

Research Article

Combining Rock-Eval pyrolysis and organic petrographic techniques to study the organic facies of the Pabdeh Formation in the Rag-e-Sefid Oilfield, SW Iran

Marziyeh Khazami¹, Majid Alipour^{1*}

1- Department of Petroleum Geology and Sedimentary Basins, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Keywords: *Organic Facies, Pabdeh Formation, Rag-e-Sefid Oilfield, Organic Petrography, Rock-Eval 6 Pyrolysis*

1- Introduction

Searching for new hydrocarbon resources is an inevitable necessity considering the exhaustibility of the discovered resources. Therefore, the concern of exhausting the resources that have been discovered so far prompts petroleum geologists to look for new petroleum systems and resources (Davies and Simmons, 2021). The most critical element for the creation of a petroleum system is the ability of a source rock to generate sufficient amounts of hydrocarbons (Hunt, 1996). The Zagros basin located in the southwest of Iran is one of the most prolific oil-producing basins in the Middle East and the world (Bordenave, 2014). Three geomorphological zones along the Iranian part of the Zagros fold and thrust belt include the Fars region, the Dezful Embayment, and the Lurestan region. These zones exhibit contrasting differences in terms of basin geometry and tectono-stratigraphic evolution. The Dezful Embayment is a basin with significant subsidence, which is known as a low-lying alluvial plain covered with Tertiary sediments (Motiei, 1993). The Reg-e-Safid Oilfield, located in the South Dezful Embayment, is one of Iran's most important oil and gas production fields. This field was discovered in 1964 by drilling well number 1 (NIOC, unpublished).

The Pabdeh Formation is known as an active source rocks only in limited parts of Zagros basin, where it could play a secondary role in the formation of hydrocarbon accumulations in some fields (Bordenave and Huc, 1995). In this study, by combining the results of organic petrography and Rock-Eval pyrolysis, a more detailed investigation of the organic geochemical characteristics of the Pabdeh Formation in the Reg-e-Sefid Oilfield is carried out.

2- Material and methods

In this study, 4 cutting samples from the Pabdeh Formation in well No. 99 of Reg-e-Sefid Oilfield have been selected. These samples are used to evaluate the organic geochemical characteristics of the studied formation by a combination of Rock-Eval pyrolysis and organic petrographic methods.

3- Results and discussions

3-1- Rock-Eval pyrolysis results

Diagrams of HI versus OI for the studied samples indicates that the kerogen in the studied samples is of type II/III mixed origin (Fig. 1a). This is consistent with the diagrams of HI versus Tmax (Fig. 1b). These diagrams additionally indicate that the studied samples are in the early stages of hydrocarbon generation (Fig. 1b).

3-2- Organic petrography results

After the analysis of Pabdeh Formation by Rock-Eval pyrolysis, organic petrographic studies were also carried out in order to better evaluate the organic geochemistry of the studied samples. The detectable organic

* Corresponding author: alipour@scu.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2023.43221.2350

Received: 2023-03-10

Accepted: 2023-06-06

components in these samples mainly included amorphous organic matter (AOM), bituminite, framboidal Pyrite, euhedral pyrite and fossil.

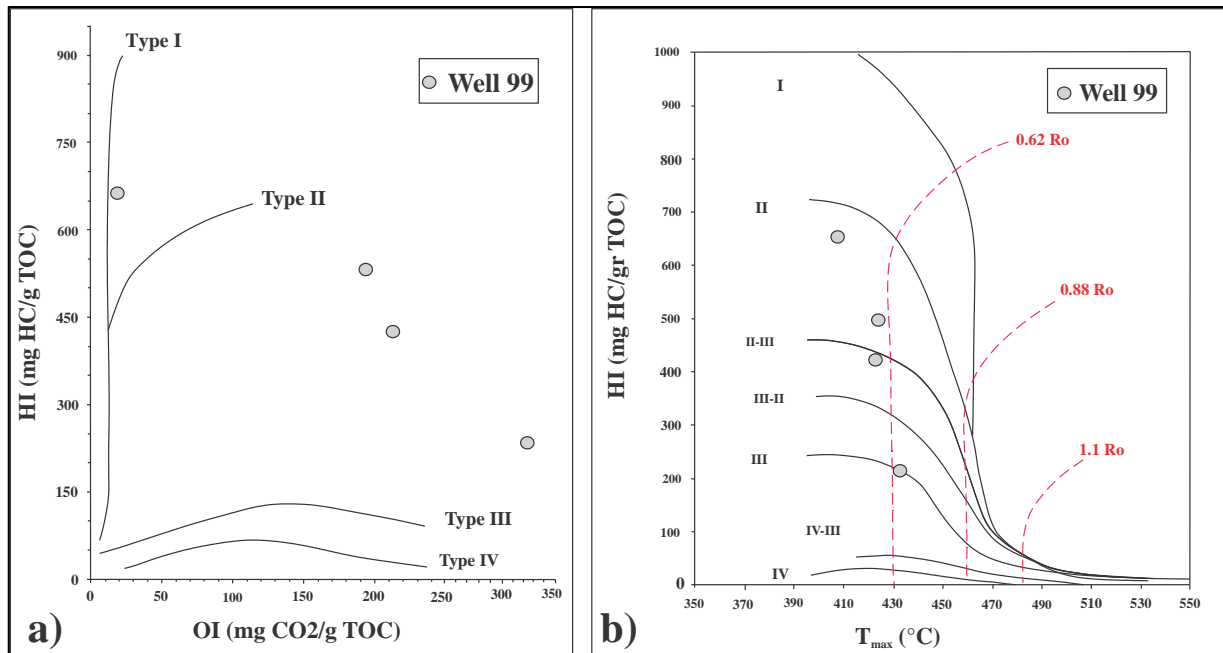


Fig. 1. HI versus OI diagram indicating the type of organic matter (a) and of HI versus T_{max} diagram (b) indicating thermal maturity of the studied samples from the Pabdeh Formation in the Rag-e-Sefid Oilfield.

Organic petrographic observations indicate that the Pabdeh Formation in Reg-e-Sefid Oilfield has organic-rich and organic-poor facies. The organic-rich part of Pabdeh Formation contain abundant AOM, bituminite and framboidal pyrite. These observations are consistent with anoxic depositional conditions, which controlled the preservation of primary organic matter in the mentioned parts. The organic-poor facies of Pabdeh Formation have negligible amounts of AOM along with abundant planktonic fossils and secondary pyrite. These points suggest that the mentioned parts were deposited under oxic conditions.

4- Conclusions

Based on the results obtained from Rock-Eval pyrolysis, the Pabdeh Formation in well number 99 of the Reg-e-Sefid Oilfield contains Type II/III kerogen in the initial stages of hydrocarbon generation. The presence of bituminite in the studied samples indicates the beginning of hydrocarbon generation from organic matter inside the Pabdeh Formation in the Reg-e-Sefid Oilfield. This point is in complete agreement with the results obtained from Rock-Eval pyrolysis. Also, combining the results of Rock-Eval pyrolysis and organic petrography shows that Pabdeh Formation has organic-rich facies surrounded by organic-poor facies. The organic-rich part of the Pabdeh Formation has a high potential for hydrocarbon generation with a high concentration of AOM. This fact can indicate the better preservation of organic matter in the mentioned parts, which was controlled by anoxic conditions in the paleo-depositional environments of the Pabdeh Formation.

References

- 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. <http://doi.org/10.1036/13431865M1063614>.
- Bordenave, M. L., Huc, A.Y., 1995. The Cretaceous source rocks in the Zagros foothills of Iran: Revue Institut Français du Pétrole 50, 727-753. <https://doi.org/10.2516/ogst:1995044>.
- Davies, A., Simmons, M.D., 2021. Demand for 'advantaged' hydrocarbons during the 21st century energy transition: Energy Reports 7, 4483-4497. . <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.013>.

Hunt, J.M., 1996. Petroleum Geochemistry and Geology. WH Freeman, P. 743

Motiei, H., 1993. Stratigraphy of Zagros. In Hushmandzadeh, A., (Ed.), Treatise of Geology of Iran, Volume 1: Tehran, Geological Survey of Iran, P. 536.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Khazami, M., Alipour, M., 2024. Combining Rock-Eval pyrolysis and organic petrographic techniques to study the organic facies of the Pabdeh Formation in the Rag-e-Sefid Oilfield, SW Iran. Adv. Appl. Geol. 14(1), 91-105.

