

Research Article

Organic geochemical Evaluation of the Pabdeh Formation in the Siah-Makan Oilfield using Rock-Eval pyrolysis and organic petrographic methods

Sara Amiri, Majid Alipour.*

Department of Petroleum Geology and Sedimentary Basin, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Keyword: *Pabdeh Formation, Siah-Makan Oilfield, Organic Petrography, Rock-Eval Pyrolysis, Hydrocarbon potential*

1. Introduction

This study was carried out on the Pabdeh Formation in the Siah-Makan Oilfield, which is one of the oil fields located in the Zagros fold and thrust belt of Iran. The Dezful Embayment is a part of the Zagros basin, which has an area of about 60000 square kilometers and contains most of the oil and gas fields (Bordenave 2014). The Siah-Makan Oilfield is located 40 km northeast of the Genaveh port and 45 km southwest of Gachsaran city. The Pabdeh Formation, is of late Paleocene-early Oligocene age, and is considered as the youngest source rock in the Zagros basin (Motiei 1993). In most parts of the Dezful Embayment this source rock does not attain thermal maturity required for hydrocarbon generation (Bordenave 2002). In recent years, the hydrocarbon generation potential of the Pabde Formation has been investigated using organic geochemical methods (Alizadeh et al. 2012, Alizadeh et al. 2020).

In the present study, a combination of organic petrography and Rock-Eval pyrolysis methods is used to evaluate the organic geochemistry of the Pabde Formation in the Siah-Makan Oilfield. Results from this study are useful for determining the hydrocarbon generation potential of the Pabdeh Formation and for determining its Paleo-depositional environments.

2. Methodology

For geochemical evaluation of the Pabdeh Formation in the study area, 21 cutting samples were collected from one well in the Siah-Makan Oilfield (Well#4). The collected samples were analyzed by Rock-Eval 6 pyrolysis. In addition, 8 samples were selected for detailed organic petrographic inspections.

3. Results

3.1. Rock-Eval pyrolysis results

Rock-Eval pyrolysis data obtained for the Pabde Formation in the Siah-Makan Oilfield indicate considerable amounts of organic matter in the studied samples. In addition, the high S_2 readings obtained for the studied samples are consistent with significant hydrocarbon potential. The HI versus OI diagrams suggest that the studied samples contain type II and III kerogen (Figure 1a). Similarly, the HI versus T_{max} diagrams for Pabdeh Formation in the Siah-Makan Oilfield indicate that the studied formation has not experienced maturity levels required for hydrocarbon generation (Figure 1b).

3.2. Organic Petrographic results

Microscopic examination of selected samples from the Pabdeh Formation indicated that the samples with high TOC values contain planktonic fossil chambers filled with bituminite. Also, in terms of lithological composition, these samples are mainly composed of light-colored limestone and were deposited in an oxic environment. These results indicate that the organic matter in the Pabdeh Formation in the Siah-Makan

* Corresponding author: alipour.magid@gmail.com

DOI: 10.22055/AAG.2023.43214.2349

Received: 2023-03-10

Accepted: 2022-04-21

Oilfield is mainly composed of bituminite. Therefore, the studied formation cannot have significant potential for hydrocarbon generation.

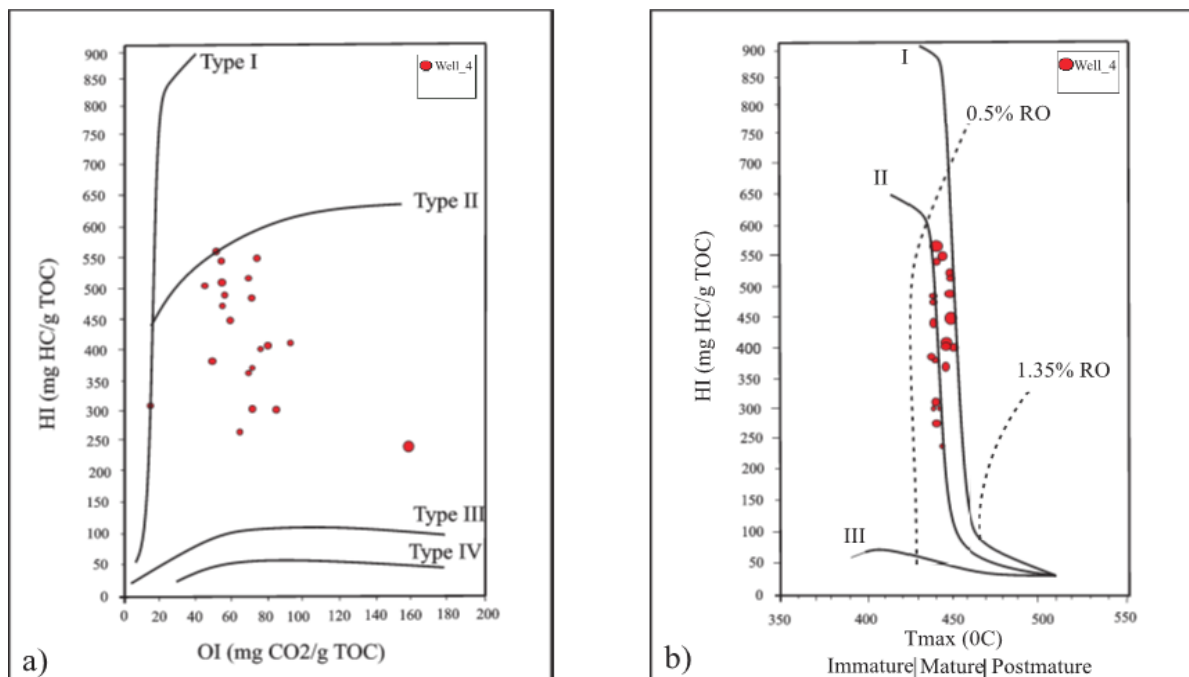


Fig. 1. Diagrams of HI versus OI (a) and HI versus T_{max} (b) for Pabdeh samples from the Siah-Makan Oilfield.

4. Conclusions

Based on the Rock-Eval pyrolysis results, high values of TOC are generally associated with high values of S_1 in the samples studied from the Pabdeh Formation of the Siah-Makan Oilfield. Therefore, high TOC readings cannot be considered as a reliable indicator for organic-rich facies within the Pabdeh Formation. Organic petrographic studies on selected samples clearly indicate the presence of significant amount of bituminite inside the planktonic fossil chambers. Accordingly, it is concluded that the Pabdeh Formation in the Siah-Makan Oilfield has low hydrocarbon generation potential and was deposited in an oxic environment. Therefore, it is suggested that for accurate geochemical evaluation of the Pabdeh Formation it is necessary to combine Rock-Eval pyrolysis results with organic petrographic observations.

