



<https://jssr.ui.ac.ir/?lang=en>

Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches

E-ISSN: 2423-8007

Vol. 41, Issue 1, No. 98, 2025, pp 79-97

Received: 26.01.2025

Accepted: 03.03.2025

Research Paper

Organic petrography and geochemistry of the Pabdeh Formation in Khaviz and Mansourabad anticlines, SW Iran

Marziyeh Khazami

MSc Student of Petroleum Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
marziyeh.kh1376@gmail.com

Majid Alipour* 

Assistant Professor, Department of Petroleum and Sedimentary Basins, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
alipour@scu.ac.ir

Abstract

This paper presents the results from organic geochemical evaluation of the Paleocene–Eocene Pabdeh Formation in the Khaviz Anticline and Mansourabad Oilfield by a combination of Rock-Eval pyrolysis method and organic petrographic techniques. A total of 24 cutting samples, collected from these anticlines, were subjected to Rock-Eval pyrolysis, and 12 samples were subsequently selected for complementary petrographic inspections. According to the Rock-Eval pyrolysis results, the middle parts of the Pabdeh Formation contain predominantly type II organic matter, while the lower and upper parts are mainly characterized by a type II/III kerogen. In addition, Rock-Eval pyrolysis results indicated that the thermal maturity of the studied samples corresponds to the early stages of the oil generation window. Similarly, our organic petrographic observations supported the presence of organic-rich facies in the middle parts of the Pabdeh Formation. The organic-rich facies is characterized by large concentrations of amorphous organic matter (AOM), framboidal pyrite, and solid bitumen (SB). In contrast, the organic-poor zones contain abundant fossils and euhedral pyrite in a calcareous-marly matrix. These results suggest that the middle parts of the Pabdeh Formation were deposited under predominantly anoxic conditions with enhanced preservation of sedimentary organic matter. In contrast, the organic-poor zones were formed under oxidizing conditions which led to the poor preservation of organic matter.

Keywords: Pabdeh Formation, Khaviz Anticline, Mansourabad Oilfield, Organic facies, Paleo-depositional environments.

Introduction

The petroleum industry has an important role in the worldwide supply of energy and the improvement of global economic/technological growth. The Zagros fold and thrust belt of Iran is one of the most prolific petroleum provinces in the world with several supergiant oil and gas accumulations (Alipour 2024). Most of the oil in the Zagros Basin has accumulated in the Dezful Embayment (Bordenave and Huc 1995). The Aptian–Albian Kazhdumi Formation is one of the most important petroleum source rocks that charged the Bangestan Group (Ilam/Sarvak) reservoirs in the Dezful Embayment (Alipour 2022, 2024). The Paleocene–Oligocene Pabdeh Formation is a young source rock with minor petroleum contribution due to limited thermal maturity across most of the Zagros Basin (Alipour 2024).

In recent years the Pabdeh Formation has been evaluated using bulk Rock-Eval pyrolysis techniques (Alizadeh et al. 2012; Safaei-Farouji et al. 2021), organic petrographic methods

(Amiri and Alipour 2023a, b; Khazami and Alipour 2024), and advanced biomarker analyses (Alizadeh et al. 2020). Nevertheless, little information is available about the organic petrographic characteristics and organic facies properties of the Pabdeh source rock in the Dezful Embayment. Therefore, the purpose of this study is to investigate the organic petrographic characteristics of sedimentary organic matter contained in the Pabdeh Formation to understand its paleo-depositional environments. Results from this study can provide new insights into the lateral-vertical organofacies variation within the Pabdeh Formation of the Dezful Embayment and surrounding regions.

Material & Methods

In this study, a total of 24 cutting samples (i.e., 10 samples from well#11 of the Mansourabad Field and 14 samples from well#2 of the Khaviz Anticline) were collected from the Pabdeh Formation. These samples were subjected to Rock-

*Corresponding author

Khazami M. and Alipour M. (2025). Organic petrography and geochemistry of the Pabdeh Formation in Khaviz and Mansourabad anticlines, SW Iran. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 41(1):79-97. <https://doi.org/10.22108/jssr.2025.144148.1306>



2423-8007 / © 2025 University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/jssr.2025.144148.1306>

Eval pyrolysis analysis using a Vinci Rock-Eval 6 instrument. After preliminary screening, a total of 12 samples (i.e., 6 samples from Mansourabad and 6 samples from Khaviz) were selected for detailed organic petrographic inspections under reflected light.

Rock-Eval pyrolysis: In the present study, in order to represent the entire thickness of the Pabdeh Formation, cutting samples were collected every 20 meters. The cutting samples were cleaned under a binocular to remove non-indigenous particles like mica fragments from drilling mud additives and iron filings from the erosion of the drill bit. In addition, the cutting samples were treated with detergent and n-hexane to remove non-indigenous hydrocarbons arising from drilling mud additives. The cleaned samples were then pulverized in a porcelain mortar. The powdered samples were placed in the oven for 24 hours at a temperature of about 50 °C to remove any possible moisture. To perform the analysis, approximately 50–70 mg of the powdered samples were placed in the crucible and then subjected to Rock-Eval pyrolysis following the standard procedure published elsewhere (Behar et al. 2001). The Rock-Eval 6 device is used to evaluate the source rocks in terms of the amount, type, and maturity of their contained organic matter. In addition, analytical parameters derived from Rock-Eval pyrolysis can be used to infer the paleo-depositional environments of source rocks and the prevalence of oxic/anoxic conditions during their sedimentation (Kotarba et al. 2003). The amount of organic matter in a source rock includes the total organic carbon in the sample, which is expressed as a weight percentage and includes both kerogen and bitumen (Hunt 1996).

Organic petrography: In the present study, organic petrographic examinations were conducted by a Zeiss

Axioplane II microscope under reflected light in oil immersion with 100x objective magnification. The organic matter contained in fine-grained shales has different petrography with respect to the organic matter preserved in coals (Gonçalves et al. 2024). Kerogen in coal seams may contain 90% detectable maceral and only 10% amorphous organic matter, but kerogen in shale rocks usually contains more than 50% amorphous organic matter (Mastalerz et al. 2018).

Discussion of Results & Conclusions


The combined application of Rock-Eval pyrolysis and organic petrography confirms the existence of an organic-rich interval sandwiched between organic-poor facies. According to our organic petrographic observations, the middle parts of the Pabdeh Formation contain distinct organic facies characterized by abundant AOM, SB, and framboidal pyrite in a dark-colored marl matrix. In contrast, the organic-poor intervals are characterized by calcareous lithology with abundant fossils and negligible AOM. These observations are consistent with the enhanced organic preservation during deposition of the middle parts of the Pabdeh Formation, which was most likely related to the prevalence of anoxia within the paleo-depositional environments. However, the organic-poor sections were deposited under suboxic regimes with minor preservation of the organic matter. These findings have practical implications for paleo-environmental reconstructions during deposition of the Pabdeh Formation. In addition, they provide new insights into variations of organic facies in the Pabdeh Formation as a potential source rock in the Cenozoic succession of the Zagros basin.

پetroگرافی آلی و ژئوشیمی آلی سازند پابده در تاقدیس‌های خویز و منصورآباد، جنوب غرب ایران

مرضیه خزامی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی نفت و حوضه‌های رسوبی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید

چمران اهواز، اهواز، ایران

marziyeh.kh1376@gmail.com

مجید علیپور* ، استادیار، گروه زمین‌شناسی نفت و حوضه‌های رسوبی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز،

ایران

alipour@scu.ac.ir

چکیده

در این مقاله، نتایج ارزیابی ژئوشیمیایی سازند پابده با سن پالئوسن - الیگوسن در تاقدیس خویز (چاه شماره ۲، ۱۴ نمونه) و میدان نفتی منصورآباد (چاه شماره ۱۱، ۱۰ نمونه)، با تلفیقی از روش‌های پیرولیز راک - ایول و پتروگرافی آلی، ارائه شده است. به این منظور، ۲۴ نمونه خرده‌حفاری جمع‌آوری شده از تاقدیس‌های مطالعه شده، با استفاده از روش پیرولیز راک - ایول آنالیز شدند. پس از غربالگری اولیه این داده‌ها، ۱۲ نمونه برای بررسی‌های دقیق‌تر پتروگرافی آلی انتخاب شدند. براساس نتایج آنالیز راک - ایول، بخش‌های میانی سازند پابده عمدتاً حاوی مواد آلی نوع II است؛ در حالی که بخش‌های پایینی و بالایی عمدتاً با کروژن نوع II/III مشخص می‌شوند. مشاهدات پتروگرافی آلی، از وجود رخساره‌ای غنی از ماده آلی در بخش‌های میانی سازند پابده حکایت دارد که بین زون‌های فقیر از ماده آلی قرار گرفته است. رخساره غنی از ماده آلی، با مقادیر بالایی از ماده آلی آمورف، پیریت فرامبوئیدال و بی‌تومن جامد مشخص می‌شود. در مقایسه، رخساره‌های فقیر از ماده آلی، حاوی فسیل‌های فراوان و پیریت شکل‌دار در یک ماتریکس آهکی - مارلی هستند. براساس این مشاهدات، بخش‌های میانی سازند پابده عمدتاً در شرایط بدون اکسیژن رسوب کرده‌اند. در مقابل، رسوب‌گذاری بخش‌های فقیر از ماده آلی، تحت شرایط اکسیدان انجام و به حفظ‌شدگی ضعیف مواد آلی منجر شده است. نتایج این مطالعه، شواهد محکمی را برای تغییرات مکانی رخساره‌های آلی در سازند پابده ارائه می‌دهد و به درک بهتر محیط رسوبی دیرینه آن کمک می‌کند.

واژه‌های کلیدی: سازند پابده، تاقدیس خویز، میدان نفتی منصورآباد، رخساره آلی، محیط رسوبی دیرینه.

