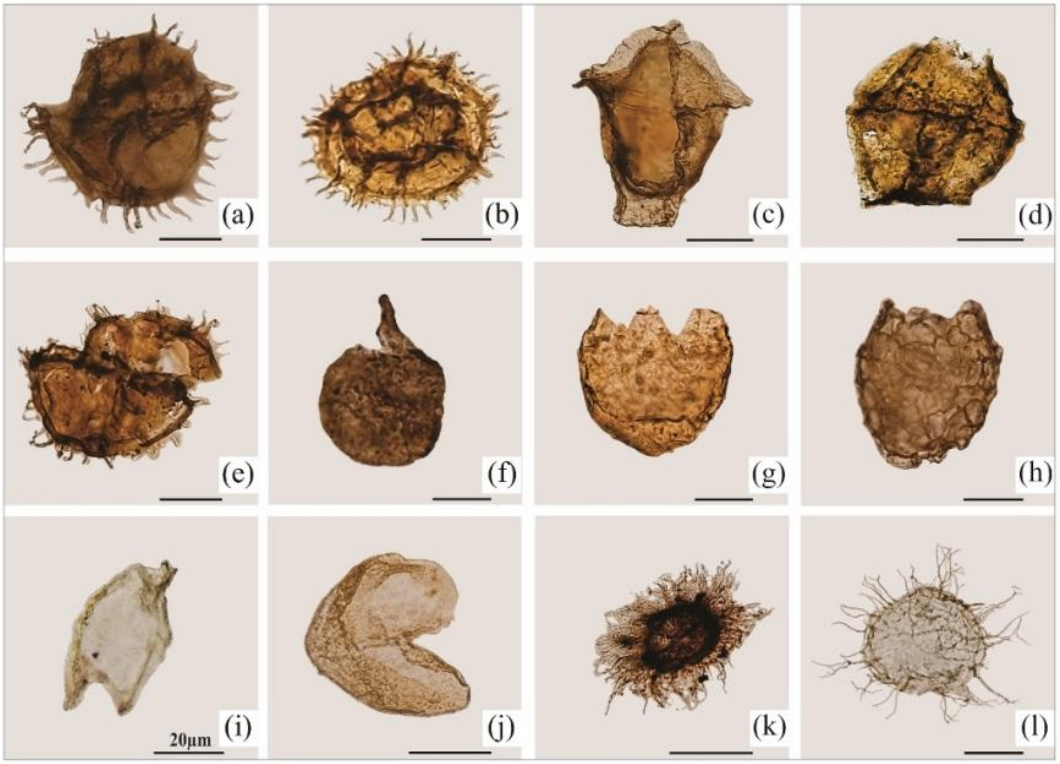
Ctenidodinium continuum Interval Biozone: این بایوزون مشخص کننده زمان کالووین پیشین تا میانی بوده (Riding and Thomas, 1992) و ضخامت ۵ متر (نمونه‌های ۱۸ تا ۱۹) در حدفاصل آخرین حضور *Ctenidodinium combazii* و اولین حضور *Scriniodinium crystallinum* را در برمی‌گیرد. این بایوزون با *Ctenididinium continuum Interval Biozone* (Riding and Thomas, 1992) و Ctenidodinium continuum Zone (Poulsen and Riding, 2003) مربوط به شمال غربی اروپا و بایوزون Ctenidodinium ornatum - Ctenidodinium continuum Zone معرفی شده در انگلستان (Woollam and Riding, 1983) متعلق به کالووین پیشین - میانی مطابقت دارد. در ۵ متر انتهایی برش حضور دایینوسیست‌هایی نظیر *Mendicodinium groenlandicum* و *Systematophora areolata* نشان دهنده سن کالووین پسین است (Woollam, 1980; Riding and Thomas, 1992; Borges et al., 2011). در مجموع بر اساس دایینوسیست‌های شناسایی شده و کلیدی، سن باژوسین پسین - کالووین پسین برای سازند دلیچای در برش چینه‌شناسی وانا تعیین می‌شود. تصویر تعدادی از دایینوسیست‌ها در شکل ۴ ارائه شده است.

در پژوهش‌های مختلفی که در محدوده البرز مرکزی (e.g., Ghasemi-Nejad et al., 2012; Dehbozorgi, 2014; Hashemi Yazdi, 2015; Dehbozorgi et al., 2018; Mohammad Khani and Zarei, 2019; Dehbozorgi and Senemari, 2020)، البرز شرقی (Hashemi Yazdi, 2015; Kalanat and Raoufian, 2023) و البرز غربی (Sajjadi et al., 2018) بر پایه پالینومورف‌های دریایی انجام شده‌اند، سن سازند دلیچای بررسی شده است. در همه این مطالعات، بایوزون‌های استاندارد (Riding and Thomas, 1992; Poulsen and Riding, 2003) معرفی شده و بازه زمانی این سازند به طور کلی باژوسین پسین تا کالووین تعیین شده است.

جدول ۱- بایوزون‌های سازند دلیچای در برش چینه‌شناسی وانا و تطابق آن با بایوزون‌های استاندارد معادل آن در شمال غرب اروپا و انگلستان.

Table 1. Biozones of the Dalichai Formation at Vana stratigraphic section and its correlation with standard equivalent biozones in Northwest Europe and England.

Era	Period	Epoch	Age		England		Subboreal Northwest Europe		Iran Dalichai Formation
					Wollam & Riding, 1983	Riding & Thomas, 1992	Poulsen & Riding, 2003		Present study
Mesozoic	Jurassic	Late	Oxfor.	Early	*Wanaea fimbriata*	*Wanaea fimbriata* (Wfi)	*Wanaea fimbriata*	DSJ20	Not zoned
		Middle	Callovian	Late	*Wanaea thysanota*	*Wanaea thysanota* (Wth)	*Wanaea thysanota*	DSJ19	
				Middle	*Ctenidodinium ornatum-Ctenidodinium continum*	*Ctenidodinium continum* (Cco)	*Ctenidodinium continum*	DSJ18	*Ctenidodinium continum*
				Early					
			Bathonian	Late	*Ctenidodinium combazii-Ctenidodinium sellwoodii*	*Ctenidodinium sellwoodii* (Cse) c	*Ctenidodinium sellwoodii*	DSJ17	*Dicadogonyaulax sellwoodii*
				Middle		b		DSJ16	
				Early		a		DSJ15	
			Bajoc.	Late	*Acanthaulax crispa*	*Acanthaulax crispa* (Acr)	*Cribroperidinium crispum*	DSJ14	*Cribroperidinium crispum*
								DSJ13	



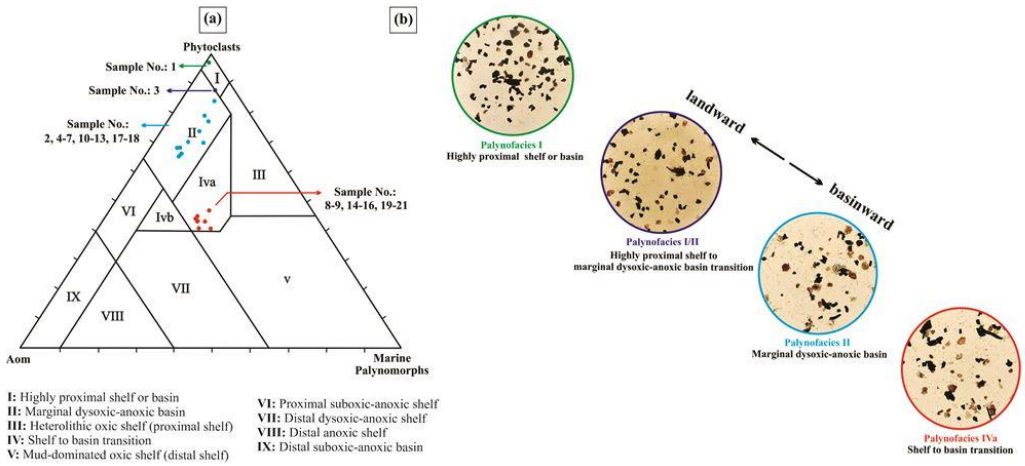
شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی منتخب برخی از داینوسیست‌های سازند دلیچای، برش چینه‌شناسی وانا.

Fig. 4. Selected microscope images of some identified dinocysts of the Dalichai Formation, Vana stratigraphic section. (a) *Ctenidodinium combazii* Dupin, 1968, (b) *Ctenidodinium continuum* Gocht, 1970, (c) *Meiourogonyaulax valensii* Sarjeant, 1966, (d) *Meiourogonyaulax caytonensis* (Sarjeant) Sarjeant, 1969, (e) *Dichadogonyaulax sellwoodii* (Sarjeant) Stover and Evitt, 1978, (f) *Pareodinia ceratophora* Deflandre, 1947, (g) *Escharisphaeridia pocockii* (Sarjeant) Erkmen and Sarjeant, 1980, (h) *Valensiella ovulum* (Deflandre) Eisenack, 1963, (i) *Nannoceratopsis pellucida* (Deflandre) emend. Evitt, 1961, (j) *Mendicodinium groenlandicum* (Pocock and Sarjeant) Davey, 1979, (k) *Cometodinium jurassicum* Poulsen, 1996, and (l) *Systematophora areolata* Klement, 1960.

۴- ۲- پالینوفاسیس

مطالعه پالینوفاسیس، به عنوان بازتابی از ترکیب اولیه مواد آلی در سنگ‌های رسوبی که تحت تأثیر فرایندهای رسوب‌گذاری و دیاژنز شکل گرفته است (Aggarwal, 2022)، ابزاری قدرتمند برای بازسازی محیط دیرینه فراهم می‌آورد، چرا که ترکیب این مواد به طور مستقیم توسط شرایط زیستی و فیزیکوشیمیایی حاکم بر محیط رسوبی کنترل می‌شود (Tyson, 1993). در همین راستا، بررسی تغییرات مواد آلی رسوبی در امتداد توالی چینه‌شناسی، دیدگاه‌های ارزشمندی را درباره توزیع رخساره‌ها، ورودی‌های آواری (تخریبی) و شرایط اکسیک - انوکسیک در محیط رسوب‌گذاری فراهم می‌آورد (Vallejo et al., 2026). در نتیجه، علاوه بر روش‌های متداول رسوب‌شناسی، بررسی الگوی پراکندگی پالینومورف‌ها و خرده‌های آلی در اسلایدهای پالینولوژیکی، رویکردی کارآمد برای تفسیر شرایط حوضه‌های رسوبی محسوب می‌شود. این روش به طور گسترده به عنوان شاخصی کلیدی جهت بازسازی اقلیم دیرینه، تحلیل تاریخچه رسوب‌گذاری، تعیین شرایط اکسیک - انوکسیک، بررسی تغییرات عمق آب و نیز شناسایی فرایندهای رسوبی مورد استفاده قرار گرفته (Zobaa et al., 2011; Mueller et al., 2014; Tyson and Follows, 2000) و می‌تواند به عنوان مکملی ارزشمند برای داده‌های ژئوشیمیایی مورد استفاده قرار گیرد (Mueller et al., 2014; Zhang et al., 2015).

به منظور بازسازی محیط دیرینه حوضه رسوبی سازند دلیچای، درصد فراوانی نسبی سه گروه اصلی عناصر پالینولوژی شامل مواد ارگانیکی بی‌شکل (Amorphous Organic Matters: AOM)، فیتوکلاست‌ها (Phytoclast: PH) و پالینومورف‌های دریایی (Marine Palynomorphs: MP) محاسبه و نتایج حاصل به دیاگرام سه گانه Tyson (۱۹۹۳) منتقل شد (شکل ۵).