References

- Alizadeh, B., Opera, A., Kalani, M., Alipour, M., 2020. Source rock and shale oil potential of the Pabdeh Formation (Middle-Late Eocene) in the Dezful Embayment, southwest Iran. *Geologica Acta* 18, 14-22. <https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2020.18.15>.
- Alizadeh, B., Sarafdokht, H., Rajabi, M., Opera, A., Janbaz, M., 2012. Organic geochemistry and petrography of Kazhdumi (Albian–Cenomanian) and Pabdeh (Paleogene) potential source rocks in southern part of the Dezful Embayment, Iran. *Organic Geochemistry* 49, 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2012.05.004>.
- Bordenave, M., Hegre, J.J.G.S., 2010. Current distribution of oil and gas fields in the Zagros Fold Belt of Iran and contiguous offshore as the result of the petroleum systems. Geological Society, London, Special Publications 330, 291-353. <https://doi.org/10.1144/SP330.14>.
- Bordenave, M.L. 2014. Petroleum systems and distribution of the oil and gas fields in the Iranian part of the Tethyan region. In: Marlow, L., Kendall, C. Yose, L. (Eds.), *Petroleum systems of the Tethyan region*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 106, 505-540. <https://doi.org/10.1036/13431865M1063614>.
- Motiei, H. 1993. Stratigraphy of Zagros. In *Treatise of Geology of Iran*, edited by Hushmandzadeh, A., Tehran: Geological Survey of Iran. P. 536.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Amiri, S., Alipour, M., 2023. Organic geochemical Evaluation of the Pabdeh Formation in the Siah-Makan Oilfield using Rock-Eval pyrolysis and organic petrographic methods. Adv. Appl. Geol. 13(3), 782-793.

DOI: 10.22055/AAG.2023.43214.2349

https://aag.scu.ac.ir/article_18512.html

©2023 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

ارزیابی ژئوشیمی آلی سازند پابده در میدان نفتی سیاه‌مکان با استفاده از داده‌های

پیرولیز راک-ایول و پتروگرافی آلی

سارا امیری

گروه زمین‌شناسی نفت و حوضه‌های رسوبی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

مجید علیپور*

گروه زمین‌شناسی نفت و حوضه‌های رسوبی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

* alipour.magid@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۱

چکیده

در این مطالعه، پتانسیل هیدروکربن‌زایی و محیط رسوبی دیرینه سازند پابده در میدان سیاه‌مکان در جنوب‌غربی ایران مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی پتانسیل هیدروکربن‌زایی، ۲۱ نمونه خردۀ حفاری از چاه شماره ۴ میدان سیاه‌مکان توسط روش‌های پیرولیز راک - ایول و پتروگرافی آلی مطالعه شده‌اند. نمودار HI در مقابل T_{max} نشان می‌دهد که سازند پابده دارای مخلوطی از کروژن نوع II/III می‌باشد که در مراحل اولیه پنجره نفتی قرار دارد. از سوی دیگر بررسی‌های پتروگرافی آلی نشان می‌دهد که نمونه‌هایی که دارای TOC بالایی هستند، دارای حجات فسیل هستند که عمدتاً با بیتومینایت پر شده‌اند. این نمونه‌ها از نظر ترکیب سنگ‌شناسی عمدتاً از آهک با رنگ روشن تشکیل شده‌اند و در محیط اکسیک ته‌نشین شده‌اند. با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه، سازند پابده در میدان سیاه‌مکان دارای پتانسیل قابل توجه برای زایش هیدروکربن نمی‌باشد. همچنین بهتر است در مطالعات آتی برای ارزیابی دقیق‌تر مشخصات ژئوشیمیایی این سنگ منشأ از تلفیق روش‌های پیرولیز و پتروگرافی آلی بهره گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: سازند پابده، میدان سیاه‌مکان، پتروگرافی آلی، پیرولیز راک - ایول، پتانسیل هیدروکربن‌زایی

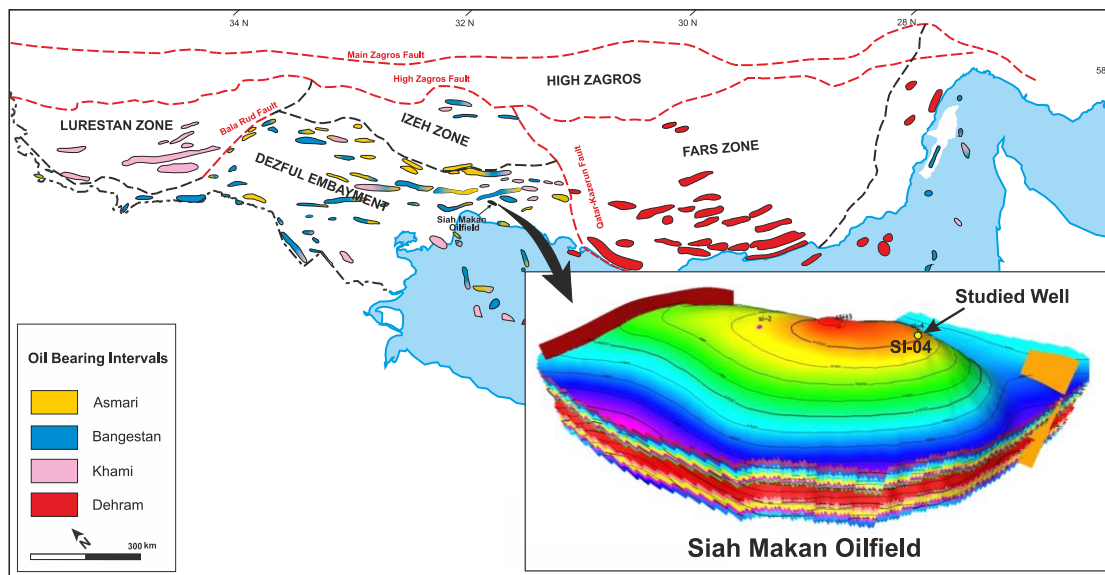
۱- مقدمه

این مطالعه بر روی سازند پابده در میدان نفتی سیاه‌مکان صورت گرفته است که یکی از میداین واقع در کمربند چین‌خورده زاگرس در جنوب فروافتادگی دزفول می‌باشد (شکل ۱). فروافتادگی دزفول بخشی از حوضه زاگرس است که دارای وسعتی حدود ۶۰۰۰۰ کیلومتر مربع است و اکثر میداین نفت و گاز را در بر دارد (Bordenave 2014). میدان نفتی سیاه‌مکان در ۴۰ کیلومتری شمال‌شرقی بندر گناوه و ۴۵ کیلومتری جنوب‌غربی شهرستان گچساران قرار دارد. این میدان دارای روند شمال‌غرب - جنوب‌شرق است که توسط یک گسل تراستی

با روند شمال‌غرب - جنوب‌شرق در مرز شمالی از میدان نفتی بی‌بی‌حکیمه جدا شده است (شکل ۱).

