

Original Research Paper

Geochemical evaluation of potential source rocks based on Rock-Eval pyrolysis and vitrinite reflectance analyses in Foroozan oil field

Sadegh Barati-Boldaji^{1*}, Ebrahim Sfidari¹, Houshang Mehrabi¹, and Seyed Mohammad Zamanzadeh²

¹ Research Institute of Applied Science, Academic Center for Education, Culture and Research, Tehran, Iran

² School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2023 October 28

Accepted: 2023 December 27

Available online: 2024 June 21

Keywords:

Source rock

Rock-Eval pyrolysis

Vitrinite reflectance

Foroozan field

ABSTRACT

Geochemical evaluation of potential source rocks in Foroozan Field is carried out based on Rock-Eval pyrolysis and vitrinite reflectance analyses. For getting the results, 101 samples for Rock-Eval pyrolysis and 11 samples for vitrinite reflectance analysis were selected from Gurpi, Sarvak, Kazhdumi, Dariyan, Gadvan, Upper Fahliyan, and Neyriz Formations cuttings. The results were used to determine the quantity, quality, and maturity of organic matter and show that the average content of organic matter in the studied Formations range from poor to very good. According to the interpretations, the type of organic matter in the Gurpi, Sarvak, Upper Fahliyan, and Neyriz Formations are mostly type III kerogen, and they have not reached to appropriate maturity. However, the Kazhdumi, Dariyan, and Gadvan Formations mostly show type II kerogen which is not mature enough and have not yet entered the oil window. This group of formations can be considered suitable source rocks in the Foroozan field. Despite these formations are at the onset of the oil window, they have not produced hydrocarbon yet. Therefore, these formations or their equivalents in the deeper parts of the basin could be considered as active source rocks.

1. Introduction

One of the practical usages of petroleum geochemistry is improving of exploration and enhanced oil recovery (England, 2007). Organic geochemistry has an influential potential in analyzing and interpreting source rock, hydrocarbon migration and trapping, determining productive and non-productive zones, and developing hydrocarbon fields (England, 2007; Peters and Fowler, 2002).


The rudimentary point in hydrocarbon reserve development is the deposition of organic-rich materials (i.e., source rock) which can generate hydrocarbons (Hood *et al.*, 1975; Passey *et al.*, 1990). One of the main targets in geochemical studies is determining stratigraphic units in a basin which represent the best source rocks (Hunt, 1996). In this research, attempts have been made to determine

* Corresponding author: Sadegh Barati-Boldaji; E-mail: baratiboldaji.s@gmail.com

Citation:

Barati-Boldaji, S., Sfidari, E., Mehrabi, H., and Zamanzadeh, S. M., 2024. Geochemical evaluation of potential source rocks based on Rock-Eval pyrolysis and vitrinite reflectance analyses in Foroozan oil field. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 34(2), 132, 59-74. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.422750.2119>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2023.422750.2119

 dor: 20.1001.1.10237429.1403.34.2.4.0



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

the hydrocarbon generation potential in the probable Jurassic and Cretaceous formations (i.e., Gurpi, Sarvak, Kazhdumi, Daryan, Gadvan, Upper Fahliyan, and Neyriz) in Foroozan field by using the Rock-Eval pyrolysis and vitrinite reflectance analyses results.

Foroozan field is located 100 kilometers west of Kharg Island in the offshore area in the territorial boundary between Iran and Saudi Arabia. The Arabian part of this field is called Marjan field. This field is located at the northeastern flank of an anticline generated by a salt plug. Foroozan field and its surrounding fields are developed due to the prevalent compressional tectonic regime in the Zagross area and the Persian Gulf.

The latest reservoir studies and drillings have represented that sandstone (Ahwaz) member of the Asmari Formation, carbonate parts of Sarvak Formation, thick sandstone parts of Burgan (A and B units) from Kazhdumi Formation, and carbonate parts of Fahliyan, Dariyan and Surmeh Formations are reservoirs; and Neyriz, Gadvan, Dariyan, Gurpi, Sarvak, upper part of Fahliyan, and shaly parts of Kazhdumi Formations can act as the potential source rocks for these reservoirs in the Foroozan field.

2. Research methodology

For geochemical evaluation of probable source rocks in the Foroozan field, 101 cutting samples from Gurpi, Sarvak, Kazhdumi, Daryan, Gadvan Upper Fahliyan and Neyriz Formations were selected for Rock-Eval analysis and 11 samples for determine the vitrinite reflectance.