شکل ۵- (a) نمایش موقعیت نمونه‌های مطالعه شده سازند دلیچای در برش چینه‌شناسی وانا بر روی نمودار سه‌گانه Tyson (۱۹۹۳) و (b) روند تغییرات پالینوفاسیس از محیط‌های نزدیک به خشکی به سمت بخش‌های عمیق‌تر حوضه.

Fig. 5. (a) Distribution of the studied samples of the Dalichai Formation at the Vana stratigraphic section on the Tyson (1993) ternary diagram, and (b) the landward-to-basinward palynofacies trend.

مواد ارگانیکی بی‌شکل یا AOM، مواد آلی فاقد ساختمان هستند که خصوصیات آن‌ها متاثر از عواملی از قبیل منشأ، محیط، رسوب‌گذاری و درجه بلوغ حرارتی می‌باشد. AOM به دو دسته AOM شفاف و AOM تیره تقسیم‌بندی می‌شود (Batten, 1996). مقادیر بالای AOM شفاف که از تجزیه پالینومورف‌های دریایی حاصل می‌شود معرف حفظ‌شدگی بالای فیتوپلانکتون‌ها در محیط‌های فاقد اکسیژن یا با اکسیژن کم می‌باشد (Tyson, 1995). در حالی که AOM تیره از محیط خشکی نشات گرفته و حضور فراوان آن معرف یک محیط اکسیژن‌دار است (Bombardiere and Gorin, 2000). فیتوکلاست‌ها شامل ذراتی از قبیل اسپورها، پولن‌ها و قطعاتی از قبیل چوب سیاه و قهوه‌ای، کوتیکول، پوست درخت، خرده‌های برگ و ریشه گیاهان هستند که از محیط خشکی وارد حوضه رسوب‌گذاری می‌شوند (Tyson, 1995). پالینومورف‌های دریایی شامل داینوفلاژله‌ها، آستر داخلی پوسته فرامینیفرها، اکریتارک‌ها و اسکلوکودونت‌ها می‌باشند (Tyson, 1995; Batten, 1996). تغییرات در فراوانی نسبی پالینومورف‌های دریایی، فیتوکلاست‌ها و ماده آلی بی‌شکل می‌تواند نشان‌دهنده تغییرات در محیط‌های رسوب‌گذاری، میزان تغذیه رسوبی و الگوهای گردش حوضه باشد (Carvalho et al., 2026).

بر این اساس چهار نوع پالینوفاسیس در نمونه‌های مورد مطالعه سازند دلیچای تفکیک شد. روند تغییرات پالینوفاسیس از محیط‌های نزدیک به خشکی (landward) به سمت بخش‌های عمیق‌تر حوضه (basinward)، بازتاب‌دهنده کاهش تدریجی اثرات خشکی، افزایش فاصله از ساحل و تغییر شرایط رسوب‌گذاری در راستای حوضه است (شکل ۵).

پالینوفاسیس I: در نمونه ۱، غلبه چشمگیر عناصر خشکی‌زاد بر اجزای دریایی و فراوانی بالای فیتوکلاست‌ها، همراه با حضور ناچیز داینوفلاژله‌های پروکسیمیت، بر استقرار یک محیط بسیار کم‌عمق و نزدیک به خط ساحلی دلالت دارد.

پالینوفاسیس II: این رخساره پالینولوژیکی در بخش‌هایی از ستون چینه‌شناسی برش مورد مطالعه در بازه نمونه‌های ۲، ۴ تا ۷، ۱۰ تا ۱۳ و ۱۷ تا ۱۸ ثبت شده است. در این بازه‌ها، سهم پالینومورف‌های دریایی کمتر از ۱۳ درصد، AOM بین ۷ تا ۲۶ درصد و سهم فیتوکلاست‌ها ۶۵ تا ۸۴ درصد از مجموع اجزای پالینوفاسیس برآورد می‌شود. بر اساس طبقه‌بندی Tyson (۱۹۹۳)، این پالینوفاسیس نمایانگر یک محیط حاشیه‌ای کم‌عمق با شرایط کم‌اکسیژن تا فاقد اکسیژن است.

پالینوفاسیس I/II: نمونه ۳ در محدوده گذار بین پالینوفاسیس I و II قرار دارد و نشان‌دهنده یک وضعیت بینابینی و ناپایدار در محیط رسوبی است. این نمونه نسبت به نمونه ۱ کمی از راس فیتوکلاست‌ها فاصله گرفته است. بنابراین، اگرچه فیتوکلاست‌ها غالب هستند، ولی سهم AOM و پالینومورف‌های دریایی اندکی افزایش یافته است. این الگو می‌تواند بیانگر نوسان کوتاه‌مدت خط ساحلی، افزایش موقت

ورودی مواد خشکی‌زاد یا بازگشت نسبی انرژی محیط به شرایط نزدیک‌تر به ساحل باشد.

پالینوفاسیس IVa: این پالینوفاسیس در محدوده نمونه‌های ۸ تا ۹، ۱۴ تا ۱۶ و ۱۹ تا ۲۱ از برش چینه‌شناسی وانا قابل شناسایی است. در این نمونه‌ها، AOM بین ۲۷ تا ۳۳ درصد، پالینومورف‌های دریایی بین ۲۴ تا ۳۰ درصد و فیتوکلاست‌ها بین ۴۰ تا ۴۷ درصد متغیر است. به طور کلی Tyson (۱۹۹۳) برای این نوع پالینوفاسیس محیط دیرینه‌ای حدواسط میان پهنه‌های کم‌عمق و نسبتا عمیق را پیشنهاد کرده است.

به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر، درصد فراوانی برخی از فاکتورهای کلیدی تفسیر محیطی نیز محاسبه و به صورت نمودار رسم شد (شکل ۶)؛ این فاکتورها شامل نسبت پالینوماسرال‌های هم‌بعد (Equidimensional Opaque Palynomacerals: P1) به تیغه‌ای (Blade - shaped Opaque Palynomacerals: P2)، نسبت عناصر خشکی (Terrestrial) به دریایی (Marine) و نسبت مواد آلی بی‌شکل شفاف (Transparent AOM: T AOM) به تیره (Opaque AOM: O AOM) است. فراوانی پالینوماسرال‌ها تابعی از فاصله نسبت به منشأ رسوبی است. به دلیل قدرت شناوری بالاتر پالینوماسرال‌های تیغه‌ای (Blade -shaped) در مقایسه با اشکال هم‌بعد (Equant)، نسبت این دو، شاخص کلیدی برای تعیین روند پروکسیمال ـ دیستال در محیط‌های رسوبی محسوب می‌شود (Van der Zwan, 1990; Tyson, 1995). علاوه بر این، افزایش درجه گردشدگی و جورشدگی در پالینوماسرال‌های هم‌بعد و ریز دانه، مشخصه نهشته‌های دیستال است؛ در حالی که فراوانی اجزای تیغه‌ای و درشت دانه در پهنه‌های پروکسیمال افزایش می‌یابد (Gorin and Steffen, 1991). ماده آلی بی‌شکل (AOM) نیز به نوسانات سطح آب دریا و میزان اکسیژن محیط وابسته است. شرایط کم‌اکسیژن همراه با نرخ مناسب ته‌نشینی، نقش حفاظتی مؤثری در حفظ AOM شفاف ایفا می‌کند. در مقابل، رسوب‌گذاری در محیط‌های اکسیژن‌دار که منجر به فعالیت باکتری‌های هوازی می‌شود، سبب اکسیداسیون و تشکیل AOM تیره می‌شود (Waveren and Visscher, 1994). بدین ترتیب، نسبت AOM شفاف به تیره به عنوان شاخصی جهت برآورد پتانسیل اکسیژن در محیط رسوبی عمل می‌کند؛ به طوری که مقادیر بیشتر از یک، نشان‌دهنده شرایط کم‌اکسیژن و نرخ بهینه رسوب‌گذاری (Batten, 1996; Zonneveld et al., 1997; Bombardiere and Gorin, 2000) و مقادیر کمتر از یک، حاکی از شرایط اکسیدان (اکسیژن‌دار) در حوضه رسوبی است.

۴- ۲- ۱- تحلیل محیط دیرینه بر اساس پالینوفاسیس

در توالی مورد مطالعه، تحلیل پالینوفاسیس بر پایه نمودار Tyson (۱۹۹۳) نشان می‌دهد که رسوب‌گذاری از شرایط بسیار نزدیک به ساحل و تحت سلطه ورودی مواد آلی قاره‌ای آغاز شده و به تدریج به سمت محیط‌های دریایی عمیق‌تر پیش رفته است، هرچند این روند یکنواخت نبوده و با نوسانات کوتاه‌مدت سطح نسبی دریا همراه بوده است. تغییرات پالینوفاسیس در نمونه‌های ۱ تا ۴ نشان‌دهنده نوسانات کوتاه‌مدت در موقعیت خط ساحلی و انرژی محیط رسوبی است. نمونه ۱ با پالینوفاسیس I بیانگر محیطی پرانرژی، کم‌عمق و بسیار نزدیک به منبع خشکی است که در آن فیتوکلاست‌ها غلبه دارند و سهم AOM و پالینومورف‌های دریایی ناچیز است (Tyson, 1993, 1995). فیتوکلاست‌های سیاه و کدر از اکسیداسیون بافت‌های چوبی منشأ گرفته و فراوانی زیاد این اجزا نشان دهنده یک محیط نزدیک ساحلی با شرایط اکسیدان یا انتقال طولانی به محیط‌های دورتر است (Tyson, 1995; Carvalho et al., 2016). مقادیر بالای فیتوکلاست‌های بزرگ و تیغه‌ای شکل بزرگ، مقادیر پایین پالینومورف‌های دریایی و نسبت بالای عناصر خشکی به دریایی (T/M ratio)، در ابتدای برش بر وجود یک محیط بسیارکم‌عمق نزدیک ساحل برای سازند دلیچای در این برش چینه‌شناسی در انتهای باژوسین دلالت دارد (شکل ۶). این موارد همگی معرف پایین بودن سطح آب دریا می‌باشد (Gedl and Ziaja, 2012). در نمونه ۲، رخساره مارنی قاعده دلیچای معرف بالا آمدن سطح آب و آغاز پیشروی دریا است. در این نمونه، افزایش تدریجی پالینومورف‌های دریایی و کاهش فیتوکلاست‌ها و نسبت عناصر خشکی به دریایی مشاهده می‌شود (شکل ۶). نمونه ۳ که در محدوده گذار I/II قرار دارد، بیانگر یک نوسان کوتاه‌مدت درون این روند پیشروی است که احتمالا ناشی از افزایش موقت ورودی قاره‌ای یا تغییرات جزئی در انرژی محیط بوده، اما روند کلی پیشروی را مختل نکرده است. نمونه ۴ نیز با تکرار شرایط نمونه ۲، استمرار این فاز پیشروی و ناپایداری‌های جزئی خط ساحلی را نشان می‌دهد. نمونه‌های ۲ و ۴ تا ۷ در پالینوفاسیس

