Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Spring 2026, Vol. 16(1): 38 - 56

Research Article

Hydrocarbon generation potential of the Upper Triassic-Middle Jurassic coal-bearing strata in the Parvadeh mine, Tabas, east-central Iran

Mohammad Eskandari[1], Maryam Khosravi [1]*, Amir Abbas Jahangard[2], Mohammad Ali Salehi[2], Morteza Tabaei[1]

1- Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
2- Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Keywords: *Organic petrography, Thermal maturity, Rock-Eval pyrolysis, Gas-generation potential, Methane gas*

1-Introduction

Recent investigations have emphasized the significance of the hydrocarbon-generation potential of coal-bearing intervals in the Parvadeh area of the Tabas Basin, based on detailed analyses of organic petrography and vitrinite reflectance (Zamansani et al., 2019; Esmailpour et al., 2022; Zamani et al., 2023a, 2023b). Zamani et al. (2023a) demonstrated that the coal seams of the Nayband Formation in the Parvadeh region (Tabas Block) were deposited in a paralic environment influenced by marine conditions and located within the lower delta plain. Furthermore, Zamani et al. (2023b) reported vitrinite reflectance values ranging from 0.97% to 1.35% for coal seams B1, B2, C1, and C2. Similarly, Esmailpour et al. (2022) documented reflectance values of 1.13% to 1.54% for seams B1, B2, and C1, whereas Zamansani et al. (2019) identified a range of 1.17% to 1.37% for the same seams in the Parvadeh Coal Mine. Because vitrinite reflectance measurements, organic petrographic observations, and Rock-Eval pyrolysis data are fundamental for evaluating thermal maturity, predicting oil- and gas-generation potential, and characterizing coal quality, this study focuses on the Qadir Member of the Nayband Formation, as well as the Ab-e-Haji and Parvadeh Formations, based on borehole data from Block 7 of the Parvadeh-4 area. The results of this study provide important insights into coal quality, methane generation potential, and methane explosion hazards within the coal seams of the Parvadeh Coal Mine.

2-Materials and methods

In this study, 135 drilling core boxes from the Nayband, Ab-e-Haji, Badamu, Hojedk, and Parvadeh Formations, representing a total core length of 641.1 m, were subjected to detailed lithological description. From these cores, 35 representative samples were selected for organic petrographic analysis and evaluation of the gas-generation potential of the coal-bearing intervals. Laboratory investigations include Rock-Eval pyrolysis, vitrinite reflectance measurements, and organic petrographic analyses. Of the 35 samples, 14 polished sections were prepared and examined under reflected light microscopy using an Olympus BX60 microscope for organic petrography. These analyses were conducted at the Petrography Laboratory, Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran. Subsequently, 5 polished sections from samples with the highest TOC values were selected for vitrinite reflectance measurements using a Leica DM-4500 microscope equipped with a J&M TIDOS MSP 200 photomultiplier system, following ASTM D7708 standards, at the Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran. In addition, to evaluate the source-rock characteristics of the studied succession, 10 powdered core samples were analyzed by Rock-Eval 6 pyrolysis (VINCI Technologies) at RIPI.

* Corresponding author: maryamkhosravi22@gmail.com
DOI: 10.22055/aag.2026.51483.2555
Received: 2025-12-27
Accepted: 2026-05-10

ISSN: 2717-0764

3-Results and discussion

3-1- Organic petrography

In the Qadir Member of the Nayband Formation, the dominant macerals are vitrinite—predominantly collotelinite-and gelinite. Petrographic features, including fractures infilled with gelinite and the presence of pyritic veins, indicate coal formation under reducing deltaic conditions characterized by low-energy sedimentation and moderate to high thermal maturity. In contrast, the Ab-e-Haji Formation is dominated by inertinite macerals (fusinite, inertodetrinite, and funginite) of terrestrial origin. Their fibrous, cellular, and highly porous textures, together with the occurrence of pyrite and inertodetrinite fragments within silty matrices, suggest deposition in swampy to fluvial environments under oxidizing to sub-oxidizing conditions. The marked differences in maceral assemblages between the Nayband and Ab-e-Haji Formations reflect substantial variations in depositional settings and subsequent diagenetic processes. In the Parvadeh Formation, the predominance of vitrinite indicates peat accumulation under reducing conditions in shallow swamp and floodplain environments subjected to fluctuating redox conditions. The occurrence of telinite and collotelinite, preservation of cell-wall structures, and the presence of pyrite as framboidal, dispersed, and pore-filling aggregates further support reducing diagenetic conditions.

3-2- Vitrinite reflectance (Ro%)

Vitrinite reflectance (Ro%) is a robust and widely used indicator for evaluating the thermal maturity of organic matter and the hydrocarbon-generation potential of source rocks. Variations in average Ro values among the analyzed samples reflect distinct maturity stages within the Parvadeh, Ab-e-Haji, and Nayband Formations. A shallow sample from the Parvadeh Formation, with an average Ro of 0.72%, corresponds to the early maturity stage. An intermediate-depth sample from the Ab-e-Haji Formation and a shallow sample from the Nayband Formation, with average Ro values of 0.95% and 0.90%, respectively, indicate full maturity within the peak oil-generation window. In contrast, an intermediate-depth C1 seam sample from the Nayband Formation, with an average Ro of 1.21%, represents a high-maturity wet-gas stage, indicating the generation of thermogenic gases, particularly methane and higher hydrocarbons (C2-C5). Finally, a deep sample from the Nayband Formation, with an average Ro of 1.32%, indicates that the organic matter has entered the condensate-wet gas generation stage.

3-3- Rock-Eval pyrolysis

Rock-Eval pyrolysis results reveal substantial differences in organic richness and thermal maturity between the Ab-e-Haji and Nayband Formations. Total organic carbon (TOC) values range from 0.7% to 39.69%, indicating a high potential for dry-gas generation under adequate thermal conditions. Shallow and deep Nayband Formation samples, with TOC exceeding 30%, were deposited in reducing marsh–deltaic environments with limited oxygen exposure, whereas shallow Ab-e-Haji samples with lower TOC reflect more oxidizing conditions. High TOC values indicate favorable organic accumulation and high burial rates in reducing swamp environments, while low TOC may result from oxidation, biodegradation, or destructive diagenesis. Consequently, the Nayband Formation surpasses the Ab-e-Haji Formation in organic richness and gas-generation potential. S_2 values of the studied samples range from 0.33 to 78.88 mg HC/g rock. Elevated S_2 in the Nayband samples reflects reducing depositional conditions. Based on petrographic and pyrolysis data, the organic matter of the Nayband coals is classified as type III/II-III kerogen derived from terrestrial plants, showing significant methane-generation potential. However, due to the low hydrogen index (HI) and the absence of lipid- and resin-like compounds typical of marine algae, the oil-generation potential is limited. Therefore, despite high TOC, the organic matter quality is relatively low, and these coals primarily generate dry gas at advanced thermal maturity stages. The S_2 versus TOC plot shows that most Nayband samples, with TOC around 10% and S_2 values between 10–80 mg HC/g rock, fall within the "very good to excellent" range, reflecting high organic richness, hydrocarbon-generation capacity, and type III kerogen with gas-prone characteristics. The Ab-e-Haji samples, with lower TOC and S_2 values compared to the Nayband Formation, exhibit lower organic richness and gas-generation potential. Overall, the

ISSN: 2717-0764
CC BY

terrestrial coals of the Nayband Formation in the Tabas Basin, with high TOC and S_2 values, exhibit considerable potential for methane generation or expulsion under suitable thermal conditions.

4-Conclusions

Organic petrographic investigations of coal seams from an exploratory borehole in the Parvadeh Coal Mine, Tabas Basin, indicate that the Nayband Formation is dominated by vitrinite macerals, mainly telinite and collotelinite, whereas the Parvadeh and Ab-e-Haji Formations are characterized predominantly by inertinite macerals, including fusinite and semifusinite. Accordingly, the organic matter in the Nayband Formation is derived from terrestrial higher plants, whereas the organic matter preserved in the Lower–Middle Jurassic Ab-e-Haji and Parvadeh Formations is most likely reworked and redeposited material sourced from the Nayband Formation following the Early Cimmerian orogenic event. Microscopic evidence, such as the widespread occurrence of pyrite and pyrite-filled fractures, indicates sub-reducing to reducing depositional and diagenetic conditions for the coal-bearing strata. Vitrinite reflectance measurements reveal that the Parvadeh Formation is at the onset of thermal maturity, the Ab-e-Haji Formation is within the peak oil-generation stage, and the Nayband Formation spans peak oil generation to the transition into wet-gas generation. Rock-Eval pyrolysis results show that the Ab-e-Haji Formation, characterized by relatively low TOC values (average 5.31 wt%), low hydrogen index (HI = 47–113 mg HC/g TOC), and moderate oxygen index (OI = 6–27 mg CO_2/g TOC), predominantly contains relatively oxidized organic matter corresponding mainly to type III kerogen. These characteristics suggest deposition under oxidizing to sub-oxidizing conditions. Although this formation has reached early to intermediate thermal maturity, its overall hydrocarbon-generation potential is assessed as low to moderate. In contrast, the Nayband Formation exhibits high TOC contents (1.38–39.69 wt%, average 13.63 wt%), relatively high S_2 values (1.3–78.88 mg HC/g rock), and low OI values (≤51 mg CO_2/g TOC). Its organic matter is dominated by terrestrially derived type III kerogen, indicating very good to excellent potential for natural gas generation (dominated by methane). The Nayband Formation is at full thermal maturity; its shallower intervals lie within the oil window, while deeper samples have reached the condensate oil to wet-gas generation stage. Overall, the results demonstrate that the Nayband Formation possesses a very high gas-generation capacity, particularly for methane, whereas the Ab-e-Haji Formation exhibits lower thermal maturity, poorer organic matter quality, and a more limited hydrocarbon-generation potential. These findings indicate that within the Tabas Basin, the Nayband Formation represents the most effective and favorable potential source rock for gas generation among the Upper Triassic–Jurassic stratigraphic units.

5-References

Esmailpour, R., Alipour, S., Ardejani, F.D., Rodrigues, S., Esterle, J., 2022. Petrology of the Parvadeh coals, Tabas Basin, Iran. International Journal of Coal Geology 258, 104028. https://doi.org/10.1016/j.coal.2022.104028.

Zamani, Z., Rahimpour Bonab, H., Littke, R., 2023a. Palaeoenvironmental reconstruction of a coal bearing unit: the Upper Triassic Nayband Formation, Tabas Block, east central Iran. Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments 103, 733–757. https://doi.org/10.1007/s12549-023-00630-2.

Zamani, Z., Rahimpour Bonab, H., Littke, R., 2023b. Coal petrology, sedimentology and depositional environment of the Parvadeh coals in the Upper Triassic, Tabas Block of Central East Iran. International Journal of Coal Science and Technology 10, 1–20. https://doi.org/10.1007/s40789-022-00405-4.

Zamansani, N., Rajabzadeh, M.A., Littke, R., Zieger, L., Baniasad, A., 2019. Organic petrology and geochemistry of Triassic and Jurassic coals of the Tabas Basin, Northeastern/Central Iran. International Journal of Coal Science and Technology 6, 354–371. https://doi.org/10.1007/s40789-019-00260-5.