3. Results and Discussions

3.1. Migration index and contamination assessment

The diagram of S1 versus TOC (Hunt, 1996; Peters *et al.*, 2005) along with Production Index value (PI above 0.5 representing contamination and nonindigenous hydrocarbon) (Hunt, 1996) were used for identifying the contamination. According to the mentioned methods, most of the samples are located below contamination line ($S1/TOC < 1.5$) which represents no sample contamination. 13 samples Out of 101 had contamination which were omitted and did not consider in the following analyses. Moreover, some data with TOC value lower than 1 excluded from final data and did not consider in the following analyses.

3.2. Organic matter quantity

To evaluate the potential of source rock, total organic carbon (TOC), bitumen content (EOM), S1 and S2 values are used (Huang *et al.*, 2003). The diagrams show that Gurpi Formation with 0.97-1.29 weight percent TOC is in fair to good zone. Sarvak Formation with 0.87-1.18 weight percent TOC shows fair to good quantity. According to the analysis, Kazhdumi and Neyriz Formations represent a fair to good quantity with 0.62-1.58 and 0.77-1.46

weight percent TOC, respectively. Gadvan Formation with 0.84-2.29 weight percent TOC represents a fair to very good condition. Dariyan, and Fahliyan Formations represent a fair to good quantity with 0.63-1.47, and 0.85-1.19 weight percent TOC, respectively.

3.3. Organic matter quality

The values of hydrogen index of Gurpi Formation indicate the combination of type II and III kerogen. Hydrogen index in Sarvak Formation indicates type III kerogen. Hydrogen index in Kazhdumi Formation represents type II kerogen. Dariyan Formation represents the occurrence of kerogen type II/III. Hydrogen index in Gadvan Formation indicating type II kerogen. While, this index in Neyriz Formation designate a combination of type II/III kerogen. Hydrogen index in Fahliyan Formation suggest type III kerogen for this formation.

3.4. Organic matter maturity

Variation of vitrinite reflectance against the depth illustrates that Gurpi and Sarvak samples have vitrinite reflectance of less than 0.5, confirmed immature condition. In Kazhdumi, Dariyan, Gadvan and Upper Fahliyan Formations the average values of vitrinite reflectance percent, representing immature to early mature. The average value of Ro in Neyriz Formation indicating mature conditions for this formation.

3.5. Depositional environment

The studied samples represent a vast variety of depositional environments. Gurpi, Sarvak, Upper Fahliyan and Neyriz Formations samples were in deep marine environments in the vicinity of orogens up to environments with a moderate sedimentation rate in reduced environments. The samples from Kazhdumi, Dariyan and Gadvan Formations also represent deposition in a transgressive marine environment with reduced conditions, or relatively reduced lacustrine environment or ultimately the environments with marine and terrestrial organic matter representing fast deposition under relatively oxic conditions.

4. Conclusion

The Persian Gulf basin is one of the most important oil prone basins in the world. The Foroozan field along with its Arabian counterpart (Marjan field) is one of the important fields of the northwestern part of the Persian Gulf. This field is located on Khafji-Nowrooz paleo-high.

In this research geochemical analyses of Rock-Eval and vitrinite reflectance were carried out on potential source rocks of Gurpi, Sarvak, Kazhdumi, Dariyan, Gadvan, Upper Fahliyan and Neyriz Formations in one of the wells in Foroozan field. The results represented that the average values of organic matter in the studied

formations are in the poor to very good zones. However, the type of organic matter of Gurpi, Sarvak, Upper Fahliyan and Neyriz are placed in type III kerogen which did not have enough maturity for hydrocarbon generation. On the other hand, Kazhdumi, Dariyan and Gadvan Formations have type II kerogen which is at the beginning of oil-window in the studied field. As the main conclusion, it

can be stated that Kazhdumi, Dariyan and Gadvan Formations represent suitable source rocks in Foroozan field. However, since these formations were located on a paleo-high, they were at the beginning of the oil window, so these formations or their equivalent ones which were in the deeper parts of the basin could act as the active source rocks.

ارزیابی ژئوشیمیایی سنگ مادرهای احتمالی میدان فروزان بر اساس پیرولیز راکا اول و انعکاس ویترنایت

صادق براتی بلداجی^{۱*}، ابراهیم سفیداری^۱، هوشنگ مهربابی^۱ و سید محمد زمانزاده^۲

^۱پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی شهید بهشتی، تهران، ایران
^۲دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