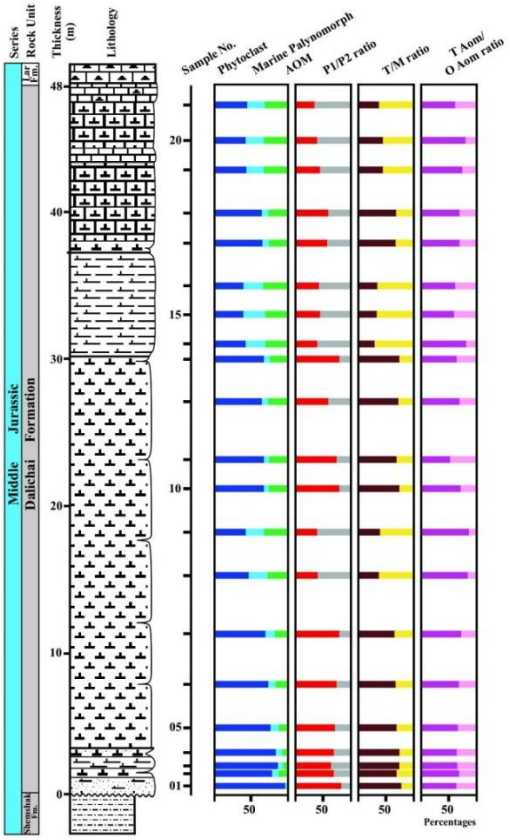
II قرار گرفته‌اند و بیانگر استقرار یک محیط رسوبی دیرینه کم‌عمق حاشیه‌ای کم‌اکسیژن تا فاقد اکسیژن هستند. در این بخش، اگرچه ورودی مواد آواری و بقایای گیاهی همچنان قابل توجه است، اما افزایش تدریجی AOM و پالینومورف‌های دریایی از کاهش انرژی محیط و افزایش ارتباط با دریا حکایت دارد. مقادیر بالای نسبت عناصر خشکی به دریایی و نسبت پالینوماسرال‌های اپک هم‌بعد به تیغه‌ای (P1/P2 ratio) نیز با محیط دریایی نسبتا کم‌عمق سازگاری دارد. از سوی دیگر، نسبت AOM شفاف به AOM تیره بیانگر شرایط کم‌اکسیژن در زمان رسوب‌گذاری است. با این حال، حضور هرچند اندک AOM تیره حاکی از آن است که محیط رسوبی به طور کامل فاقد اکسیژن نبوده و این شرایط، ماهیتی نوسانی داشته است. در این محیط، AOM به علت ورود زیاد فیتوکلاست‌ها رقیق می‌شود، اما حفظ شدگی آن همچنان تا حد متوسط یا خوب است. بنابراین، حفظ ماده آلی و مقدار TOC دریایی به وضعیت اکسایش - کاهش حوضه و میزان رقیق‌شدگی ناشی از ورود مواد خشکی‌زاد وابسته بوده است. در ادامه، نمونه‌های ۸ و ۹ که در پالینوفاسیس IVa واقع شده‌اند، مرحله‌ای از بیشینه شدن پیشروی دریایی را منعکس می‌کنند. در این مرحله، کاهش نسبی فیتوکلاست‌ها همراه با افزایش سهم AOM و پالینومورف‌های دریایی، استقرار محیطی بازتر، آرام‌تر و عمیق‌تر را نشان می‌دهد که می‌تواند معادل ناحیه گذار شلف به حوضه باشد. در این فواصل همچنین، کاهش نسبت عناصر خشکی به دریایی (T/M)، افزایش فراوانی پالینوماسرال‌های تیغه‌ای، افزایش درجه گردشدگی و جورشدگی در پالینوماسرال‌های هم‌بعد و ریزدانه و کاهش نسبت AOM شفاف به تیره مشاهده می‌شود (شکل ۶). این مجموعه شواهد پالینولوژیکی حاکی از بالا آمدن سطح آب و افزایش عمق نسبی حوضه در این بازه‌های رسوبی است. سپس بازگشت نمونه‌های ۱۰ تا ۱۳ به پالینوفاسیس II نشان‌دهنده یک نوسان کوتاه‌مدت به شرایط کم‌عمق‌تر یا افزایش مجدد تأثیر ورودی خشکی‌زاد است، این تغییر می‌تواند ناشی از پسروی نسبی دریا، تغییرات موضعی در نرخ رسوب‌گذاری یا افزایش فرسایش و انتقال مواد قاره‌ای باشد. نسبت عناصر خشکی به دریایی و پالینوماسرال‌های اپک هم‌بعد نسبت به تیغه‌ای شکل نیز بالا می‌باشد که وجود محیط دریایی نسبتا کم‌عمق را تایید می‌کند. نمونه‌های ۱۴ تا ۱۶ بار دیگر در پالینوفاسیس IVa قرار گرفته‌اند و نشان می‌دهند که پس از این نوسان، شرایط دریایی عمیق‌تر مجددا برقرار شده است. حضور نمونه‌های ۱۷ و ۱۸ در پالینوفاسیس II نیز بر بازگشت نسبی دیگر به محیط‌های انتقالی‌تر و افزایش اثر خشکی دلالت دارد. در نهایت، نمونه‌های ۱۹ تا ۲۱ که دوباره در پالینوفاسیس IVa قرار دارند، حاکی از تداوم یا تجدید فاز دریایی عمیق‌تر در بخش‌های بالایی توالی هستند. حضور داینوفلاژله‌های کوریت و اکریتارک دارای خارهای بلند در قسمت‌های انتهایی سازند این نتیجه‌گیری را تایید می‌کند. بر این اساس، توالی سازند دلیچای در برش چینه‌شناسی مورد مطالعه یک الگوی کلی عمیق‌شدگی به سمت بالا را نشان می‌دهد که با چند چرخه کوتاه‌مدت پیشروی و پسروی دریایی همراه بوده است.

۴- ۲- ۲- ارزیابی آماری داده‌های کمی پالینوفاسیس و روند تغییرات محیط رسوبی

۴- ۲- ۲- ۱- تحلیل مؤلفه‌های اصلی در تفکیک پالینوفاسیس‌ها و تفسیر شرایط محیطی

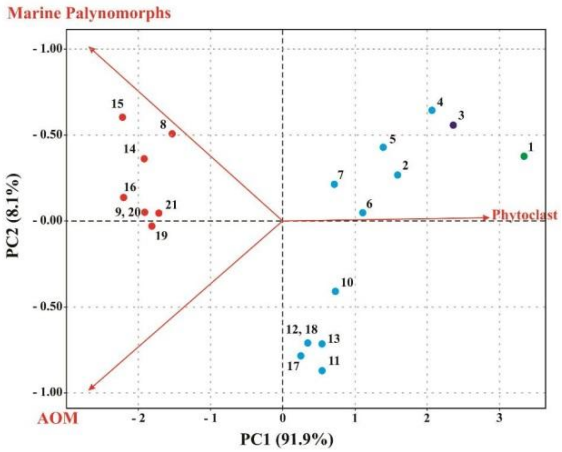
به منظور بررسی روابط بین متغیرهای مورد مطالعه و تعیین روند تغییرات پالینوفاسیس‌ها، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (Principal Component Analysis; PCA) بر اساس فراوانی نسبی فیتوکلاست‌ها، AOM و پالینومورف‌های دریایی انجام شد. در این تحلیل، پراکنش نمونه‌ها بر اساس مؤلفه‌های اصلی PC1 و PC2 در قالب نمودار دو بعدی (PCA biplot) ترسیم شد (شکل ۷). به طور کلی، این نمودار نشان می‌دهد که نمونه‌ها عمدتا بر اساس نسبت فیتوکلاست‌ها در برابر AOM و پالینومورف‌های دریایی از یکدیگر جدا می‌شوند. نمونه‌هایی که به سمت بردار فیتوکلاست رفته‌اند، ماهیت قاره‌ای‌تر و ساحلی‌تری دارند و نمونه‌هایی که به سمت AOM و پالینومورف‌های دریایی متمایل هستند، بیشتر به شرایط دریایی‌تر و آرام‌تر نزدیک می‌شوند. به طور مثال نمونه ۱ با فراوانی بالای فیتوکلاست در یک انتهای نمودار به سمت بردار فیتوکلاست قرار گرفته و نشان‌دهنده ورودی بیشتر مواد گیاهی خشکی‌زاد است، در حالی که نمونه‌های پالینوفاسیس IVa به دلیل AOM و پالینومورف‌های دریایی بیشتر و فیتوکلاست کمتر، در انتهای مقابل قرار دارند و غلبه شرایط دریایی‌تر و کاهش نسبی ورود مواد آلی خشکی‌زاد را نشان می‌دهند. نمونه ۳ در ناحیه بین I و II واقع شده است. نمونه‌های پالینوفاسیس II بین دو گروه I و IVa قرار گرفته‌اند که بیانگر شرایط حدواسط و تغییر تدریجی در میزان ورود مواد خشکی‌زاد و

دریایی است. بنابراین، PCA در مجموع یک روند از شرایط با تاثیر بیشتر مواد آلی خشکی‌زاد به شرایط با تاثیر بیشتر مواد آلی دریایی را در مجموعه نمونه‌ها نشان می‌دهد. همچنین افزایش AOM در بخشی از نمونه‌ها می‌تواند نشان‌دهنده شرایط مناسب‌تر برای حفظ مواد آلی و احتمالا محیط کم‌اکسیژن‌تر در زمان رسوب‌گذاری باشد.



شکل ۶- تغییرات عناصر اصلی پالینولوژی و فاکتورهای محیطی نمونه‌های مطالعه شده، سازند دلیچای، برش چینه‌شناسی وانا.

Fig. 6. Variations in major palynological elements and environmental factors of the studied samples, Dalichai Formation, Vana stratigraphic section.



شکل ۷- نمودار بی‌پلات تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نمونه‌های سازند دلیچای بر اساس سه مؤلفه اصلی پالینوفاسیس (AOM، پالینومورف‌های دریایی و فیتوکلاست‌ها)، برش چینه‌شناسی وانا.

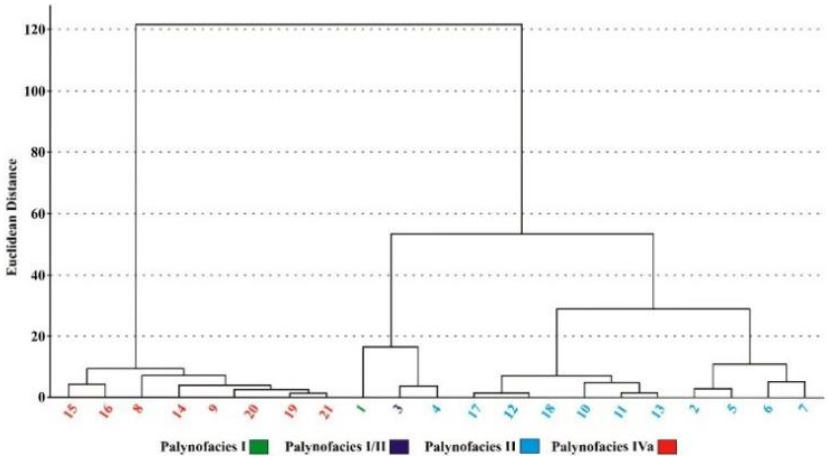
Fig. 7. Principal Component Analysis (PCA) biplot of the Dalichai Formation samples based on the three main palynofacies components (AOM, Marine Palynomorphs, and Phytoclasts), Vana stratigraphic section.