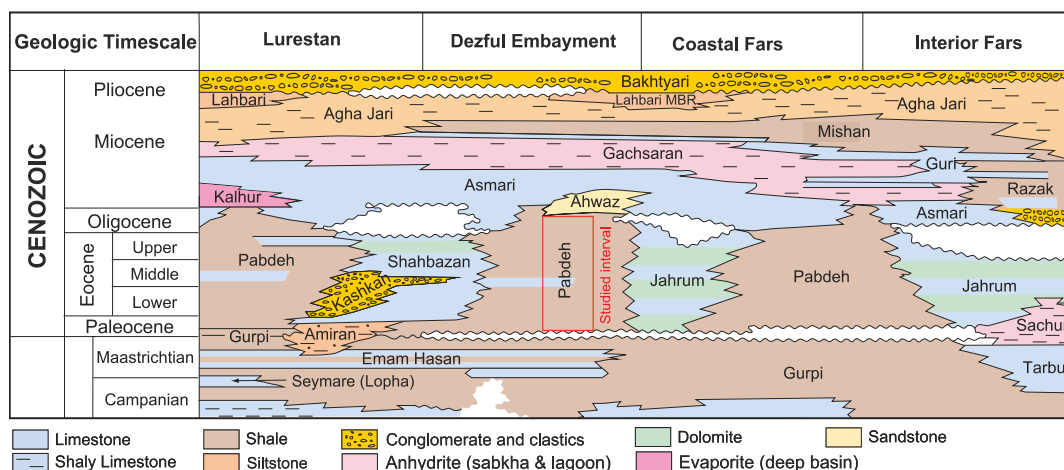
۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

سازند پابده به سن پالئوسن پسین - الیگوسن پیشین، جوان‌ترین سنگ منشأ موجود در حوضه زاگرس است (شکل ۲) و در بیشتر قسمت‌های فروافتادگی دزفول به پختگی لازم برای زایش هیدروکربن نرسیده است (Bordenave 2014, Motiei 1993). در برخی بخش‌های حوضه زاگرس، به دلیل شرایط دمایی و تدفین مناسب، این سازند در ابتدای پنجره نفت زایی قرار داشته و سهم اندکی در تغذیه مخازن آسماری داشته است (Bordenave and Hegre 2010).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی میدان نفتی سیاه‌مکان در حوضه زاگرس و چاه مورد استفاده در این مطالعه.

Fig. 1. The Geographic location of the Siah-Makan Oilfield in the Zagros basin and the approximate location of the oil well used in this study (Well#4).



شکل ۲- ستون چینه‌شناسی مربوط به سازندهای دوران سنوزوئیک در حوضه زاگرس (James and Wynd 1965).

Fig. 2. Cenozoic stratigraphic column of the Zagros basin (James and Wynd 1965).

پیشرفته ژئوشیمیایی مانند کروماتوگرافی گازی و کروماتوگرافی گازی - طیف‌سنجی جرمی استفاده شده است (Alizadeh et al. 2020). لیکن تاکنون مطالعات میکروسکوپی بر روی اجزای آلی تشکیل دهنده مواد آلی در سازند پابده صورت نگرفته است. در این مطالعه، از تلفیق نتایج پتروگرافی آلی و داده‌های پیرولیز راک - ایول برای ارزیابی ژئوشیمی آلی سازند پابده در میدان سیاه‌مکان استفاده شده است. نتایج حاصل از این مطالعه کمک مؤثری برای تعیین پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازند مذکور در

عمده مطالعات پیشین بر روی سازند پابده در حوضه زاگرس، در زمینه ویژگی‌های چینه‌شناسی و رسوب‌شناسی آن بوده است (Mohseni et al. 2011, Van Buchem et al. 2010). همچنین در سال‌های اخیر، پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازند پابده نیز با استفاده از روش‌های ژئوشیمی آلی مورد بررسی قرار گرفته است (Alizadeh et al. 2012, Alizadeh et al. 2020). شایان ذکر است که در این مطالعات، از روش‌های ژئوشیمیایی مختلفی مانند پیرولیز راک - ایول یا آنالیزهای

می‌آورد (شکل ۳) (Lafargue, Marquis and Pillot 1998). اطلاعات به دست آمده از روش پیرولیز راک - ایول، معمولاً برای ارزیابی پتانسیل هیدروکربن‌زایی، نوع ماده آلی (نوع کروژن) و همچنین بلوغ حرارتی سنگ‌های منشأ هیدروکربنی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Peters 1986, Dembicki 2009, Behar et al. 2001).

اجزای آلی آزاد شده در طول پیرولیز، اغلب توسط یک آشکارگر یونیزاسیون شعله‌ای FID اندازه‌گیری می‌شوند. پیک اول (S₁)، نمایانگر مقدار هیدروکربن‌های آزاد در نمونه است که در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس تبخیر شده و در واحد میلی‌گرم هیدروکربن در هر گرم سنگ بیان می‌شوند (Behar et al., 2001). پیک دوم (S₂)، بیانگر مقدار هیدروکربن‌هایی است که بین دمای ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجه سلسیوس در اثر تجزیه حرارتی کروژن و ترکیبات سنگین‌تر آزاد می‌شوند (Lafargue et al., 1998). پیک سوم (S₃)، نشان‌دهنده ترکیبات اکسیژن‌داری که در دمای ۳۹۰ درجه سلسیوس تجزیه شده و به صورت گاز CO₂ آزاد می‌شوند (Behar et al., 2001). دمایی که پیک S₂ در آن بیشینه خود را نشان می‌دهد با پارامتری به نام T_{max} بیان می‌شود که به عنوان شاخصی جهت ارزیابی بلوغ حرارتی نمونه سنگ منشأ استفاده می‌شود (Lafargue et al. 1998). شاخص هیدروژن (HI)، از نسبت S₂ به کل کربن آلی محاسبه می‌شود و شاخص اکسیژن (OI)، نسبت پیک S₃ به کل کربن آلی است (Behar et al., 2001).

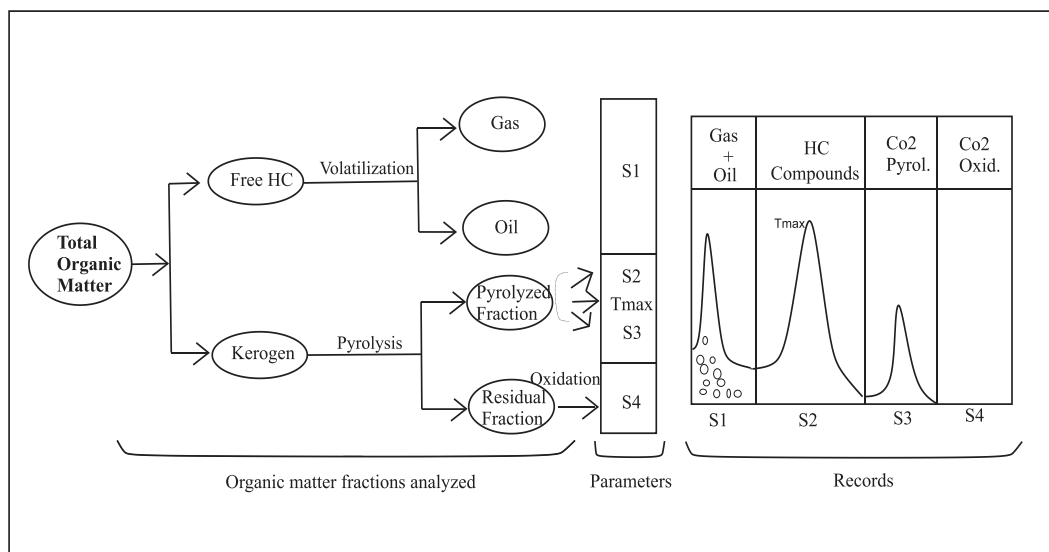
میدان مورد مطالعه نموده است. همچنین، این نتایج می‌توانند در راستای روشن‌تر شدن شرایط محیط رسوبی دیرینه سازند پابده در میدان سیاه‌مکان راهگشا باشند.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- روش پیرولیز راک - ایول