DOI: 10.22055/AAG.2023.43221.2350

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_18600.html

©2024 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

تلفیق روش‌های پیرولیز راک - ایول و پتروگرافی آلی برای مطالعه‌ی رخساره‌ی آلی سازند پابده در میدان نفتی رگ سفید، جنوب غرب ایران

مرضیه خزامی

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

مجید علیپور*

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

* alipour@scu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۹

چکیده

در این مطالعه رخساره‌ی آلی و محیط رسوبی دیرینه‌ی سازند پابده در میدان نفتی رگ سفید واقع در فروافتادگی دزفول جنوبی مورد مطالعه قرار گرفته است. با وجود مطالعات پیشین انجام شده بر روی سازند پابده، اطلاعات کمی در مورد رخساره‌ی آلی و محیط رسوبی دیرینه‌ی آن وجود دارد. بدین منظور، تعداد ۴ نمونه از سازند پابده در عمق‌های مختلف از چاه شماره‌ی ۹۹ میدان نفتی رگ سفید انتخاب و با استفاده از روش‌های پیرولیز راک - ایول و پتروگرافی آلی مورد بررسی قرار گرفتند. دیاگرام HI در مقابل T_{max} نشان داد که کروژن موجود در سازند پابده مخلوطی از کروژن نوع II و III، بوده و در مراحل اولیه‌ی پنجره‌ی نفتی قرار دارد. نتایج پتروگرافی آلی نشان داد که بخش میانی سازند پابده در میدان مورد مطالعه دارای رخساره‌ی غنی از ماده‌ی آلی است که توسط رخساره‌های فقیر از ماده‌ی آلی احاطه شده است. رخساره‌ی غنی از ماده‌ی آلی عمدتاً دارای ماده‌ی آلی آمورف، بیتومینایت و پیریت فرمبوتیدال است. این در حالیست که رخساره‌های فقیر از ماده‌ی آلی غالباً دارای مقدار ناچیزی از ماده‌ی آلی آمورف بوده و همچنین پیریت‌های آنها به شکل ائوهدرال و ثانویه هستند. بر اساس مشاهدات و نتایج بدست آمده، بخش غنی از ماده‌ی آلی سازند پابده در محیطی با شرایط احیایی نهشته شده و سازند پابده در این بخش دارای پتانسیل قابل توجهی برای زایش هیدروکربن است.

واژه‌های کلیدی: رخساره‌ی آلی، سازند پابده، میدان رگ سفید، پتروگرافی آلی، پیرولیز راک - ایول

۱- مقدمه

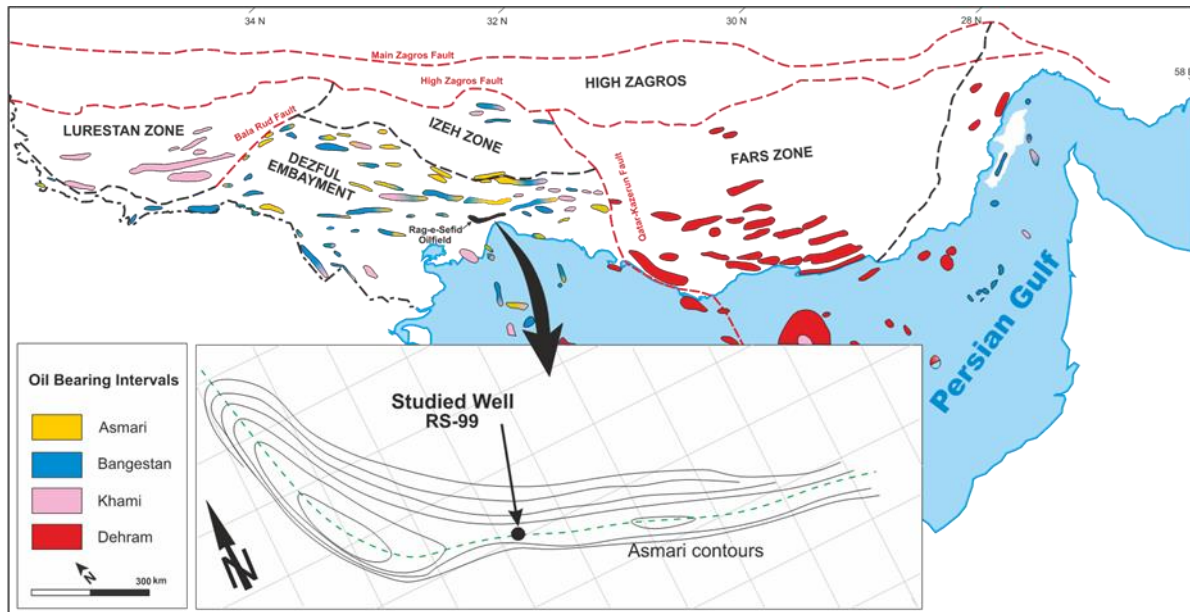
پی‌جویی برای دستیابی به ذخایر جدید هیدروکربنی، باتوجه به پایان پذیر بودن ذخایر کشف شده ضرورتی اجتناب ناپذیر است. لذا دغدغه‌ی اتمام ذخایری که تاکنون کشف شده، زمین‌شناسان نفتی را بر آن می‌دارد که در جستجوی سیستم‌های نفتی و ذخایر جدید برآیند (Davies and Simmons, 2021).

حوضه‌ی زاگرس واقع در جنوب غرب ایران یکی از بارورترین حوضه‌های تولید کننده‌ی نفت در خاورمیانه و جهان محسوب می‌شود (Bordenave, 2014). حیاتی‌ترین عنصر برای ایجاد یک سیستم نفتی، توانایی یک سنگ منشاء در زایش مقادیر کافی هیدروکربن است (Hunt, 1996). کمربند چین خورده‌ی زاگرس با وسعتی حدود ۲۰۰۰ کیلومتر شامل مخازن هیدروکربنی متعدد و فعالیت‌های تکتونیکی بسیار جوان

می‌باشد (Sepehr and Cosgrove, 2004, 2005). سه زون ژئومورفولوژیکی در امتداد بخش ایرانی کمربند چین خورده‌ی ساده‌ی زاگرس شامل ناحیه‌ی فارس، فروافتادگی دزفول و ناحیه‌ی لرستان است که تفاوت آنها مربوط به هندسه‌ی حوضه و تغییرات لیتولوژی می‌باشد (شکل ۱). این مناطق بخشی از حاشیه‌ی قاره‌ای پلتفرم عربی هستند و در حال حاضر توسط زون‌های گسلی با روند شمالی - جنوبی (ایذه و کارون) و شرقی - غربی (بالارود) از هم جدا می‌شوند (Alavi, 2004; Sherhati and Letouzey, 2004). این زون‌های گسلی نقش مهمی در کنترل رسوبگذاری حوضه در ترشیری بازی کرده و در نتیجه، این مناطق توالی رسوبی متفاوتی نسبت به همدیگر دارند (Alipour, 2023). حوضه‌ی فروافتادگی دزفول یک حوضه با فرونشست قابل توجه است که به صورت یک دشت آبرفتی کم

شمسی شناسایی گردیده و سرانجام در سال ۱۳۴۳ با حفر چاه شماره ۱ به مرحله بهره‌برداری رسید (NIOC, unpublished).

ارتفاع پوشیده شده با رسوبات ترشیاری شناخته می‌شود (Motiei, 1993). میدان رگ سفید واقع در فروافتادگی دزفول جنوبی، یکی از قدیمی‌ترین و مهم‌ترین میدان‌های هیدروکربنی در کشور محسوب می‌شود (شکل ۱). این میدان در سال ۱۳۳۰



شکل ۱- نقشه توزیع میادین هیدروکربنی در حوضه زاگرس (Alipour, 2017) و موقعیت چاه مورد مطالعه از میدان نفتی رگ سفید.

Fig. 1. Geographic distribution of hydrocarbon fields in the Zagros basin (Alipour, 2017) and the approximate location of the studied well in the Rag-e-Sefid Oilfield.