۴- ۲- ۲- تحلیل خوشه‌بندی سلسله مراتبی در تفکیک پالینوفاسیس‌ها و تفسیر شرایط محیطی

تحلیل خوشه‌بندی سلسله مراتبی (Hierarchical Cluster Analysis: HCA) با هدف بررسی شباهت آماری میان نمونه‌ها، بر پایه داده‌های کمی اجزای پالینوفاسیس انجام شد (شکل ۸). این روش نشان می‌دهد که نمونه‌ها بر اساس ترکیب واقعی اجزای آلی تا چه اندازه به یکدیگر شباهت دارند. این تحلیل، نمونه‌ها را با توجه به نسبت AOM، پالینومورف‌های دریایی و فیتوکلاست‌ها گروه‌بندی می‌کند و از این‌رو، ابزاری مکمل برای تفسیر پالینوفاسیس به شمار می‌آید. نتایج خوشه‌بندی، سه خوشه آماری اصلی را نشان می‌دهد. با این‌حال، تعداد خوشه‌های آماری الزاما با تعداد پالینوفاسیس‌های تفسیری یکسان نیست، زیرا پالینوفاسیس‌ها علاوه بر شباهت عددی نمونه‌ها، بر اساس ترکیب اجزای آلی و تفسیر محیط رسوبی نیز تعریف می‌شوند. بر این اساس، نمونه ۱ در پالینوفاسیس I، بیانگر محیطی بسیار کم‌عمق و نزدیک به ساحل با غلبه مواد خشکی‌زاد است، در حالی که نمونه ۳ به عنوان پالینوفاسیس گذار I/II، ویژگی‌های بینابینی میان شرایط نزدیک ساحلی پالینوفاسیس I و محیط حاشیه‌ای پالینوفاسیس II را نشان می‌دهد. نمونه ۴، اگرچه از نظر ترکیب کیفی در پالینوفاسیس II قرار می‌گیرد، در شاخه‌ای نزدیک به نمونه‌های ۱ و ۳ جای گرفته است که بیانگر شباهت نسبی آن با شرایط انتقالی و نزدیک ساحلی است. در مقابل، نمونه‌های متعلق به پالینوفاسیس IVa، با افزایش نسبی AOM و پالینومورف‌های دریایی و کاهش سهم فیتوکلاست‌ها، به محیطی حدواسط و دریایی‌تر نسبت داده می‌شوند. بنابراین، نتایج خوشه‌بندی ضمن پشتیبانی از تفکیک پالینوفاسیس‌ها نشان می‌دهد که تغییرات ترکیب ماده آلی و شرایط محیط دیرینه در سازند دلیچای به‌صورت تدریجی رخ داده است.

۴- ۳- ارزیابی ژئوشیمیایی سازند دلیچای از دیدگاه ویژگی‌های سنگ منشأ احتمالی

پیرولیز یکی از رایج‌ترین و کارآمدترین روش‌ها برای ارزیابی کمی قابلیت ژئوشیمیایی مواد آلی و سنجش پتانسیل هیدروکربن‌زایی سنگ‌های منشأ به شمار می‌رود. این روش بر پایه گرم‌کردن نمونه در شرایط فاقد اکسیژن انجام می‌شود و امکان تعیین ویژگی‌های کمی و کیفی ماده آلی، نوع کروژن، میزان بلوغ حرارتی و توان تولید هیدروکربن را فراهم می‌سازد. در این آنالیز، پارامترهای اصلی شامل S_1، S_2، S_3، Tmax و TOC اندازه‌گیری می‌شوند، به طوری‌که S_1 نشان دهنده هیدروکربن‌های آزاد موجود در سنگ، S_2 معرف هیدروکربن‌های حاصل از شکست حرارتی کروژن و ترکیبات سنگین‌تر، S_3 بیانگر دی‌اکسیدکربن آزاد شده از تجزیه ترکیبات اکسیژن‌دار و Tmax دمای متناظر با بیشینه پیک S_2 است که به عنوان شاخصی مهم برای ارزیابی بلوغ حرارتی ماده آلی به کار می‌رود. همچنین TOC بیانگر درصد کربن آلی کل موجود در نمونه است. بر اساس این داده‌ها، شاخص‌هایی نظیر اندیس هیدروژن (Hydrogen Index: $HI=100*S_2/TOC$) و اندیس اکسیژن (Oxygen Index: $OI=100*S_3/TOC$)، نیز محاسبه می‌شوند که در مجموع، چارچوبی معتبر برای ارزیابی ویژگی‌های ژئوشیمیایی و ظرفیت مولد سنگ‌های منشأ فراهم می‌آورند (Espitalié et al., 1977; Peters, 1986; Taylor et al., 1998). همچنین پارامترهای گازی حاصل از دو مرحله Pyrolysis و Oxidation اطلاعات مهمی درباره ترکیب و رفتار مواد آلی و کربن موجود در نمونه فراهم می‌کنند. در مرحله پیرولیز، CO_2 Pyrolysis و CO Pyrolysis عمدتا بیانگر میزان و نوع ترکیبات اکسیژن‌دار موجود در بخش آلی سنگ و قابلیت تولید گازهای کربنی در اثر حرارت‌دهی در شرایط بدون اکسیژن هستند. در مقابل، در مرحله اکسیداسیون، مقادیر CO_2 Oxidation و CO Oxidation نشان‌دهنده کربن و ترکیبات آلی باقی‌مانده‌ای هستند که پس از پیرولیز، در اثر حرارت‌دهی در حضور اکسیژن اکسید شده و به CO_2 و CO تبدیل می‌شوند. بنابراین، بررسی هم زمان این پارامترها می‌تواند در ارزیابی مقدار، نوع و بلوغ ماده آلی، سهم کربن آلی و معدنی و همچنین ماهیت ترکیبات آلی موجود در سنگ مورد استفاده قرار گیرد (Behar et al., 2001). به منظور ارزیابی پتانسیل سنگ منشأ احتمالی سازند دلیچای در برش چینه‌شناسی وانا، ارزیابی‌های ژئوشیمیایی با استفاده از روش پیرولیز راک-اول ۶ بر روی پنج نمونه منتخب از افق‌های مختلف سازند دلیچای صورت گرفت (جدول ۲).



شکل ۸- دندوگرام تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی نمونه‌های پالینوفاسیس سازند دلیچای، برش چینه‌شناسی وانا.

Fig. 8. Hierarchical cluster analysis dendrogram of the Dalichai Formation samples, Vana stratigraphic section.

جدول ۲- نتایج پیرولیز راک-اول ۶، نمونه‌های منتخب مورد مطالعه سازند دلیچای در برش چینه‌شناسی وانا

Table 2. Rock-Eval 6 Pyrolysis results of the selected samples studied from the Dalichai Formation, Vana stratigraphic section.

No	Sample ID	S_1	S_2	S_3	TOC	T_{max}	HI	OI
1	**D2**	0	0.03	0.19	0.25	454	12	74
2	**D11**	0	0.05	0.23	0.28	446	17	80
3	**D16**	0	0.03	0.14	0.08	436	39	181
4	**D18**	0	0.04	0.22	0.08	443	50	285
5	**D21**	0	0.04	0.16	0.07	604	55	246

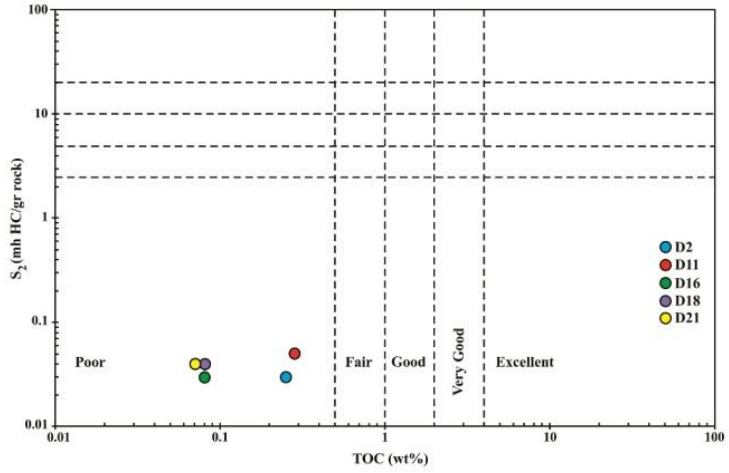
۴-۳-۱- کمیت ماده آلی

برای ارزیابی یک سازند به عنوان سنگ منشأ احتمالی، نخستین گام سنجش میزان کل کربن آلی (TOC) آن است (Peters, 1986). به منظور تعیین کمیت ماده آلی از طبقه‌بندی Peters و Cassa (۱۹۹۴) استفاده شد (جدول ۳). به منظور طبقه‌بندی نوع کروژن و ارزیابی پتانسیل هیدروکربن‌زایی سنگ‌های منشأ از نمودار مقادیر TOC در برابر S_2 استفاده می‌شود (Eskandari et al., 2026). همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده است نمونه‌های مورد مطالعه با توجه به محدوده قرارگیری، از نقطه نظر محتوای مواد آلی، کاملا فقیر می‌باشند.

جدول ۳- پارامترهای ژئوشیمیایی مورد استفاده برای ارزیابی غنای ماده آلی در سنگ‌های منشأ (Peters and Cassa, 1994).

Table 3. Geochemical parameters used to evaluate organic matter richness in source rocks (Peters and Cassa, 1994).

Source-rock quality	TOC (wt %)	S_1 (mg HC/g rock)	S_2 (mg HC/g rock)
Poor	0–0.5	0–0.5	**0–2.5**
Fair	0.5–1.0	0.5–1.0	**2.5–5**
Good	1.0–2.0	1.0–2.0	**5–10**
Very Good	2.0–4.0	2.0–4.0	**10–20**
Excellent	>4.0	>4.0	**>20**



شکل ۹- نمودار پراکندگی محتوای کربن آلی کل (TOC) در مقابل پتانسیل هیدروکربن زایی (S_2) سازند دلیچای، برش چینه‌شناسی وانا.

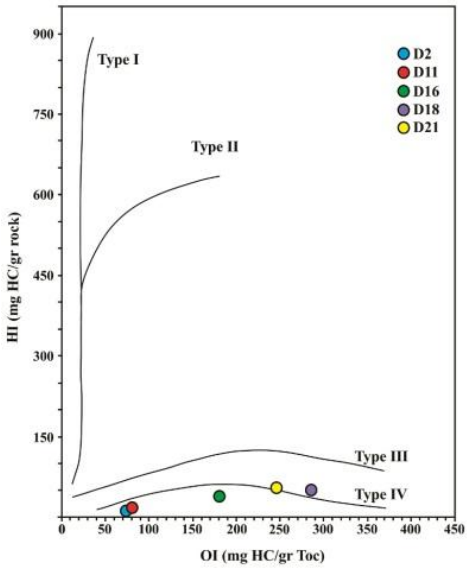
Fig. 9. Cross-plot of Total Organic Carbon (TOC) versus hydrocarbon generating potential (S_2), Dalichai Formation, Vana stratigraphic section.

۴-۳-۲- کیفیت ماده آلی (نوع کروژن)

در مطالعات ژئوشیمیایی سنگ‌های منشأ، شناسایی نوع کروژن به دلیل ارتباط مستقیم آن با ظرفیت هیدروکربن‌زایی و تعیین نوع محصول نهایی (نفت یا گاز)، از اهمیت اساسی برخوردار است (Welte and Tissot, 1984). کیفیت ماده آلی اساسا تابع غنای نسبی هیدروژن در ساختار مولکولی کروژن است، به گونه‌ای که افزایش نسبت هیدروژن، مستقیما پتانسیل زایش نفت را ارتقا داده و ارزش اقتصادی سنگ منشأ را تعیین می‌کند (Peters and Cassa, 1994). جهت ارزیابی کیفیت محتوای ماده آلی نمونه‌های مورد مطالعه، از نمودار استاندارد HI در برابر OI (Hunt, 1996) استفاده شد. ترسیم مقادیر پارامترهای HI در برابر OI (شکل ۱۰) نمونه‌های آنالیز شده، بیانگر کیفیت نامناسب محتوای ماده آلی سازند دلیچای (کروژن نوع IV) می‌باشد. کروژن نوع IV، کروژنی خنثی است که فاقد توانایی تولید نفت و گاز است (Welte and Tissot, 1984).