ISSN: 2717-0764

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
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. Adv. Appl. Geol. 16 (1), 38-56.
DOI: 10.22055/aag.2026.51483.2555
https://aag.scu.ac.ir/article_20634.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

ISSN: 2717-0764

مقاله پژوهشی

ارزیابی پتانسیل هیدروکربن‌زایی توالی آواری زغال‌دار تریاس بالایی- ژوراسیک میانی در معدن پروده، طبس، شرق ایران مرکزی

محمد اسکندری
دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
مریم خسروی
گروه مهندسی اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
امیرعباس جهانگرد
گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
محمدعلی صالحی
گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
مرتضی طبایی
گروه مهندسی اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
maryamkhosravi@iut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰

چکیده

این مطالعه با هدف ارزیابی پتانسیل گاززایی لایه‌های زغالی در معدن پروده، طبس، شرق ایران مرکزی انجام شد. برای این منظور، مغزه‌های گمانه اکتشافی از سه واحد زمین‌شناسی شامل سازندهای نایبند (بخش قدیر، تریاس بالایی)، آب‌حاجی (ژوراسیک زیرین) و پروده (ژوراسیک میانی) مورد بررسی قرار گرفتند. بلوغ حرارتی در توالی مورد مطالعه با افزایش عمق به تدریج بیشتر شده و از ابتدای پنجره نفتی در سازند پروده آغاز می‌شود. این روند در سازند آب‌حاجی به مرحله پیک زایش نفت می‌رسد و در نهایت در سازند نایبند با عبور از محدوده پیک زایش نفت، وارد محدوده زایش گاز مرطوب می‌شود. نتایج پیرولیز راک- ایول نشان می‌دهد که سازند آب‌حاجی دارای مقدار نسبتاً کم کربن آلی کل (متوسط ۵/۳۱ درصد وزنی)، پتانسیل هیدروکربن‌زایی ضعیف تا متوسط، شاخص هیدروژن پایین و شاخص اکسیژن بالا است. این ویژگی‌ها بیانگر حضور کروژن نوع III و رسوب‌گذاری در شرایط اکسیدان تا نیمه اکسیدان هستند. در مقابل، سازند نایبند از TOC بالا، مقادیر زیاد S_2، HI بالا و OI کمتر نسبت به سازند آب‌حاجی برخوردار است. کروژن این سازند عمدتاً از نوع III/II و III با منشاء خشکی بوده و از پتانسیل بسیار خوب تا عالی برای تولید گاز خشک (متان) برخوردار است. بخش‌های کم عمق آن در پنجره نفتی واقع شده و نمونه‌های عمیق‌تر به مرحله زایش نفت میعانی تا گاز مرطوب رسیده‌اند. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که سازند نایبند بالغ‌ترین و گاززاترین واحد در توالی مورد مطالعه است و حفاری آن می‌تواند با خطر آزادسازی ناگهانی گاز متان محبوس و احتمال وقوع انفجار همراه باشد.

واژه‌های کلیدی: *پتروگرافی آلی، بلوغ حرارتی، پیرولیز راک- ایول، پتانسیل گاززایی، حوضه طبس*

۱- مقدمه

از منظر اهمیت پتانسیل هیدروکربن‌زایی لایه‌های زغال‌دار، در سال‌های اخیر مطالعات ارزشمندی در زمینه پتروگرافی آلی و انعکاس ویترینایت در منطقه پروده طبس انجام شده است (Zamansani et al., 2019, Esmailpour et al., 2022, Zamani et al., 2023a, 2023b, Zamansani and Rajabzadeh, 2025). بر اساس مطالعه Zamani و همکاران (۲۰۲۳a)، زغال‌سنگ‌های سازند نایبند در منطقه پروده (بلوک طبس) در محیط پارالیک (تحت تاثیر دریا) و در بخش پایینی یک دشت دلتایی تشکیل شده‌اند. همچنین این پژوهشگران، مقادیر انعکاس ویترینایت در لایه‌های زغالی B1، B2، C1 و C2 در بازه ۰/۹۷٪ تا ۱/۳۵٪ را مشخص کرده‌اند (Zamani et

al., 2023b). در مطالعه Esmailpour و همکاران (۲۰۲۲)، انعکاس ویترینایت بین ۱/۱۳٪ تا ۱/۵۴٪ برای لایه‌های زغالی B1، B2 و C1 گزارش شده است. همچنین نتایج پژوهش Zamansani و همکاران (۲۰۱۹) نشان می‌دهد که رگه‌های زغالی B1، B2 و C1 از سازند نایبند در معدن پروده دارای انعکاس ویترینایت بین ۱/۱۷٪ تا ۱/۳۷٪ هستند. نظر به اینکه داده‌های مربوط به انعکاس ویترینایت، پتروگرافی آلی و آنالیز پیرولیز راک- ایول برای پیش‌بینی ویژگی‌های پتانسیل گاززایی یا نفت‌زایی، بلوغ حرارتی زغال‌سنگ و اکتشاف ذخایر با کیفیت بالا اهمیت اساسی دارند، در این مطالعه بخش قدیر از سازند نایبند و نیز سازندهای آب‌حاجی و پروده در یک گمانه اکتشافی واقع در محدوده بلوک ۷ در منطقه پروده ۴ مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده در این پژوهش در ارزیابی کیفیت ذخایر زغال‌سنگ، امکان‌سنجی تولید گاز متان و همچنین تحلیل خطرات ناشی از انفجار گاز متان در لایه‌های زغالی معدن پروده طبس کاربرد مستقیم دارد. مزیت و نوآوری اصلی این پژوهش نسبت به مطالعات پیشین، تمرکز بر بررسی گمانه‌های اکتشافی واقع در محدوده‌ای جدید از معدن پروده است. افزون بر این، در این مطالعه از مجموعه‌ای از روش‌ها و آزمایش‌های تحلیلی استفاده شده است که در تحقیقات قبلی این منطقه تنها برای لایه‌های زغال‌دار تریاس بالایی به کار گرفته شده بودند و بخش‌های زغال‌دار ژوراسیک زیرین تا میانی مورد توجه قرار نگرفته بود. این آزمایش‌ها شامل پتروگرافی آلی و پیرولیز راک- ایول به منظور ارزیابی کمی و کیفی ماده آلی می‌باشند. به کارگیری این رویکردهای نوین، امکان ارزیابی دقیق‌تر منشاء ماده آلی و تعیین پتانسیل گاززایی نهشته‌های زغالی معدن پروده را فراهم ساخته و درک جامع‌تری از ویژگی‌های این نهشته‌ها ارائه می‌دهد.

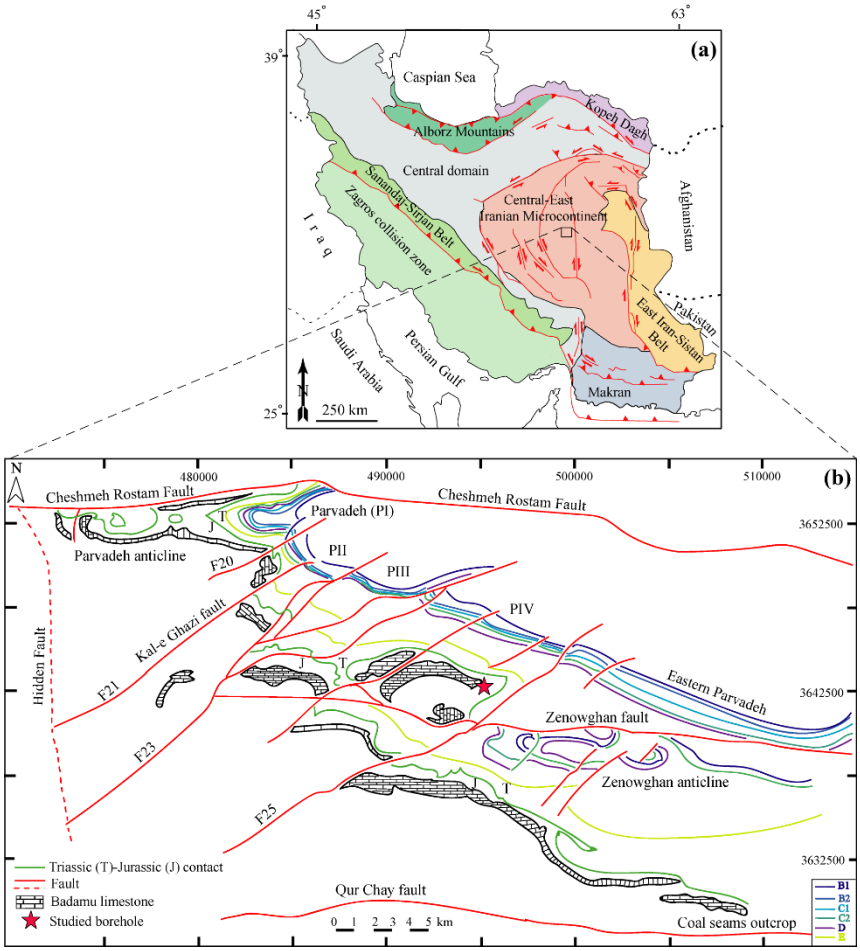
۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

حوضه زغال‌دار پروده در فاصله حدود ۹۰ کیلومتری جنوب شهر طبس و در زون شرقی ایران مرکزی، درون بلوک طبس قرار گرفته است. این بلوک توسط گسل‌های اصلی پی‌سنگی از بلوک یزد در غرب و بلوک لوت در شرق جدا می‌شود. حوضه طبس از سمت شرق و غرب با گسل‌های نایبند و کلمرد با روند شمال- جنوب محدود شده است و علاوه بر آن، وجود مجموعه‌ای از گسل‌های رانده با روند شرق- غرب موجب قطعه قطعه شدن آن شده است (Konon et al., 2016). معدن زغال‌سنگ پروده بر روی یال جنوبی تاقدیس پروده و در یک چین نامتقارن واقع شده و به وسیله گسل معکوس چشمه رستم با روند شرق- غرب تحت تاثیر قرار گرفته است. منطقه پروده همچنین توسط مجموعه‌ای از سیستم‌های گسلی با روند شمال‌شرق- جنوب‌غرب تفکیک می‌شود (Zamani et al., 2023a) (شکل ۱).