در این مطالعه، از دستگاه راک - ایول ۶ برای ارزیابی ژئوشیمیایی ۲۱ نمونه خرد خرد حفاری از سازند پابده استفاده شد که با فواصل منظم حدود ۲۰ متری از چاه شماره ۴ میدان سیاه‌مکان جمع آوری شدند (جدول ۱). دستگاه راک - ایول ۶ یکی از سریع‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین روش‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی سنگ‌های منشأ می‌باشد (Behar, Beaumont and Penteado 2001). برای انجام آنالیز راک - ایول در این مطالعه، ابتدا هر گونه قطعات نابرجا مانند خرده‌های میکا و براده آهن از نمونه‌های خرده‌های حفاری جداسازی شدند. سپس در حدود ۷۰ میلی‌گرم از نمونه‌های آماده شده در داخل هاون چینی پودر شده و طبق دستورالعمل‌های استاندارد مورد آنالیز قرار گرفتند (Espitalié et al. 1977, Peters 1986).

به‌طور کلی، پیرولیز راک - ایول اطلاعاتی با ارزشی را در مورد کمیت، کیفیت و بلوغ حرارتی مواد آلی موجود در سنگ‌های رسوبی فراهم می‌آورد (Peters and Cassa 1994). این روش اطلاعاتی را در مورد اجزای مختلف از کل ماده آلی در قالب پارامترهای ژئوشیمیایی و نسبت‌های محاسبه شده فراهم



شکل ۳- نمایش اجزای مختلف کل مواد آلی آنالیز شده در روش پیرولیز راک - ایول و پارامترهای ثبت‌شده (Lafargue et al., 1998).

Fig. 3. Schematic illustration of the various fractions of the organic matter analyzed in the Rock-Eval pyrolysis method and the recorded geochemical parameters (Lafargue et al., 1998).

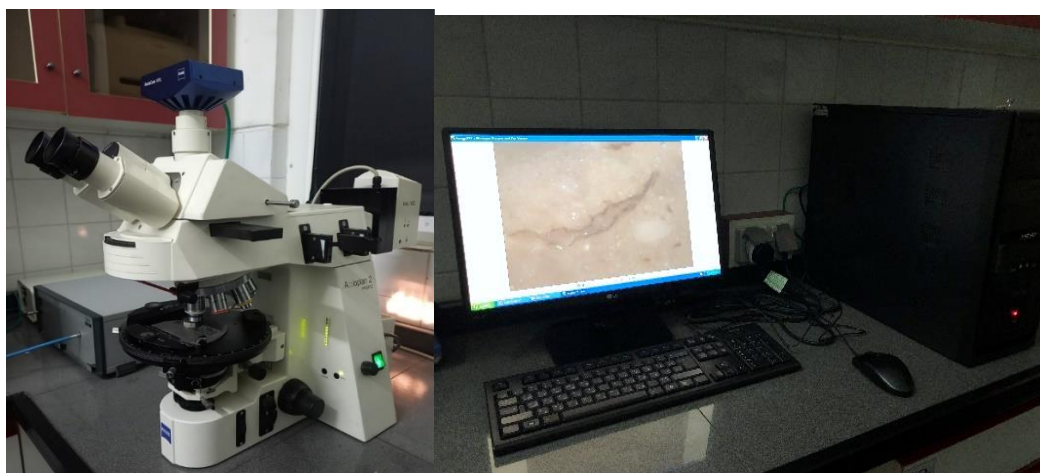
۳-۲- روش پتروگرافی آلی

پتروگرافی آلی، مطالعه اجزای آلی است که به عنوان ماسرال در سنگ‌های رسوبی شناخته می‌شوند (Taylor et al. 1998). ماسرال‌ها، قطعات قابل تشخیصی از مواد آلی رسوبی هستند که بر اساس خواص نوری و ویژگی‌های مورفولوژیکی خاصی که دارند در زیر میکروسکوپ قابل تشخیص هستند (Stach et al. 1982). روش‌های میکروسکوپی، اطلاعات مفیدی را در مورد کیفیت ماده آلی در سنگ‌های رسوبی فراهم می‌آورند (Bustin et al. 1985). سه گروه اصلی ماسرال‌ها در سنگ‌های رسوبی تشخیص داده شده است (لیپتینایت‌ها، ویتربینایت‌ها و اینرتینایت‌ها) (Stach et al., 1982; Taylor et al., 1998). انجام مطالعات پتروگرافی آلی بر روی سنگ‌های منشأ هیدروکربنی، دارای تفاوت‌های عمده با مطالعه زغال‌سنگ‌ها می‌باشد (Suárez-Ruiz et al. 2012). به‌طور کلی سنگ‌های منشأ هیدروکربنی دارای دو نوع اصلی از مواد آلی هستند که عبارتند از مواد آلی اولیه و مواد آلی ثانویه (Hackley and Cardott 2016). مواد آلی اولیه (شامل مواد آلی آمورف، آلزینایت، ویتربینایت و اینرتینایت)، تحت تأثیر تولید آلی اولیه در محیط‌های رسوبی ایجاد شده‌اند (Hackley, Valentine and Hatcherian 1996, Hunt 1996). در مقایسه، مواد آلی ثانویه، از دگرسانی مواد آلی اولیه شکل می‌گیرند (Mastalerz, Drobnik and Stankiewicz 2018). مواد آلی آمورف در سنگ‌های منشأ به مواد آلی بدون ساختار گفته می‌شود که از فیتوپلانکتون‌های تجزیه‌شده، رزین‌های گیاهی و مواد آلی

آمورف از منشأ باکتریایی مشتق می‌شوند (Mastalerz et al., 2018). این مواد آلی، در نور انعکاسی سفید و روغن ایمرسیون، به رنگ قهوه‌ای تیره مایل به سیاه دیده می‌شوند (Hackley and Cardott, 2016). ویتربینایت و اینرتینایت هر دو از گیاهان خشکی مشتق می‌شوند و نشانگر ورود مواد آلی قاره‌ای به محیط رسوبی هستند (Hackley et al., 2018). مواد آلی اولیه در اثر حرارت، به مواد آلی ثانویه تبدیل می‌شوند که مهم‌ترین آنها Solid bitumen است (Hackley et al., 2018). این مواد آلی معمولاً بصورت بین ذره‌ای فضای بین کانی‌ها را پر می‌کنند و سرشت ثانویه دارند (Mastalerz et al., 2018).