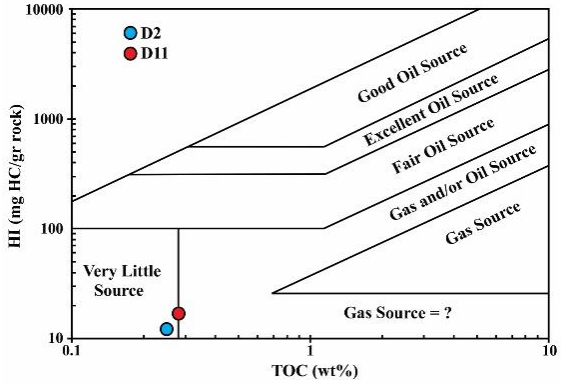
۴-۳-۳- پتانسیل هیدروکربن‌زایی

به منظور تعیین پتانسیل هیدروکربن‌زایی نمونه‌های سازند دلیچای از نمودار شاخص هیدروژن HI در مقابل TOC (Hunt 1996) و ارزیابی مقادیر S_2/S_3 (Peters and Cassa, 1994) استفاده شد. همان طور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود نمونه‌های منتخب مورد مطالعه، فاقد هرگونه پتانسیل هیدروکربن‌زایی می‌باشند که در نتیجه محتوای کروژن نوع IV سازند دلیچای می‌باشد. در شکل ۱۱ نمونه‌های D2 و D11 در محدوده سنگ منشأ بسیار ضعیف قرار گرفتند. مقادیر پایین TOC و HI در هر دو نمونه بیانگر غنای آلی بسیار کم و ماده آلی فقیر از هیدروژن است. اگرچه D11 نسبت به D2 دارای مقادیر اندکی بالاتر از TOC و HI است، هر دو نمونه از نظر پتانسیل تولید هیدروکربن بسیار ضعیف بوده و نمی‌توانند به عنوان سنگ منشأ موثر و اقتصادی در نظر گرفته شوند. سه نمونه دیگر به دلیل مقادیر بسیار پایین پارامترهای HI و TOC بر روی نمودارها قابل ارائه نیستند. مقادیر S_2/S_3 در نمونه‌های بررسی شده بین ۰/۱۶ تا ۰/۲۵ متغیر است (جدول ۲). مقادیر بسیار پایین این نسبت، در کنار TOC کمتر از ۰/۵ درصد، مقادیر HI و مقادیر ناچیز S_2، نشان دهنده غلبه ماده آلی فقیر از هیدروژن، اکسید شده و دارای پتانسیل بسیار ضعیف تولید هیدروکربن است. اگرچه موقعیت نمونه‌ها در نمودارهای مبتنی بر پارامترهایی مانند HI و S_2/S_3 می‌تواند با ماده آلی فقیر از هیدروژن و اکسید شده سازگار باشد، اما به دلیل پایین بودن شدید S2، این پارامترها از عدم قطعیت تفسیری برخوردار بوده و نمی‌توان بر اساس موقعیت نمونه‌ها در نمودار، نوع کروژن یا ماهیت نفتی/گازی ماده آلی را به‌طور قطعی تعیین کرد. بنابراین، نتایج این نمودارها صرفا به عنوان شواهد کیفی و در کنار مقادیر TOC و S_2 تفسیر می‌شوند.



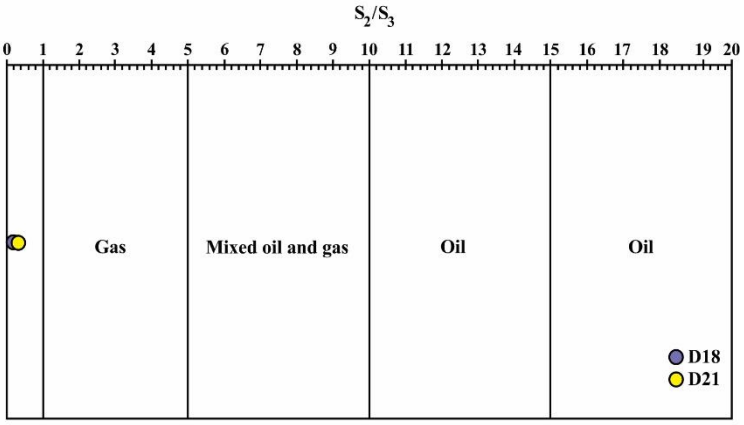
شکل ۱۰- نمودار شاخص هیدروژن (HI) در برابر شاخص اکسیژن (OI) برای تعیین نوع کروژن نمونه‌های سازند دلیچای، برش چینه‌شناسی وانا.

Fig. 10. Hydrogen Index (HI) versus Oxygen Index (OI) plot for determining the kerogen type of the Dalichai Formation samples, Vana stratigraphic section.



شکل ۱۱- نمودار شاخص هیدروژن (HI) در برابر کربن آلی کل (TOC) برای ارزیابی پتانسیل سنگ منشأ نمونه‌های سازند دلیچای در برش چینه‌شناسی وانا.

Fig. 11. Hydrogen Index (HI) versus Total Organic Carbon (TOC) plot for evaluating the source rock potential of the Dalichai Formation samples, Vana stratigraphic section.



شکل ۱۲- نمودار پراکنش نسبت S_2/S_3 برای نمونه‌های منتخب سازند دلیچای در برش چینه‌شناسی وانا.

Fig. 12. S_2/S_3 ratio cross-plot for selected samples of the Dalichai Formation, Vana stratigraphic section.

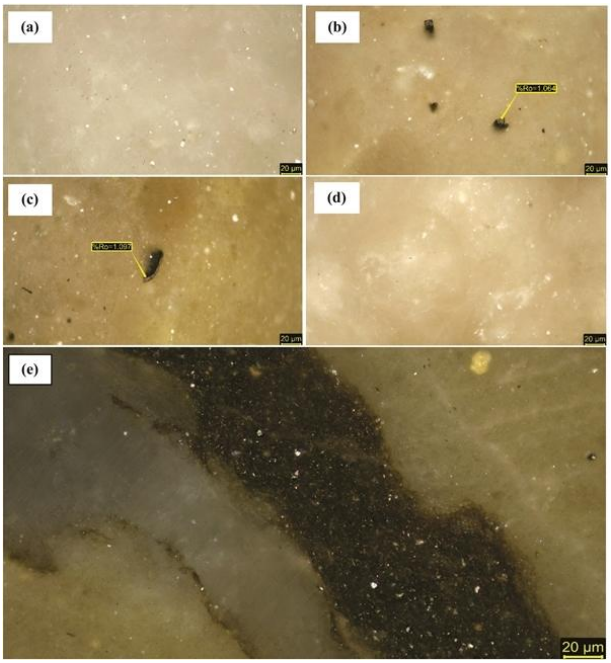
۴-۳-۴- ارزیابی بلوغ حرارتی

تعیین درجه بلوغ مواد آلی، یکی از اساسی‌ترین گام‌ها در ارزیابی پتانسیل هیدروکربن‌زایی یک واحد چینه‌شناسی به شمار می‌رود. در همین راستا، در پژوهش حاضر شاخص دمای بیشینه پیرولیز (Tmax) حاصل از آنالیز راک-اول در کنار سنجش میزان انعکاس ویترینایت (Vitrinite Reflectance: Ro)، مبنای ارزیابی بلوغ حرارتی قرار گرفتند. پارامتر انعکاس ویترینایت، که حاصل بازتابش نور از سطوح صیقلی ماسرال‌ها است، معیاری کلیدی در تعیین درجه تکامل حرارتی و ارزیابی پنجره هیدروکربن‌زایی در سنگ‌های منشأ محسوب می‌شود (Mukhopadhyay, 1994). بر اساس نتایج حاصل از پیرولیز راک-اول (جدول ۲)، اگرچه تمامی نمونه‌ها غنای آلی بسیار پایینی (TOC<0.3%) را نشان می‌دهند، اما نمونه D21 به دلیل ثبت مقدار غیرمتعارف Tmax (604°C) از میان سایر نمونه‌ها جهت بررسی‌های پتروگرافی آلی و سنجش انعکاس ویترینایت برگزیده شد. در این نمونه، مواد آلی به صورت نادر و بسیار پراکنده و به شکل بیتومن جامد (Solid Bitumen) در امتداد و مجاورت شکستگی‌ها مشاهده شدند (شکل ۱۳). انعکاس نوری این ذرات در محدوده Ro = 1-1.1% اندازه‌گیری شد که نشان دهنده بلوغ حرارتی قابل توجه مواد آلی است اما به دلیل ابعاد بسیار کوچک ذرات و ماهیت ثانویه بیتومن‌ها، این اعداد باید با احتیاط تفسیر شوند. با این حال نتایج راک-اول نشان می‌دهد که این نمونه از نظر سنگ منشأ فقیر از مواد آلی است و از نظر پتانسیل هیدروکربن‌زایی در رده فقیر (Poor) قرار دارد، به طوری‌که مقدار TOC برابر ۰/۰۷ wt%، S_2 برابر ۰/۰۴ mg HC/g rock و S_1 برابر صفر است. مقدار Tmax برابر ۶۰۴ درجه سانتی‌گراد این نمونه نیز به دلیل S_2 بسیار پایین، به‌عنوان شاخص مستقل بلوغ قابل اتکا نیست و باید با احتیاط تفسیر شود. حضور مقادیر بسیار اندک و پراکنده بیتومن جامد در ارتباط با شکستگی‌ها، همراه با فقر شدید ماده آلی و پتانسیل مولد ضعیف، می‌تواند بیانگر مهاجرت و تمرکز ثانویه هیدروکربن‌های تولید شده در واحدی دیگر و غنی‌تر (نظیر رسوبات زغال‌دار و شیل‌های غنی از ماده آلی سازند شمشک؛ Shekarifard et al., 2012; Hamidi et al., 2018) در امتداد شبکه شکستگی‌ها باشد. بنابراین، D21 علی‌رغم ثبت شواهدی از بلوغ حرارتی قابل توجه و حضور هیدروکربن‌های ثانویه در شکستگی‌ها، بر اساس داده‌های راک-اول یک سنگ فقیر از نظر پتانسیل سنگ منشأ محسوب می‌شود و شواهد موجود بیشتر با نقش این واحد به عنوان مسیر یا محل ثانویه تجمع هیدروکربن سازگار است تا یک سنگ منشأ موثر.