بلوک‌های یزد، طبس و لوت، زون‌های ساختاری خرده قاره‌ای شرق ایران مرکزی را تشکیل می‌دهند و سابقه رسوب‌گذاری گسترده‌ای از پرکامبرین تا دوران سوم دارند. این بلوک‌ها، به ویژه در دوره مزوزوئیک، به یک پهنه تکتونیکی بسیار پویا تبدیل شدند که تحت تاثیر فرایندهای کوهزایی سیمرین قرار گرفته است. توالی‌های رسوبی تریاس بالایی تا ژوراسیک میانی، موسوم به گروه شمشک، عمدتاً آواری هستند و در بخش‌هایی از بلوک طبس، شامل لایه‌های زغال‌سنگ نیز می‌شوند. سازندهای این گروه، به ترتیب سنی از قدیم به جدید، شامل نایبند (بخش قدیر به سن تریاس بالایی)، آب‌حاجی (به سن ژوراسیک زیرین)، بادامو و هجدک پروده (به سن ژوراسیک میانی) هستند. بخش شمالی بلوک طبس در دوره ژوراسیک به عنوان پهنه‌ای زمین‌ساختی ناپایدار شناخته می‌شود که رویدادهای تکتونیکی متعدد را تجربه کرده است. تمرکز بر برداشت تعداد بیشتری از نمونه‌ها از سازند نایبند در مقایسه با سایر سازندها، ناشی از توسعه گسترده‌تر لایه‌های زغالی در این سازند است. سازند نایبند بیشترین ضخامت و فراوانی لایه‌های زغال‌دار را در محدوده مورد مطالعه در برمی‌گیرد و از این رو، اهمیت ویژه‌ای در ارزیابی ویژگی‌های آلی و گاززایی دارد. افزون بر این، عمق مدفون‌شدگی بیشتر و سن زمین‌شناسی بالاتر این سازند نسبت به سایر واحدهای چینه‌ای، شرایط مناسب‌تری را برای بلوغ حرارتی ماده آلی فراهم کرده و در نتیجه احتمال گاززایی نهشته‌های زغالی آن را افزایش می‌دهد. به نظر می‌رسد در اثر رویدادهای سیمرین و خرد شدن صفحه ایران به چندین بلوک ساختاری، شدت ناآرامی‌های تکتونیکی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. در نتیجه، طی تریاس بالایی تا ژوراسیک میانی و بالایی، جنبش‌های متعدد زمین‌ساختی به صورت حرکات بلوکی همراه با نوسانات مکرر سطح آب دریا تاثیر چشمگیری بر الگوهای رسوب‌گذاری داشته و منجر به گسترش گستره‌ای وسیع از رخساره‌های چینه‌سنگی در منطقه شده است (Wilmsen et al., 2009, Salehi et al., 2024).

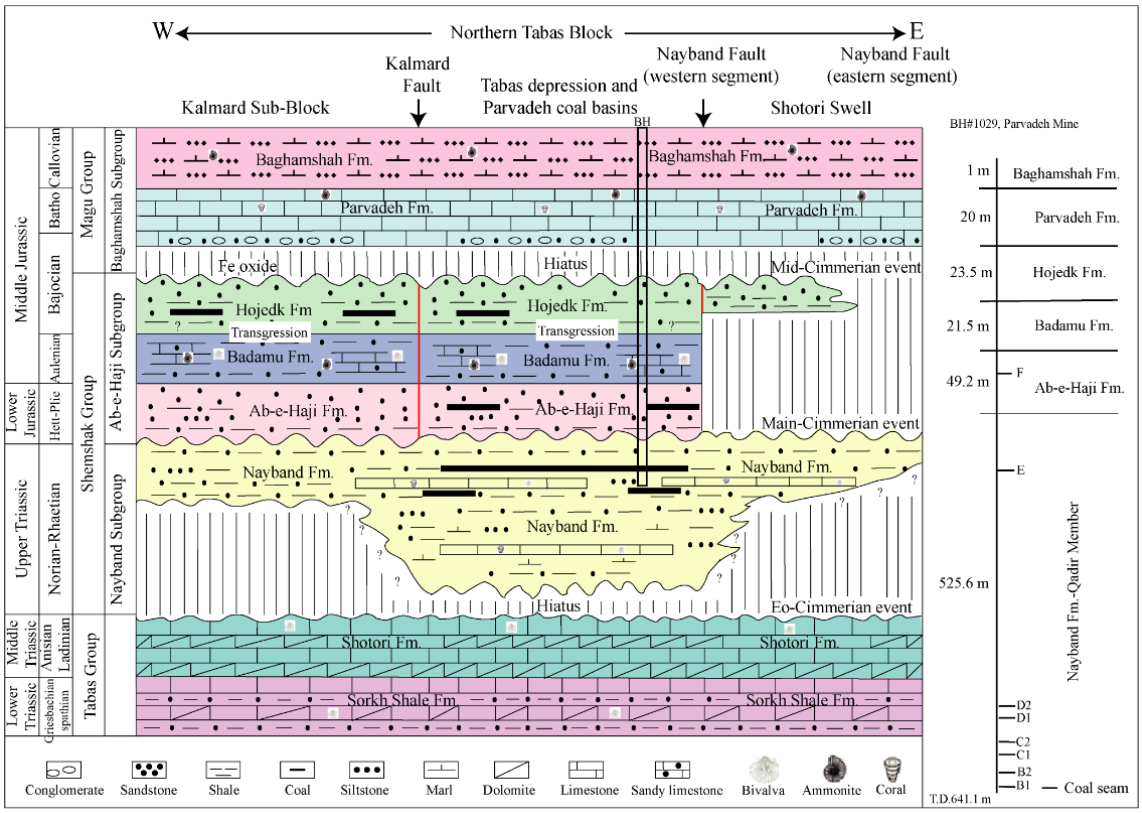
سازند نایبند به عنوان یکی از مهم‌ترین واحدهای زغال‌دار و دارای پتانسیل هیدروکربنی (به ویژه تولید متان) در منطقه پروده، ضخامتی بین ۱۴۱۰ تا ۲۳۰۰ متر دارد و از پنج عضو گلکان، بیدستان، حوض شیخ، حوض خان و قدیر تشکیل شده است. تفکیک این پنج عضو بر اساس مشخصات چینه‌شناسی و تفاوت در سنگ‌شناسی و محتوای فسیلی آنها انجام شده است (Hautmann, 2001, Fürsich et al., 2005). براساس مطالعات پالینومورفی، سن این سازند نورین- رتین (تریاس بالایی) تعیین شده است. در منطقه معدن پروده رخنمون‌هایی از گروه شمشک و همچنین گروه مگو وجود دارد (Ghavidel-Syooki et al., 2015) (شکل ۲).

در منطقه پروده، عضو قدیر از سازند نایبند دارای ذخایر زغال‌سنگ قابل توجه است، در حالی که سایر سازندهای گروه شمشک در این محدوده، پتانسیل قابل توجهی برای تشکیل زغال‌سنگ ندارند یا بسیار اندک است. عضو قدیر با ضخامت حدود ۸۰۰ متر شامل ماسه‌سنگ ریزدانه، سیلت‌ستون، شیل و پنج سری لایه‌های زغال‌سنگ A1، A2، B1، B2، C1، C2، D1، D2 و E است. در این مطالعه، گمانه اکتشافی از بلوک ۷ در زون پروده ۴ بررسی شده است. در این گمانه، مغزه‌های حفاری از بالا به پایین شامل گروه مگو (سازند پروده) و گروه شمشک (شامل سازندهای هجدک، بادامو، آب‌حاجی و بخش قدیر از سازند نایبند) هستند و مجموع طول مغزه‌های حفاری شده در این گمانه ۶۴۱/۱ متر می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۱- (a) نقشه تکتونیکی ساده شده ایران (Stöcklin and Nabavi, 1973) که موقعیت بخشی از بلوک طبس را نشان می‌دهد. (b) نقشه زمین‌شناسی منطقه پروده و زیر زون‌های آن، که به پروده ۱ تا ۴ و پروده شرقی تفکیک شده‌اند (اقتباس با تغییراتی از Shariat Nia, 1994, Zamani et al., 2023b). موقعیت گمانه مورد مطالعه با علامت ستاره مشخص شده است.

Fig. 1. (a) Simplified tectonic map of Iran (Stöcklin and Nabavi, 1973) showing the location of part of the Tabas Block. (b) Geological map of the Parvadeh area and its subzones, subdivided into Parvadeh 1–4 and Eastern Parvadeh (modified after Shariat Nia, 1994; Zamani et al., 2023b). The location of the studied borehole is marked with a star.

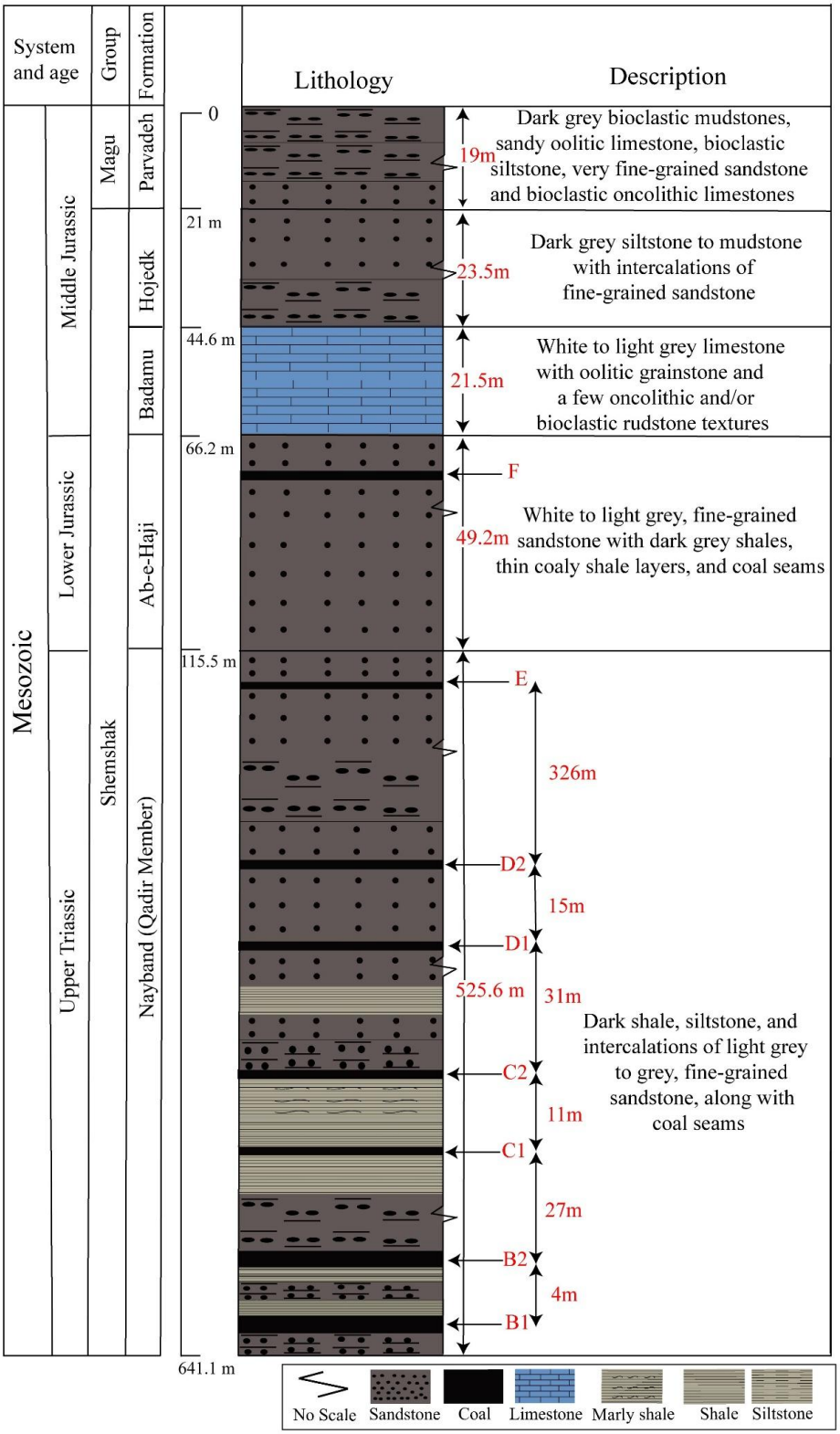


شکل ۲- واحدهای اصلی سنگ‌چینه‌ای تریاس ـ ژوراسیک میانی در شمال بلوک طبس شامل گمانه اکتشافی مورد مطالعه در منطقه پروده (اقتباس با تغییراتی از Salehi و همکاران (۲۰۲۶)).