در این مطالعه، با بررسی مقدماتی داده‌های حاصل از پیرولیز راک - ایول مربوط به ۲۱ نمونه برداشته شده از سازند پابده، تعداد ۸ نمونه برای انجام مطالعات پتروگرافی آلی انتخاب شدند. بدین منظور، قرص‌های صیقلی از نمونه‌ها تهیه شده و در زیر میکروسکوپ انعکاسی مورد مطالعه قرار گرفتند. برای تهیه قرص‌های صیقلی از نمونه‌های مورد مطالعه، ابتدا خرده‌های حفاری در داخل چسب اپوکسی رزین قرار داده شده و سپس با رعایت دستورالعمل‌های استاندارد (Bustin et al., 1985) با دقت صیقل داده شدند.

قرص‌های صیقلی تهیه شده از نمونه‌های سازند پابده با استفاده از میکروسکوپ انعکاسی مدل Zeiss-Axioplan-II موجود در آزمایشگاه زمین‌شناسی نفت دانشگاه شهید چمران اهواز با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر و به حالت غوطه‌ور در روغن ایمرسیون مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۴).



شکل ۴- میکروسکوپ Axioplan -II مجهز به دوربین عکس برداری در آزمایشگاه نفت دانشگاه شهید چمران اهواز.

Fig. 4. Axioplan-II microscope imaging system in the petroleum geology laboratory of the Shahid Chamran University of Ahvaz.

۴- نتایج

۴-۱- نتایج حاصل از پیرولیز راک - ایول

نتایج حاصل از آنالیز راک - ایول نمونه‌های برداشته شده از سازند پابده در میدان نفتی سیاه‌مکان، نشان دهنده حضور

مقادیر قابل توجهی از مواد آلی در داخل این سازند هستند (جدول ۱). همچنین، مقادیر به‌دست آمده برای پارامتر S_2 (جدول ۱)، بیانگر پتانسیل هیدروکربن‌زایی قابل توجه برای این سازند در میدان مورد مطالعه هستند.

جدول ۱. نتایج حاصل از پیرولیز راک - ایول نمونه‌های سازند پابده در میدان نفتی سیاه‌مکان (نمونه‌های انتخاب شده برای مطالعات پتروگرافی آلی، به‌صورت پررنگ نمایش داده شده‌اند).

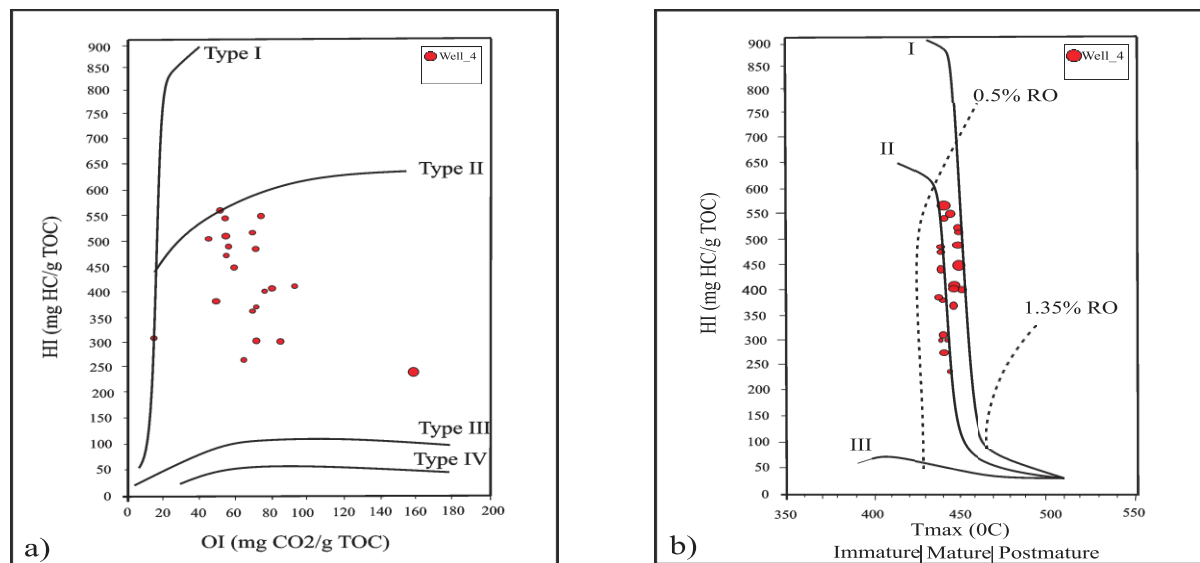
Table 1. Results from Rock-Eval pyrolysis of the Pabdeh samples from the Siah-Makan Oilfield (samples selected for organic petrographic studies are highlighted in bold).

Oilfield	Formation	Depth (m)	PI	S_1 (mg HC/g rock)	S_2 (mg HC/g rock)	T_{max} (C)	HI (mg HC/g TOC)	OI (mg CO ₂ /g TOC)	TOC (wt%)
Siah-Makan	Pabdeh	3522	0.64	5.08	2.91	444	239	160	1.22
		3546	0.62	8.12	5.05	440	316	14	1.6
		3559	0.62	7.03	4.36	442	297	84	1.47
		3575	0.68	11.04	5.12	440	272	67	1.88
		3590	0.53	6.57	5.81	439	375	63	1.55
		3630	0.61	6.53	4.23	438	300	73	1.41
		3650	0.46	8.63	10.07	439	482	73	2.09
		3670	0.5	16.44	16.52	438	505	44	3.27
		3684	0.59	13.16	9.21	438	384	53	2.4
		3690	0.49	10.64	10.96	441	472	54	2.32
		3710	0.42	11.63	15.96	440	564	52	2.83
		3732	0.37	6.29	10.58	443	548	75	1.93
		3750	0.46	14.22	16.87	440	539	54	3.13
		3790	0.45	11.46	14.06	450	511	54	2.65
		3810	0.4	8.23	12.11	447	521	71	2.22
		3832	0.52	11.99	10.93	447	448	61	2.44
		3850	0.48	11.07	11.81	446	486	54	2.43
3870	0.44	7.79	9.99	448	400	75	2		
3877	0.55	10.2	8.49	446	406	79	2.09		
3890	0.58	10.26	7.41	444	371	70	2		
3900	0.51	7.26	7.06	445	410	94	1.72		

(شکل ۶). با توجه به این تغییرات ملاحظه می‌شود که مقادیر بالای TOC عمدتاً منطبق با مقادیر بالای S_1 و S_2 نیز هستند (شکل ۶). البته لازم به ذکر است که بالا بودن مقدار هیدروکربن‌های آزاد در سنگ‌های منشأ می‌تواند باعث بروز خطا در تفسیر داده‌های حاصل از پیرولیز راک - ایول گردد (Dembicki, 2009; Hunt, 1996; Peters, 1986). به همین دلیل، اظهار نظر دقیق‌تر در خصوص ویژگی‌های ژئوشیمیایی بخش‌های غنی از ماده آلی در سازند پابده در میدان مورد مطالعه، نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر با استفاده از روش‌های پتروگرافی آلی می‌باشد