گرفته است (Amiri and Alipour, 2023a,b). لذا در این مطالعه سعی بر آن است که با تلفیق نتایج پتروگرافی آلی و پیرولیز راک-ایول، به بررسی دقیق‌تر ویژگی‌های ژئوشیمی آلی سازند پابده در میدان رگ سفید پرداخته شود. نتایج حاصل از این مطالعه می‌توانند برای روشن‌تر شدن رخساره آلی و شرایط محیط رسوبی دیرینه سازند پابده موثر باشند.

۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

از دیدگاه ساختمانی، فروافتادگی دزفول جنوبی، بین دو گسل عمده‌ی کازرون در شرق و گسل هنديجان - بهرگانسر در غرب قرار گرفته است (شکل ۱). میدان نفتی رگ سفید واقع در فروافتادگی دزفول جنوبی، بین میادین بی‌بی‌حکیمه در شمال-شرق، پازنان در شمال، رامشیر در غرب و تنگو و زاغه در جنوب قرار دارد (شکل ۱). این میدان تاق‌دیزی با طول ۵۴ کیلومتر و پهنای ۷-۸ کیلومتر و به شکل بومرنگ، است.

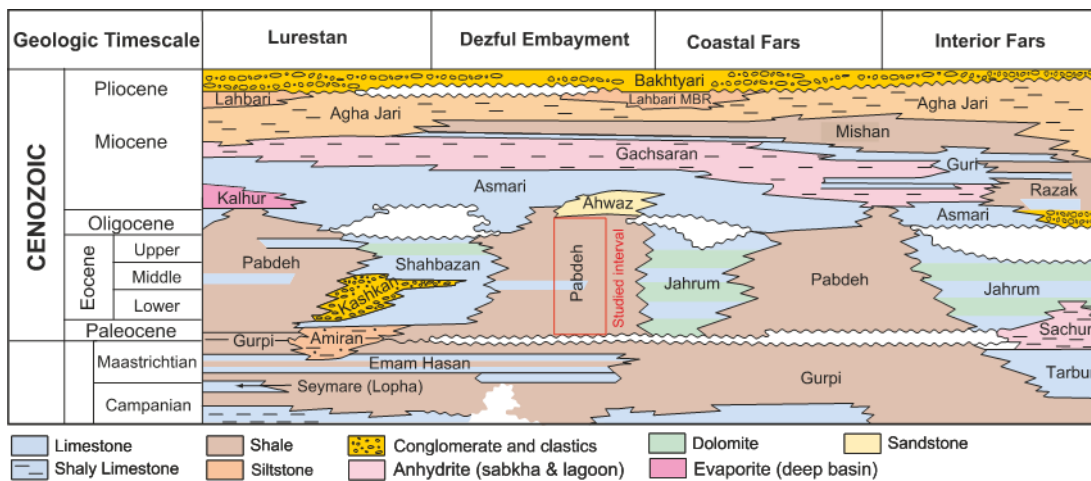
سازند پابده به سن پالئوسن تا لیگوسن در سال ۱۳۴۴ برای اولین بار مطالعه و معرفی شد (James and Wynd, 1965). این سازند دارای تغییرات رخساره‌ای شدید در بخش‌های

سازند پابده در میدان رگ سفید از حدود ۸۰۰ متر مارل، شیل‌های خاکستری و لایه‌های آهک رسی دریایی تشکیل شده است. سازند پابده در بخش‌هایی از حوضه زاگرس به‌عنوان یکی از سنگ‌های منشاء فعال در زایش هیدروکربن شناخته می‌شود که نقش فرعی در شکل‌گیری تجمعات هیدروکربنی در برخی از میادین داشته است (Bordenave and Huc, 1995). در بسیاری از بخش‌های حوضه زاگرس، این سازند به دلیل عمق تدفین پائین خود، هنوز وارد مرحله هیدروکربن‌زایی نشده است (Bordenave and Burwood, 1990).

پژوهش‌های پیشین بر روی سازند پابده، عمدتاً به بررسی ویژگی‌های چینه‌شناختی و رسوب‌شناختی آن پرداخته‌اند (Dabbagh and Kendall, 2021; Mohseni et al., 2011). همچنین مطالعات ژئوشیمی آلی بر روی این سازند در فروافتادگی دزفول، نوع کروژن آن را از نوع II تشخیص داده‌اند (Alizadeh et al., 2020; Alizadeh et al., 2012). با این حال پژوهش‌های اندکی در جهت روشن‌تر شدن ویژگی‌های رخساره‌های آلی سازند پابده در منطقه‌ی مورد مطالعه انجام

فقط بخش‌های خاصی از سازند پابده، دارای پتانسیل کافی برای زایش هیدروکربن است و همه ضخامت سازند پابده را نباید به عنوان سنگ‌منشاء در نظر گرفت (Alizadeh et al., 2020). معادل‌های منطقه‌ای سازند پابده در کشورهای کویت و عربستان، سازندهای روس (Rus)، المردوما (Umm Err-) (Radhuma) و دمام (Dammam) هستند (Sharland et al., 2001).

مختلف حوضه زاگرس است و به صورت جانبی به دولومیت‌های سازند جهرم (به سمت ناحیه فارس) یا فیلیش‌های سازند امیران (به سمت ناحیه لرستان) تبدیل می‌شود (Motiei, 1993). وجود افق‌های فسفات، لایه‌های دارای پیریت و فراوانی فسیل‌های پلانکتونیک در پابده مبین این است که شرایط تولید و حفظ ماده‌ی آلی در مقیاس انبوه در حوضه فراهم بوده است (Alizadeh et al., 2020). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که



شکل ۲- ستون چینه‌شناسی ساده شده از کرتاسه‌ی پسین تا سنوزوئیک حوضه زاگرس (James and Wynd, 1965).

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

برنامه دمایی این دستگاه معمولاً دارای یک مرحله ابتدایی با دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به مدت سه دقیقه است (شکل ۳a). در این مرحله، هیدروکربن‌های آزاد شده از نمونه مورد مطالعه با استفاده از آشکارگر یونی (FID) به صورت پارامتر S₁ ثبت می‌شوند. در مرحله بعد، دمای کوره دستگاه پیرولیز با نرخ دمایی ۲۵ درجه سلسیوس بر دقیقه افزایش پیدا می‌کند تا در نهایت به دمای ۶۵۰ درجه سلسیوس برسد (Behar et al., 2001). در این مرحله، هیدروکربن‌های آزاد شده از شکست حرارتی کروژن موجود در داخل نمونه توسط آشکارگر با عنوان پارامتر S₂ ثبت می‌شوند. این پارامتر، نمایانگر پتانسیل هیدروکربن‌زایی ماده آلی است (Peters, 1986). مقدار دی-اکسید کربن آزاد شده از مواد آلی نیز بصورت پارامتر S₃ ثبت می‌شود که بیانگر مقدار گروه‌های اکسیژن‌دار موجود در ساختمان کروژن می‌باشد (شکل ۳a) (Delvaux et al., 1990; Lafargue et al., 1998).

شاخص هیدروژن (Hydrogen Index, HI) مقدار نرمالیزه شده‌ی S₂ است که به میلی گرم هیدروکربن بر گرم TOC بیان

۳- مواد و روش‌ها

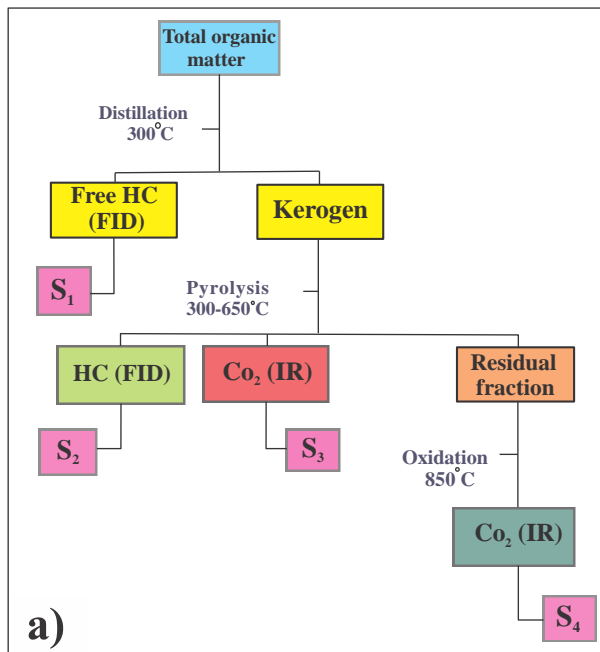
۳-۱- روش پیرولیز راک - ایول

در این مطالعه تعداد ۴ نمونه خردی حفاری از سازند پابده در چاه شماره ۹۹ میدان نفتی رگ سفید به منظور ارزیابی ویژگی‌های ژئوشیمیایی (آنالیز راک - ایول) و پتروگرافی آلی سنگ منشاء انتخاب شده‌اند. باتوجه به اینکه حفاری سازند پابده در این چاه با استفاده از گل پایه روغنی انجام شده است، برای حذف اثرات گل پایه روغنی، نمونه‌های مورد مطالعه با استفاده از زداگر شسته شده و به مدت ۷۲ ساعت درون خشک‌کن قرار داده شدند. این نمونه‌ها سپس در هاون چینی آسیاب شده و با استفاده از دستگاه راک - ایول مورد آنالیز قرار گرفتند.