Fig. 2. Triassic–Middle Jurassic lithostratigraphic units in the northern Tabas Block including the studied borehole in the Parvadeh area (modified after Salehi et al., 2026).

۳- روش مطالعه

در این مطالعه، ۱۳۵ جعبه مغزه حفاری از سازندهای نایبند، آب‌حاجی، بادامو، هجدک و پروده به طول مجموع ۶۴۱/۱ متر مورد توصیف سنگ‌شناسی قرار گرفتند. از میان این مغزه‌ها، ۳۵ نمونه برای مطالعه پتروگرافی آلی و ارزیابی پتانسیل گاززایی لایه‌های زغال‌دار انتخاب شدند. مطالعات آزمایشگاهی شامل آنالیزهای پیرولیز راک- ایول، انعکاس ویترینایت و پتروگرافی آلی بود. از میان ۳۵ نمونه، ۱۴ مقطع صیقلی تهیه شد و با استفاده از میکروسکوپ Olympus BX60 و نور انعکاسی، در آزمایشگاه پتروگرافی گروه زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان مورد مطالعه پتروگرافی آلی قرار گرفتند (جدول ۱). همچنین، ۵ مقطع صیقلی از نمونه‌هایی با بالاترین مقادیر کربن آلی کل (TOC) انتخاب شد و برای اندازه‌گیری انعکاس ویترینایت، با استفاده از میکروسکوپ Leica DM-4500 مجهز به فتومولتی‌پلایر J&M TIDAS MSP 200 و مطابق استاندارد ASTM D7708، در پژوهشگاه صنعت نفت تهران مورد مطالعه قرار گرفتند. علاوه بر این، به منظور ارزیابی سنگ منشاء توالی مورد مطالعه، ۱۰ نمونه سنگ پودر شد و با دستگاه Rock–Eval 6 ساخت شرکت VINCI Technologies در پژوهشگاه صنعت نفت تهران، برای آنالیز پیرولیز راک- ایول مورد ارزیابی قرار گرفتند (جدول ۲).



شکل ۳- ستون چینه‌شناسی شماتیک گمانه مورد مطالعه که بخش زیرین گروه مگو و سازندهای گروه شمشک در منطقه پروده ۴ را نشان می‌دهد. لایه‌های زغال‌دار عمدتاً به صورت بین‌لایه‌ای با شیل‌ها و سیلت‌ستون‌های سیاه رنگ قرار دارند.

Fig. 3. Schematic lithostratigraphic column of the studied borehole showing the lower part of the Magu Group and the formations of the Shemshak Group in the Parvadeh 4 area. Coal layers are mainly interbedded with dark shales and siltstones.

جدول ۱- فهرست نمونه‌های مورد مطالعه جهت تهیه مقاطع صیقلی برای انجام مطالعات پتروگرافی آلی، انعکاس ویترینایت و آنالیز پیرولیز راک-ایول.

Table 1. List of the studied samples for polished sections prepared for organic petrography, vitrinite reflectance, and Rock–Eval pyrolysis analyses.

Number	Sample No.	Formation	Depth (m)	Analysis
1	P-20.3	Parvadeh	20.3	Organic petrography, vitrinite reflectance
2	P-80.3	Ab-e-Haji	80.3	Organic petrography, vitrinite reflectance, Rock Eval-pyrolysis
3	P-90.9		90.9	
4	P-118.3	Nayband	118.3	Organic petrography, vitrinite reflectance
5	P-195.4	Nayband	195.4	Organic petrography, vitrinite reflectance, Rock Eval-pyrolysis
6	P-178.3	Nayband	178.3	Rock Eval-pyrolysis
7	P-206.6	Nayband	206.6	Organic petrography, vitrinite reflectance, Rock Eval-pyrolysis
8	P-236.6	Nayband	236.6	Organic petrography, vitrinite reflectance, Rock Eval-pyrolysis
9	P-255	Nayband	255	Rock Eval-pyrolysis
10	P-343.3	Nayband	343.3	Organic petrography, vitrinite reflectance, Rock Eval-pyrolysis
11	P-363.8	Nayband	363.8	Organic petrography, vitrinite reflectance, Rock Eval-pyrolysis
12	P-399	Nayband	399	Organic petrography, vitrinite reflectance, Rock Eval-pyrolysis
13	P-444.9	Nayband	444.9	Rock Eval-pyrolysis
14	P-471.1	Nayband	471.1	Organic petrography, vitrinite reflectance, Rock Eval-pyrolysis
15	P-547	Nayband	547	Organic petrography, vitrinite reflectance, Rock Eval-pyrolysis
16	P-594.1	Nayband	594	Organic petrography, vitrinite reflectance, Rock Eval-pyrolysis
17	P-625.8	Nayband	625.8	Organic petrography, vitrinite reflectance, Rock Eval-pyrolysis

۴- نتایج و بحث

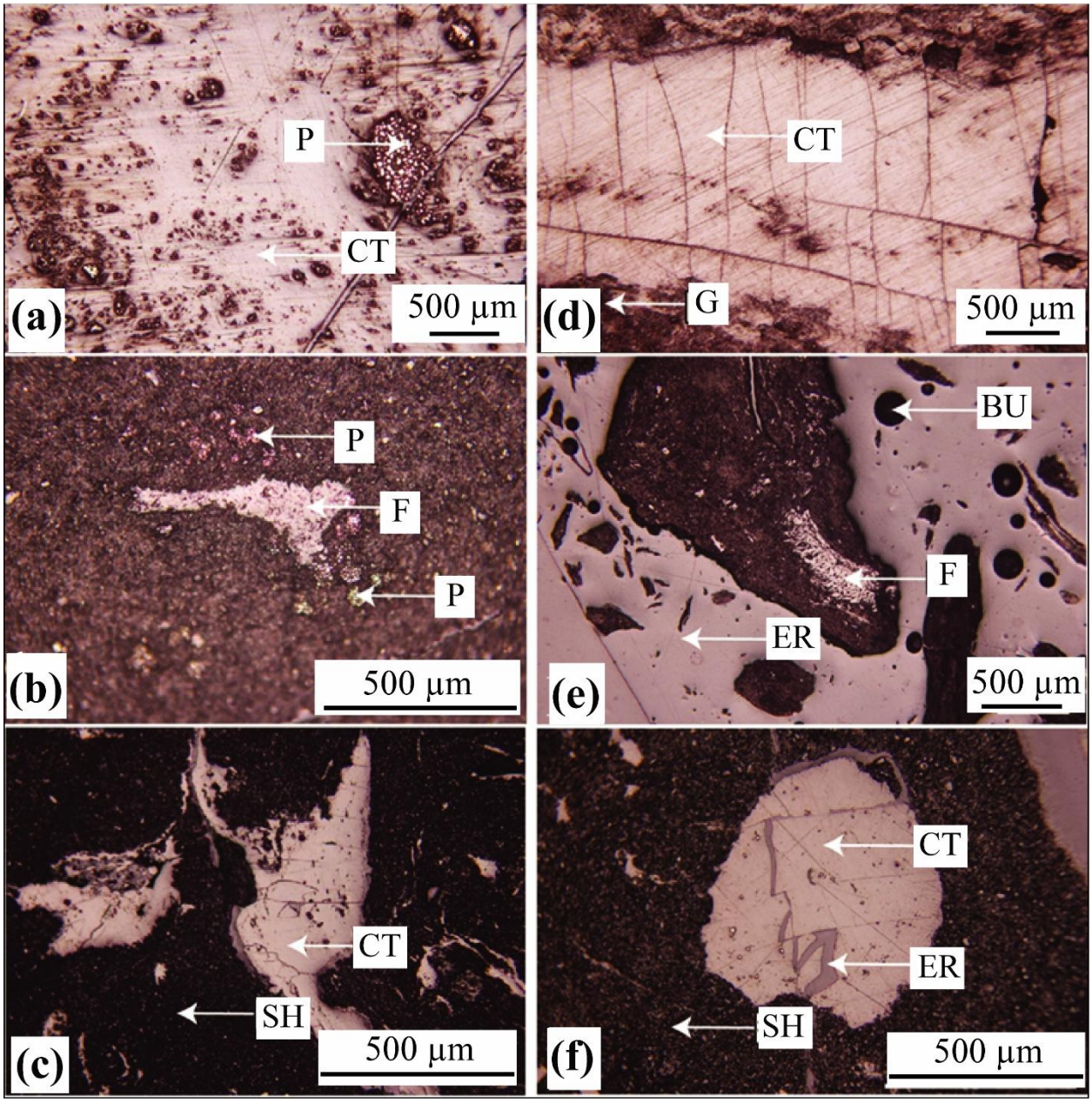
۴-۱- پتروگرافی آلی

در بررسی پتروگرافی آلی بخش قدیر سازند نایبند، ماسرال‌های اصلی شناسایی شده شامل گروه ویترینایت (عمدتاً کولوتلینایت) و ژلینایت هستند (شکل‌های ۴-f–a و ۵-f–e). این نمونه‌ها دارای ترک‌های پرشده از ژلینایت و رگه‌های پیریتی حاصل از دیاژنز بوده و رنگ خاکستری یکنواخت آن‌ها نشان‌دهنده بلوغ حرارتی متوسط تا بالا است. بازتاب نسبتاً زیاد نور در زیر میکروسکوپ نیز تایید کننده بلوغ حرارتی بالاتر و افزایش میزان آرایش حلقه‌های آروماتیکی در ماسرال‌های ویترینایت می‌باشد. مجموعه ویژگی‌های پتروگرافی این بخش شامل حضور پیریت و ساختار همگن ویترینایت‌ها نشان می‌دهد که زغال‌سنگ‌ها در محیط‌های دلتایی احیایی با رسوب‌گذاری آرام و تحت شرایط دیاژنزی احیایی تشکیل شده‌اند.

در سازند پرورده، دو گروه اصلی ماسرال‌ها شامل ویترینایت و اینرتینایت شناسایی شده‌اند (شکل ۵-b–a). نتایج نشان می‌دهد که ویترینایت بیشترین فراوانی را دارد و بیانگر تشکیل زغال‌سنگ در محیط‌های احیایی است. حضور تلینایت و کلوتلینایت (از زیرگروه ویترینایت) همراه با بقایای دیواره‌های سلولی حفظ شده، نشان‌دهنده تشکیل در محیط‌های مردابی کم عمق با شرایط احیایی می‌باشد. کانی‌های رسی و پیریت نیز با این زغال‌سنگ‌ها مشاهده می‌شوند. پیریت در اثر فعالیت باکتری‌های احیاکننده سولفات و واکنش یون‌های آهن با سولفید هیدروژن طی دیاژنز تشکیل شده و به صورت پراکنده، فرامبوئیدال یا به صورت پرکننده منافذ در بافت زغال‌سنگ و لایه‌های رسی حضور دارد که بیانگر شرایط دیاژنزی احیایی است. در مجموع، پتروگرافی آلی سازند پروده نشان می‌دهد که این زغال‌سنگ‌ها در اثر نوسانات متناوب شرایط احیایی و اکسیدی در محیط‌های مردابی و دشت‌های سیلابی با تغییرات میزان اکسیژن تشکیل شده‌اند.