* نویسنده مسئول

خزامی، مرضیه و علیپور، مجید. (۱۴۰۴). پتروگرافی آلی و ژئوشیمی آلی سازند پابده در تاقدیس‌های خویز و منصورآباد، جنوب غرب ایران. پژوهش‌های

چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۴۱(۱): ۷۹-۹۷. <https://doi.org/10.22108/jssr.2025.144148.1306>



مقدمه

پetroگرافی آلی بررسی شده‌اند (شکل ۱). هدف از انجام این مطالعه، بررسی ویژگی‌های مواد آلی موجود در سازند پابده است تا رخساره آلی و شرایط محیط رسوبی دیرینه این سازند، بهتر شناخته شود. نتایج به دست آمده از این مطالعه، به درک بهتر تغییرات عمودی - جانبی رخساره آلی سازند پابده در فروافتادگی دزفول و مناطق مجاور، کمک می‌کند.

زمین‌شناسی و چینه‌شناسی منطقه مطالعه شده

کمبرند چین‌خورده و رانده زاگرس، بخشی از سیستم کوهزایی آلپ - هیمالیا در امتداد حاشیه شمال شرقی صفحه عربستان است که با توالی ضخیم رسوبات از پرکامبرین تا عهد حاضر مشخص می‌شود (Setudehnia 1978). کمبرند زاگرس، نتیجه برخورد قاره‌ای بین صفحه عربستان و ایران مرکزی (به‌عنوان بخشی از صفحه اوراسیا) است (Takin 1972; Berberian and King 1981; Alipour 2023). کمبرند زاگرس از نظر ساختاری به دو زون منطقه مرتفع زاگرس^۴ و کمبرند چین‌خورده ساده زاگرس^۵ تقسیم می‌شود (Alavi 2007). در طی زمان زمین‌شناسی، تعامل میان چهارچوب ساختاری و نرخ رسوب‌گذاری در فروافتادگی دزفول، این منطقه را به یکی از مهم‌ترین مناطق هیدروکربنی جهان تبدیل کرده است (Sepehr and Cosgrove 2004; Alipour 2023). ساختارهای بررسی شده در این مطالعه (تاقدیس خویز و میدان منصورآباد) در دو طرف گسل پیشانی کوهستان واقع شده‌اند و به همین دلیل، به دو زون ساختاری - رسوبی متفاوت تعلق دارند (شکل ۱). تاقدیس خویز در بخش به‌شدت چین‌خورده - گسل‌خورده زاگرس و در زون ساختاری ایزه قرار دارد (شکل ۱)؛ در حالی که میدان نفتی منصورآباد، که در بلافضل تاقدیس خویز قرار دارد، در زون فروافتادگی دزفول جنوبی واقع شده است. این دو تاقدیس به‌واسطه گسل پی‌سنگی پیشانی زاگرس^۶، از یکدیگر جدا شده‌اند (شکل ۱). عملکرد

صنعت نفت، نقش مهمی در عرضه جهانی انرژی و بهبود رشد اقتصادی و تکنولوژیکی دارد. کمبرند چین‌خورده و رانده زاگرس ایران، یکی از پربارترین مناطق نفتی جهان با چندین تجمع فوق‌عظیم نفت و گاز است (Alipour 2024). بیشتر نفت حوضه زاگرس در فروافتادگی دزفول انباشته شده است (Bordenave and Huc 1995). این منطقه از نظر چینه‌شناسی (James and Wynd 1965)، ساختار (Sherkati and 2012; Mouthereau et al. 2004; Letouzey 2004) و سیستم‌های نفتی (Bordenave and Burwood 1990; Alipour 2024) مطالعه شده است. یکی از مهم‌ترین سنگ‌های منشأ هیدروکربنی در فروافتادگی دزفول، سازند کزدمی به سن آپتین - آلبین است که مخازن گروه بنگستان و آسماری را شارژ کرده است (Alipour 2022; Alipour 2024). سازند پابده به سن پالئوسن - الیگوسن، سنگ منشأ جوانی است که فقط در مناطق محدودی از حوضه زاگرس به بلوغ حرارتی کافی برای زایش هیدروکربن رسیده است (Alipour 2024).

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی درباره ارزیابی ژئوشیمیایی آلی سنگ‌های منشأ پابده، با استفاده از تکنیک‌های پیرولیز راک - ایول^۱ (Alizadeh et al. 2012; Hosseiny et al. 2024; Safaei-Farouji et al. 2021) پتروگرافی آلی (Amiri and Alipour 2023a, b; Khazami and Alipour 2024) و آنالیزهای نشانگرهای زیستی پیشرفته^۲ (Alizadeh et al. 2020) انجام شده است. با وجود این، اطلاعات اندکی درباره ویژگی‌های پتروگرافی آلی^۳ سنگ منشأ پابده در فروافتادگی دزفول در دسترس بوده و رخساره آلی آن هنوز به‌درستی شناخته نشده است. در همین راستا در مطالعه حاضر، نمونه‌های برداشته شده از سازند پابده در ۲ چاه حفاری شده در تاقدیس‌های خویز و منصورآباد در بخش جنوب غربی ایران، با تلفیق روش‌های پیرولیز راک - ایول و

⁴ High Zagros Zone (HZZ)

⁵ Zagros Simple Folded Belt Zone (ZSFB)

⁶ Mountain Frontal Fault (MFF)

¹ Rock-Eval pyrolysis

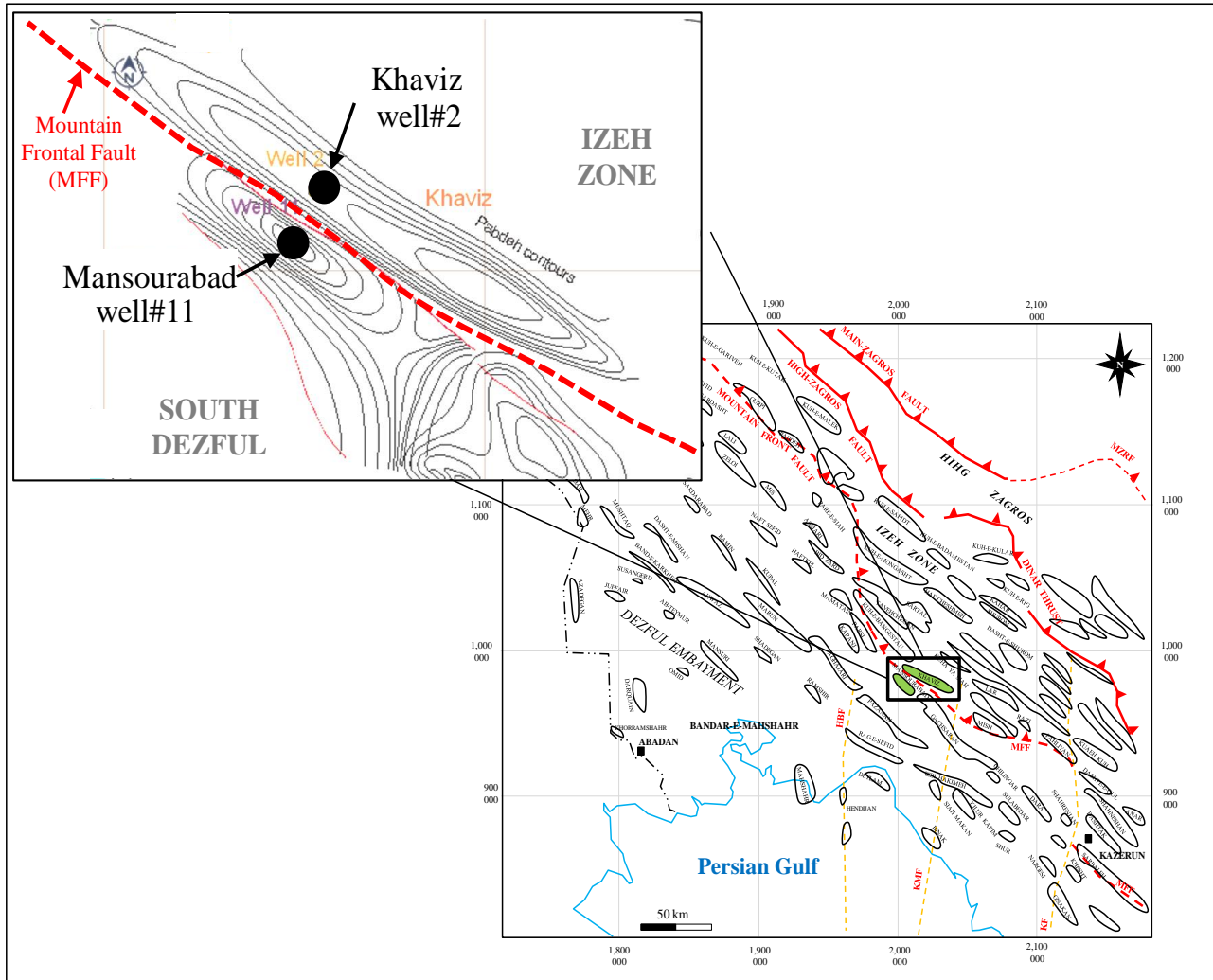
² Advanced biomarker analyses

³ Organic petrography



اختلاف عمق، نزدیک به ۲۵۰۰ متر در سازند پابده مشاهده می‌شوند.