در این مطالعه ارزیابی ژئوشیمیایی سنگ مادرهای مستعد در میدان فروزان بر اساس آنالیزهای ژئوشیمیایی پیرولیز راکا اول و انعکاس ویترنایت انجام گرفته است. برای این منظور ۱۰۱ نمونه خرده حفاری جهت پیرولیز راکا اول و ۱۱ نمونه جهت آنالیز انعکاس ویترنایت از سازندهای گورپی، سروک، کژدمی، داریان، گدوان، فهلیان بالایی و نیریز در یکی از چاه‌های میدان فروزان، به منظور تعیین کمیت، کیفیت و بلوغ مواد آلی موجود در سنگ‌های مادر استفاده شده است. نتایج نشان داد که سازندهای مورد مطالعه میزان مواد آلی در محدوده ضعیف تا خیلی خوب را دارا می‌باشند. مواد آلی موجود در سازندهای گورپی، سروک، فهلیان بالایی و نیریز بیشتر در محدوده کروژن نوع III قرار دارند که به بلوغ کافی برای تولید هیدروکربن نرسیده‌اند. با این وجود، مواد آلی سازندهای کژدمی، داریان و گدوان بیشتر از کروژن نوع II تشکیل شده که ابتدای بلوغ قرار داشته و هنوز وارد پنجره نفت‌زایی نشده‌اند. بنابراین می‌توان اظهار کرد که سازندهای کژدمی، داریان و گدوان مستعد سنگ مادر مناسب در میدان فروزان به حساب می‌آیند. با این وجود، در میدان مورد مطالعه هنوز هیدروکربنی تولید نکرده‌اند ولی همین سازندها یا معادل آن‌ها در بخش‌های ژرف‌تر حوضه می‌توانند به‌عنوان سنگ مادرهای فعال عمل کرده باشند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:

سنگ مادر

پیرولیز راکا اول

انعکاس ویترنایت

میدان فروزان

۱- پیش‌نوشتار

امروزه از ژئوشیمی نفت به‌عنوان یک علم بنیادی برای بهبود بازده اکتشاف و تولید استفاده می‌شود (England, 2007). علم ژئوشیمی این توانایی را دارد که با بهره‌گیری از روش‌های ژئوشیمیایی به تحلیل و بررسی سنگ مادر، مهاجرت هیدروکربن، تله‌های هیدروکربنی، زون‌های تولیدی و غیر تولیدی و همچنین توسعه میادین هیدروکربنی بپردازد (Peters and Fowler, 2002; England, 2007). با استفاده از مطالعات ژئوشیمیایی می‌توان به بررسی فعالیت‌های اکتشافی و ارزیابی توان هیدروکربن‌زایی حوضه رسوبی پی برد (Tissot and Welte, 1984). برای تشکیل ذخایر هیدروکربنی، لایه‌های غنی از مواد آلی (سنگ مادر) که توانایی تولید هیدروکربن را دارا باشند، لازم است (Hood et al., 1975; Passey et al., 1990). سنگ مادر یکی از عناصر تشکیل دهنده سیستم نفتی است. فرایندهای نفت‌زایی و مهاجرت هیدروکربن از سنگ مادر، پدیده‌های مهمی هستند که در یک سیستم نفتی رخ می‌دهند. یکی از اهداف علم ژئوشیمی، تعیین واحدهای چینه‌ای است که

در یک حوضه رسوبی بهترین سنگ‌های مادر را تشکیل می‌دهند (Hunt, 1996). در این مطالعات، کمیت، نشان‌دهنده مقدار مواد آلی و میزان توان سنگ در تولید هیدروکربن است. کیفیت مواد آلی نیز تعیین کننده نوع هیدروکربن تولیدی از سنگ مادر و در نهایت درجه تکامل مواد آلی بیانگر مرحله تولید هیدروکربن می‌باشد (Hood et al., 1975; Passey et al., 1990).

از غنی‌ترین قطب‌های هیدروکربنی جهان می‌توان به منطقه جنوب باختر آسیا اشاره کرد که در این منطقه فروافتادگی دزفول در جنوب باختر و حوضه رسوبی خلیج فارس در جنوب ایران قرار گرفته که شامل میادین هیدروکربنی مهمی مانند میادین عظیم نفت و گاز حوضه زاگرس در شمال و شمال باختر حوضه خلیج فارس و میادین کشورهای حاشیه جنوبی خلیج فارس می‌باشد (Tissot and Welte, 1984; Bordenave and Hux, 1995). در طول دوره‌های احیایی در زمان‌های بالا آمدگی سطح آب دریا، وجود آب و هوای مرطوب و فرونشست‌های فراوان محلی،

* نویسنده مسئول: صادق براتی بلداجی؛ E-mail: baratiboldaji.s@gmail.com

ماخذنگاری:

براتی بلداجی، ص، سفیداری، ا، مهربابی، ه، زمانزاده، س.م، ۱۴۰۳، ارزیابی ژئوشیمیایی سنگ مادرهای احتمالی میدان فروزان بر اساس پیرولیز راکا اول و انعکاس ویترنایت. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۴(۲)، ۵۹-۷۴. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.422750.2119>.

doi: 10.22071/gsj.2023.422750.2119



doi: 20.1001.1.10237429.1403.34.2.4.0

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.