در سازند آب‌حاجی، بیشتر ماسرال‌های شناسایی شده از گروه اینرتینایت، شامل فوزینایت، اینرتودترینایت و فانجینایت هستند که منشاء آن‌ها بقایای سوخته یا اکسید شده گیاهان خشکی‌زی است. این ماسرال‌ها دارای ساختار فیبری، سلولی و متخلخل بوده و در نور بازتابی نسبت به ویترینایت روشن‌تر دیده می‌شوند (شکل ۵-d–c). حضور فوزینایت با ساختار سلولی مشخص بیانگر شرایط اکسیدی تا نیمه اکسیدی پیش از دفن

است؛ شرایطی که در آن بقایای گیاهی در تماس با اکسیژن قرار داشته‌اند. در برخی نمونه‌ها، تجمع پیریت به صورت فرامبوئیدال و حضور خرده ماسرال‌های اینرتودترینایت در زمینه‌ای سیلت‌ستونی و شیلی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تاثیر فرآیندهای دیاژنتیکی و رسوب‌گذاری در محیط‌های باتلاقی و رودخانه‌ای است. تفاوت در ترکیب ماسرالی میان دو سازند نایبند و آب‌حاجی بیانگر تغییرات قابل توجه در شرایط محیطی و فرایندهای دیاژنزی حاکم بر تشکیل این نهشته‌ها است.



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی از زغال‌سنگ بیتومینه سازند نایبند (تریاس بالایی)، معدن پرورده، طبس. تصاویر با نور انعکاسی سفید گرفته شده‌اند. (a) عمق ۵۹۴/۱ متر، (b) عمق ۲۵۵ متر، (c) عمق ۵۴۷ متر، (d) عمق ۶۲۵/۸ متر، (e) عمق ۲۳۶/۶ متر و (f) عمق ۵۴۷ متر. CT: کلوتلینایت، SH: شیل، F: فوزینایت، BU: حفره یا حباب، G: ژلینایت، P: پیریت. برخی از شکستگی‌ها و حفره‌ها با اپوکسی رزین (ER) پر شده‌اند.

Fig. 4. Photomicrographs of bituminous coal from the Nayband Formation (Upper Triassic), Parvadeh Mine, Tabas. Images were captured under reflected white light. (a) 594.1 m depth, (b) 255 m depth, (c) 547 m depth, (d) 625.8 m depth, (e) 236.6 m depth, and (f) 547 m depth. CT: collotelinite, SH: shale, F: fusinite, BU: bubble or void, G: gelinite, P: pyrite. Some fractures and voids are filled with epoxy resin (ER).

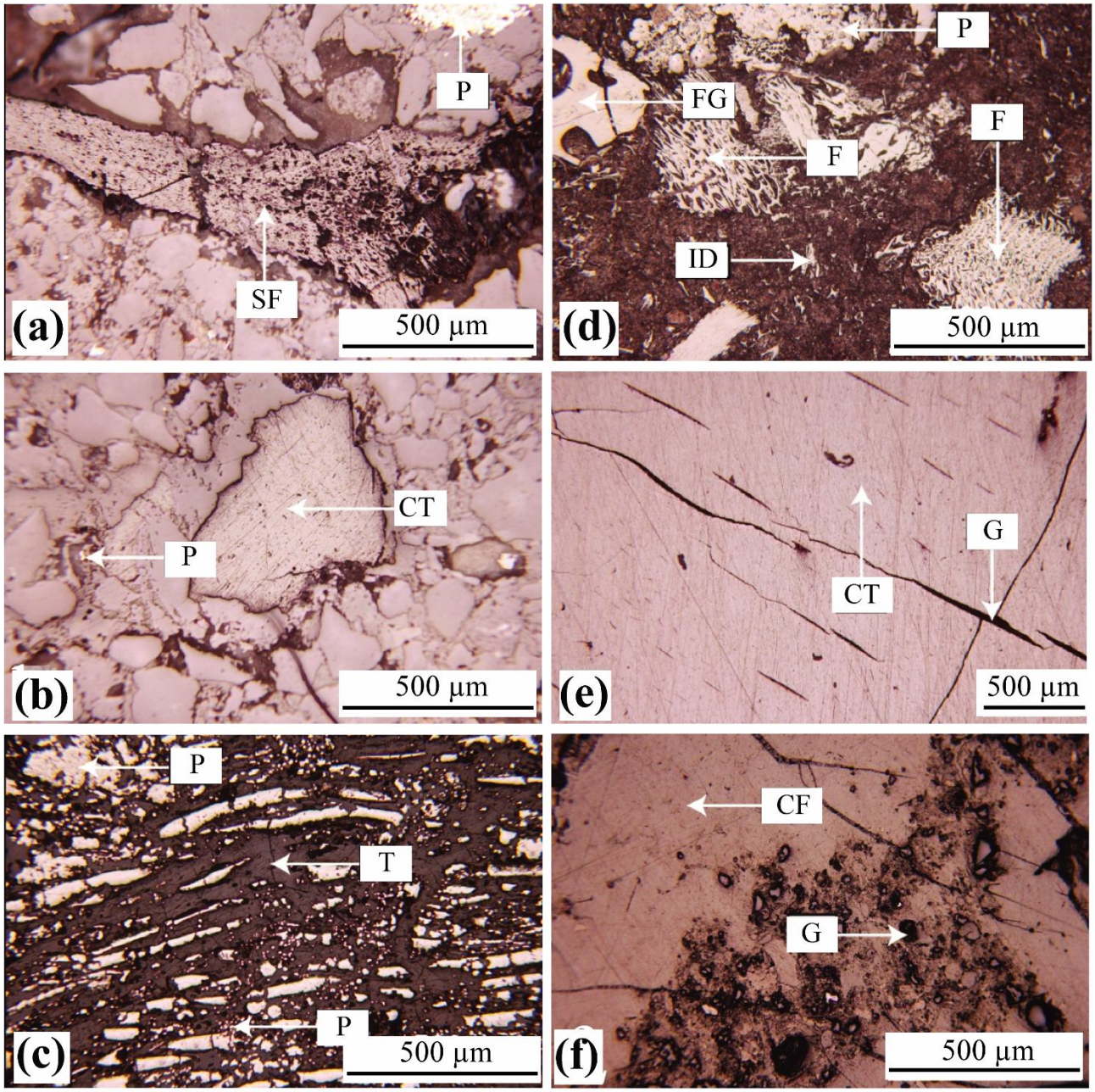
۴-۲- انعکاس ویترینایت

اندازه‌گیری شدت انعکاس ویترینایت (Ro%) شاخصی قابل اعتماد برای تعیین بلوغ حرارتی ماده آلی و ارزیابی پتانسیل سنگ منشاء محسوب می‌شود. مقادیر میانگین انعکاس ویترینایت در نمونه‌های مختلف، بیانگر تفاوت مراحل بلوغ حرارتی در سازندهای پروده، آب‌حاجی و نایبند است. نتایج مربوط به اندازه‌گیری این پارامتر در توالی زغال‌دار معدن پروده طبس در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. نمونه کم عمق سازند پروده با میانگین انعکاس ویترینایت ۰/۷۲٪ در مرحله بلوغ اولیه قرار دارد (شکل‌های ۶-a–b و ۷). نمونه با عمق متوسط از سازند آب‌حاجی و نیز نمونه کم عمق سازند نایبند، به ترتیب با میانگین انعکاس ۰/۹۵٪ و ۰/۹۰٪، هر دو در مرحله بلوغ کامل و در محدوده اوج زایش نفت قرار می‌گیرند (شکل‌های ۶-c–d و ۷). در مقابل، نمونه عمق متوسط از لایه C1 سازند نایبند با میانگین انعکاس ۱/۲۱٪ در مرحله بلوغ بالا- گاز مرطوب قرار دارد و این میزان بلوغ حرارتی می‌تواند احتمال تولید گازهای ترموژنیک، به ویژه متان و هیدروکربن‌های سنگین‌تر(C2–C5) را نشان دهد (شکل‌های ۶-e و ۷). در نهایت، نمونه عمیق سازند نایبند با میانگین انعکاس ویترینایت ۱/۳۲٪ بیانگر ورود ماده آلی به مرحله زایش نفت میعانی تا گاز مرطوب است (شکل‌های ۶-f و ۷).

به منظور تحلیل دقیق‌تر داده‌ها، نتایج این پژوهش با یافته‌های مطالعات پیشین مقایسه شده است. بر اساس مطالعه Zamani و همکاران (۲۰۲۳a)، زغال‌سنگ‌های سازند نایبند در منطقه پروده در محیطی پارالیک و در بخش پایینی یک دشت دلتایی تشکیل شده‌اند؛ جایی که تغییرات سطح آب دریا نقش تعیین‌کننده‌ای در فرایند تورب‌زایی داشته است. وجود مقادیر نسبتاً بالای گوگرد، حضور رسوبات آواری، و درصد بالای خاکستر بیانگر تاثیر آب‌های شور دریایی و نیز فعالیت‌های تکتونیکی شدید همزمان با نهشته‌گذاری است. مقادیر انعکاس ویترینایت گزارش شده برای لایه‌های زغالی B1، B2، C1 و C2 توسط Zamani و همکاران (۲۰۲۳b) در بازه ۰/۹۷– ۱/۳۵٪ قرار می‌گیرد. این مقادیر با شدت انعکاس ویترینایت اندازه‌گیری شده برای لایه‌های B1 و C1 در این پژوهش (۱/۱۴–۱/۴۲٪) کاملاً سازگار است. Esmailpour و همکاران (۲۰۲۲) نیز با بررسی پتروگرافی زغال‌سنگ‌های پروده در حوضه طبس، نمونه‌هایی از معادن زیرزمینی مختلف پروده ۱ تا پروده ۴ را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که انعکاس ویترینایت برای لایه‌های زغالی B1، B2 و C1 در بازه ۱/۱۳–۱/۵۴٪ متغیر است که مشخصه زغال‌های بیتومینه با درجه متوسط و مقادیر کم تا متوسط مواد فرار است. علاوه بر این، میزان ویترینایت در تمامی نمونه‌ها به طور قابل توجهی بیش از اینرتینایت بوده و تنها مقدار اندکی لیپتینایت-که عمدتاً از اگزودترینایت ثانویه تشکیل شده است- مشاهده شده است. این نتایج با داده‌های حاصل از پژوهش حاضر همخوانی کامل دارد. Zamansani و همکاران (۲۰۱۹) نیز به بررسی پتروگرافی آلی زغال‌سنگ‌های تریاس و ژوراسیک در حوضه طبس پرداخته‌اند. مطابق نتایج آن‌ها، انعکاس ویترینایت رگه‌های زغالی B1، B2 و C1 در سازند نایبند معدن پروده در بازه ۱/۱۷–۱/۳۷٪ قرار دارد. این مقادیر نیز تایید کننده سازگاری کامل داده‌های این پژوهش با مطالعات پیشین است.