این گسل باعث شده است که توالی رسوبی قرارگرفته در دو طرف آن، متحمل شرایط تدفین بسیار متفاوتی شوند که با



شکل ۱- پراکنندگی جغرافیایی میدان‌های اصلی هیدروکربنی در حوضه زاگرس (شرکت ملی نفت ایران، NIOC) و موقعیت چاه‌های مطالعه‌شده در تاقدیس نفتی خویز و میدان منصورآباد

Fig 1- Geographic distribution of major hydrocarbon fields in the Zagros basin (National Iranian Oil Company, NIOC) and the location of the studied wells in the Khaviz Anticline and Mansourabad Oilfield

گسترش دارند و به سمت لرستان و فارس به سازند جهرم، با ترکیب آهکی تغییر رخساره می‌دهند (James and Wynd 1965) (شکل ۲). از دیدگاه سنگ‌شناسی، سازند پابده از سنگ‌های آهکی متناوب با لایه‌های نازک تا ضخیم و شیل‌های

سازند پابده (به سن پالئوسن - الیگوسن) متشکل از مارن و شیل خاکستری روشن تا تیره، با منشأ دریایی و غنی از بقایای موجودات پلانکتونی است (James and Wynd 1965) (شکل ۲). بخش‌های مارنی این سازند، عمدتاً در فروافتادگی دزفول

یکی از مهم‌ترین پیش‌نیازهای ارزیابی ژئوشیمیایی سنگ‌های منشأ، انتخاب تعداد کافی نمونه با فاصله مناسب از سنگ‌های مطالعه شده است. در تحقیق حاضر به منظور پوشش دادن کل ضخامت سازند پابده، نمونه‌های خرده حفاری با فاصله ۲۰ متر جمع‌آوری شدند. نمونه‌های خرده حفاری، ابتدا با استفاده از یک میکروسکوپ دوچشمی بررسی شدند تا ذرات نابر جای آنها، مانند قطعات میکا (حاصل از گل حفاری) و براده‌های آهن (حاصل از فرسایش مته)، از خرده‌های حفاری جدا شوند. علاوه بر این، خرده‌های حفاری با استفاده از محلول دترجنت^۴ و نرمال هگزان^۵ (برای حذف هیدروکربن‌های نابر جای ناشی از گل حفاری) شست‌وشو شدند. در قدم بعد، نمونه‌های تمیز شده در هاون چینی پودر شدند. نمونه‌های پودر شده به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا رطوبت احتمالی آنها گرفته شود. برای انجام آنالیز، تقریباً ۷۰-۵۰ میلی‌گرم از نمونه‌های پودر شده در کروسیبل^۶ قرار داده شد و سپس با استفاده از روش پیرولیز راک - ایول (طبق روش استاندارد) آنالیز شدند (شکل ۳).

خاکستری با رنگ روشن تا تیره تشکیل شده است که سرشار از فرامینفرهای پلانکتونی‌اند (Mohseni and Al-Aasm 2004). این سازند در فروافتادگی دزفول، به سه بخش غیررسمی تقسیم شده است. بخش‌های پایینی و بالایی، محتوای آلی کم دارند و در شرایط نسبتاً اکسیدان^۱ ته‌نشین شده‌اند. در مقابل، بخش‌های میانی این سازند، محتوای آلی نسبتاً بالاتری دارند و تحت شرایط بدون اکسیژن (احیایی)^۲ رسوب کرده‌اند (Alizadeh et al. 2020)؛ بنابراین مشخص است که تنها بخش‌های میانی سازند پابده، پتانسیل کافی برای زایش هیدروکربن^۳ را دارد و کل ضخامت سازند پابده، سنگ منشأ در نظر گرفته نمی‌شود. از نظر بلوغ حرارتی، سازند پابده در ابتدایی‌ترین مراحل زایش هیدروکربن قرار دارد؛ اما در نواحی شمال شرقی فروافتادگی دزفول، به دلیل تدفین عمیق، درجات بالاتری از بلوغ حرارتی را تجربه کرده است (Bordenave and Hegre 2010).

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری

در این تحقیق، در مجموع ۲۴ نمونه خرده حفاری (۱۰ نمونه از چاه شماره ۱۱ میدان منصورآباد و ۱۴ نمونه از چاه شماره ۲ تاقدیس خویز) از سازند پابده بررسی و مطالعه شده است. این نمونه‌ها ابتدا با استفاده از روش پیرولیز راک - ایول^۶، آنالیز و پس از غربالگری اولیه، در مجموع ۱۲ نمونه (۶ نمونه از میدان منصورآباد و ۶ نمونه از تاقدیس خویز)، برای مطالعات دقیق‌تر پتروگرافی آلی تحت نور انعکاسی انتخاب شدند.

روش پیرولیز راک - ایول

⁴ Detergent

⁵ n-hexane

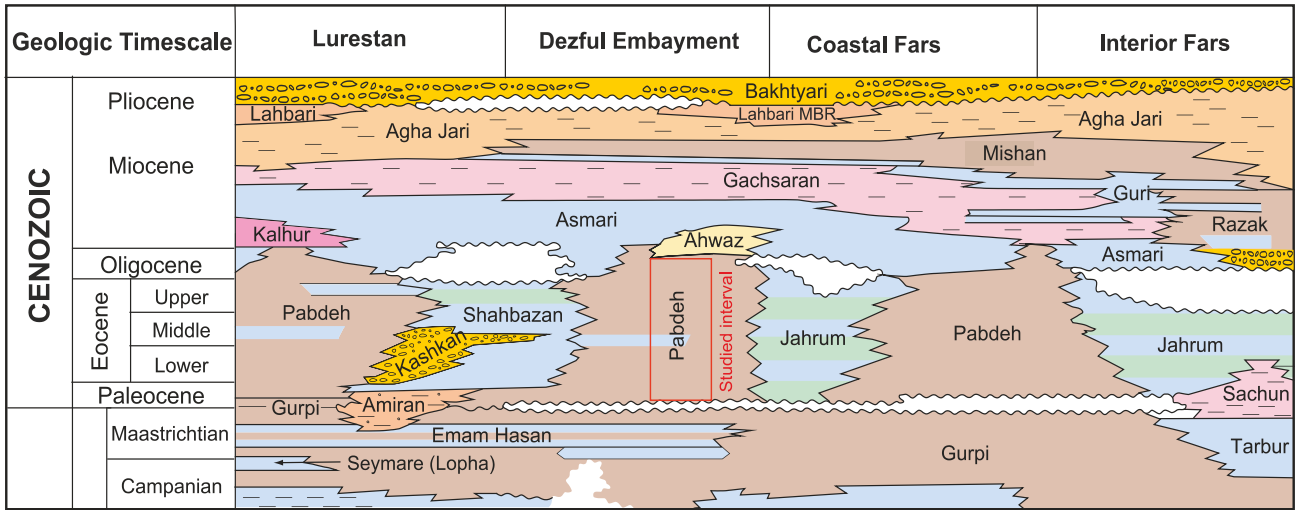
⁶ Crucible

¹ Oxidic conditions

² Anoxic conditions

³ Hydrocarbon generation

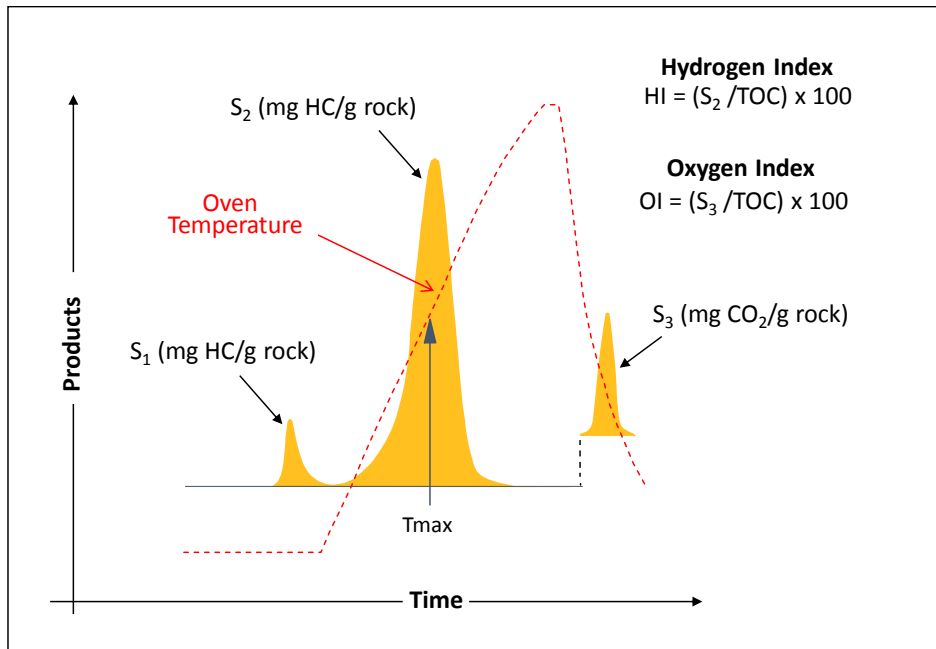




شکل ۲- ستون سنگ - چینه‌شناسی کرتاسه - سنوزوئیک حوضه زاگرس (Motiei 1993)

Limestone Shale Conglomerate and clastics Dolomite Sandstone
 Shaly Limestone Siltstone Anhydrite (sabkha & lagoon) Evaporite (deep basin)

Fig 2- Generalized Cretaceous - Cenozoic lithostratigraphic column of the Zagros basin (Motiei 1993)



شکل ۳- روش کار دستگاه پیرولیز راک - ایول و پارامترهای ژئوشیمیایی مهم به دست آمده از آن (Behar et al. 2001)

Fig 3- Analytical procedure of the Rock-Eval pyrolysis device and the main analytical parameters obtained from it (Behar et al. 2001)

طول بلوغ، باعث کاهش تدریجی هیدروژن از ساختار کروژن می‌شود (Peters and Cassa 1994). در طی تجزیه حرارتی مواد آلی در کوره پیرولیز (شکل ۳)، بخش‌های واکنش‌پذیر کروژن به محصولات هیدروکربنی تبدیل می‌شوند. این پتانسیل زایش، به‌عنوان پارامتر S_2 اندازه‌گیری می‌شود و پتانسیل زایش هیدروکربن باقی‌مانده کروژن را نشان می‌دهد (Hunt 1996). پارامتر T_{max} مربوط به دمایی است که در آن مقدار زایش هیدروکربن از کروژن قرار داده شده در شرایط پیرولیز، به بالاترین حد خود می‌رسد. این پارامتر در ابتدای پنجره زایش نفت، حدود ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد است و در آخرین مراحل پنجره نفتی، به مقادیر حدود ۴۶۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد (Hunt 1996).