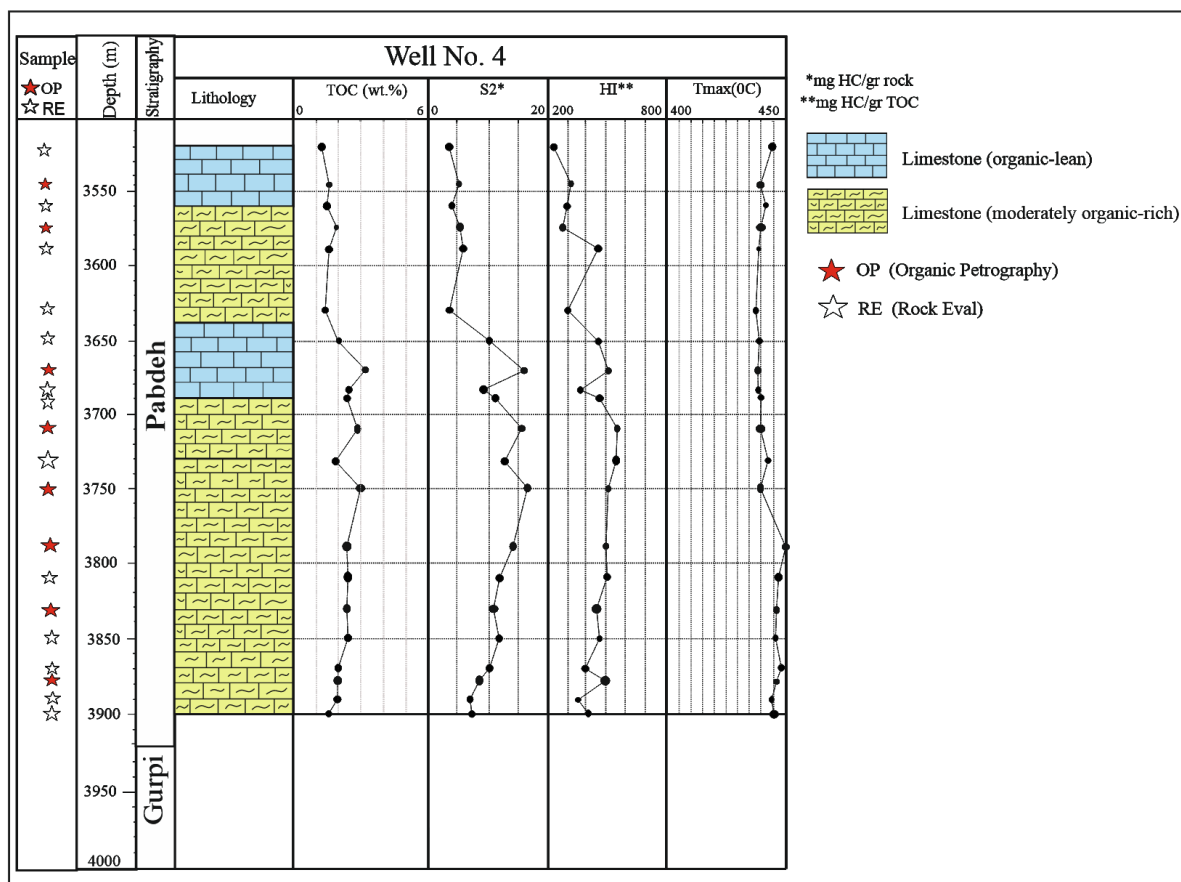
برای تعیین نوع کروژن موجود در سازند پابده از نمودار HI در مقابل OI استفاده شده است که نشان می‌دهد نمونه‌های مورد مطالعه دارای کروژن نوع II و III هستند (شکل ۵a). مقادیر بالاتر از ۴۳۵ درجه برای پارامتر T_{max} ، نشان می‌دهند که نمونه‌های مورد مطالعه با رسیدن به مرحله ی کاتائز، مسیر بلوغ حرارتی را طی کرده‌اند (جدول ۱). این نکته با استفاده از نمودار HI در مقابل T_{max} نیز قابل تأیید است (شکل ۵b).

در راستای قائم، داده‌های حاصل از آنالیز راک - ایول نمونه‌های سازند پابده تغییرات قابل توجهی را از خود به نمایش می‌گذارند



شکل ۵- (a) نمودار HI در مقابل OI جهت تعیین نوع ماده آلی و (b) نمودار HI در مقابل Tmax برای ارزیابی بلوغ حرارتی نمونه‌های مورد مطالعه سازند پابده در میدان سیاه مکان.

Fig. 5. (a) HI versus OI diagram for defining the type of organic matter and (b) HI versus Tmax diagram for assessing the thermal maturity of the studied samples from the Pabdeh Formation in the Siah-Makan Oilfield.



شکل ۶- تغییرات عمودی در داده‌های حاصل از پیرولیز راک - ایول سازند پابده در چاه شماره ۴ از میدان نفتی سیاه‌مکان.

Fig. 6. Vertical profile indicating variations of the Rock-Eval pyrolysis data in the Pabdeh Formation of the Siah-Makan Oilfield (Well#4).