دستگاه راک - ایول ۶ موجود در مرکز تحقیقات زمین‌شناسی و زمین‌شیمی نفت دانشگاه شهید چمران اهواز در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۳b). در این آنالیز، در حدود ۷۰ میلی گرم از نمونه‌ی حفاری را پودر کرده و در داخل کپسول‌های مخصوص در دستگاه پیرولیز قرار داده می‌شود.

برای ارزیابی بلوغ حرارتی ماده‌ی آلی موجود در سنگ‌های منشا مورد استفاده قرار می‌گیرد (Peters, 1986). شاخص تولید (Production index, PI) حاصل تقسیم پارامتر S_1 به مجموع پارامترهای S_1+S_2 می‌باشد (Hunt, 1996). این نسبت در طی زایش هیدروکربن به‌نحوی افزایش می‌یابد که مقدار آن در آغاز زایش حدود ۰/۱ و در پایان هیدروکربن‌زایی حدود ۰/۴ می‌باشد (Hunt, 1996).

می‌شود (Hunt, 1996a). این پارامتر برای تعیین نوع ماده‌ی آلی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Peters, 1986). شاخص اکسیژن (Oxygen Index, OI)، نسبت دی‌اکسید کربن به TOC است که برای تعیین درجه‌ی بلوغ و نوع کروژن استفاده می‌شود (Behar et al., 2001). به‌دمایی که بیشترین مقدار هیدروکربن زایش‌یافته‌ی S_2 را دارد T_{max} می‌گویند. این پارامتر



شکل ۳- شکل شماتیک آنالیز راک - ایول، IR آشکارگر فروسرخ و FID آشکارگر یونی شعله‌ای هستند (اقتباس از (Johannes et al., 2007)) (a)، و دستگاه راک - ایول ۶ مرکز تحقیقات زمین‌شناسی و زمین‌شیمی نفت دانشگاه شهید چمران اهواز (b).

Fig. 3. Schematic illustration of the analytical set-up of the Rock-Eval pyrolysis instrument (Johannes et al., 2007) (a), and the Rock-Eval 6 instrument in the Petroleum Geology, and Geochemistry Research Centre (PGGRC) of Shahid Chamran University of Ahvaz-Iran (b).

آلی ثانویه، در اثر دگرسانی حرارتی مواد آلی اولیه حاصل می‌شوند.

ماده‌ی آلی آمورف (AOM) در سنگ‌های منشاء به ماده‌ی آلی بی‌ساختار مشتق شده از فیتوپلانکتون دگرسان شده، رزین‌های گیاهان تکامل یافته و ماده‌ی آلی با منشاء باکتریایی اطلاق می‌شود (Pacton et al., 2011; Pickel et al., 2017; Tyson, 1995). این مواد آلی، در زیر نور سفید انعکاسی میکروسکوپ به رنگ قهوه‌ای تیره، قهوه‌ای تا سیاه دیده می‌شوند (Mastalerz et al., 2018). ماده‌ی آلی آمورف معمولاً دارای مقدار کم اینکلوزن‌های معدنی است، در حالیکه مواد آلی ثانویه غالباً ظاهر یک‌دست‌تری دارند (Liu et al., 2019).

۳-۲- روش پتروگرافی آلی

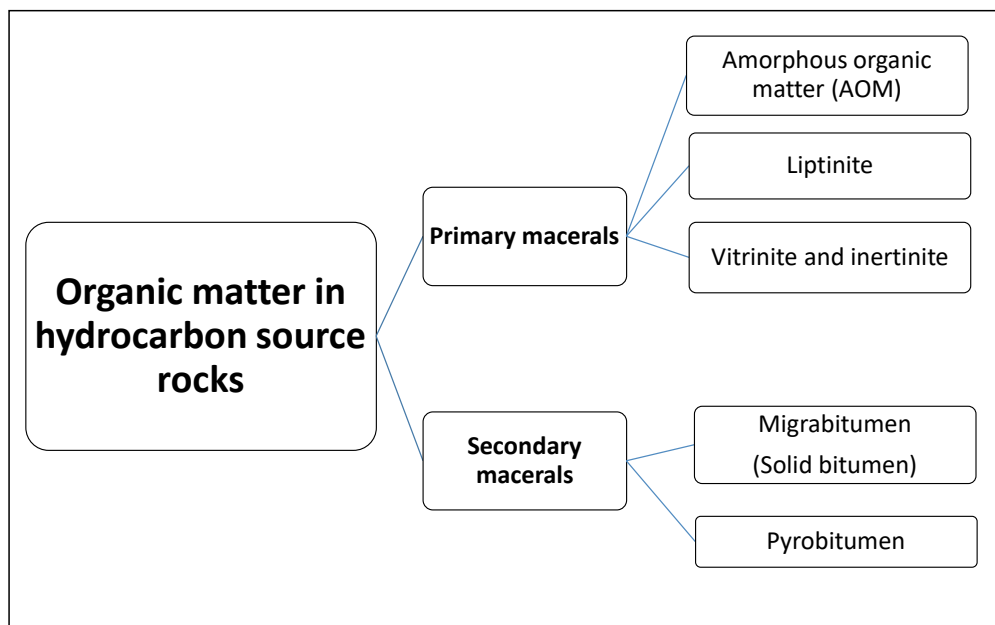
پتروگرافی آلی مطالعه‌ی اجزاء آلی موجود در سنگ‌های رسوبی است که به‌عنوان ماسرال شناخته می‌شوند (Hutton, 1995). این علم برای مطالعه‌ی اجزای آلی در ذغالسنگ، سنگ‌های منشاء نفتی و شیل‌های نفتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماده‌ی آلی در سنگ‌های منشاء نفتی مخلوطی از ماسرال‌های آلی است که از راه‌های ویژه‌ی خودشان در طول بلوغ حرارتی تکامل می‌یابند (Liu et al., 2019). مطالعات پتروگرافی آلی مربوط به سنگ‌های منشاء هیدروکربنی، دارای اصطلاحات خاص خود می‌باشد که شامل مواد آلی اولیه و مواد آلی ثانویه هستند (Liu et al., 2019) (شکل ۴). مواد آلی اولیه، شامل مواد آلی حاصل از موجودات زنده هستند که در داخل رسوبات حفظ می‌شوند. مواد

ارزیابی بلوغ حرارتی نمونه‌های شیلی استفاده می‌شود (Stach et al., 1982).

ماده آلی ثانویه، به موادی گفته می‌شود که مشتق شده از ماسرال‌های نفتزا هستند (Jacob, 1989; Mastalerz et al., 2018). مهم‌ترین نوع از مواد آلی ثانویه، بیتومن جامد Solid Bitumen است که فضای داخل بخش بین دانه‌های معدنی را پر می‌کند. با افزایش بلوغ معمولاً اندازه قطعه‌های بیتومن جامد کاهش پیدا کرده و انعکاس آنها افزایش پیدا می‌کند (Liu et al., 2019). نقش سیمانی بیتومن جامد مؤید این است که این اجزا در پنجره نفتی و احتمالاً پنجره گازی قابلیت تحرک داشته‌اند (Liu et al., 2019).