پتروگرافی آلی

پس از غربالگری اولیه نمونه‌ها با استفاده از داده‌های حاصل از آنالیز راک - ایول، نمونه‌هایی با ویژگی‌های ژئوشیمیایی مناسب (برای مثال، محتوای مواد آلی بالاتر) برای مطالعات میکروسکوپی دقیق‌تر انتخاب شدند. این نمونه‌ها با استفاده از دستورالعمل‌های استاندارد ارائه شده، به صورت قرص‌های صیقلی^۷ آماده شدند. در پژوهش حاضر، مطالعات پتروگرافی آلی با میکروسکوپ (Zeiss Axioplane II) زیر نور انعکاسی^۸، به حالت مستغرق در روغن ایمرسیون^۹، با بزرگ‌نمایی چشمی ۱۰۰ برابر انجام شدند (شکل ۴).

دستگاه راک - ایول^۶، یکی از ابزارهای رایج در صنعت نفت است که برای ارزیابی مقدار، نوع و بلوغ حرارتی مواد آلی موجود در سنگ‌های منشأ به کار می‌رود (Behar et al. 2001). علاوه بر این، پارامترهای متعددی که از آنالیز راک - ایول حاصل می‌شوند، در راستای تفسیر محیط‌های رسوبی دیرینه سنگ‌های منشأ به کار می‌روند (Hunt 1996).

مقدار ماده آلی در یک سنگ منشأ، شامل کل کربن آلی^۱ نمونه است که به صورت درصد وزنی بیان و هم کروژن و هم بیتومن را شامل می‌شود (Hunt 1996). واژه کروژن نخستین بار، برای اشاره به ماده آلی موجود در شیل‌های نفتی استفاده شد که در طی گرم‌شدن، نفت تولید می‌کردند. بعدها این اصطلاح به تمام مواد آلی پراکنده در سنگ‌های رسوبی اطلاق شد که در اسیدهای غیر اکسیدکننده^۲، بازها^۳ و حلال‌های آلی^۴، نامحلول بودند (Hunt 1996). کروژن جزء خاصی از مواد آلی است که پس از خردکردن نمونه و شستن آن با حلال‌های آلی، باقی می‌ماند؛ در حالی که بیتومن بخشی از ماده آلی است که در حلال‌های آلی حل می‌شود و عمدتاً با پارامتر S_1 حاصل از آنالیز راک - ایول نمونه‌های سنگی پودر شده مطابقت دارد (Tissot and Welte 1984; Peters and Cassa 1994). به طور کلی، سه نوع اصلی کروژن با استفاده از داده‌های آنالیز راک - ایول تعیین می‌شود (با استفاده از نمودارهای شاخص هیدروژن^۵ در مقابل شاخص اکسیژن^۶) که با طبقه‌بندی منتشر شده از سوی دانشمندان علوم زغال‌سنگ، مطابقت دارد (Stach et al. 1982; Taylor et al. 1998). هرچه مقدار نسبی هیدروژن در کروژن بیشتر باشد، پتانسیل زایش هیدروکربن آن بیشتر است. زایش محصولات نفتی/گازی در

¹ Total Organic Carbon (TOC)

² Non-oxidizing acids

³ Bases

⁴ Organic solvents

⁵ Hydrogen Index (HI)

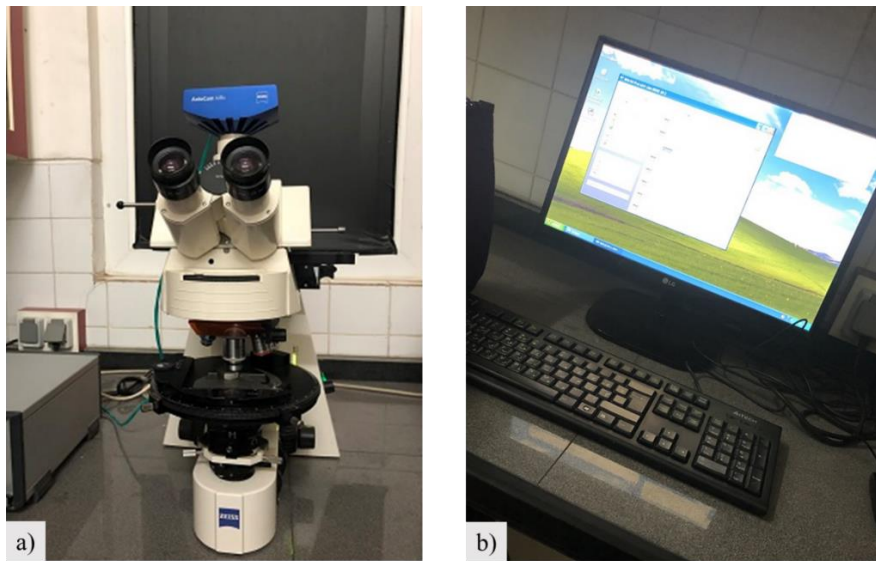
⁶ Oxygen Index (OI)

⁷ Polished pellets

⁸ Reflected light

⁹ Immersion Oil





شکل ۴- میکروسکوپ (Zeiss Axioplan II) (a) و دستگاه عکس‌برداری کامپیوتری (b) استفاده‌شده در این مطالعه

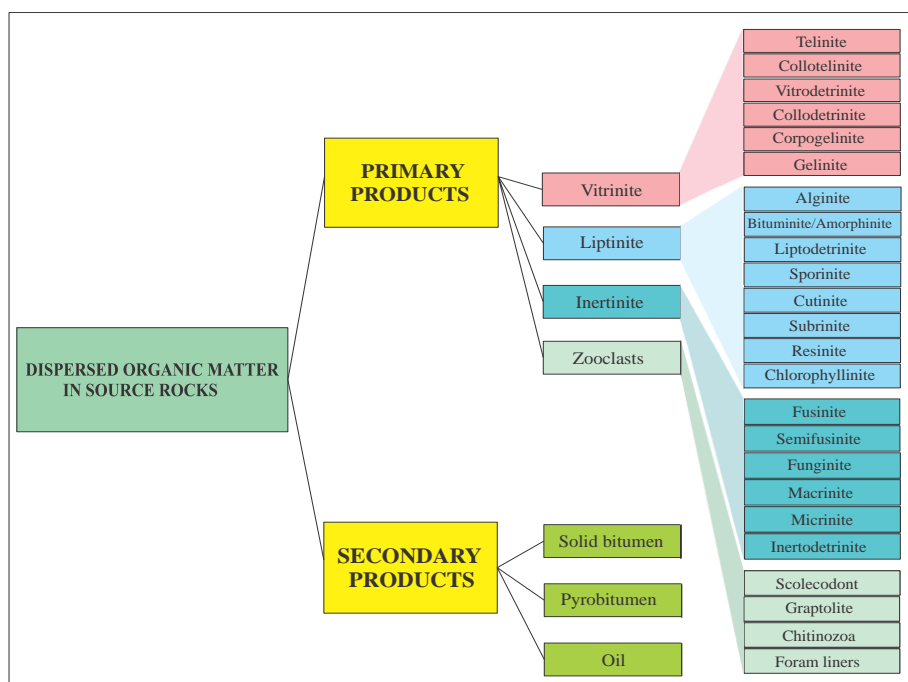
Fig 4- Zeiss Axioplan II microscope (a) and the associated computerized imaging device (b) used in this study

(Mastalerz et al. 2018; Liu et al. 2022) (شکل ۵). ماسرال‌های اولیه نمایانگر ویترینایت^۲، لپتینایت^۳ (شامل آلژینایت^۴ و ماده آلی آمورف یا آمورفینایت/بیتومینایت^۵)، اینرتینایت^۶ و زئوکلاست‌ها^۷ هستند (شکل ۵). در مقابل، ماسرال‌های ثانویه، از طریق تبدیل حرارتی ماسرال‌های اولیه تولید می‌شوند و شامل بیتومن جامد^۸ و پیروبیتومن^۹ هستند (Liu et al. 2022) (شکل ۵).