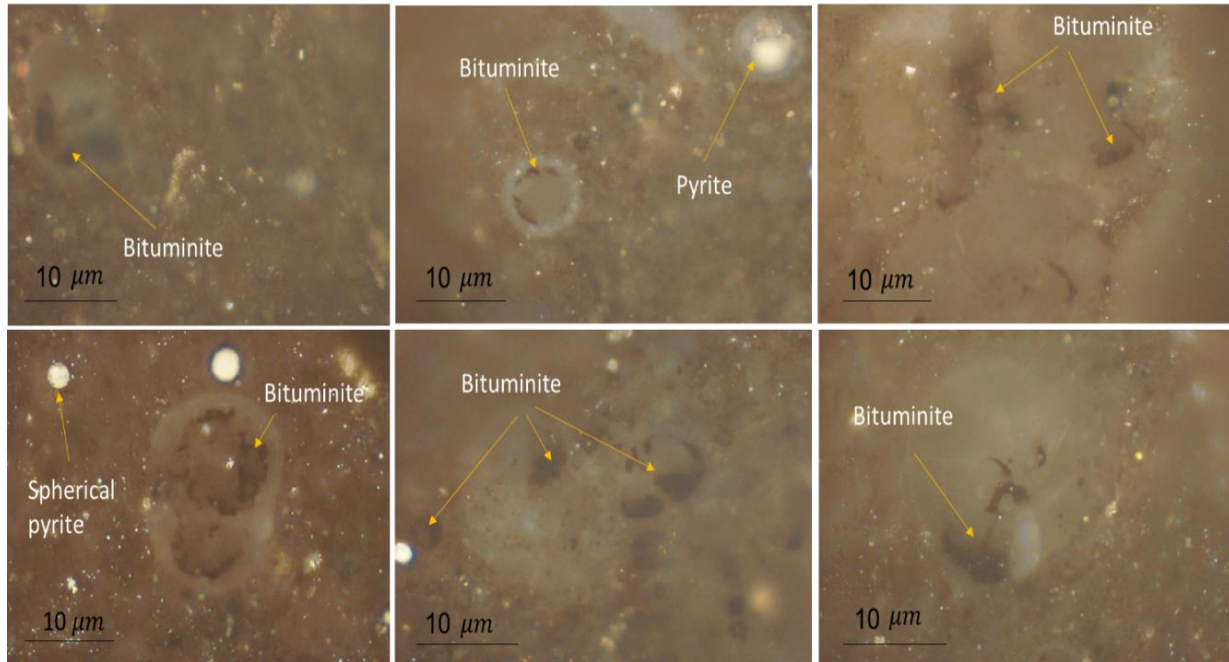
۴-۲- نتایج حاصل از پتروگرافی آلی

بعد از بررسی سازند پابده به وسیله روش پیرولیز راک - ایول، برای ارزیابی بهتر نوع ماده آلی موجود در داخل این سازند از مطالعات میکروسکوپی استفاده شده است. با بررسی‌های میکروسکوپی نمونه‌های انتخاب شده از سازند پابده، مشخص شده است که قرائت‌های بالای نشان داده شده در بخش‌های میانی این سازند (شکل ۶)، لزوماً نشانگر پتانسیل هیدروکربن-زایی بالا در این بخش‌ها نیستند. بر اساس نتایج حاصل از مطالعات میکروسکوپی، این بخش‌ها عمدتاً دارای بیتومینایت هستند که به صورت ثانویه حجره‌های فسیلی را پر کرده‌اند (شکل ۷).

واضح است که حضور بیتومینایت در حجره‌های فسیلی در نمونه‌های مطالعه شده می‌تواند نتایج مربوط به پیرولیز راک - ایول را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، برای ارزیابی صحیح خصوصیات ژئوشیمیایی سازند پابده در میدان سیاه مکان، بایستی از تلفیق نتایج پتروگرافی آلی و پیرولیز راک - ایول بهره گرفت. بر همین اساس، نتایج حاصل از مطالعات پتروگرافی آلی

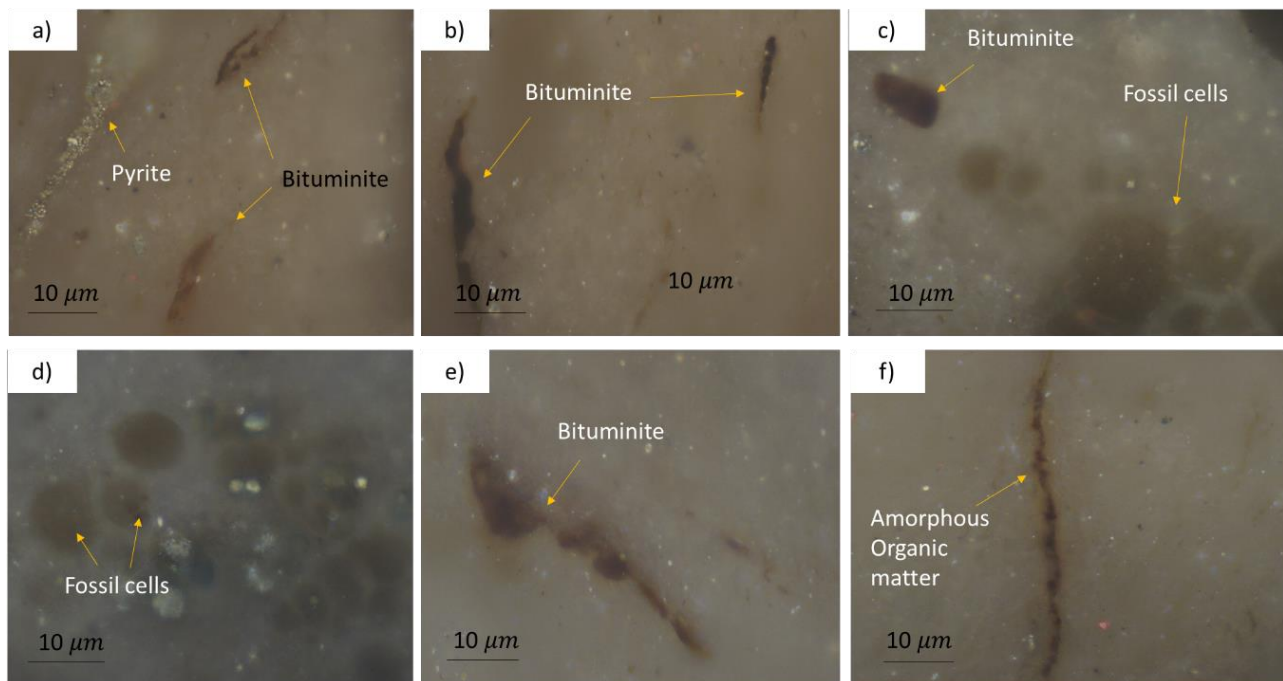
نشان می‌دهند که نمونه‌هایی که دارای TOC بالایی هستند، عمدتاً دارای حجره‌های فسیلی هستند که با بیتومینایت پر شده‌اند. همچنین این نمونه‌ها از نظر ترکیب سنگ شناسی عمدتاً از آهک با رنگ روشن تشکیل شده‌اند که خود بیانگر برقراری شرایط اکسیک در محیط ته نشینی دیرینه آنها می‌باشد (شکل ۷). در نتیجه، می‌توان بیان داشت که ماده آلی موجود در سازند پابده در میدان سیاه مکان، عمدتاً از بیتومینایت تشکیل شده است که به صورت قرائت‌های بالایی از S1 ظهور پیدا می‌کند. بدین ترتیب، بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که سازند پابده در میدان سیاه مکان، پتانسیل قابل توجهی برای زایش هیدروکربن ندارد.

بررسی نمونه‌های مختلف از سایر بخش‌های سازند پابده همچنین نشان می‌دهد که این بخش‌ها دارای مقادیر بسیار اندکی از مواد آلی آمورف هستند و عمدتاً دارای ترکیب سنگ شناسی آهکی با رنگ روشن هستند (شکل ۸). این مشاهدات نشان می‌دهند که سازند پابده در میدان مورد مطالعه در یک محیط اکسیک ته نشین شده است که امکان حفظ شدگی مواد آلی در آن پائین بوده است (شکل ۸).



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های سازند پابده در عمق ۳۶۷۰ متری (جدول ۱)، که نشان دهنده حجره‌های فسیلی پر شده با بیتومینایت است (میدان دید مستغرق در روغن امرسیون و بزرگنمایی ۱۰۰ برابر).

Fig. 7. Microscopic photomicrographs obtained for Pabdeh sample from 3670 m (Table 1) indicating abundant fossil chambers filled with bituminite (oil immersion view 100×).



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های سازند پابده در عمق ۳۸۳۲ متری (جدول ۱)، که نشان‌دهنده مقادیر کمی از مواد آلی آمورف در زمینه آهکی روشن هستند (میدان دید مستغرق در روغن امرسیون و بزرگنمایی ۱۰۰ برابر).

Fig. 8. Microscopic photomicrographs obtained for the Pabdeh sample from 3832 m (Table 1) indicating negligible amounts of amorphous organic matter in a light-colored matrix (oil immersion view 100×).