۴-۳-۵- پارامترهای گازی پیرولیز و اکسیداسیون و ارزیابی ژئوشیمیایی مواد آلی

به منظور تکمیل داده‌های ژئوشیمیایی و دستیابی به ارزیابی جامع‌تری از ویژگی‌های مواد آلی و کربن موجود در نمونه‌ها، پارامترهای حاصل از دو مرحله پیرولیز و اکسیداسیون برای هر پنج نمونه مورد بررسی قرار گرفت. در این آنالیز، ترکیبات هیدروکربنی آزاد شده طی مرحله پیرولیز توسط آشکارساز یونش شعله‌ای (Flame Ionization Detector: FID) ثبت و پارامترهای مرتبط با تولید هیدروکربن تعیین شدند. همچنین، مقادیر CO_2 و CO حاصل از مراحل پیرولیز و اکسیداسیون به منظور ارزیابی ترکیبات اکسیژن‌دار و کربن باقی‌مانده پس از پیرولیز اندازه‌گیری شدند. این مجموعه داده‌ها، در کنار پارامترهای اصلی راک-اول (جدول‌های ۲ و ۴)، برای تکمیل ارزیابی مقدار و ماهیت ماده آلی، میزان کربن آلی و معدنی، درجه اکسید شدگی و رفتار حرارتی مواد آلی در پنج نمونه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از پارامترهای کربن و گازهای آزاد شده طی مراحل پیرولیز و اکسیداسیون، در کنار داده‌های راک-اول، بیانگر تغییرات قابل توجهی در مقدار، ماهیت و وضعیت حرارتی ماده آلی در نمونه‌های مورد مطالعه است (شکل ۱۴). نمونه‌های D2 و D11 با دارا بودن بیشترین مقادیر TOC (به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۲۸ wt.٪) و کربن باقی‌مانده، RC (به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۲۷)، نسبت به سایر نمونه‌ها از فراوانی بیشتری از کربن آلی برخوردارند، با این‌حال، مقادیر بسیار پایین S_2 (0.03 – 0.05 mg HC/g rock)، HI (12 – 17 mg HC/g TOC) و S_1=0 نشان می‌دهد که این ماده آلی از نظر هیدروکربن‌زایی بسیار فقیر و عمدتا فاقد قابلیت تولید هیدروکربن قابل توجه است. در مقابل، نمونه‌های D16، D18 و D21 با کاهش شدید TOC به ۰/۰۷ تا ۰/۰۸ wt.٪، افزایش قابل توجه MINC و OXIMINC و مقادیر بالاتر OI، سهم بیشتری از کربن معدنی و ترکیبات اکسیژن‌دار را نشان می‌دهند؛ به ویژه D21 با MINC = 10.23 و OXIMINC = 10.11 بیشترین مقدار کربن معدنی را در میان نمونه‌ها دارد که عمدتا متأثر از ماهیت کربناته سنگ و ناچیز بودن کربن آلی است. در نتیجه مقایسه مقادیر کربن آلی کل (TOC) و کربن

باقی‌مانده (RC) در تمامی نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که تقریبا تمامی کربن موجود در سنگ به صورت کربن باقی‌مانده است. با توجه به پایین بودن پارامترهای بلوغ حرارتی، این هم‌پوشانی بیانگر بلوغ بیش از حد نیست، بلکه نشان‌دهنده حضور ماده آلی با کیفیت بسیار پایین است که قابلیت پیرولیز و تولید هیدروکربن ندارد. بنابراین، مقادیر TOC مشاهده شده در این سازند، منعکس‌کننده پتانسیل تولید هیدروکربن نیست، بلکه بیانگر وجود ماده آلی غیرفعال و بازمانده است که از دیدگاه سنگ منشأ، پتانسیل اقتصادی ندارد.



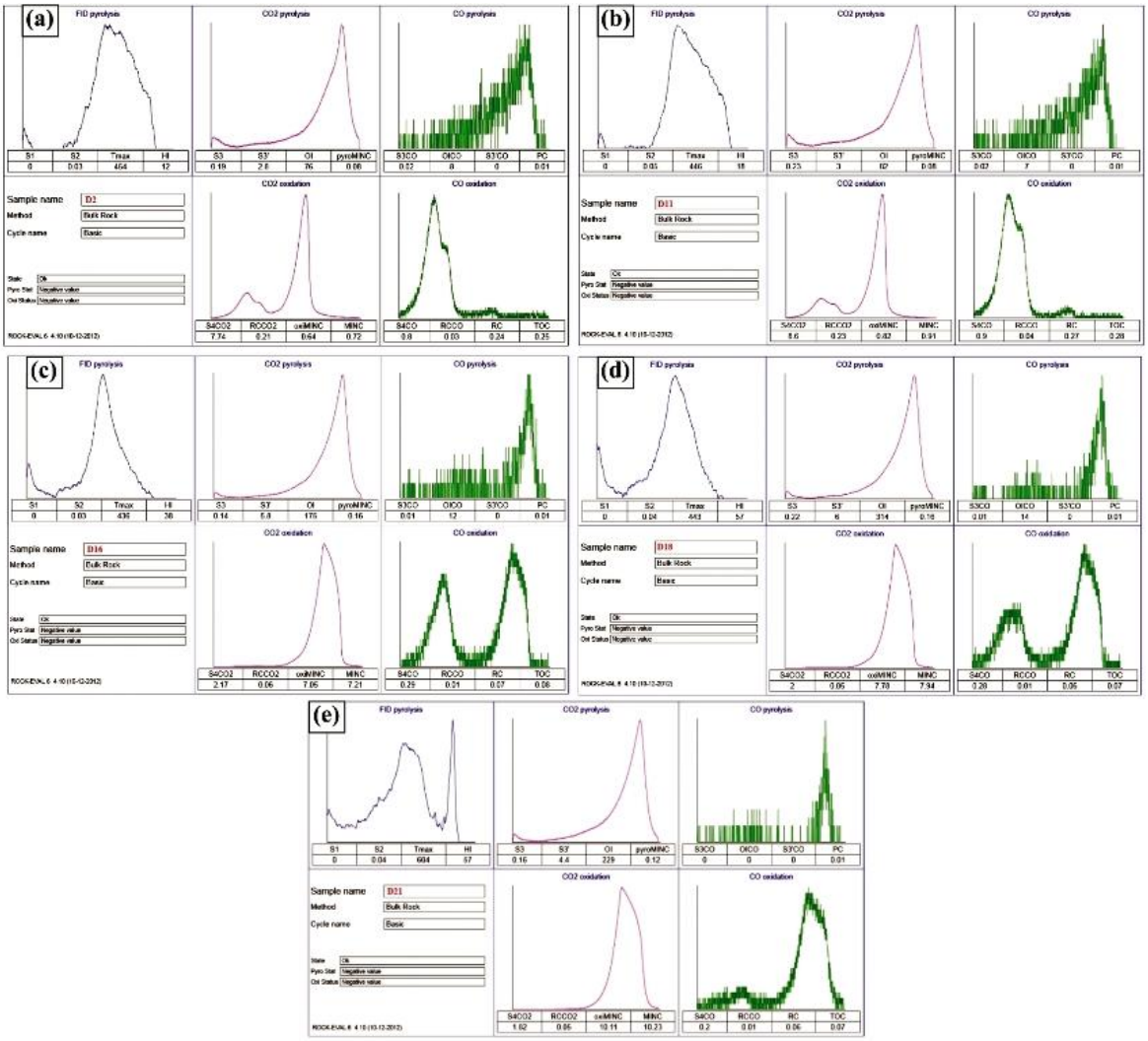
شکل ۱۳- فوتومیکروگراف‌های پتروگرافی آلی نمونه منتخب D21 سازند دلیچای؛ نمایش ذرات بیتومن جامد (R_o = 1-1.1%) و ریزدرزه‌ها در یک ماتریکس معدنی فقیر از ماده آلی. (a) نمای کلی از ماتریکس معدنی، که نشان‌دهنده فقر شدید کربن آلی و پراکندگی بسیار ناچیز ذرات آلی است، (b, c) اندازه‌گیری میزان انعکاس ویترینایت (R_o = 1.06-1.09%) بر روی ذرات پراکنده و کوچک بیتومن جامد، (d) بزرگنمایی از بافت ناهمگن ماتریکس معدنی و (e) حضور ریزدرزه‌های مرتبط با بیتومن جامد و مسیرهای احتمالی مهاجرت.

Fig. 13. Organic petrography photomicrographs of selected sample D21 of Dalichai Formation, showing solid bitumen particles (Ro = 1-1.1%) and microfractures within an organic poor matrix. (a) General view of the mineral matrix, showing severe organic carbon depletion and a very sparse distribution of organic particles, (b, c) Vitrinite Reflectance measurements (Ro = 1.06-1.09%) on dispersed and small solid bitumen particles, (d) Magnified view of the heterogeneous mineral matrix texture, and (e) Presence of microfractures associated with solid bitumen and potential migration pathways.

جدول ۴- پارامترهای ژئوشیمیایی کربن معدنی و آلی و ترکیبات گازی حاصل از مراحل پیرولیز و اکسیداسیون در نمونه‌های منتخب سازند دلیچای در برش چینه‌شناسی وانا.

Table 4. Geochemical parameters of inorganic and organic carbon and gaseous compounds derived from pyrolysis and oxidation stages of the selected samples of the Dalichai Formation, Vana stratigraphic section.

No	Sample ID	S_3CO	$S_{3'}CO$	$S_{3'}$	PC	RC	OICO	PYROMINC	OXIMINC	MINC
1	**D2**	0.02	0.04	2.85	0.01	0.25	9	0.08	0.64	0.72
2	**D11**	0.02	0.04	3	0.01	0.27	7	0.08	0.83	0.91
3	**D16**	0.01	0.02	5.77	0.01	0.07	13	0.16	7.05	7.21
4	**D18**	0.01	0.02	6.05	0.01	0.07	8	0.17	7.78	7.95
5	**D21**	0	0.01	4.39	0.01	0.06	5	0.12	10.11	10.23



شکل ۱۴- تغییرات پارامترهای ژئوشیمیایی کربن آلی و معدنی و ترکیبات گازی حاصل از مراحل پیرولیز و اکسیداسیون در نمونه‌های منتخب سازند دلیچای، برش چینه‌شناسی وانا. (a) نمونه D2، (b) نمونه D11، (c) نمونه D16، (d) نمونه D18 و (e) نمونه D21.

Fig. 14. Variations in geochemical parameters of organic and inorganic carbon and gaseous compounds derived from pyrolysis and oxidation stages in selected samples of the Dalichai Formation, Vana stratigraphic section. (a) D2, (b) D11, (c) D16, (d) D18, and (e) D21.