مواد آلی پراکنده‌شده در شیل‌های ریزدانه، ویژگی‌های پتروگرافی آلی متفاوتی نسبت به مواد آلی حفظ‌شده در زغال‌سنگ‌ها دارند (Taylor et al. 1998). ممکن است مواد آلی موجود در رگه‌های زغال‌سنگ حاوی ۹۰ درصد ماسرال تشخیص‌دانی و تنها ۱۰ درصد ماده آلی آمورف باشد؛ اما مواد آلی حفظ‌شده در داخل سنگ‌های شیلی ریزدانه، معمولاً در بر دارنده بیش از ۵۰ درصد مواد آلی آمورف است (Gonçalves et al. 2024). بقایای تشخیص‌دانی انواع مختلف مواد آلی، که به وسیله مورفولوژی‌شان در زیر میکروسکوپ از یکدیگر متمایز می‌شوند، ماسرال^۱ نامیده می‌شوند (Stach et al. 1998; Taylor et al. 1998؛ بنابراین، بین سنگ‌های شیلی غنی از ماده آلی و زغال‌سنگ از نظر محتویات ماسرالی، تفاوت‌های چشمگیری انتظار می‌رود. مواد آلی پراکنده در سنگ‌های شیلی، به‌طور کلی به پنج گروه ماسرال دسته‌بندی می‌شوند

² Vitrinite
³ Liptinite
⁴ Alginite
⁵ Amorphinite/Bituminite
⁶ Inertinite
⁷ Zooclast
⁸ Solid bitumen
⁹ Pyrobitumen

¹ Maceral



شکل ۵- طبقه‌بندی کلی مواد آلی پراکنده (ماده آلی اولیه و ثانویه) در سنگ‌های منشأ (Mastalerz et al. 2018)

Fig 5- Generalized classification of dispersed organic matter (primary and secondary organic matter) in source rocks (Mastalerz et al. 2018)

زایش متان دارند (Taylor et al. 1998). به‌طور کلی، ماسرال‌های اولیه در طی بلوغ حرارتی، به نفت، بیتومن جامد و پیرو بیتومن تبدیل می‌شوند (Suárez-Ruiz et al. 2012). بیتومن جامد، یک ماده آلی نیمه‌جامد است که در زیر نور سفید انعکاسی، بی‌شکل و مات به نظر می‌رسد (Sanei 2020). وجود این ماسرال‌ها در فراوانی‌های مختلف در نمونه‌ها، نشان‌دهندهٔ زایش یا مهاجرت محلی هیدروکربن است. این ماسرال‌ها عموماً شکل فضا یا حفره‌ای را به خود می‌گیرند که آن را اشغال کرده‌اند (Mastalerz et al. 2018). اگر بیتومن جامد در معرض شکست حرارتی ثانویه در پنجرهٔ گاز خشک^۱ قرار بگیرد، به پیرو بیتومن تبدیل می‌شود (Liu et al. 2022) که اساساً فاقد پتانسیل هیدروکربن‌زایی است (Sanei 2020).

شایان ذکر است که مادهٔ آلی آمورف (AOM)، رایج‌ترین نوع مادهٔ آلی در سنگ‌های شیلی است (Liu et al. 2022). رنگ مادهٔ آلی آمورف زیر نور انعکاسی به حالت مستغرق در روغن، بسته به میزان تکامل حرارتی آن، خاکستری تیره، قهوه‌ای تا سیاه است (Liu et al. 2019). این ماسرال‌ها پس از پیک دمای پنجرهٔ نفتی، به دلیل تبدیل به نفت و گاز، ناپدید می‌شوند (Mastalerz et al. 2018; Liu et al. 2020). علاوه بر این، ممکن است سنگ‌های شیلی غنی از مادهٔ آلی، حاوی ماسرال‌های آلزینایت فراوانی باشند که از اجسام جلبکی مشتق شده‌اند و معمولاً پتانسیل زایش هیدروکربن بالایی دارند (Hackley et al. 2024; Gonçalves et al. 2018). آلزینایت در زیر نور سفید انعکاسی و به حالت مستغرق در روغن، رنگ قهوه‌ای کهربایی دارد (Liu et al. 2019). ممکن است مقادیر ناچیزی ویتزینایت، در سنگ‌های شیلی غنی از مادهٔ آلی نیز وجود داشته باشد. این ماسرال‌ها از گیاهان عالی خشکی مشتق می‌شوند و پتانسیل

¹ Dry Gas window

نتایج و بحث

نتایج پیرولیز راک - ایول

کافی (قرائت S_2 بالا) است. براساس دستورالعمل‌های استاندارد که قبلاً منتشر شده است (Peters and Cassa 1994)، سازند پابده، سنگ منشأ بسیار خوب تا عالی شمرده و در تاقدیس‌های مطالعه‌شده، طبقه‌بندی می‌شود.

نتایج حاصل از پیرولیز راک - ایول نمونه‌های سازند پابده در میدان‌های نفتی مطالعه‌شده (جدول ۱)، نشان‌دهنده وجود مواد آلی فراوان (مقادیر TOC بالا) با پتانسیل زایش هیدروکربن

جدول ۱- نتایج پیرولیز راک - ایول نمونه‌های سازند پابده در تاقدیس خویز (چاه شماره ۲) و میدان نفتی منصورآباد (چاه شماره ۱۱) نمونه‌هایی که برای مطالعات پتروگرافی آلی انتخاب شده‌اند، به صورت بولد با رنگ قرمز مشخص شده‌اند.

Table 1- Rock-Eval pyrolysis results for the Pabdeh Formation samples in the Khaviz Anticline (well#2) and Mansourabad Oilfield (well#11). Samples selected for organic petrographic examinations are highlighted in boldface with a red color.

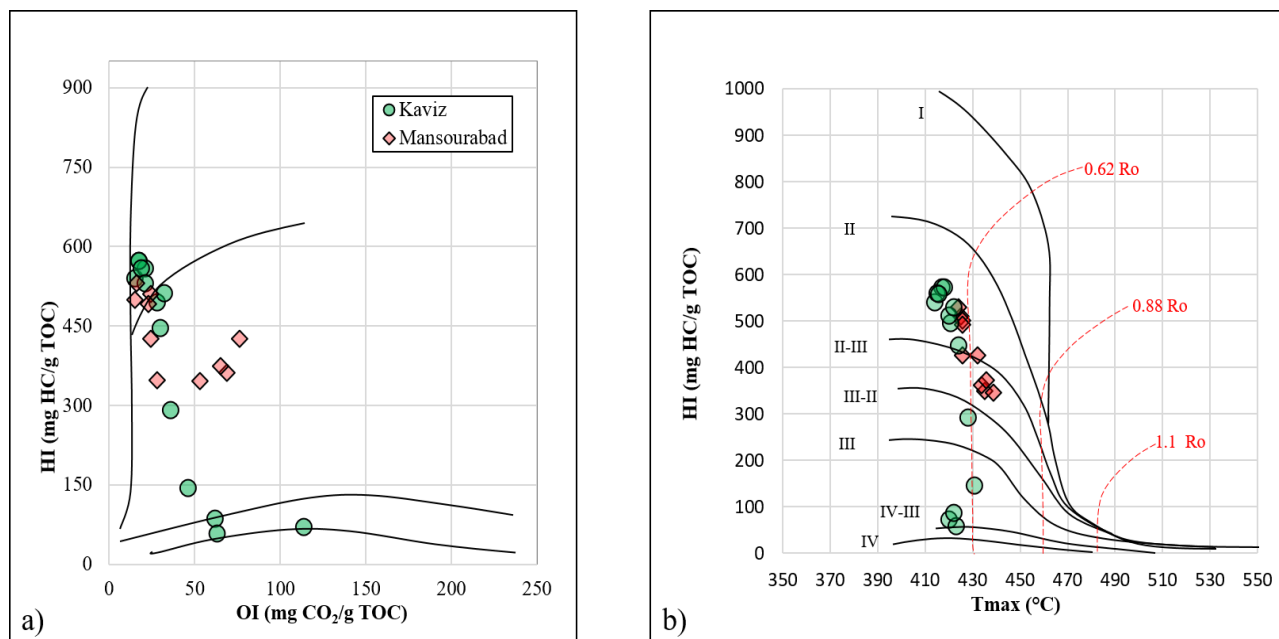
Oilfield	Depth (m)	TOC (wt%)	Tmax (°C)	S ₁ (mg rock)	S ₂ HC/g (mg rock)	S ₃ HC/g (mg TOC)	HI CO ₂ /g (mg TOC)	OI (mg CO ₂ /g TOC)	PI
Khaviz	232	0.21	420	0.13	0.15	0.24	71	114	0.46
Khaviz	264	0.43	423	0.02	0.25	0.27	58	63	0.08
Khaviz	290	1.19	428	0.13	3.47	0.43	292	36	0.04
Khaviz	330	0.52	422	0.04	0.45	0.32	87	62	0.08
Khaviz	350	1.01	431	0.02	1.46	0.46	145	46	0.01
Khaviz	448	1.65	424	0.31	7.36	0.49	446	30	0.04
Khaviz	472	2.37	421	0.24	11.73	0.66	495	28	0.02
Khaviz	490	6.46	414	0.78	34.94	0.96	541	15	0.02
Khaviz	500	4.82	417	1.03	27.62	0.81	573	17	0.04
Khaviz	510	3.21	415	0.35	17.97	0.68	560	21	0.02
Khaviz	516	4.49	418	0.74	25.75	0.78	573	17	0.03
Khaviz	534	4.57	416	0.59	25.54	0.85	559	19	0.02
Khaviz	566	2.58	420	0.26	13.21	0.83	512	32	0.02
Khaviz	589	2.48	422	0.29	13.15	0.53	530	21	0.02
Mansourabad	2916	1.66	435	2.42	5.8	0.47	349	28	0.43
Mansourabad	2962	1.17	439	2.85	4.03	0.61	346	53	0.41
Mansourabad	3010	4.4	425	4.44	22.47	1.07	510	24	0.17
Mansourabad	3030	5.26	426	6.39	26.3	0.77	500	15	0.22
Mansourabad	3050	5.6	424	5.53	29.71	0.89	530	16	0.16
Mansourabad	3070	3.88	426	4.03	19.07	0.87	429	23	0.17
Mansourabad	3100	4.18	426	4.08	17.84	0.99	426	24	0.19
Mansourabad	3140	1.83	432	1.88	7.78	1.39	426	76	0.33
Mansourabad	3208	1.29	434	2.13	4.66	0.88	362	69	0.43
Mansourabad	3228	1.24	436	2.09	4.64	0.8	374	65	0.43

صورت رسیدن به بلوغ کافی، این نوع مواد آلی به ترتیب قادر به زایش نفت و نفت - گاز هستند؛ با این حال، نمودار شاخص هیدروژن در مقابل T_{max} برای نمونه‌های مطالعه‌شده

نمودار شاخص هیدروژن در مقابل شاخص اکسیژن، نشان می‌دهد که نمونه‌های مطالعه‌شده عمدتاً حاوی ماده آلی نوع II با مقادیر جزئی ماده آلی نوع II/III هستند (شکل ۶ a). در

مطالعه‌شده نسبت داده می‌شود (Hunt 1996)؛ زیرا نمونه‌هایی با مقادیر HI بالاتر، بیشتر با قرائت‌های T_{max} پایین‌تر همراه‌اند (جدول ۱ و شکل ۶).