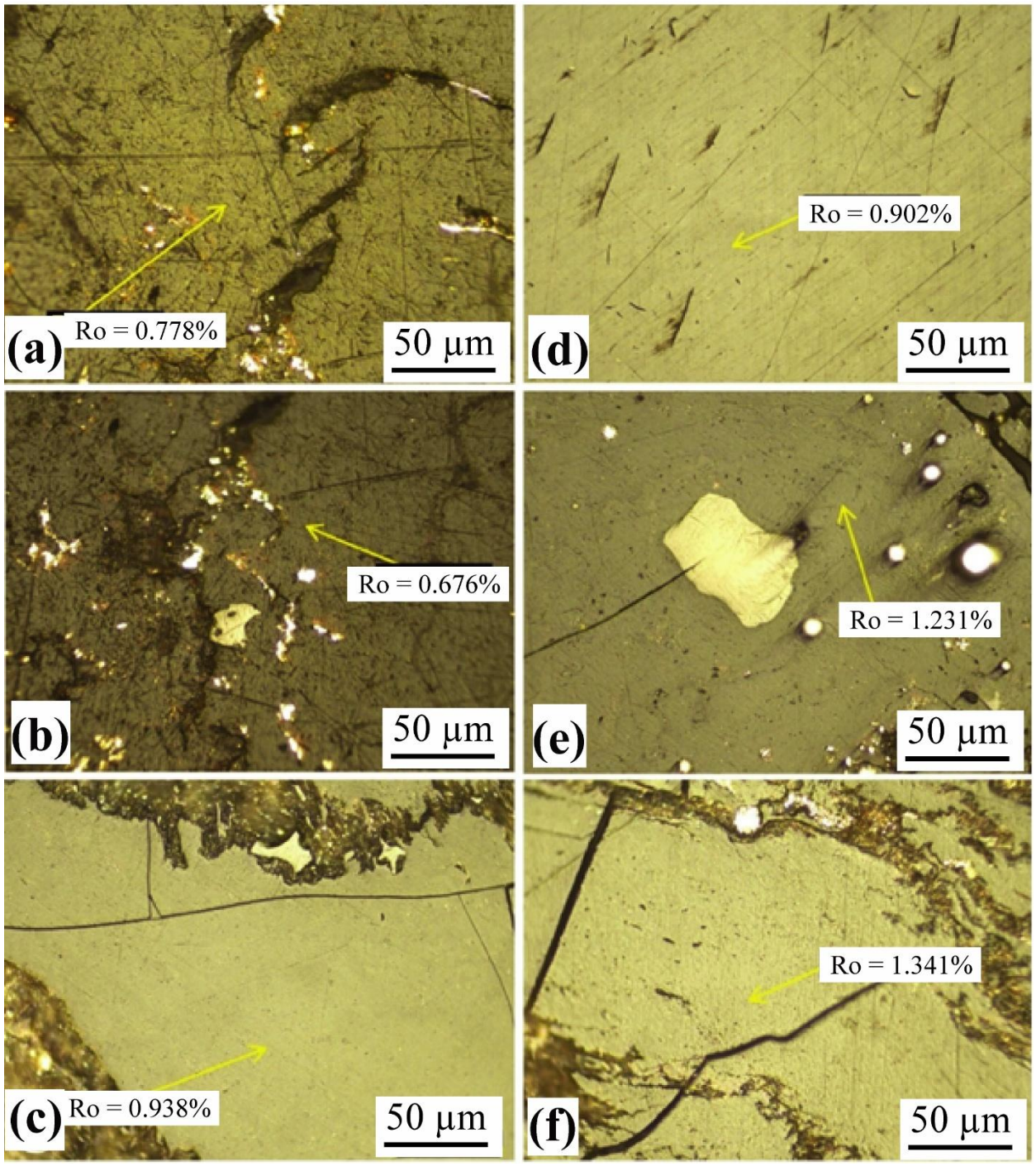
۴-۳- پیرولیز راک- ایول

نتایج آنالیز پیرولیز راک- ایول بیانگر اختلاف قابل توجه در غنای ماده آلی و بلوغ حرارتی دو سازند آب‌حاجی و نایبند است (جدول ۲). مقدار TOC نمونه‌های مورد مطالعه در بازه ۰/۷ تا ۳۹/۶۹ درصد وزنی متغیر بوده و نشان‌دهنده پتانسیل بالای زایش گاز خشک در صورت وجود شرایط حرارتی مناسب است. توزیع فراوانی TOC برای نمونه‌های این دو سازند در شکل ۸ ارائه شده است. نمونه‌های انتخابی کم‌عمق و عمیق از سازند نایبند با مقادیر TOC بیش از ۳۰ درصد وزنی در محیط‌های مردابی- دلتایی و احیایی با اکسیژن‌پذیری محدود تشکیل شده‌اند، در حالی که نمونه عمق کم سازند آب‌حاجی با مقدار پایین‌تر TOC نشان‌دهنده رسوب‌گذاری در شرایط اکسیدان‌تر هستند. مقادیر بالای TOC در نمونه مورد مطالعه نشان‌دهنده شرایط مطلوب تجمع ماده آلی و رسوب‌گذاری در محیط‌های مردابی و احیایی با نرخ بالای دفن است. در مقابل، مقادیر پایین TOC می‌تواند ناشی از شرایط اکسید کننده، تخریب زیستی یا دیاژنز مخرب باشد. بر این اساس، از نظر غنای آلی و پتانسیل گاززایی، سازند نایبند نسبت به سازند آب‌حاجی برتری دارد. مقادیر S_2 زغال‌سنگ‌های مورد مطالعه در بازه mg HC/g rock ۰/۳۳ تا ۷۸/۸۸ قرار دارند. افزایش مقدار S_2 در نمونه‌های سازند نایبند نسبت به سایر نمونه‌ها بیانگر شرایط احیایی حین رسوب‌گذاری ماده آلی است (شکل ۸).



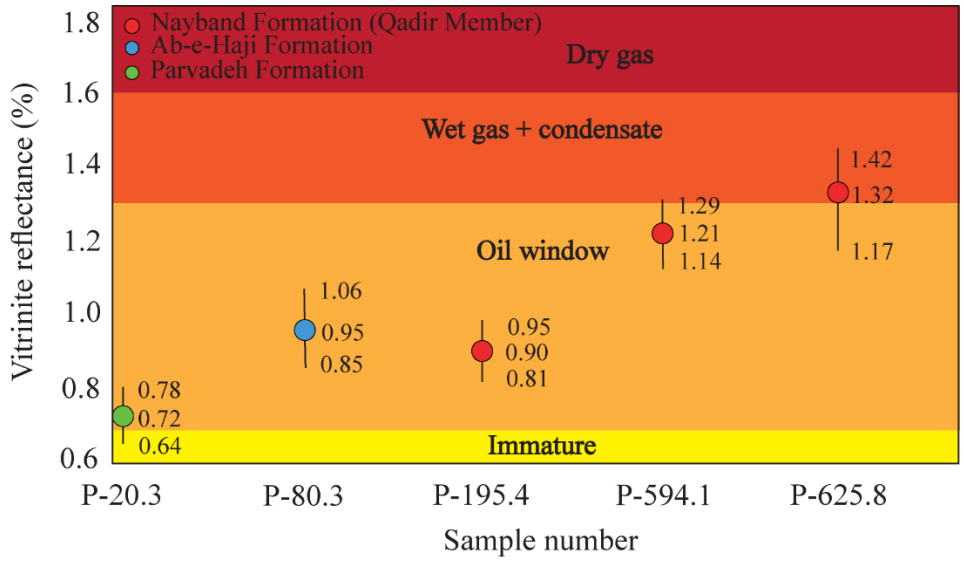
شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی از زغال‌سنگ بیتومینه، معدن پروده، طبس. تصاویر با نور انعکاسی سفید گرفته شده‌اند. (a–b) سازند پروده (ژوراسیک میانی، عمق ۲۰/۳ متر)، (c–d) سازند آب‌حاجی (ژوراسیک زیرین، عمق ۸۰/۳ متر)، (e) بخش بالایی سازند نایبند (تریاس بالایی، عمق ۱۹۵/۴ متر) و (f) سازند نایبند (تریاس بالایی، عمق ۲۰۶/۶ متر). SF: سمی‌فوزینایت، CT: کولوتلینایت، FG: فانجینایت، ID: اینرتودترینایت، F: فوزینایت، T: تلینایت، G: ژلینایت، P: پیریت. برخی از شکستگی‌ها و حفره‌ها با اپوکسی رزین (ER) پر شده‌اند.

Fig. 5. Photomicrographs of bituminous coal from the Parvadeh Mine, Tabas. Images were captured under reflected white light. (a–b) Parvadeh Formation (Middle Jurassic, 20.3 m depth), (c–d) Ab-e-Haji Formation (Lower Jurassic, 80.3 m depth), (e) the upper part of the Nayband Formation (Upper Triassic, 195.4 m depth), and (f) Nayband Formation (Upper Triassic, 206.6 m depth). SF: semifusinite, CT: collotelinite, FG: funginite, ID: inertodetrinite, F: fusinite, T: telinite, G: gelinite, P: pyrite. Some fractures and voids are filled with epoxy resin (ER).



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی و شدت انعکاس ویترینایت نمونه‌های زغال‌سنگ معدن پروده، طبس. اندازه‌گیری به روش غوطه‌ور در روغن ایمرسیون با بزرگ‌نمایی ۵۰ برابر با استفاده بخش سبز طیف نور مرئی با طول موج ۵۴۶ نانومتر. (a–b) سازند پروده، عمق ۲۰/۳ متر، (c) سازند آب‌حاجی، عمق ۸۰/۳ متر، (d) سازند نایبند، عمق ۱۹۵/۴ متر، (e) سازند نایبند، عمق ۵۹۴/۱ متر و (f) سازند نایبند، عمق ۶۲۵/۸ متر.

Fig. 6. Photomicrographs and vitrinite reflectance measurements of coal samples from the Parvadeh Mine, Tabas. Measurements were performed in oil immersion at 50× magnification using the green spectral band (λ = 546 nm). (a–b) Parvadeh Formation, 20.3 m depth, (c) Ab-e-Haji Formation, 80.3 m depth, (d) Nayband Formation, 195.4 m depth, (e) Nayband Formation, 594.1 m depth, and (f) Nayband Formation, 625.8 m depth.



شکل ۷- مقادیر انعکاس ویترینایت اندازه‌گیری شده در نمونه‌های زغال‌سنگ معدن پروده در طبس و بلوغ حرارتی توالی مورد مطالعه.

Fig. 7. Measured vitrinite reflectance (Ro%) of coal samples from the Parvadeh Mine in Tabas and the thermal maturity of the studied stratigraphic succession.

جدول ۲- پارامترهای حاصل از آنالیز پیرولیز راک- ایول نمونه‌های زغال‌سنگ معدن پروده، طبس.

Table 2. Rock-Eval pyrolysis parameters of coal samples from the Parvadeh Mine, Tabas.