آلژینایت از کیست‌های تاسمانیت مشتق می‌شود که پتانسیل زایش هیدروکربن بسیار زیادی دارد. شاخص هیدروژن این اجزای آلی می‌تواند بیشتر از ۹۰۰ (mg HC/g TOC) باشد (Revill et al., 1994; Vigran et al., 2008). با افزایش بلوغ، رنگ این مواد آلی به کهربایی تیره تغییر پیدا می‌کند و در درجات بلوغ حرارتی معادل با انعکاس ویتترینایت حدود ۰/۸ درصد، زایش هیدروکربن از این اجزا آغاز می‌شود (Liu et al., 2019).

ویتترینایت و اینرتینایت، معمولاً به صورت قطعه‌های مجزا پدیدار می‌شوند و تغییرات قابل ملاحظه مورفولوژیکی در طول بلوغ حرارتی ندارند (Liu et al., 2019). در مطالعات حوضه‌های رسوبی به‌طور معمول، از انعکاس ویتترینایت، برای

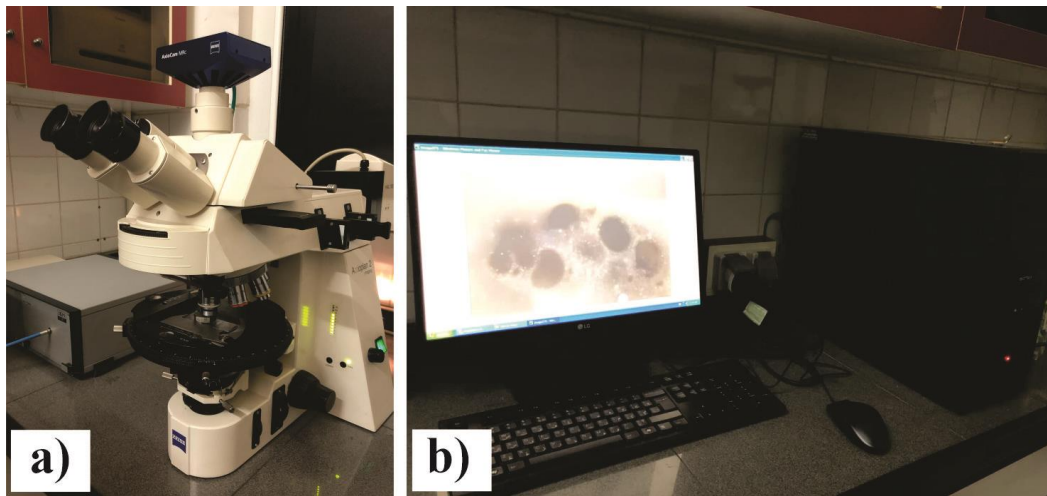


شکل ۴- شکل شماتیک از مواد آلی اولیه و ثانویه در سنگ‌های منشأ هیدروکربنی (اقتباس از Mastalerz et al., 2018).

Fig. 4. Schematic representation of the primary and secondary organic macerals in the hydrocarbon source rocks (after Mastalerz et al., 2018).

دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شده است (شکل ۵). برای تهیه قرص‌های صیقلی از نمونه‌های مورد مطالعه، ابتدا خرده‌های حفاری در داخل رزین اپوکسی مطابق روشهای استاندارد قرار داده شده و سپس با استفاده از پودر کروندوم با مش‌های متفاوت صیقل داده شده‌اند (Bustin et al., 1985).

در این مطالعه، بعد از انجام آنالیز راک - ایول، تمامی نمونه‌های برداشته شده توسط روش پتروگرافی آلی تحت نور سفید انعکاسی با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مطالعه پتروگرافی این نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ پتروگرافی آلی مدل Zeiss Axioplan (II) موجود در مرکز تحقیقات زمین‌شناسی و زمین‌شیمی نفت



شکل ۵- میکروسکوپ Axioplan II (a) و کامپیوتر (b) موجود در دارک روم مرکز تحقیقات زمین‌شناسی و زمین‌شیمی نفت دانشگاه شهید چمران اهواز (PGGRC).

Fig. 5. Axioplan-II microscope (a) and the accessory imaging system in the Petroleum Geology and Geochemistry Research Centre of the Shahid Chamran University of Ahvaz-Iran (b).

۴- نتایج

۴-۱- نتایج پیرولیز راک - ایول

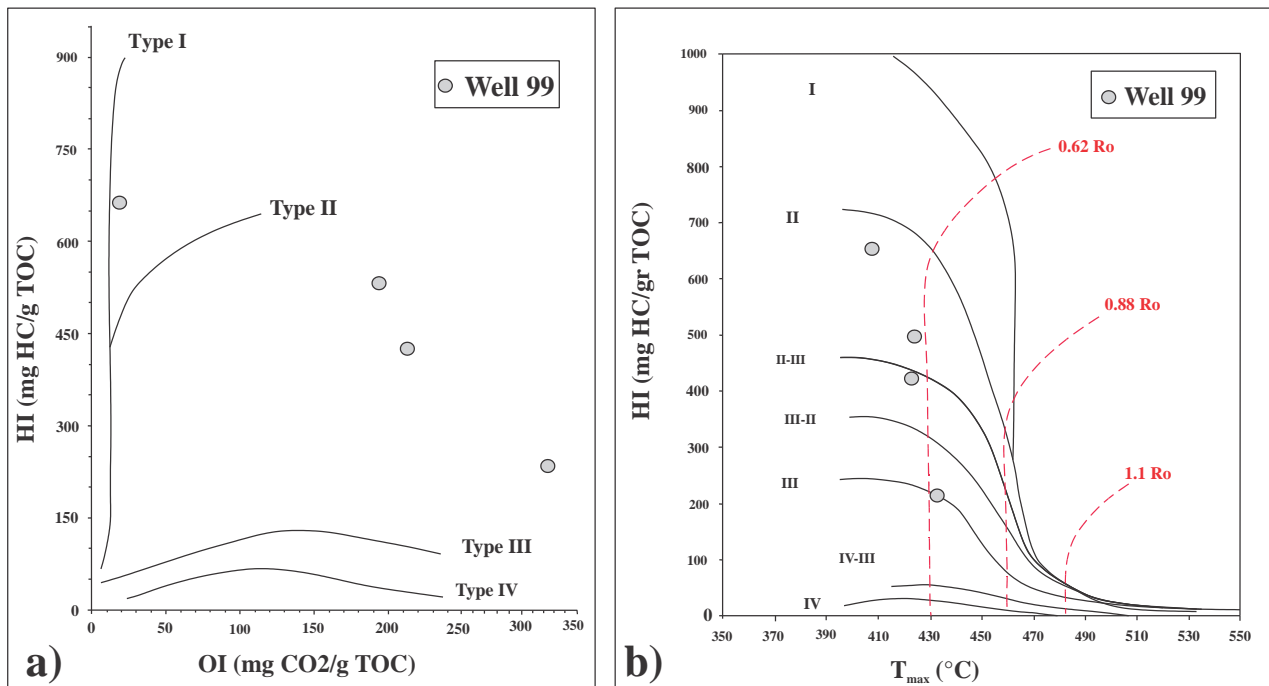
نتایج حاصل از پیرولیز راک - ایول برای ۴ نمونه از سازند پابده در چاه شماره ۹۹ در میدان نفتی رگ سفید، نشان‌دهنده مقادیر بالای S_2 نسبت به S_1 در تمامی نمونه‌ها هستند (جدول ۱). قرائت بالای S_2 حاکی از بالا بودن پتانسیل هیدروکربن‌زایی نمونه‌های مورد مطالعه است. مقادیر PI در جدول زیر مؤید این است که نمونه‌های موجود از چاه مورد مطالعه از سازند پابده در این میدان نابالغ بوده و یا در ابتدای پنجره‌ی نفتی قرار دارد. نمونه‌ی مربوط به عمق ۲۳۵۰ متری دارای بیشترین مقدار TOC و HI بوده و مقدار OI بسیار کمتری را نسبت به بقیه

نمونه‌ها نشان می‌دهد (جدول ۱). این نکته مؤید آن است که شرایط محیط رسوبی سازند پابده در برخی از مقاطع زمانی کاملاً عاری از اکسیژن (Anoxic) بوده است. برای پی بردن به نوع کروژن موجود در سازند پابده، از دیاگرام‌های HI در مقابل OI استفاده شده است (شکل ۶a) این نمودار نشان می‌دهد که کروژن موجود در نمونه‌ها، مخلوطی از کروژن‌های نوع II و II-III تشکیل شده است که با دیاگرام T_{max} در مقابل HI نیز همخوانی دارد (شکل ۶b). همچنین بر اساس دیاگرام T_{max} در مقابل HI می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های مورد مطالعه از سازند پابده در مراحل اولیه‌ی زایش هیدروکربن قرار دارند (شکل ۶b).