ما نشان می‌دهد که سازند پابده، بلوغ حرارتی مطابق با مراحل اولیه زایش هیدروکربن را دارد (شکل ۶ b). پراکندگی جزئی در قرائت‌های T_{max} ، به غنای هیدروژن در نمونه‌های

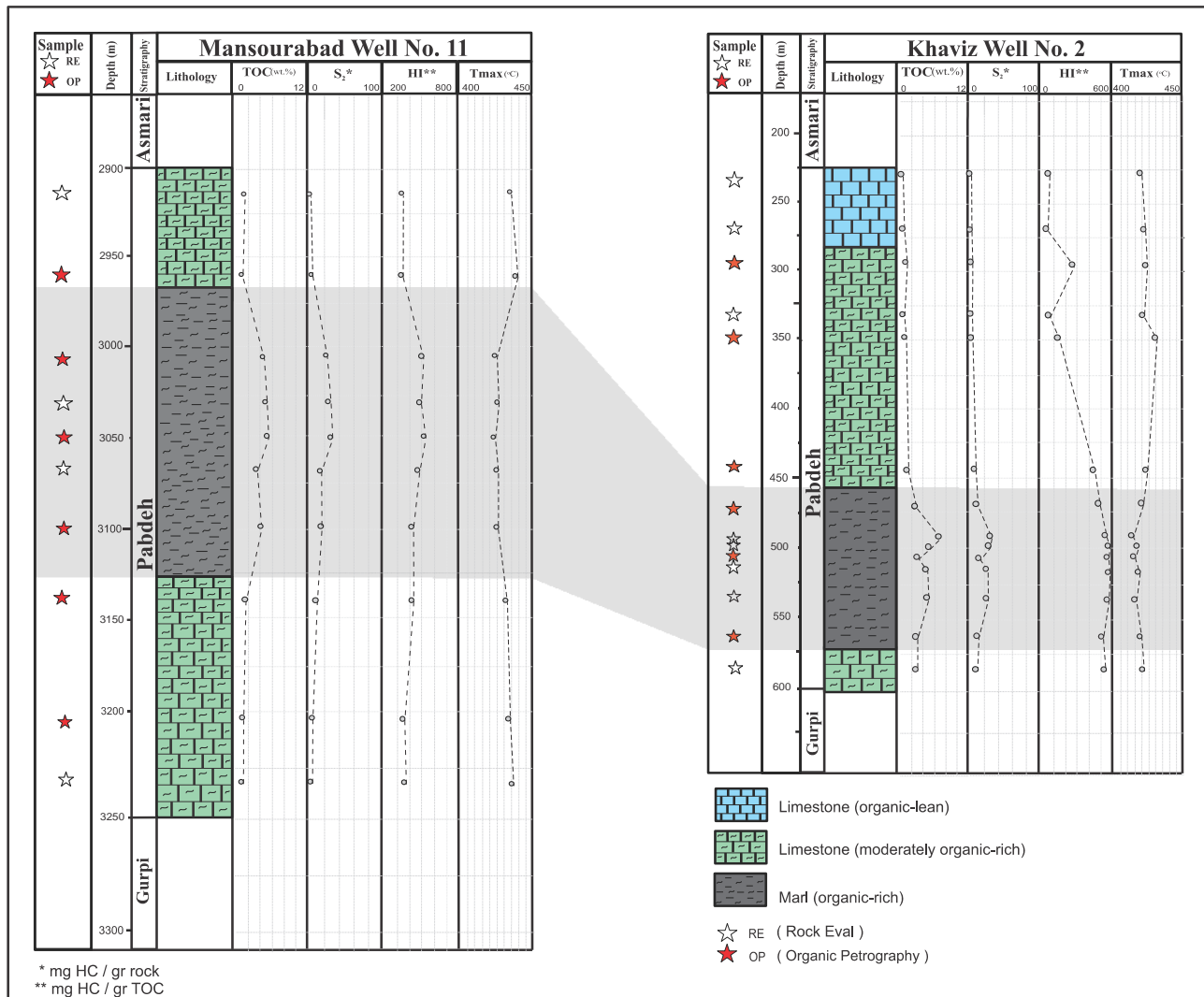


شکل ۶- نمودار شاخص هیدروژن در مقابل شاخص اکسیژن، نشان‌دهنده نوع ماده آلی (a) و نمودار شاخص هیدروژن در مقابل T_{max} ، نشان‌دهنده بلوغ حرارتی (b) (Hunt 1996) برای نمونه‌های سازند پابده در تاق‌دیس‌های خویز و منصورآباد

Fig 6- HI versus OI diagram indicating the type of organic matter (a), and HI versus T_{max} diagram indicating the level of thermal maturity (b) (Hunt 1996) for samples from the Pabdeh Formation in Khaviz and Mansourabad anticlines

بالاتری نسبت به بخش‌های بالایی و پایینی است (شکل ۷) که با نتایج منتشرشده قبلی مطابقت دارد (Alizadeh et al. 2020).

بررسی نتایج پیرولیز در نیمرخ عمودی نشان می‌دهد که بخش‌های میانی سازند پابده، دارای مقادیر HI و TOC نسبتاً



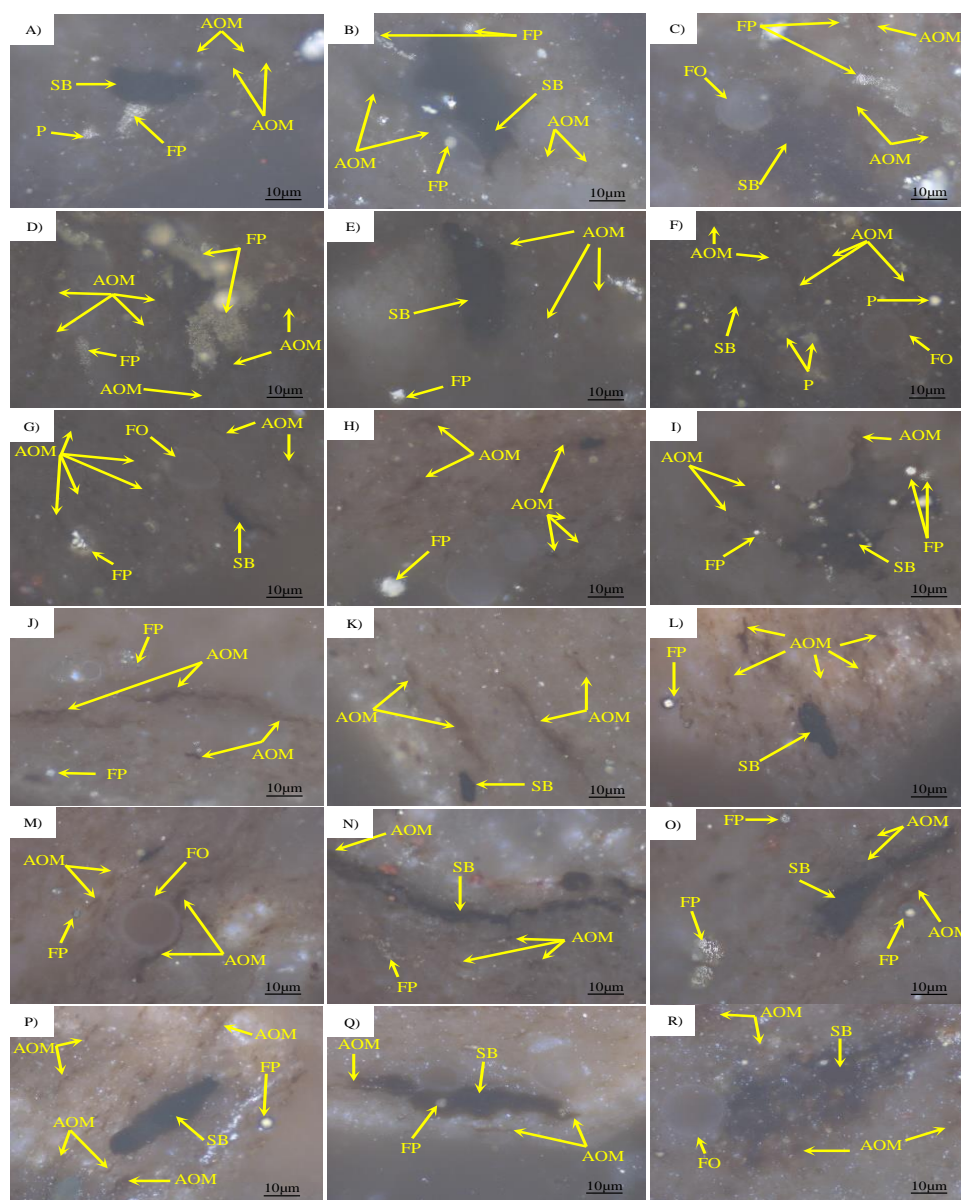
شکل ۷- پروفیل عمودی پارامترهای راک - ایول به دست آمده برای نمونه‌های سازند پابده در تاقدیس خویز و میدان منصورآباد، نشان‌دهنده وجود یک بخش غنی از ماده آلی در قسمت‌های میانی سازند پابده است.

Fig 7- Vertical profiles of Rock-Eval parameters obtained for Pabdeh samples in the Khaviz Anticline and Mansourabad Oilfield indicating the presence of organic-rich intervals in the middle parts of the Pabdeh Formation.