روند افزایش OI از ۷۴ در D2 به ۲۸۵ در D18 و ۲۴۶ در D21، در کنار غالب بودن S_3 بر S_2، نشان‌دهنده افزایش سهم اجزای اکسیژن‌دار و کاهش نسبی کیفیت هیدروژن‌زایی ماده آلی است. تضاد بین مقادیر بالای OI و نتایج پالینولوژیکی، احتمالا ناشی از اثر ماتریکس معدنی در نمونه‌های کربناته است. در فرآیند پیرولیز سنگ‌های با TOC پایین، تجزیه حرارتی کانی‌های کربناته منجر به آزادسازی CO_2 معدنی، افزایش کاذب S_3 و در نتیجه تورم شاخص OI می‌شود. از این رو، شواهد پالینولوژیکی که از اثرات ماتریکس معدنی مصون هستند، برای بازسازی دیرینه محیط قابل استنادتر بوده و داده‌های ژئوشیمیایی در نمونه‌های با فقر شدید مواد آلی، باید با احتیاط تفسیر شوند. همچنین، مقادیر بسیار پایین PYROMINC، PC و محصولات گازی CO و CO_2 حاصل از پیرولیز در برابر مقادیر متناظر مرحله اکسیداسیون، بیانگر آن است که بخش قابل توجهی از کربن باقی‌مانده در نمونه‌ها در قالب اجزای مقاوم‌تر و یا کربن معدنی حضور دارد. پاسخ FID در نمونه‌ها نشان‌دهنده غنای آلی بسیار پایین و پتانسیل هیدروکربن‌زایی ناچیز هستند. بنابراین، همه نمونه‌ها در رده سنگ‌های منشأ ضعیف قرار می‌گیرند. در نمونه D21، افزایش یا برجسته شدن پاسخ FID در این نمونه می‌تواند ناشی از حضور مقدار اندکی

بیتومن جامد باشد، این تفسیر با مشاهده مواد آلی بسیار نادر و پراکنده به صورت بیتومن جامد در امتداد شکستگی‌ها و انعکاس حدود ۱.۰ تا ۱.۱٪ سازگار است. با این‌حال، از آنجا که مقدار مطلق S_2 در D21 تنها ۰/۰۴ mg HC/g rock و S_1 برابر صفر است، این پاسخ FID نشان‌دهنده یک ذخیره قابل توجه هیدروکربن در سنگ نیست و نمی‌تواند بر غنی بودن یا سنگ منشأ بودن D21 دلالت کند، بلکه بیانگر وجود مقادیر اندک هیدروکربن‌های ثانویه مرتبط با بیتومن جامد در شکستگی‌ها است. $Tmax = 604°C$ به دلیل S_2 بسیار پایین (۰/۰۴) نباید به تنهایی به عنوان شاخص بلوغ تفسیر شود. در نتیجه، مجموعه داده‌های ژئوشیمیایی و پتروگرافی آلی بیانگر آن است که این بخش از سازند دلیچای فاقد پتانسیل سنگ منشأ مؤثر بوده و مقادیر ناچیز بیتومن جامد مشاهده شده در شکستگی‌های نمونه D21، شاهدی محتمل از مهاجرت ثانویه هیدروکربن‌ها از واحدهای زیرین (احتمالا سازند شمشک) به درون این رسوبات است، نه دلیلی بر تولید درجا و بلوغ پیشرفته سنگ.

۴-۴- تحلیل نتایج پالینوفاسیس براساس نتایج آنالیز پیرولیز راک-اول

انطباق نتایج آنالیز پیرولیز راک-اول با پالینوفاسیس نوع II (نمونه‌های منتخب D2، D11 و D18) شامل غلبه فیتوکلاست‌ها (۶۵ تا ۸۴ درصد) و حضور پالینومورف‌های دریایی (کمتر از ۱۳ درصد) و AOM (۷ تا ۲۶ درصد)، حاکی از نهشت در یک محیط حاشیه‌ای کم‌عمق با انرژی بالا و نفوذ دریایی محدود است، شرایطی که منجر به تخریب فیزیکی و اکسیداسیون شدید مواد آلی شده و در نهایت، فقر شدید غنای آلی و پتانسیل هیدروکربن‌زایی ضعیف در این بخش از سازند دلیچای را رقم زده است. در ادامه پالینوفاسیس IVa در بخش‌هایی از توالی سازند دلیچای برقرار است (نمونه‌های منتخب D16 و D21) که شامل AOM بین ۲۷ تا ۳۳ درصد، پالینومورف‌های دریایی بین ۲۴ تا ۳۰ درصد و فیتوکلاست‌ها بین ۴۰ تا ۴۷ درصد است. این پالینوفاسیس بیانگر نهشت در محیط دریایی بازتر، آرام‌تر و عمیق‌تر است. نتایج پیرولیز راک-اول نیز با ثبت مقادیر بسیار پایین TOC، S_2 و HI، غنای آلی ناچیز و پتانسیل هیدروکربن‌زایی ضعیف این نمونه‌ها را تأیید می‌کند. حفظ نشدن مؤثر ماده آلی در این بخش از سازند دلیچای را می‌توان به شرایط اکسیژنی بالاتر از حالت کاملا بی‌اکسیژن و سرعت پایین رسوب‌گذاری نسبت داد، به‌گونه‌ای که باقی ماندن طولانی‌تر ماده آلی در سطح رسوب، فرصت بیشتری برای اکسیداسیون و تخریب آن فراهم کرده است. همچنین، فراوانی بالای فیتوکلاست‌ها می‌تواند بیانگر ورود و انتقال قابل توجه ماده آلی خشکی‌زاد و در نتیجه کاهش کیفیت و قابلیت حفظ ماده آلی باشد.

۵- جنبه کاربردی پژوهش

تلفیق داده‌های پالینوفاسیس و پیرولیز راک-اول در سازند دلیچای (برش چینه‌شناسی وانا)، دیدگاهی شفاف درباره نقش این سازند در ارزیابی سیستم‌های هیدروکربوری ژوراسیک میانی در البرز ارائه می‌دهد. شواهد ژئوشیمیایی حاکی از مقادیر بسیار ناچیز کربن آلی کل (TOC) و شاخص هیدروژن (HI) به همراه غلبه فیتوکلاست‌های اکسید شده و کروژن بی‌اثر نوع IV است، ویژگی‌هایی که انعکاس‌دهنده رسوب‌گذاری در محیطی است که در آن، نرخ پایین رسوب‌گذاری منجر به افزایش زمان مواجهه ماده آلی با اکسیژن شده و در نتیجه، باعث اکسیداسیون و حذف بخش‌های مولد هیدروکربن پیش از دفن شده است. با توجه به تداوم و ماهیت یکنواخت چنین شرایطی در گستره حوضه، یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که سازند دلیچای به طور کلی فاقد ماده آلی هیدروکربن‌زا بوده و نمی‌تواند به عنوان یک افق سنگ منشأ فعال یا بالقوه در نظر گرفته شود. از این رو، پتانسیل سنگ منشأ بودن برای این سازند عملا صفر است و هرگونه مطالعه یا بررسی آتی بر روی این واحد در چارچوب سنگ‌های منشأ ضرورتی ندارد.

۶- نتیجه‌گیری

پراکندگی داینوسیست‌های شاخص در سازند دلیچای برش چینه‌شناسی وانا، منجر به شناسایی سه بایوزون قابل انطباق با بایوزون‌های استاندارد در بازه زمانی باژوسین پسین - کالووین میانی شده است. همچنین بر اساس فونای داینوسیستی در بخش بالایی برش، سن سازند دلیچای در این برش چینه‌شناسی باژوسین پسین تا کالووین پسین در نظر گرفته می‌شود. در ادامه، بررسی ژئوشیمی آلی سازند دلیچای در برش چینه‌شناسی وانا با تلفیق داده‌های راک-اول، پتروگرافی ماده آلی و تحلیل پالینوفاسیس انجام شد. در توالی مورد مطالعه، تحلیل پالینوفاسیس نشان می‌دهد که رسوب‌گذاری از شرایط بسیار نزدیک به ساحل و تحت سلطه ورودی مواد آلی قاره‌ای آغاز شده و به تدریج به سمت محیط‌های دریایی عمیق‌تر پیش رفته است. البته این روند کاملا یکنواخت نبوده و با نوسانات

کوتاه‌مدت سطح نسبی دریا همراه بوده است. نرخ رسوب‌گذاری پایین و افزایش زمان مواجهه با اکسیژن، موجب اکسیداسیون و تخریب بخش واکنش‌پذیر ماده آلی شده است. مقادیر پایین TOC، S_1 و S_2 و همچنین شاخص‌های هیدروژن پایین، نشان می‌دهند که سازند دلیچای در محدوده مطالعه شده فاقد پتانسیل قابل توجه برای تولید هیدروکربن درجا است. با این‌حال، بلوغ حرارتی بیتومن جامد در یک نمونه و وجود ریزدرزه‌ها نشان می‌دهد که برخی بخش‌های سازند می‌توانسته‌اند به عنوان مسیر یا بستر حامل برای مهاجرت ثانویه هیدروکربن عمل کنند. بنابراین، اهمیت نفت‌زایی سازند دلیچای در این ناحیه بیشتر در ارتباط با نقش احتمالی آن به عنوان مسیر مهاجرت یا سنگ معبر است تا یک سنگ منشأ مؤثر و فعال. نتایج تحلیل‌های ژئوشیمی آلی راک-اول سازند دلیچای در برش چینه‌شناسی وانا نشان می‌دهد که ماده آلی موجود در سازند دلیچای، در رده کروژن نوع IV (خنثی) قرار داشته و به دلیل مقادیر پایین TOC، این سازند در این برش به عنوان سنگ منشأ فقیر تا غیرمولد ارزیابی می‌شود. بنابراین، حتی اگر در برخی افق‌ها شرایط کف حوضه به‌طور نسبی آرام‌تر و کم‌اکسیژن‌تر بوده باشد، این شرایط نه پایدار و نه به اندازه‌ای محدودکننده اکسیژن بوده که بتواند از تخریب ماده آلی واکنش‌پذیر جلوگیری کند. در نتیجه، بخش عمده ماده آلی اولیه یا در طی انتقال و ته‌نشست تخریب شده یا پس از رسوب‌گذاری تحت تاثیر فرآیندهای اکسایشی به بقایای آلی باقی‌مانده و فقیر از هیدروژن تبدیل شده است، شرایطی که به خوبی با غلبه کروژن نوع IV و فقدان هرگونه پتانسیل زایش هیدروکربنی در نمونه‌های منتخب سازگار است. نتایج این پژوهش از نظر کاربردی نشان می‌دهد که سازند دلیچای در حوضه البرز فاقد پتانسیل موثر هیدروکربن‌زایی بوده و نمی‌تواند به عنوان یک سنگ منشأ مولد در نظر گرفته شود. بنابراین، این سازند را می‌توان از فهرست واحدهای مستعد سنگ منشأ در مطالعات ارزیابی پتانسیل هیدروکربنی منطقه کنار گذاشت و منابع مطالعاتی را بر واحدهای چینه‌شناسی واجد پتانسیل بالاتر متمرکز کرد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از پژوهشگاه صنعت نفت و به ویژه گروه پژوهش ژئوشیمی پژوهشکده علوم زمین و همکاری جناب آقای دکتر قربانی برای انجام آنالیزهای ژئوشیمیایی این پژوهش سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

Aggarwal, N., 2022. Sedimentary organic matter as a proficient tool for the palaeoenvironmental and palaeodepositional settings on Gondwana coal deposits. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology 12, 257-278. https://doi.org/10.1007/s13202-021-01331-x.

Batten, D.J., 1996. Upper Jurassic and Cretaceous miospores. Chapter 26A, Palynofacies and palaeoenvironmental interpretation. In: Jansonius, J., McGregor, D.C., (Eds.). Palynology: Principles and Application. American Association Stratigraphic Palynologists Foundation 3, pp. 1011-1064.

Behar, F., Beaumont, V., Penteado, H.D.B., 2001. Rock-Eval 6 technology: performances and developments. Oil and Gas Science and Technology 56, 111-134. https://doi.org/10.2516/ogst:2001013.

Bombardiere, L., Gorin, G.E., 2000. Stratigraphical and lateral distribution of sedimentary organic matter in Upper Jurassic carbonates of SE France. Sedimentary Geology 132, 177-203. https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00006-3.

Borges, M.E.N., Riding, J.B., Fernandes, P., Pereira, Z., 2011. The Jurassic (Pliensbachian to Kimmeridgian) palynology of the Algarve Basin and the Carrapateira outlier, southern Portugal. Review of Palaeobotany and Palynology 163(3-4), 190-204. https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2010.09.006.

Carvalho, M.A., Bengtson, P., Lana, C.C., 2016. Late Aptian (Cretaceous) paleoceanography of the South Atlantic Ocean inferred from dinocyst communities of the Sergipe Basin, Brazil. Paleoceanography 31, 2-26. https://doi.org/10.1002/2014PA002772.