جدول ۱. نتایج پیرولیز راک - ایول برای نمونه‌های سازند پابده در چاه شماره ۹۹ میدان نفتی رگ سفید.

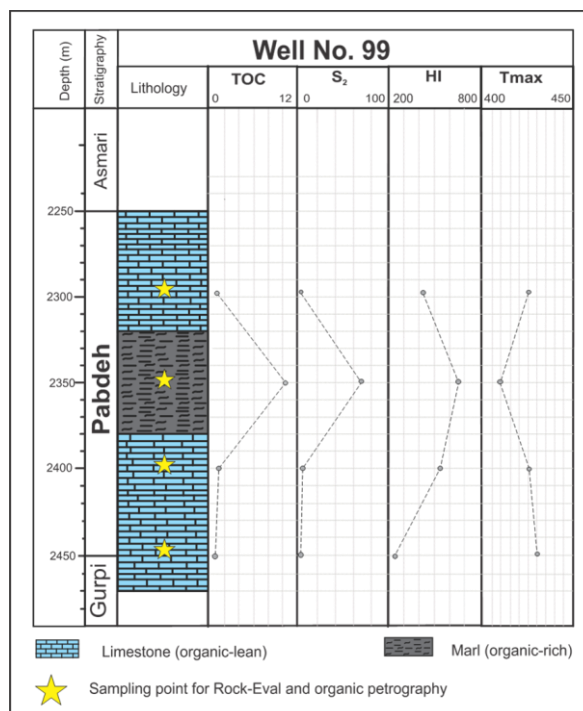
Table 1. Rock-Eval pyrolysis results from Pabdeh samples in well No. 99 of Rag-e-Sefid Oilfield.

Oilfield	Well No.	Formation	Depth (m)	S_1 (mg HC/g rock)	S_2 (mg HC/g rock)	S_3 (mg CO_2 /g rock)	HI (mg HC/g TOC)	OI (mg CO_2 /g TOC)	TOC (wt%)	PI	T_{max} (C)
Rag-e-Sefid	99	Pabdeh	2296	0.61	5.67	2.87	426	216	1.33	0.1	425
		Pabdeh	2350	3.66	67.41	2.17	658	21	10.24	0.05	411
		Pabdeh	2400	0.58	6.29	2.29	533	194	1.18	0.09	426
		Pabdeh	2450	0.28	1.54	2.23	226	328	0.68	0.15	432



شکل ۶- دیانگرام HI در مقابل OI نشان دهنده نوع ماده‌ی آلی (a) و دیانگرام HI در مقابل T_{max} نشان دهنده بلوغ حرارتی (b) نمونه‌های مورد مطالعه از سازند پابده در چاه شماره ۹۹ میدان نفتی رگ سفید است.

Fig. 6. HI versus OI (a) and HI versus T_{max} (b) diagrams for determining the type and maturity of the organic matter in the Pabdeh Formation of the Rag-e-Sefid Oilfield.



شکل ۷- تغییرات عمودی لیتولوژی همراه با داده‌های ژئوشیمیایی به دست آمده از آنالیز راک - ایول مربوط به سازند پابده در چاه شماره ۹۹ میدان نفتی رگ سفید.

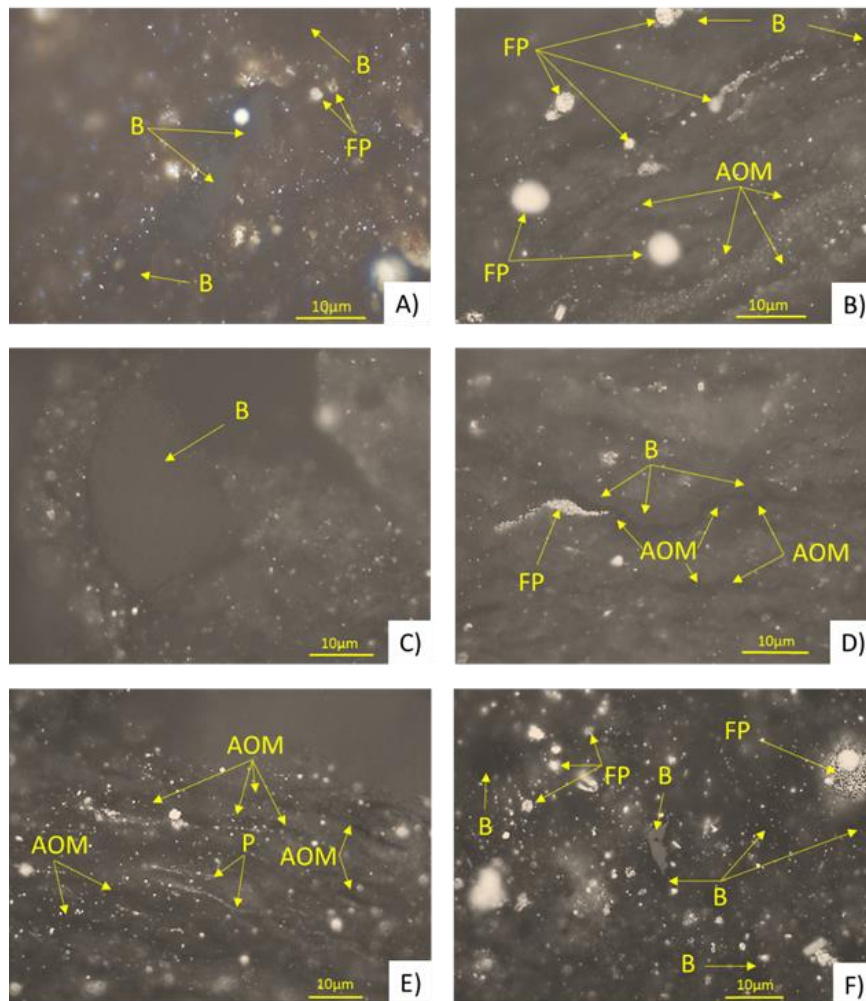
Fig. 7. Vertical profile indicating variations of Rock-Eval pyrolysis data in the Pabdeh Formation of the Rag-e-Sefid Oilfield.

مشاهدات پتروگرافی آلی نشان می‌دهد که سازند پابده در میدان نفتی رگ سفید دارای رخساره‌های غنی و فقیر از ماده‌ی آلی است. این نکته با نتایج حاصل از پیرولیز راک - ایول نیز همخوانی دارد. بخش‌های غنی از ماده‌ی آلی، عموماً دارای لیتولوژی شیل و مارن می‌باشند (شکل ۷) که همراه با مقدار قابل توجهی از ماده‌ی آلی آمورف (شکل ۸ A, B, D و E) و بیتومینایت (شکل ۸ A, B, C, D و F) هستند. همچنین در این بخش‌ها، پیریت‌ها غالباً به شکل کریستال‌های دانه ریز و فرمبویید وجود دارند (شکل ۸ A, B, D, E و F). این شواهد حاکی از برقراری شرایط غیراکسیدان در محیط ته‌نشینی سازند پابده می‌باشند که منجر به حفظ‌شدگی بالای مواد آلی اولیه در بخش‌های مذکور شده است.

بررسی نتایج به‌دست آمده از آنالیز راک - ایول در چاه مورد مطالعه نشان می‌دهد که یک بخش غنی از ماده‌ی آلی (TOC=10.24) در داخل سازند پابده قرار دارد که توسط بخش‌هایی با مقادیر پایین‌تر احاطه شده است (شکل ۷).