سازند پابده از نظر پتروگرافی آلی، حاوی سرشت متفاوتی نسبت به بخش‌های زیرین و بالایی آن‌اند. به عبارت دیگر، قسمت‌های میانی سازند پابده از نظر مواد آلی آمورف بسیار غنی‌ترند (شکل ۸). علاوه بر این، این بخش‌ها معمولاً با حضور غالب پیریت فرمبوتیدال و همچنین مقادیر درخور توجهی از بیتومن جامد همراه‌اند (شکل ۸).

نتایج پتروگرافی آلی

برای تشخیص دقیق‌تر ماهیت مواد آلی موجود در سازند پابده، نمونه‌های انتخاب‌شده از این سازند (جدول ۱) با استفاده از روش‌های پتروگرافی آلی بررسی شدند. مطابق با نتایج به دست آمده از پیرولیز راک - ایوال (برای مثال شکل ۷)، مشاهدات میکروسکوپی نشان دادند که بخش‌های میانی



شکل ۸- عکس‌های پتروگرافی آلی از بخش‌های غنی از ماده آلی موجود در سازند پایده در تاق‌دیس‌های مطالعه‌شده

فتومیکروگراف‌های A, B, C (۳۰۱۰ متر)؛ D, E, F (۳۰۵۰ متر)؛ G, H, I (۳۱۰۰ متر) مربوط به میدان منصورآبادند. فتومیکروگراف‌های J, K (۴۲۷ متر)؛ L, M, N, O (۵۱۰ متر)؛ P, Q, R (۵۶۶ متر) مربوط به تاق‌دیس خویز هستند. اختصارات: AOM = ماده آلی آمورف، FP = پیریت فرمبئیدال، SB = بیتومن جامد، P = پیریت و FO = فسیل.

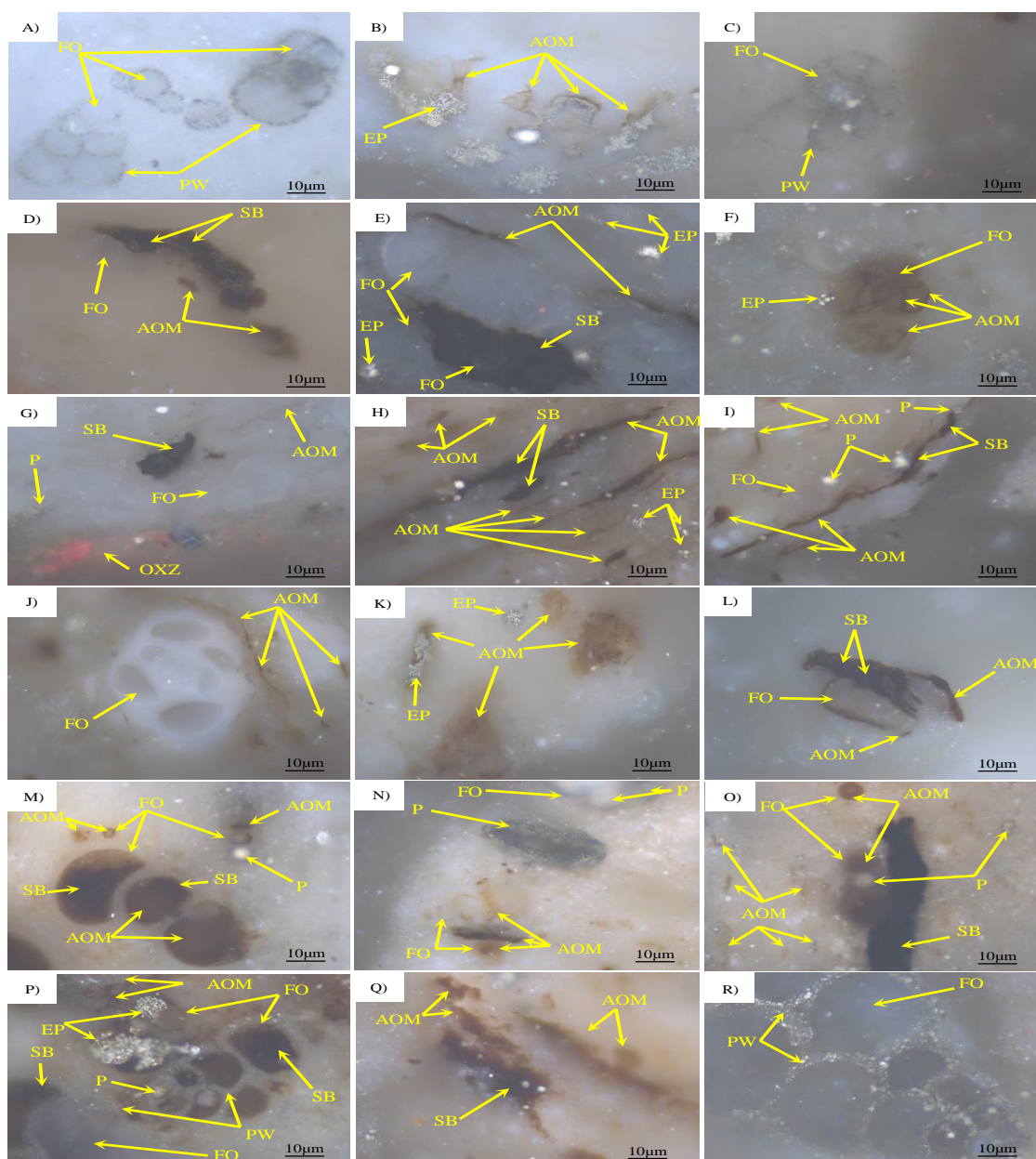
Fig 8- Example photomicrographs showing the general characteristics of organic-rich intervals within the Pabdeh Formation in the studied oil fields. Photomicrographs A, B, C (3010m); D, E, F (3050m); and G, H, I (3100m) are from Mansourabad Field. Photomicrographs J, K (427m); L, M, N, O (510m); and P, Q, R (566m) are from Khaviz Anticline. Abbreviations: AOM = amorphous organic matter, FP = framboidal pyrite, SB = solid bitumen, P = pyrite and FO = fossil.

زایش یافته از بخش‌های غنی از ماده آلی سازند پابده (بخش‌های میانی) باشد. به‌طور کلی، مشاهدات پتروگرافی نشان می‌دهند که بخش‌های فقیر از ماده آلی سازند پابده، در محیط رسوبی دیرینه با شرایط اکسیدان ته‌نشست یافته‌اند (شکل ۹).

وجود بیتومن جامد در نمونه‌های مطالعه‌شده از سازند پابده، نشان‌دهنده شروع زایش هیدروکربن از مواد آلی مربوطه است. این نتیجه‌گیری همچنین با داده‌های پیرولیز راک - ایول تأیید می‌شود که نشان می‌دهند سازند پابده، در مراحل اولیه زایش نفت قرار دارد (شکل ۶ b)؛ بنابراین، براساس مشاهدات پتروگرافی آلی، نتیجه گرفته می‌شود که بخش‌های غنی از ماده آلی سازند پابده در میدان‌های نفتی مطالعه‌شده، حاوی مواد آلی آمورف بسیار واکنش‌پذیرند که فرآیند زایش هیدروکربن در آنها آغاز شده است. با وجود این، شواهد محکمی از خروج هیدروکربن‌های زایش‌یافته در دسترس نیست و شناخت این فرآیند مستلزم انجام مطالعات بیشتری است. به‌طور کلی، قسمت غنی از ماده آلی واقع در بخش‌های میانی سازند پابده، با هم‌نشینی نزدیک بین ماده آلی آمورف و پیریت فرمبوئیدال، در یک ماتریکس مارلی تیره‌رنگ مشخص می‌شود (شکل ۸). این مشاهدات نشان می‌دهند که شرایط محیط رسوبی دیرینه، برای حفظ‌شدگی مواد آلی در طول ته‌نشینی این بخش‌ها بسیار مطلوب بوده است.

در مقابل، نمونه‌های قسمت‌های بالایی و پایینی سازند پابده، نشان‌دهنده ویژگی‌های پتروگرافی آلی متفاوتی‌اند. این بخش‌ها عموماً دارای مواد آلی آمورف کمتری هستند (شکل ۹). علاوه بر این، نمونه‌های بخش‌های پایینی و بالایی سازند پابده، با ماتریکس آهکی رنگ روشن حاوی فسیل‌های فراوان و پیریت شکل‌دار^۱ مشخص می‌شوند (شکل ۹). همچنین بیتومن جامد در نمونه‌های فقیر از ماده آلی، در مقادیر کمتری وجود دارد و عمدتاً حفره‌های حجرات فسیلی را پر می‌کند (شکل ۹). منشأ بیتومن جامد موجود در رخساره‌های فقیر از ماده آلی سازند پابده، هنوز به‌درستی مشخص نیست و شناخت آن به بررسی‌های ژئوشیمیایی دقیق‌تری نیاز دارد؛ اما این بیتومن جامد ممکن است برخاسته از هیدروکربن‌های

¹ Euhedral pyrite



شکل ۹- عکس‌های پتروگرافی آلی از بخش‌های فقیر از ماده‌ی آلی مربوط به سازند پابده در تاق‌دیس‌های مطالعه‌شده
 فتومیکروگراف‌های A, B (۲۹۶۲ متر): C, D (۳۱۴۰ متر); E, F, G (۳۲۰۸ متر) مربوط به میدان نفتی منصورآباد هستند.
 فتومیکروگراف‌های H, I, J (۲۹۰ متر); K, L (۳۵۰ متر); و M, N, O, P, Q, R (۴۴۸ متر) مربوط به تاق‌دیس خوین هستند.
 اختصارات: AOM = ماده‌ی آلی آمورف، P = پیریت، EP = پیریت یوهدرال، FO = فسیل، PW = دیواره پیریتی، SB = بیتومن جامد، OX = زون اکسید شده.