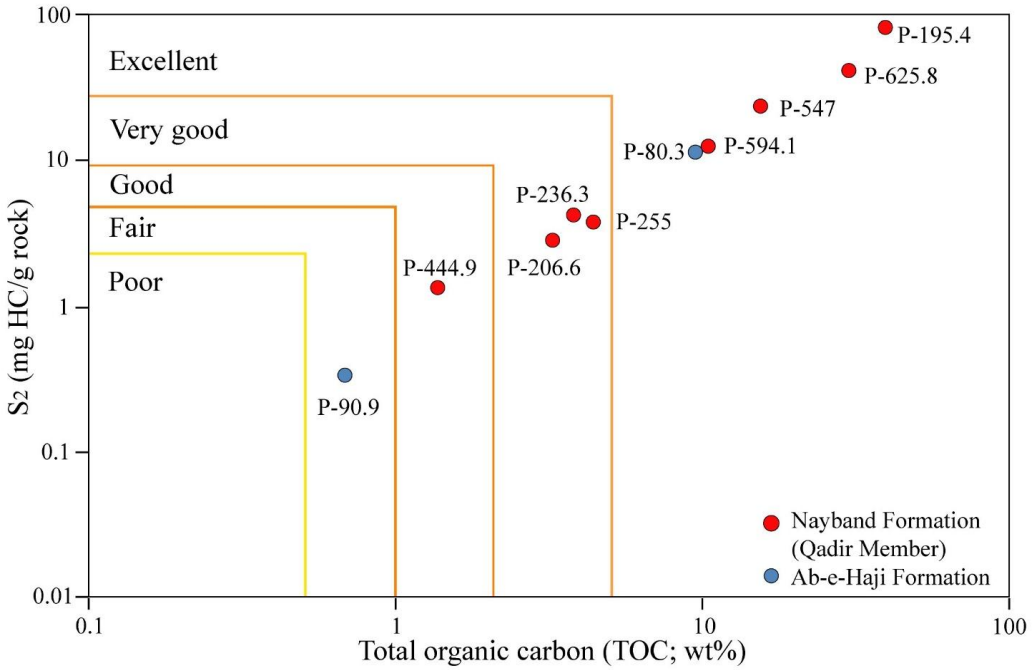
Sample No.	Formation	TOC (wt%)	HI (mg HC/g TOC)	OI (mg CO_2/g TOC)	S_1 (mg HC/g rock)	S_2 (mg HC/g rock)	T_{max} (°C)
P-80.3	Ab-e-Haji	9.92	113	6	1.16	11.23	446
P-90.9		0.70	47	27	0.06	0.33	459
P-195.4	Nayband (Qadir Member)	39.69	199	3	2.25	78.88	453
P-206.6		3.26	86	16	0.21	2.8	453
P-236.3		4.49	83	10	0.24	3.73	454
P-255		3.79	108	18	0.71	4.1	450
P-444.9		1.38	95	51	0.71	1.3	444
P-547		15.46	151	5	2.84	23.38	459
P-594.1		10.48	111	1	1.39	12.06	467
P-625.8		30.48	131	3	3.85	40.05	471

بر اساس نتایج مطالعات پتروگرافی و داده‌های پیرولیز راک-ایول، ماده آلی زغال‌سنگ‌های سازند نایبند از کروژن نوع II/III و III بوده و منشاء آن‌ها از گیاهان خشکی‌زی است که پتانسیل تولید گاز طبیعی (متان) را دارا می‌باشد. با این حال، به دلیل پایین بودن شاخص هیدروژن (HI) و فقدان ترکیبات لیپیدی و رزینی مرتبط با جلبک‌های دریایی ظرفیت تولید نفت در این نمونه‌ها محدود است. بنابراین، با وجود مقادیر بالای TOC، کیفیت هیدروژن‌زایی ماده آلی پایین بوده و این زغال‌سنگ‌ها عمدتاً تولید کننده گاز خشک در مراحل بالای بلوغ حرارتی هستند. نمودار S_2 در برابر TOC برای نمونه‌های مورد مطالعه از سازندهای آب‌حاجی و نایبند در معدن پروده نشان می‌دهد که اغلب نمونه‌های سازند نایبند با TOC بیش از ۱۰ درصد وزنی و مقادیر S_2 بین ۱۰ mg HC/g rock تا ۸۰ در محدوده خیلی خوب تا عالی قرار گرفته و حاکی از غنای آلی بالا، ظرفیت مناسب تولید هیدروکربن و حضور کروژن نوع III با منشاء زغالی و گرایش به تولید گاز هستند (شکل ۸). نمونه‌های سازند

آب‌حاجی با مقادیر پایین‌تر TOC و S_2 نسبت به سازند نایبند غنای آلی و پتانسیل گاززایی کمتری را دارا می‌باشند. به طور کلی، زغال‌سنگ‌های قاره‌ای سازند نایبند در حوضه طبس، با برخورداری از مقادیر بالای TOC و S_2، پتانسیل قابل توجهی برای تولید و آزادسازی گاز متان در صورت فراهم بودن شرایط حرارتی مناسب دارند.

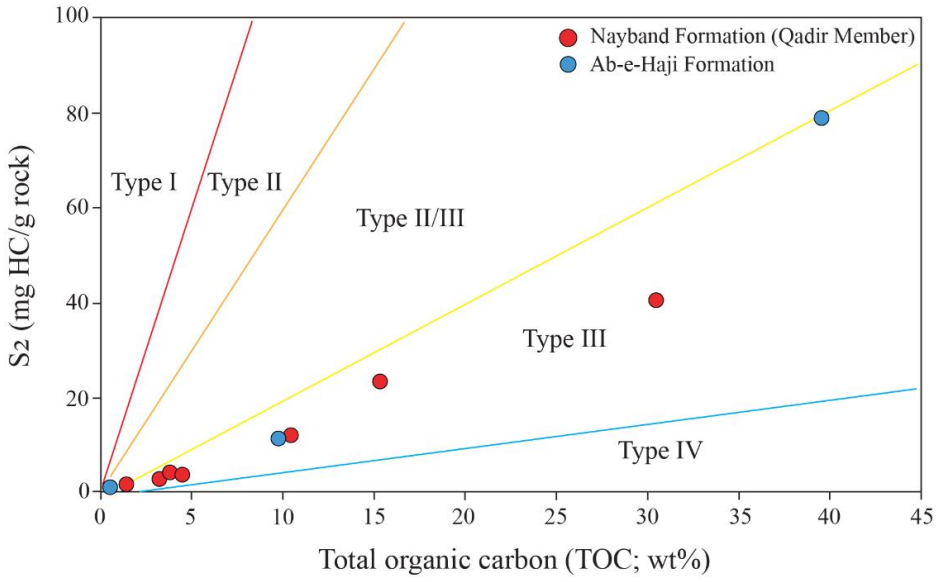
نمودار S_2 در مقابل TOC به منظور طبقه‌بندی نوع کروژن و ارزیابی پتانسیل هیدروکربنی سنگ‌های منشاء مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۹). عمده نمونه‌های سازند نایبند در بازه TOC برابر با ۰ تا ۱۰ درصد وزنی قرار دارند و تنها تعداد محدودی از نمونه‌ها (چهار نمونه) مقادیر TOC بین ۱۰ تا ۴۰ درصد وزنی را نشان می‌دهند. نسبت S_2/HC در اغلب نمونه‌ها در محدوده ۰ تا ۳۰ درصد قرار دارد و این نسبت تنها در دو نمونه به بازه ۳۰ تا ۸۰ درصد می‌رسد. بر اساس موقعیت نمونه‌ها در این نمودار، آن‌ها در محدوده کروژن نوع III قرار می‌گیرند که بیانگر منشاء قاره‌ای مواد آلی و رسوب‌گذاری در محیط‌های قاره‌ای تا انتقالی با تاثیر محدود دریایی است. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که پتانسیل تولید هیدروکربن در این نمونه‌ها عمدتاً به صورت گاز است. نمونه‌های سازند آب‌حاجی مقادیر TOC بین ۰ تا ۱۰ درصد وزنی و نسبت S_2/HC بین ۰ تا ۱۰ درصد را نشان می‌دهند و در ناحیه کروژن نوع III و III/II جای می‌گیرند. با توجه به منشاء قاره‌ای رسوبات در حوضه پروده و قرارگیری نمونه‌ها عمدتاً در محدوده کروژن نوع III، این حوضه به طور کلی دارای قابلیت تولید گاز است که این موضوع با داده‌های حاصل از نمودار نیز همخوانی دارد. بر این اساس، سازند نایبند در برخی عمق‌ها دارای پتانسیل تولید گاز خشک و مرطوب است، در حالی که سازند آب‌حاجی تقریباً فاقد پتانسیل هیدروکربنی می‌باشد.

نمودار HI در برابر T_{max} با هدف تعیین نوع کروژن و مرحله بلوغ حرارتی ماده آلی برای نمونه‌های زغال‌سنگی سازندهای آب‌حاجی و نایبند در معدن پروده طبس در شکل ۱۰ ارائه شده است. عمده نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده کروژن نوع III و II/III قرار دارند که با منشاء قاره‌ای و خشکی‌زی زغال‌سنگ‌های طبس (بر اساس نتایج پتروگرافی آلی) سازگار است. مقادیر پایین HI، در بازه ۱۵۰-۲۰۰ mg HC/g TOC، و همچنین مقادیر نسبتاً بالای T_{max} در برخی نمونه‌ها نشان‌دهنده بلوغ حرارتی بالا و قرارگیری ماده آلی در محدوده زایش گاز است. موقعیت نمونه‌ها نسبت به خطوط بلوغ حرارتی نیز بیانگر آن است که آن‌ها در مرحله بلوغ کامل تا آغاز پنجره گاز قرار دارند (Ro = ٪۰/۶۲-۱/۱۰).



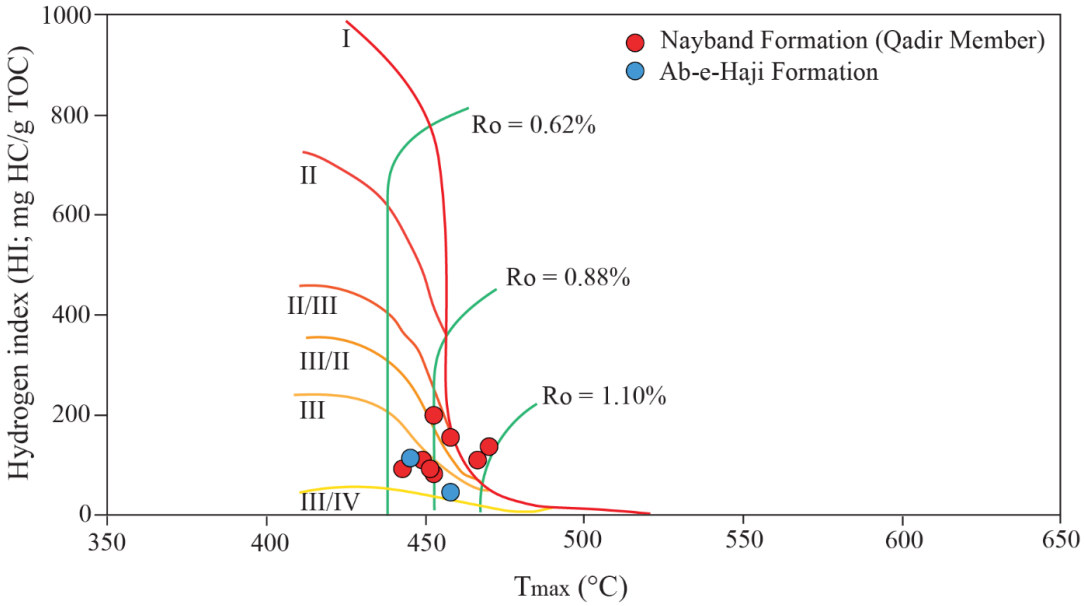
شکل ۸- نمودار S_2 در مقابل TOC (Shaaban et al., 2006) برای نمونه‌های زغال‌سنگ معدن پروده، طبس.