۴-۲- نتایج پتروگرافی آلی

بعد از آنالیز نمونه‌های سازند پابده به‌وسیله پیرولیز راک - ایول، مطالعات پتروگرافی آلی نیز به منظور ارزیابی بهتر محتوای ماده‌ی آلی نمونه‌های مورد مطالعه صورت گرفت. اجزای آلی قابل تشخیص در این نمونه‌ها عمدتاً شامل ماده‌ی آلی آمورف (AOM)، بیتومینایت (B)، پیریت فرمبویید (FP) و ائوهدرال (EP) و فسیل (FO) بوده‌اند که در ادامه به توضیح هر کدام از آنها پرداخته می‌شود.

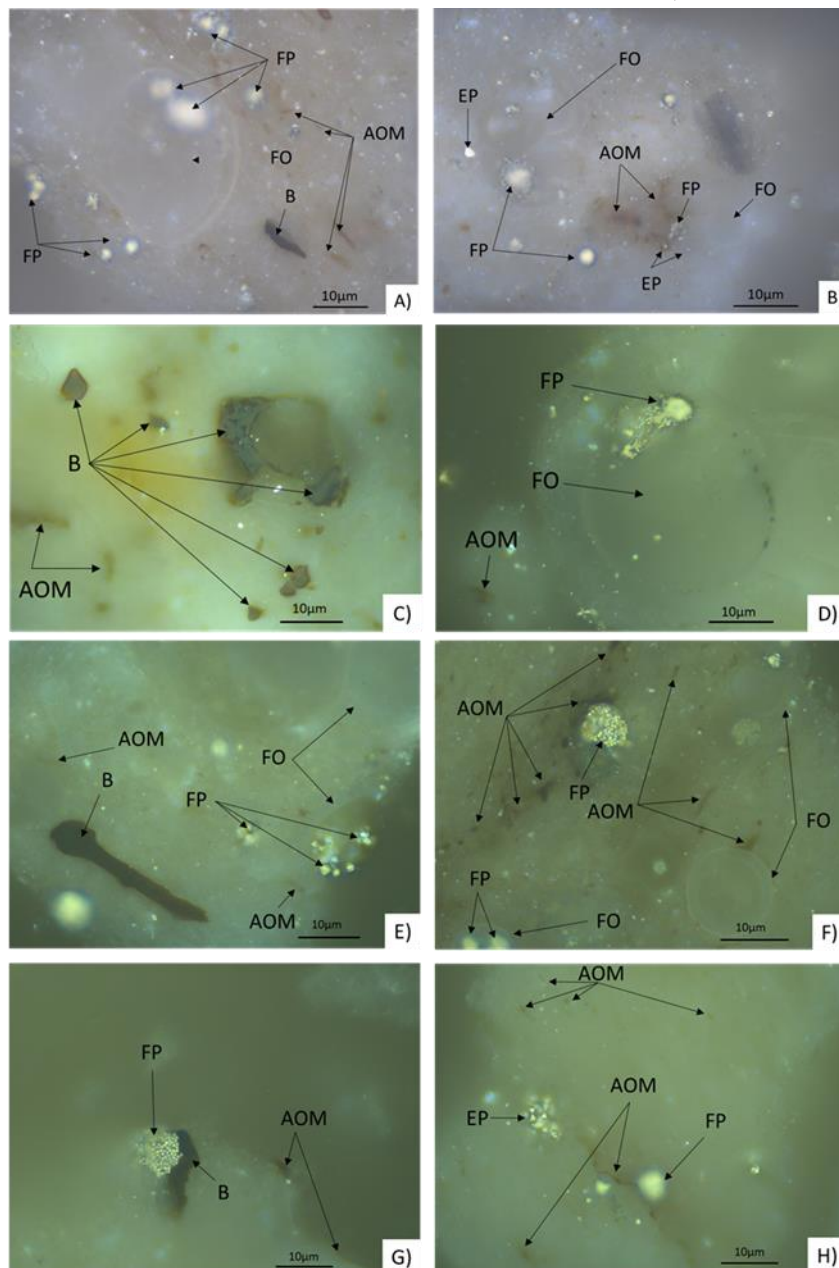


شکل ۸- نمونه‌هایی از فوتومیکروگراف‌های پتروگرافی آلی (AOM = ماده‌ی آلی آمورف، FP = پیریت فرمبویید، B = بیتومینایت و P = پیریت) مربوط به بخش غنی از ماده‌ی آلی سازند پابده در چاه شماره ۹۹ میدان نفتی رگ سفید (نمونه مربوط به عمق ۲۳۵۰ متری در جدول ۱).

Fig. 8. Selected photomicrographs (AOM = amorphous organic matter, FP = framboid pyrite, B = bituminite and P = pyrite) from organic-rich parts of the Pabdeh Formation (sample from 2350 m depth of the Rag-e-Sefid Oilfield, see Table 1).

فقیر از ماده آلی دارای تعداد فراوانی از فسیل‌های پلانکتونیک هستند (شکل ۹ A, B, D, E و F). در رخساره‌های فقیر از ماده آلی، پیریت غالباً به شکل ائوهدرال (شکل ۹ B و H) یا به شکل جانشینی ثانویه در حجرات فسیل‌ها وجود دارد (شکل ۹ A, B, D, E و F).

رخساره‌های فقیر از ماده آلی، عمدتاً دارای ترکیب سنگ-شناختی آهکی و رنگ روشن هستند (شکل ۷ و شکل ۹). مقدار ماده آلی در این فواصل، عموماً بسیار کم بوده و به صورت AOM (شکل ۹ A, B, C, D, E, F, G و H) و بیتومینایت (شکل ۹ A, C, E و G) وجود دارند. همچنین، رخساره‌های



شکل ۹- نمونه‌هایی از فتومیکروگراف‌های پتروگرافی آلی (AOM = ماده آلی آمورف، FP = پیریت فرمبویید، B = بیتومینایت، P = پیریت، EP = پیریت ائوهدرال و FO = فسیل) مربوط به لایه‌های فقیر از ماده آلی سازند پابده در چاه شماره ۹۹ میدان نفتی رگ سفید (A و B نمونه مربوط به عمق ۲۲۹۶ متری، C و D نمونه مربوط به عمق ۲۴۰۰ متری، و E, F, G, H نمونه مربوط به عمق ۲۴۵۰ متری در جدول ۱).

Fig. 9. Selected photomicrographs (AOM = amorphous organic matter, FP = framboid pyrite, B = bituminite, P = pyrite, EP = euhedral pyrite and FO = fossil) from organic-poor parts of the Pabdeh Formation. Sample from 2296 m depth (A and B), sample from 2400 m depth (C and D), sample from 2450 m depth (E, F, G, and H).

۵- نتیجه گیری

سازند پابده یک بخش غنی از ماده‌ی آلی دارد که توسط لایه‌های فقیر از ماده‌ی آلی احاطه شده است. بخش‌های غنی از ماده‌ی آلی سازند پابده با داشتن مقدار بالایی از مواد آلی آمورف، دارای پتانسیل بالایی برای زایش هیدروکربن است. این واقعیت می‌تواند بیانگر حفظ شدگی بهتر ماده‌ی آلی در بخش‌های مذکور باشد که خود توسط شرایط احیایی (Anoxic) در محیط رسوبی دیرینه سازند پابده کنترل شده است. یافته‌های حاصل از این مطالعه می‌توانند برای فهم بهتر رخساره آلی سازند پابده و نقش آن در سیستم هیدروکربنی سنوزوئیک در منطقه‌ی مورد مطالعه مفید باشند.