۵- نتیجه‌گیری

اکسیک ته‌نشین شده‌اند و دارای مقدار قابل توجهی بیتومینایت در داخل حجره‌های فسیل هستند. به همین دلیل، بالا بودن قرائت‌های TOC نمی‌تواند به‌عنوان معیاری برای غنی بودن رخساره آلی سازند پابده در نظر گرفته شود. نتایج حاصل از این مطالعه پیشنهاد می‌کند که بهتر است در مطالعات آینده برای ارزیابی ژئوشیمیایی سازند پابده از تلفیق نتایج پیرولیز راک - ایول در کنار مطالعات پتروگرافی آلی استفاده شود.

تشکر و قدردانی

از مدیریت محترم مرکز زمین‌شناسی و زمین‌شناسی نفت (PGGRC)، جناب آقای دکتر بهرام علیزاده، بخاطر در اختیار قرار دادن امکانات آزمایشگاهی تشکر و قدردانی می‌شود.

طبق نتایج به‌دست آمده از پیرولیز راک - ایول و پتروگرافی آلی، پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازند پابده در میدان سیاه‌مکان ضعیف تا خوب است. بر اساس نتایج حاصل از پیرولیز راک - ایول ۶، نوع کروژن موجود در سازند پابده در میدان نفتی سیاه-مکان مخلوطی از کروژن‌های نوع II و III می‌باشد. این نکته بر اساس نمودارهای HI در برابر OI و HI در برابر T_{max} تأیید می‌شود. بررسی داده‌های حاصل از پیرولیز راک - ایول در راستای قائم نشان می‌دهد که در سازند مورد مطالعه مقادیر بالای TOC عموماً با مقادیر بالای S_1 همراه هستند. مطالعات پتروگرافی آلی بر روی نمونه‌های سازند پابده در میدان سیاه-مکان بخوبی نشان می‌دهد که نمونه‌های مذکور، در محیط

مراجع

- Alizadeh, B., Opera, A., Kalani, M., Alipour, M., 2020. Source rock and shale oil potential of the Pabdeh Formation (Middle-Late Eocene) in the Dezful Embayment, southwest Iran. *Geologica Acta* 18, 14-22. <https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2020.18.15>.
- Alizadeh, B., Sarafdokht, H., Rajabi, M., Opera, A., Janbaz, M., 2012. Organic geochemistry and petrography of Kazhdumi (Albian–Cenomanian) and Pabdeh (Paleogene) potential source rocks in southern part of the Dezful Embayment, Iran. *Organic Geochemistry* 49, 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2012.05.004>.

- Behar, F., Beaumont, V., Penteado, H.D.B., 2001. Rock-Eval 6 technology: performances and developments. *Oil & Gas Science and Technology* 56, 111-134. <https://doi.org/10.2516/ogst:2001013>.
- Bordenave, M., Hegre, J.J.G.S., 2010. Current distribution of oil and gas fields in the Zagros Fold Belt of Iran and contiguous offshore as the result of the petroleum systems. Geological Society, London, Special Publications 330, 291-353. <https://doi.org/10.1144/SP330.14>.
- Bordenave, M.L., 2014. Petroleum systems and distribution of the oil and gas fields in the Iranian part of the Tethyan region. In: Marlow, L., Kendall, C. Yose, L. (Eds.), *Petroleum systems of the Tethyan region*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 106, 505-540. <https://doi.org/10.1036/13431865M1063614>.
- Bustin, R.M., Cameron, A., Grieve, D., Kalkreuth, W., 1985. *Coal Petrology-its principles, methods, and applications* (Geological Association of Canada, Short Course Notes, Volume 3). P. 230.
- Dembicki, H.J. 2009. Three common source rock evaluation errors made by geologists during prospect or play appraisals. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 93, 341-356. <https://doi.org/10.1306/10230808076>.
- Espitalié, J., Laporte, J.L., Madec, M., Marquis, F., Leplat, P., Paulet, J., Boutefeu, A., 1977. Méthode rapide de caractérisation des roches mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution. *Oil & Gas Science and Technology* 32, 23-42. <https://doi.org/10.2516/OGST:1977002>.
- Hackley, P.C., Cardott, B.J., 2016. Application of organic petrography in North American shale petroleum systems: A review. *International Journal of Coal Geology* 163, 8-51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2016.06.010>.
- Hackley, P.C., Valentine, B.J., Hatcherian, J.J., 2018. On the petrographic distinction of bituminite from solid bitumen in immature to early mature source rocks. *International Journal of Coal Geology* 196, 232-245. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.06.004>.
- Hunt, J.M., 1996. *Petroleum geochemistry and geology* (WH Freeman and Company). P. 743
- James, G., Wynd, J. 1965. Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 49, 2182-2245. DOI: <https://doi.org/10.1306/A663388A-16C0-11D7-8645000102C1865D>.
- Lafargue, E., Marquis, F., Pillot, D., 1998. Rock-Eval 6 applications in hydrocarbon exploration, production, and soil contamination studies. *Oil & Gas Science and Technology* 53, 421-437. [10.2516/ogst:1998036](https://doi.org/10.2516/ogst:1998036).
- Mastalerz, M., Drobnik, A., Stankiewicz, A., 2018. Origin, properties, and implications of solid bitumen in source-rock reservoirs: A review. *International Journal of Coal Geology* 195, 14-36. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.05.013>.
- Mohseni, H., Behbahani, R., Khodabakhsh, S., Atashmard, Z., 2011. Depositional environments and trace fossil assemblages in the Pabdeh Formation (Paleogene), Zagros Basin, Iran. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen* 262, 59-77. <https://doi.org/10.1127/0077-7749/2011/0185>.
- Motiei, H., 1993. Stratigraphy of Zagros. In *Treatise of Geology of Iran*, edited by Hushmandzadeh, A., Tehran: Geological Survey of Iran. P. 536.
- Peters, K. 1986. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 70, 318-329. <https://doi.org/10.1306/94885688-1704-11D7-8645000102C1865D>.
- Peters, K.E., Cassa, M.R., 1994. Applied source rock geochemistry. In: Magoon, L. Dow, W.G. (Eds.), *Petroleum system-From source to trap*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 96, 93-120. <https://doi.org/10.1306/M60585C5>.
- Stach, E., Mackowsky, M.T., Teichmüller, M., Taylor, G., Chandra, D., Teichmüller, R., 1982. *Stach's textbook of coal petrology* (Gebrüder, Borntraeger: Berlin). P. 415.
- Suárez-Ruiz, I., Flores, D., Mendonça Filho, J.G., Hackley, P.C., 2012. Review and update of the applications of organic petrology: Part 2, geological and multidisciplinary applications. *International Journal of Coal Geology* 98, 73-94. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.03.005>.
- Taylor, G.H., Teichmüller, M., Davis, A., Diessel, C., Littke, R., Robert, P., 1998. *Organic petrology*. p. 704.
- Van Buchem, F., Allan, T., Laursen, G., Lotfpour, M., Moallemi, A., Monibi, S., Motiei, H., Pickard, N., Tahmasbi, A., Vedrenne, V., 2010. Regional stratigraphic architecture and reservoir types of the Oligo-Miocene deposits in the Dezful Embayment (Asmari and Pabdeh Formations) SW Iran. Geological Society, London, Special Publications 329, 219-263. <https://doi.org/10.1144/SP329.10>.