Fig. 8. S_2 versus TOC cross-plot (Shaaban et al., 2006) for coal samples from the Parvadeh Mine, Tabas.



شکل ۹- نمودار S_2-TOC نشان‌دهنده نوع کروژن سازندهای نایبند و آب‌حاجی (Langford and Blanc-Valleron, 1990). نوع I = تولید نفت، نوع II = تولید نفت و گاز، نوع III = تولید گاز مرطوب و خشک، نوع IV = ماده آلی اکسید شده.

Fig. 9. The S_2–TOC diagram illustrating the kerogen type of the Nayband and Ab-e-Haji Formations (after Langford and Blanc-Valleron, 1990). Type I = oil generation potential, Type II = oil and gas generation potential, Type III = wet and dry gas generation potential, Type IV = oxidized organic matter.



شکل ۱۰- نمودار HI در برابر T_{max} (Hunt, 1996) برای نمونه‌های زغال‌سنگ معدن پروده، طبس. خطوط بلوغ حرارتی با مقادیر انعکاس ویترینایت ۰/۶۲٪، ۰/۸۸٪ و ۱/۱۰٪ به ترتیب نشان‌دهنده آغاز زایش نفت، اوج زایش نفت و شروع زایش گاز ترموژنیک هستند. طبقه‌بندی محیطی کروژن‌ها به شرح زیر است: نوع I = محیط دریاچه‌ای، نوع II = محیط دریایی، نوع II/III = محیط گذار دریایی- خشکی، نوع III/II = محیط گذار خشکی- دریایی، نوع III = محیط قاره‌ای، نوع III/IV = محیط قاره‌ای اکسیدی، نوع IV/III = محیط اکسیدی با تاثیر خشکی.

Fig. 10. HI versus T_{max} plot (Hunt, 1996) for coal samples from the Parvadeh Mine, Tabas. Thermal maturity lines corresponding to vitrinite reflectance values of 0.62%, 0.88%, and 1.10% represent the onset of oil generation, peak oil generation, and the beginning of thermogenic gas generation, respectively. Environmental classification of kerogens is as follows: Type I = lacustrine environment, Type II = marine environment, Type II/III = transitional marine–terrestrial environment, Type III/II = transitional terrestrial–marine environment, Type III = continental environment, Type III/IV = oxidized continental environment, Type IV/III = oxidized environment with terrestrial influence.

۵- نتیجه‌گیری

بررسی پتروگرافی آلی لایه‌های زغال‌سنگ در گمانه اکتشافی معدن پروده، طبس نشان می‌دهد که ماسرال‌های سازند نایبند عمدتاً از گروه ویترینایت، شامل تلینایت و کولوتلینایت، تشکیل شده‌اند، در حالی که در سازندهای پروده و آب‌حاجی، ماسرال‌ها عمدتاً از گروه اینرتینایت، شامل فوزینایت و سمی‌فوزینایت، هستند. بر این اساس، منشاء ماده آلی سازند نایبند گیاهان عالی قاره‌ای بوده و مواد آلی موجود در سازندهای ژوراسیک زیرین- میانی آب‌حاجی و پروده احتمالاً حاصل فرسایش، انتقال و بازرسوب‌گذاری مواد آلی سازند نایبند پس از رویداد کوهزایی سیمرین پیشین است. شواهد میکروسکوپی مانند حضور پیریت فراوان و شکستگی‌های پرشده با پیریت نشان‌دهنده شرایط نیمه احیایی تا احیایی در زمان نهشته‌گذاری و دیاژنز لایه‌های زغال‌سنگی است. نتایج اندازه‌گیری شدت انعکاس ویترینایت بیان می‌کند که سازند پروده در مرحله آغاز بلوغ حرارتی، سازند آب‌حاجی در پیک زایش هیدروکربن و سازند نایبند در مرحله بلوغ اوج زایش نفت و گذار به زایش گاز مرطوب قرار دارد. یافته‌های حاصل از آنالیز پیرولیز راک- ایول نشان می‌دهد که سازند آب‌حاجی با مقادیر پایین TOC (متوسط ۵/۳۱ درصد وزنی) و شاخص هیدروژن (۴۷–۱۱۳ mg HC/g TOC) و شاخص اکسیژن (۶–۲۷ mg CO_2/g TOC) متوسط عمدتاً حاوی ماده آلی نسبتاً اکسید شده از کروژن نوع III بوده و در شرایط اکسیدان تا نیمه اکسیدان نهشته شده است. این سازند در مرحله بلوغ اولیه تا میانی قرار دارد، اما به طور کلی پتانسیل هیدروکربن‌زایی آن ضعیف تا متوسط ارزیابی می‌شود. در مقابل، ماده آلی سازند نایبند با مقادیر بالای TOC (۱/۳۸–۳۹/۶۹ درصد وزنی، متوسط ۱۳/۶۳ درصد وزنی)، مقادیر نسبتاً زیاد S_2 (۱/۳–۷۸/۸۸ mg HC/g rock) و OI پایین (mg CO_2/g TOC ≤۵۱) عمدتاً از کروژن نوع III با منشاء خشکی‌زی (گیاهان عالی) است و نشان‌دهنده پتانسیل بسیار خوب تا عالی برای تولید گاز طبیعی می‌باشد. این سازند در مرحله بلوغ کامل قرار دارد؛ بخش‌های کم عمق آن در پنجره نفتی واقع شده و نمونه‌های عمیق‌تر به مرحله زایش نفت میعانی تا گاز مرطوب رسیده‌اند. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که سازند نایبند دارای ظرفیت بسیار بالای تولید گاز (به ویژه متان) و در مرحله بلوغ پیشرفته است، در حالی که سازند آب‌حاجی بلوغ حرارتی پایین‌تر، کیفیت ماده آلی ضعیف‌تر و پتانسیل محدودتری برای هیدروکربن‌زایی دارد. این امر نشان می‌دهد که در حوضه طبس، سازند نایبند نسبت به سایر واحدهای تریاس- ژوراسیک، موثرترین و مناسب‌ترین سنگ منشاء بالقوه برای تولید گاز است.

قدردانی

بدینوسیله نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از شرکت زغال‌سنگ پروده طبس به جهت در اختیار قرار دادن نمونه‌ها و اطلاعات گمانه‌های اکتشافی اعلام می‌دارند.

مراجع

Esmailpour, R., Alipour, S., Ardejani, F.D., Rodrigues, S., Esterle, J., 2022. Petrology of the Parvadeh coals, Tabas Basin, Iran. International Journal of Coal Geology 258, 104028. https://doi.org/10.1016/j.coal.2022.104028.

Fürsich, F.T., Hautmann, M., Senowbari-Daryan, B., Seyed-Emami, K., 2005. The Upper Triassic Nayband and Darkuh formations of east-central Iran: Stratigraphy, facies patterns and biota of extensional basins on an accreted terrane. Beringeria 35, 53–133.

Ghavidel-Syooki, M., Yousefi, M., Mohnhoff, D., 2015. Palynostratigraphy, palaeogeography and source rock evaluation of the Nayband Formation at the Parvadeh area, Central Iran. Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran 26, 241–263.

Hautmann, M., 2001. Die Muschelfauna der Nayband-Formation (Obertrias, Nor - Rhät) des östlichen Zentraliran. Beringeria 29, 1–181.

Hunt, J.M., 1996. Petroleum Geochemistry and Geology, 2nd ed. W. H. Freeman and Company, New York.

Konon, A., Nadimi, A., Koprianiuk, M., Wysocka, A., Szaniawski, R., Wyglądała, M., Słaby, E., Beygi, S., Barski, M., 2016. Formation of intracontinental basins in the opposite corners of the Tabas block as coeval structures controlled by transpressional faulting, Iran. Geological Society of America Bulletin 128, 1593–1617. https://doi.org/10.1130/B31362.1.

Langford, F.F., Blanc-Valleron, M.M., 1990. Interpreting Rock-Eval pyrolysis data using graphs of pyrolizable hydrocarbons vs. total organic carbon. American Association of Petroleum Geologists 74 (6), 799–804.

Salehi, M.A., Wilmsen, M., Yahya Sheibani, V., Zamanian, E., Keyvanpoor, K., 2024. Stratigraphy, depositional environments and provenance of the Shemshak Group (Upper Triassic–lower Middle Jurassic) on the northern Tabas Block; evidence for the emergent Cimmerian ridge in Central Iran. Marine and Petroleum Geology 167, 106980. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2024.106980.

Salehi, M.A., Wilmsen, M., Zamanian, E., Heubeck, C., 2026. Cimmerian tectonostratigraphic events in east-central Iran revealed by a long drill core of the Shemshak Group (Upper Triassic–Middle Jurassic). Journal of Asian Earth Sciences 297, 106895. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2025.106895.

Shaaban, F., Lutz, R., Bueker, C., Odisho, K., 2006. Source rock evaluation and basin modeling in NE Egypt (NE Nile Delta and Northern Sinai). Journal of Petroleum Geology 29, 103–124. https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2006.00045.x.

Shariat Nia, H., 1994. Geological characteristics of the Parvadeh region of the Tabas coal-bearing basin, Central Iran. Canadian Society of Petroleum Geologists 17, 497–509.

Stöcklin, J., Nabavi, M.H., 1973. Tectonic Map of Iran 1:250000. Geological Survey of Iran.

Wilmsen, M., Fürsich, F.T., Seyed-Emami, K., Majidifard, M.R., 2009. An overview of the stratigraphy and facies development of the Jurassic System on the Tabas Block, east-central Iran. Geological Society, London, Special Publications 312, 323–343. https://doi.org/10.1144/SP312.15.

Zamani, Z., Rahimpour Bonab, H., Littke, R., 2023a. Palaeoenvironmental reconstruction of a coal bearing unit: the Upper Triassic Nayband Formation, Tabas Block, east central Iran. Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments 103, 733–757. https://doi.org/10.1007/s12549-023-00630-2.

Zamani, Z., Rahimpour Bonab, H., Littke, R., 2023b. Coal petrology, sedimentology and depositional environment of the Parvadeh coals in the Upper Triassic, Tabas Block of Central East Iran. International Journal of Coal Science and Technology 10, 1–20. https://doi.org/10.1007/s40789-022-00405-4.

Zamansani, N., Rajabzadeh, M.A., 2025. Triassic depositional environment in the Tabas Basin, Central Iran: Constraints from mineralogy and geochemistry of coals. Iranian Journal of Science. https://doi.org/10.1007/s40995-025-01923-w.

Zamansani, N., Rajabzadeh, M.A., Littke, R., Zieger, L., Baniasad, A., 2019. Organic petrology and geochemistry of Triassic and Jurassic coals of the Tabas Basin, Northeastern/Central Iran. International Journal of Coal Science and Technology 6, 354–371. https://doi.org/10.1007/s40789-019-00260-5.