تشکر و قدردانی

از مدیریت محترم مرکز زمین‌شناسی و زمین‌شیمی‌نفت (Petroleum Geology and Geochemistry Research Centre, PGGRC)، جناب آقای دکتر بهرام علیزاده، بخاطر در اختیار قرار دادن تجهیزات و امکانات آزمایشگاهی صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

بر اساس نتایج بدست آمده از پیرولیز راک - ایول چهار نمونه از سازند پابده در عمق‌های مختلف در چاه شماره‌ی ۹۹ میدان نفتی رگ سفید، نوع کروژن موجود در سازند پابده در میدان نفتی رگ سفید ترکیبی از کروژن نوع II و III ارزیابی شد. همچنین مقادیر پلات شده در دیاگرام HI در مقابل T_{max} نشان دهنده‌ی این است که نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش در مراحل اولیه‌ی زایش هیدروکربن قرار دارند. به منظور اظهار نظر دقیق‌تر در مورد خصوصیات ژئوشیمی آلی سازند پابده، نمونه‌های مورد مطالعه با استفاده از روش‌های پتروگرافی آلی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این نتایج نشان دهنده وجود بیتومینایت در نمونه‌های مورد مطالعه هستند که حاکی از شروع زایش هیدروکربن از مواد آلی قرار گرفته در داخل سازند پابده در میدان مذکور هستند. این نکته با نتایج به‌دست آمده از پیرولیز راک - ایول، همخوانی کامل دارد. همچنین تلفیق نتایج حاصل از پیرولیز راک - ایول و پتروگرافی آلی نشان می‌دهد که

مراجع

- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution: American Journal of Science 304, 1-20. <http://doi.org/10.2475/ajs.304.1.1>.
- Alipour, M., 2017. Organic geochemistry of source rocks and unconventional resources; Habitat and alteration of hydrocarbons in Block A of the Persian Gulf. Ph.D. Thesis, Shahid Chamran University of Ahwaz.
- Alipour, M., 2023. Collision along irregular plate margin controlled the tectono-stratigraphic evolution of the Iranian Zagros fold and thrust belt. Marine and Petroleum Geology 154, 106311. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106311>.
- 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, 1-22. <http://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 the southern part of the Dezful Embayment, Iran. Organic Geochemistry 49, 36-46. <http://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2012.05.004>.
- Amiri, S., Alipour M., 2023a. Organic geochemical Evaluation of the Pabdeh Formation in the Siah-Makan Oilfield using Rock-Eval pyrolysis and organic petrographic methods. Advanced Applied Geology 13, 782-793. <http://doi.org/10.22055/AAG.2023.43214.2349>.
- Amiri, S., Alipour, M., 2023b. Organic facies and organic petrographic characteristics of the Pabdeh Formation in the Kilur-Karim Oilfield, SW Iran. Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches 39, 1-14. <https://doi.org/10.22108/jssr.2023.139363.1270>.
- Behar, F., Beaumont, V., Pentead, 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., Burwood, R., 1990. Source rock distribution and maturation in the Zagros orogenic belt: provenance of the Asmari and Bangestan reservoir oil accumulations: Organic Geochemistry 16, 369-387. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(90\)90055-5](https://doi.org/10.1016/0146-6380(90)90055-5).

- 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. <http://doi.org/10.1036/13431865M1063614>.
- Bordenave, M.L., Huc, A.Y., 1995. The Cretaceous source rocks in the Zagros foothills of Iran: *Revue Institut Français du Pétrole* 50, 727-753. <https://doi.org/10.2516/ogst:1995044>.
- Bustin, R. M., Cameron, A., Grieve, D., Kalkreuth, W., 1985. Coal Petrology-its principles, methods, and applications, Geological Association of Canada, Short Course Notes, P. 250.
- Dabbagh, A., Kendall, C.G.S.C., 2021. Deep-T-platform responses to the global sea-level fluctuations, Oligocene Asmari and Pabdeh Formations of the Zagros foredeep Kalhur sub-basin, SW Iran: *Journal of Asian Earth Sciences* 206, 104605. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104605>.
- Davies, A., Simmons, M.D., 2021. Demand for 'advantaged' hydrocarbons during the 21st century energy transition: *Energy Reports* 7, 4483-4497. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.013>.
- Delvaux, D., Martin, H., Leplat, P., Paulet, J., 1990. Comparative Rock-Eval pyrolysis as an improved tool for sedimentary organic matter analysis: *Organic Geochemistry* 16, 1221-1229. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(90\)90157-U](https://doi.org/10.1016/0146-6380(90)90157-U).
- Hunt, J.M., 1996. Petroleum Geochemistry and Geology, WH Freeman, P. 743.
- Hutton, A.C., 1995. Organic petrography: Principles and techniques. In Snape, C., (Ed.), *Composition, Geochemistry and Conversion of Oil Shales*, Springer Dordrecht, 1-16. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0317-6_1.
- Jacob, H., 1989. Classification, structure, genesis and practical importance of natural solid oil bitumen ("migrabitumen"): *International Journal of Coal Geology* 11, 65-79. [https://doi.org/10.1016/0166-5162\(89\)90113-4](https://doi.org/10.1016/0166-5162(89)90113-4).
- James, G., Wynd, J., 1965. Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 49, 2182-2245. <https://doi.org/10.1306/A663388A-16C0-11D7-8645000102C1865D>.
- Johannes, I., Kruusement, K., Veski, R., 2007. Evaluation of oil potential and pyrolysis kinetics of renewable fuel and shale samples by Rock-Eval analyzer: *Journal of analytical and applied pyrolysis* 79, 183-190. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.12.001>.
- 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. <https://doi.org/10.2516/ogst:1998036>.
- Liu, B., Schieber, J., Mastalerz, M., 2019. Petrographic and micro-FTIR study of organic matter in the Upper Devonian New Albany Shale during thermal maturation: Implications for kerogen transformation. In Camp, W., Milliken, K., Taylor, K., Fishman, N., Hackley, P., Macquaker, J., (Eds.), *Mudstone diagenesis: research perspectives for shale hydrocarbon reservoirs, seals, and source rocks*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 120, 165-188. <https://doi.org/10.1306/AAPG120>.
- Mastalerz, M., Drobniak, A., Stankiewicz, A.B., 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. <http://doi.org/10.1127/0077-7749/2011/0185>.
- Motiei, H., 1993. Stratigraphy of Zagros. In Hushmandzadeh, A., (Ed.), *Treatise of Geology of Iran*, Volume 1: Tehran, Geological Survey of Iran, P. 536.
- Pacton, M., Gorin, G.E., Vasconcelos, C., 2011. Amorphous organic matter - Experimental data on formation and the role of microbes: Review of Palaeobotany and Palynology 166, 253-267. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2011.05.011>.
- Peters, K.E., 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>.

- Pickel, W., Kus, J., Flores, D., Kalaitzidis, S., Christanis, K., Cardott, B., Misz-Kennan, M., Rodrigues, S., Hentschel, A., Hamor-Vido, M., 2017. Classification of liptinite-ICCP System 1994: International Journal of Coal Geology 169, 40-61. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.11.004>.
- Revoll, A., Volkman, J., O'leary, T., Summons, R., Boreham, C., Banks, M., Denwer, K., 1994. Hydrocarbon biomarkers, thermal maturity, and depositional setting of tasmanite oil shales from Tasmania, Australia: Geochimica et Cosmochimica Acta 58, 3803-3822. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90365-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90365-4).
- Sepehr, M., and Cosgrove, J., 2004. Structural framework of the Zagros fold-thrust belt, Iran: Marine and Petroleum Geology 21, 829-843. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2003.07.006>.
- Sepehr, M., Cosgrove, J.W., 2005. Role of the Kazerun Fault Zone in the formation and deformation of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran: Tectonics 24, 1-13. <https://doi.org/10.1029/2004TC001725>.
- Sharland, P.R., Archer, R., Casey, D.M., Davies, R., Hall, S.H., Heward, A.P., et al., 2001. Arabian plate sequence stratigraphy: Manama Bahrain, Gulf PetroLink, P.370.
- Sherkati, S., Letouzey, J., 2004. Variation of structural style and basin evolution in the central Zagros (Izeh zone and Dezful Embayment), Iran: Marine and Petroleum Geology 21, 535-554. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2004.01.007>.
- Stach, E., Mckowsky, M., Teichmuler, M., Taylor, G.H., Chandra, D., Teichmüller, R., 1982. Stach's textbook of coal petrology, P. 415.
- Tyson, R.V., 1995. Sedimentary organic Matter: organic Facies and palynofacies. Springer, P. 632 .
- Vigran, J.O., Mørk, A., Forsberg, A.W., Weiss, H.M., Weitschat, W., 2008. Tasmanites algae - contributors to the Middle Triassic hydrocarbon source rocks of Svalbard and the Barents Shelf: Polar Research 27, 360-371. <https://doi.org/10.1111/j.1751-8369.2008.00084.x>.