Carvalho M.A., Sucerquia, P.A., Krahl, G., Fauth, G., 2026. Sedimentary organic matter changes across the Cretaceous – Paleogene boundary in northeastern Brazil. Journal of South American Earth Sciences 178, 106096. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2026.106096.

Dehbozorgi, A., Sajjadi, F., Hashemi, H., 2013. Middle Jurassic palynomorphs of the Dalichai Formation, central Alborz Ranges, northeastern Iran: Paleoecological inferences. Science China Earth Sciences 56, 2107-2115. https://doi.org/10.1007/s11430-013-4697-z.

Dehbozorgi, A., 2014. Palynology and Palaeoecology of the Middle Jurassic (Dalichai and Baghamshah formations) east of Semnan (Jam area). PhD thesis, Faculty of Geology, College of Science, University of Tehran (In Persian).

Dehbozorgi, A., Hashemi Yazdi, F., Sajjadi, F., 2018. Palynostratigraphy and paleoenvironmental interpretation of the Dalichai Formation, at the Pol Dokhtar stratigraphic section, central Alborz. Applied Sedimentology 6, 35-48. https://doi.org/10.22084/psj.2018.13434.1143.

Dehbozorgi, A., Senemari, S., 2020. Palynostratigraphy, paleoclimate, and paleoenvironment of the Dalichai Formation in the Bashm stratigraphic section (Eastern Alborz). Scientific Semiannual Journal of Sedimentary Facies 13(1), 1-21. https://doi.org/10.22067/sed.facies.v13i1.87380.

Dehbozorgi, A., Hashemi Yazdi, F., Sajjadi, F., Hashemi, H., 2024. The importance of Sporomorph EcoGroups and palynofacies in recognition of paleoenvironments and paleoecology of the Middle Jurassic strata of the central and eastern Alborz. Advanced Applied Geology 14(1), 23-43. https://doi.org/10.22055/AAG.2023.44363.2389.

Eskandari, M., Khosravi, M., Jahangard, A.A., Salehi, M.A., Tabaei, M., 2026. Hydrocarbon generation potential of the Upper Triassic – Middle Jurassic coal-bearing strata in the Parvadeh mine, Tabas, east-central Iran. Advanced Applied Geology 16(1), 38-56. https://doi.org/10.22055/aag.2026.51483.2555.

Espitalié, J., Madec, M., Tissot, B., Mennig, J.J., Leplat, P., 1977. Source rock characterization method for petroleum exploration. In: Proceedings of the 9th Annual Offshore Technology Conference 3, 439-448. https://doi.org/10.4043/2935-ms.

Gedl, P., Ziaja, J., 2012. Palynofacies from Bathonian (Middle Jurassic) ore-bearing clays at Gnaszyn, Kraków-Silesia Homocline, Poland, with special emphasis on sporomorph eco-groups. Acta Geologica Polonica 62(3), 325-349. https://doi.org/10.2478/v10263-012-0018-7.

Ghasemi-Nejad, E., Sabbaghiyan, H., Mosaddegh, H., 2012. Paleobiogeographic implications of late Bajocian-late Callovian (Middle Jurassic) dinoflagellate cysts from the Central Alborz Mountain, northern Iran. Journal of Asian Earth Sciences 43, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.08.006.

Gorin, G.E., Steffen, D., 1991. Organic facies as a tool for recording eustatic variations in marine fine-grained carbonates-example of the Berriasian stratotype at Berrias (Ardéche, SE France). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 85, 303-320. https://doi.org/10.1016/0031-0182(91)90164-M.

Hamidi, Z., Fardoust, F., Jafarzadeh, M., Rabbani, A.R., 2018. Organic geochemistry of the Upper Triassic–Middle Jurassic Shemshak Group (Alborz Mountains, NE Iran). Petroleum Science and Technology 36(21), 1764–1770. https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1511587.

Hashemi Yazdi, F., 2015. Palynology and Palaeoecology of the Dalichai Formation in central-eastern Alborz basin and the Hojedk Formation at the east-central Iran. PhD thesis, Faculty of Geology, College of Science, University of Tehran (In Persian).

Hashemi Yazdi, F., Bashiri, N., Sajjadi, F., 2020. Palynofacies and Sporomorph EcoGroups-based paleoecology implications for the Dalichai Formation, Andariyeh, central Alborz. Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches 36(1), 39-60. https://doi.org/10.22108/jssr.2020.118759.1116.

Hunt, J.M., 1996. Petroleum Geochemistry and Geology. W. H. Freeman, New York. p. 743.

Kalanat, B., Raoufian, A., 2023. Palynological evidence for the Middle Jurassic environmental evolution in the eastern part of the Alborz Mountains (northern Iran). Review of Palaeobotany and Palynology 312. 104874. https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2023.104874.

Mohammad Khani, Kh., Zarei, E., 2019. Palynostratigraphy of the Dalichai Formation in Darjazin section, North of Semnan. Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches 34, 21-38. https://doi.org/10.22108/jssr.2019.112088.1062.

Mueller, S., Veld, H., Nagy, J., Kürschner, W.M., 2014. Depositional history of the Upper Triassic Kapp Toscana Group on Svalbard, Norway, inferred from palynofacies analysis and organic geochemistry. Sedimentary Geology 310, 16-29. https://10.1016/j.sedgeo.2014.06.003.

Mukhopadhyay, P.K., 1994. Vitrinite reflectance as maturity parameter: petrographic and molecular characterization and its applications to basin modeling. ACS Symposium Series 570. https://doi.org/10.1021/bk-1994-0570.ch001.

Peters, K.E., 1986. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 70(3), 318-329. 10.1306/94885688-1704-11D7-8645000102C1865D.

Peters, K.E., Cassa, M.R., 1994. Applied source rock geochemistry. In: Magoon, L.B., Dow, W.G. (Eds.), The Petroleum System-From Source to Trap. American Association of Petroleum Geologists 60, pp. 93-120.

Phipps, D., Playford, G., 1984. Laboratory techniques for extraction of palynomorphs from sediments. Department of Geology, University of Queensland, Papers 11(1), 1-23.

Poulsen, N.E., Riding, J.B., 2003. The Jurassic dinoflagellate cyst zonation of Subboreal Northwest Europe. In: Ineson, J.R., Surlyk, F., (Eds.), The Jurassic of Denmark and Greenland. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 1, 115-144.

Riding, J.B., Thomas, J.E., 1992. Dinoflagellate cysts of the Jurassic System. In: Powell, A.J. (Ed.), A stratigraphic index of dinoflagellate cysts. British Micropalaeontological Society Publications Series. Chapman and Hall, London, pp. 7-97.

Sajjadi, F., Dermanaki Farahani, S., Hashemi Yazdi, F., 2018. Palynology of the Dalichai Formation in the Guydagh section, southeastern Maragheh, according to dinoflagellate. Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches 70, 91–108. https://doi.org/10.22108/JSSR.2018.84036.0.

Sajjadi, F., Hashemi Yazdi, F., Hashemi, H., 2023. Palynostratigraphy and palaeoecology of the Dalichai Formation at the Yonjehzar stratigraphic section, northeastern Tehran, central Alborz. Scientific Quarterly Journal of Geosciences 33(2), 128, 259-282. https://doi.10.22071/gsj.2023.350092.2013.

Shekarifard, A., Baudin, F., Seyed-Emami, K., Schnyder, J., Rahimpour-Bonab, H., 2012. Organic Matter Characterization and Thermal Modeling of the Basal Black Shale from the Shemshak Group (Upper Triassic- Middle Jurassic) in the Tazareh Section, Eastern Alborz, Northern Iran. Scientific Quarterly Journal of Geosciences 21(83), 219-228. https://doi.org/10.22071/gsj.2012.54549.

Skupien, P., Pavluš, J., Falahatgar, M., Javidan, M., 2015. Middle Jurassic organic-walled dinoflagellate cysts and palynofacies from Telma-Dareh, south of Sari, northern Iran. Review of Palaeobotany and Palynology 223, 128-137. https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2015.09.009.

Taylor, G.H., Teichmüller, M., Davis, A.C.F.K., Diessel, C.F.K., Littke, R., Robert, P., 1998. Organic petrology: Berlin. Gebrüder Borntraeger. p. 704.

Tyson, R.V., 1993. Palynofacies analysis. In: Jenkins D.G. (Ed.), Applied Micropaleontology. Dordrecht. pp. 153-172.

Tyson, R.V., 1995. Sedimentary organic matter; organic facies and palynofacies. Chapman and Hall, London, p. 615. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0739-6.

Tyson, R.V., Follows, B., 2000. Palynofacies prediction of distance from sediment source: a case study from the Upper Cretaceous of the Pyrenees. Geology 28, 569-571. https:// doi. org/ 10. 1130/ 0091-7613(2000) 28% 3c569: PPODFS% 3e2.0. CO;2.

Vallejo, J.D., Gusmão, R.B., Andrade Lima, L.M., Piovesan, E.K., 2026. Sedimentary organic matter and paleoenvironmental reconstruction of the Santana Group (Lower Cretaceous), Araripe Basin, Northeast Brazil. Cretaceous Research 185, 106397. https://doi.org/10.1016/j.cretres.2026.106397.

Van der Zwan, C.J., 1990. Palynostratigraphy and Palynofacies reconstruction of the Upper Jurassic to lowermost Cretaceous of the Draugen Field, offshore Mid Norway. Review of Palaeobotany and Palynology 62, 157-186. https:// doi. org/ 10.1016/0034-6667(90)90021-A.

Ward, J.H., 1963. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. Journal of the American Statistical Association 58, 236-244. https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845.

Waveren, I., Visscher, H., 1994. Analysis of the composition and selective preservation of organic matter in surficial deep-sea sediment from a high-productivity area (Banda Sea, Indonesia). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeocology 112, 85-111. https:// doi. org/10.1016/0031-0182(94)90135-X.

Welte, D.H., Tissot, P.B., 1984. Petroleum formation and occurrence. Springer-verlag. p. 702.

Wiggan, N.J., Riding, J.B., Franz, M., 2017. Resolving the Middle Jurassic dinoflagellate radiation: the palynology of the Bajocian of Swabia, southwest Germany. Review of Palaeobotany and Palynology 238, 55-87. https:// doi. org/10.1016/j.revpalbo.2016.11.010.

Woollam, R., 1980. Jurassic dinocysts from shallow marine deposits of the East Midlands, England. Journal of the University of Sheffield. Geological Society 7(5), 243-261.

Woollam, R., Riding, J.B., 1983. Dinoflagellate cyst zonation of the English Jurassic. Institute of Geological Sciences. Report No. 83/2, 42 p.

Zhang, M., Ji, L., Wu, Y., He, C., 2015. Palynofacies and geochemical analysis of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin: Implications for hydrocarbon generation potential and the paleoenvironment of continental source rocks. International Journal of Coal Geology 152, 159-176. https:// doi. org/ 10. 1016/j. coal. 2015. 11. 005.

Zobaa, M.K., Oboh-Ikuenobe, F.E., Ibrahim, M.I., 2011. The Cenomanian/Turonian oceanic anoxic event in the Razzak Field, north Western Desert, Egypt: source rock potential and paleoenvironmental association. Marine and Petroleum Geology 28, 1475-1482. https:// doi. org/ 10.1016/j. marpe tgeo. 2011. 05. 005.

Zonneveld, K.A.F., Versteegh, G.J.M., Lange, G.J., 1997. Preservation of organic-walled dinoflagellate cysts in different oxygen regimes: a 10000 year natural experiment. Marine Micropaleontology 29, 393-405. https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2008.01.015.