Fig 9- Example photomicrographs from the organic-poor intervals of the Pabdeh Formation in the studied anticlines. Photomicrographs A, B (2962m); C, D (3140m); and E, F, G (3208m) are from the Mansourabad Field. Photomicrographs H, I, J (290m); K, L (350m); and M, N, O, P, Q, R (448m) are from the Khaviz Anticline. Abbreviations: AOM = amorphous organic matter, P = pyrite, EP = euhedral pyrite, FO = fossil, PW = pyritic wall, SB = solid bitumen, OX = oxidized zone.



References

- Alavi M. 2007. Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. *American Journal of Science*, 307(9): 1064-1095. <https://doi.org/10.2475/09.2007.02>.
- Alipour M. 2022. Organic facies and paleo-depositional environments of the Aptian–Albian Kazhdumi source rock in the Zagros basin of Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 145: 105887. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105887>.
- 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>
- Alipour M. 2024. Petroleum systems of the Iranian Zagros Fold and Thrust Belt. *Results in Earth Sciences*, 2: 100027. <https://doi.org/10.1016/j.rines.2024.100027>.
- Alizadeh B. Opera A. Kalani M. and 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 <https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2020.18.15>.
- Alizadeh B. Sarafdokht H. Rajabi M. Opera A. and 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>.
- Amiri S. and Alipour M. 2023a. Organic facies and organic petrographic characteristics of the Pabdeh Formation in the Kilur-Karim Oilfield, SW Iran. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 39(3): 1-14. <https://doi.org/10.22108/jssr.2023.139363.1270>
- Amiri S. and Alipour M. 2023b. Organic geochemical evaluation of the Pabdeh Formation in the Siah-Makan Oilfield using Rock-Eval pyrolysis and organic petrographic methods. *Advanced Applied Geology*, 13(3): 782-793. <https://doi.org/10.22055/aag.2023.43214.2349>.
- Behar F. Beaumont V. and Pentead H. D. B. 2001. Rock-Eval 6 technology: performances and developments. *Oil & Gas Science and Technology*, 56(2): 111-134. <https://doi.org/10.2516/ogst:2001013>.
- Berberian M. and King G. 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2):210-265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>.
- Bordenave M. and Burwood R. 1990. Source rock distribution and maturation in the Zagros orogenic belt: provenance of the Asmari and Bangestan

نتیجه

براساس نتایج پیرولیز راک - ایول به دست آمده برای ۲۴ نمونه از سازند پابده در (چاه شماره ۲) از تاقدیس خویز و (چاه شماره ۱۱) میدان منصورآباد، مواد آلی موجود در این سازند، از نوع II و II/III طبقه‌بندی می‌شود. همچنین نمودار HI در مقابل T_{max} برای نمونه‌های مطالعه‌شده نشان می‌دهد که سازند پابده در مراحل ابتدایی هیدروکربن‌زایی در میدان‌های نفتی مطالعه‌شده قرار دارد. برای روشن‌تر شدن بیشتر و بهتر ماهیت مواد آلی رسوبی، نمونه‌های منتخب از سازند پابده، با استفاده از روش پتروگرافی آلی بررسی شدند. کاربرد تلفیقی پیرولیز راک - ایول و پتروگرافی آلی، وجود یک بخش غنی از ماده آلی را تأیید می‌کند که بین رخساره‌های فقیر از ماده آلی قرار گرفته است. براساس مشاهدات پتروگرافی آلی، بخش‌های میانی سازند پابده حاوی رخساره‌های آلی متمایزی‌اند که با فراوانی ماده آلی آمورف، بیتومن جامد و پیریت فرموبئیدال در یک ماتریکس مارلی تیره رنگ مشخص می‌شوند. در مقابل، بخش‌های فقیر از ماده آلی عمدتاً دارای سنگ‌شناسی آهکی، فسیل‌های فراوان و مقادیر ناچیزی ماده آلی آمورف‌اند. این مشاهدات نشان‌دهنده حفظ‌شدگی بهتر مواد آلی در حین ته‌نشست بخش‌های میانی سازند پابده‌اند که به احتمال زیاد مرتبط با گسترش شرایط بدون اکسیژن (احیایی) در محیط رسوبی دیرینه است. در مقابل، بخش‌های فقیر از ماده آلی تحت رژیم‌های اکسیژن‌دار، با حفظ‌شدگی ضعیف‌تر مواد آلی نهشته شده‌اند. این نتایج برای بازسازی شرایط محیطی دیرینه در حین رسوب‌گذاری سازند پابده، اهمیت ویژه‌ای دارند. علاوه بر این، یافته‌های حاصل از این مطالعه، بینش جدیدی را درباره تغییرات جانبی و عمودی رخساره آلی در سازند پابده، به‌عنوان یک سنگ منشأ بالقوه در رسوبات سنوزوئیک حوضه زاگرس ارائه می‌دهند.



- during thermal maturation: Implications for kerogen transformation, in: Camp W. K. Milliken K. L. Taylor K. Fishman N. Hackley P. C. and Macquaker H. S. (Eds.), *Mudstone Diagenesis. Research Perspectives for Shale Hydrocarbon Reservoirs, Seals, and Source Rocks*, AAPG Memoir, 120: 165-188. <https://doi.org/10.1306/13672216M1213380>.
- Liu B. Teng J. Mastalerz M. and Schieber J. 2020. Assessing the thermal maturity of black shales using vitrinite reflectance: Insights from Devonian black shales in the eastern United States. *International Journal of Coal Geology*, 220: 103426. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2020.103426>.
- Mastalerz M. Drobniak A. and 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. and Al-Aasm I. 2004. Tempestite deposits on a storm-influenced carbonate ramp: an example from the Pabdeh Formation (Paleogene), Zagros Basin, SW Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 27(2): 163-178. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2004.tb00051.x>.
- Motiei H. 1993. Stratigraphy of Zagros, in: Hushmandzadeh A. (Ed.), *Treatise of Geology of Iran*, Volume 1: Tehran, Geological Survey of Iran, p. 536.
- Mouthereau F. Lacombe O. and Vergés J. 2012. Building the Zagros collisional orogen: timing, strain distribution and the dynamics of Arabia/Eurasia plate convergence. *Tectonophysics*, 532: 27-60. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.01.022>.
- Peters K. E. and Cassa M. R. 1994. Applied source rock geochemistry, in: Magoon L. and Dow W. G. (Eds.), *Petroleum system-From source to trap*, American Association of Petroleum Geologists Memoir 96, p. 93-120.
- Safaei-Farouji M. Kamali M. R. and Hakimi M. H. 2021. Hydrocarbon source rocks in Kazhdumi and Pabdeh formations - A quick outlook in Gachsaran oilfield, SW Iran. *Petroleum Exploration and Production Technology*, 12:1489-1507. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01413-w>.
- Sanei H. 2020. Genesis of solid bitumen. *Scientific Reports*, 10(1): 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72692-2>.
- Sepehr M. and Cosgrove J. 2004. Structural framework of the Zagros fold-thrust belt, Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 21(7): 829-843. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2003.07.006>
- Setudehnia A. 1978. The Mesozoic sequence in south-reservoir oil accumulations. *Organic Geochemistry*, 16(1): 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. and Hegre J. A. 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. and 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>.
- Gonçalves P. Kus J. Hackley P. C. Borrego A. Hámor-Vidó M. Kalkreuth W. Mendonça Filho J. Petersen H. Pickel W. and Reinhardt M. 2024. The petrology of dispersed organic matter in sedimentary rocks: Review and update. *International Journal of Coal Geology*, 294: 104604. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2024.104604>.
- Hackley P. C. Valentine B. J. and 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>.
- Hosseiny E. Beirami A. and Amini A. 2024. Geochemical assessment of the Pabdeh Formation from the perspective of conventional and unconventional hydrocarbon resources, southwest of Iran. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 40(1): 45-58. <https://doi.org/10.22108/jssr.2024.140843.1279>
- Hunt J. M. 1996. *Petroleum Geochemistry and Geology*, WH Freeman and Company, 743p.
- James G. and Wynd J. 1965. Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 49(12): 2182-2245. <https://doi.org/10.1306/A663388A-16C0-11D7-8645000102C1865D>.
- Khazami M. and 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. *Advanced Applied Geology*, 14(1): 91-105. <https://doi.org/10.22055/aag.2023.43221.2350>.
- Liu B. Mastalerz M. and Schieber J. 2022. SEM petrography of dispersed organic matter in black shales: A review. *Earth-Science Reviews*, 224: 103874. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103874>
- Liu B. Schieber J. and Mastalerz M. 2019. Petrographic and micro-FTIR study of organic matter in the Upper Devonian New Albany Shale



- west Iran and adjacent areas. *Journal of Petroleum Geology*, 1(1): 3-42. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1978.tb00599.x>.
- Sherkati S. and 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(5): 535-554. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2004.01.007>.
- Stach E. Mackowsky M. T. Teichmuller M. Taylor G. Chandra D. and Teichmuller R. 1982. *Stach's textbook of coal petrology*, Berlin, Gebruder, Borntraeger, 535 p.
- Suárez-Ruiz I. Flores D. Mendonça Filho J. G. and Hackley P. C. 2012. Review and update of the applications of organic petrology: Part 1, geological applications. *International Journal of Coal Geology*, 99: 54-112. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.02.004>.
- Takin M. 1972. Iranian geology and continental drift in the Middle East. *Nature*, 235: 147-150. <https://doi.org/10.1038/235147a0>.
- Taylor G. H. Teichmüller M. Davis A. Diessel C. Littke R. and Robert P. 1998. *Organic Petrology*, Berlin, Gebruder Borntraeger, 704 p.
- Tissot B. P. and Welte D. H. 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*, Berlin, Springer-Verlag, 720 p.