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

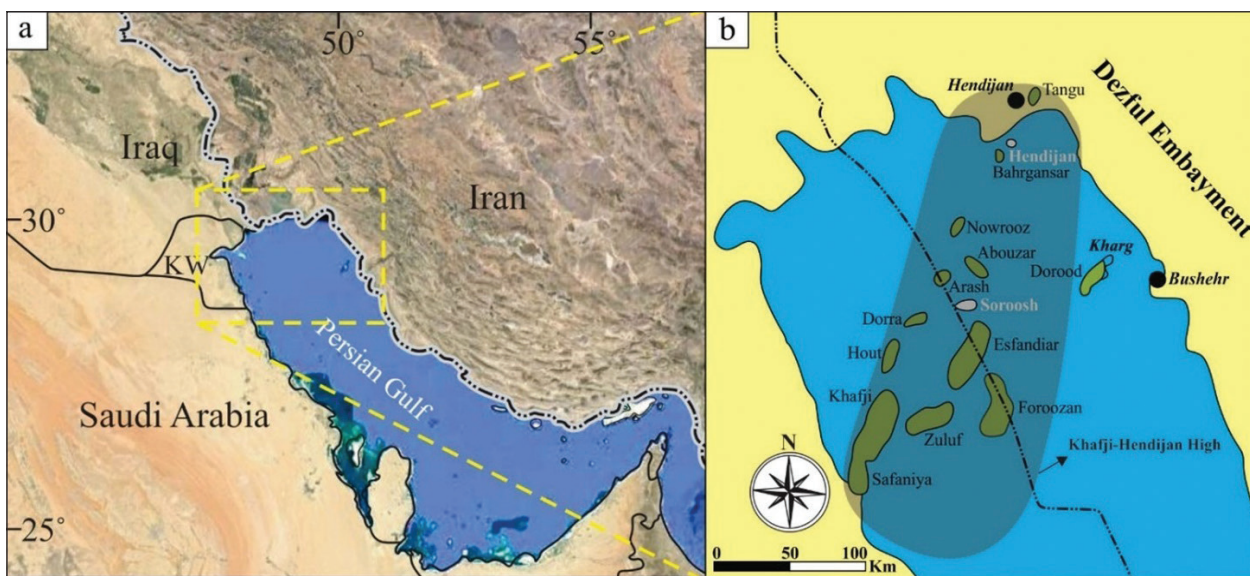
مادرهای مختلف مواد آلی و همچنین شناسایی لایه‌های مستعد در شمال باختر خلیج فارس، به‌ویژه میدان مورد مطالعه می‌کند.

میدان فروزان در بخش دور از ساحل خلیج فارس در فاصله ۱۰۰ کیلومتری جزیره خارک در مرز ایران و عربستان سعودی قرار دارد. بخش عربی این میدان به اسم میدان مرجان نامیده می‌شود. این میدان در بخش شمال خاوری تاقدیس خیلی بزرگ گنبد نمکی در امتداد مرز ایران و عربستان قرار گرفته است (شکل ۱).

این میدان همراه با بخش عربی آن (میدان مرجان) بخشی از یک ساختار بزرگ‌تر هستند که در امتداد بزرگ‌ترین روند تولید کننده نفت جهان قرار دارند. این روند شامل میداین هندیجان، نوروز، سروش، زلوف (Zuluf)، خفجی (Khafji) و سفانیه (Safaniya) می‌باشد که بالغ بر ۵۰ میلیارد بشکه ذخیره هیدروکربن دارد (Alsharhan and Salah, 1997). مهم‌ترین مخزن بیشتر این میداین، ماسه‌سنگ‌های دلتایی تا دریای کم ژرفا با سن کرتاسه زیرین تا میانی است (شکل ۱).

سنگ‌های مادر خیلی خوبی در طول سیلورین، ژوراسیک میانی و کرتاسه پسین نهشته شده است (Bordenave and Huc, 1995). وجود سنگ‌های مادر با مواد آلی فراوان، مخازنی با جنس کربناته، پوش سنگ مناسب همراه با تاقدیس‌های بزرگ و رسوب‌گذاری پیوسته، سبب ذخیره حجم شایان توجهی از هیدروکربن در این حوضه مهم شده است (Tissot and Welte, 1984; Bordenave and Huc, 1995; Rabbani, 2008).

هدف از این پژوهش، بررسی توان هیدروکربن‌زایی سنگ مادرهای احتمالی ژوراسیک و کرتاسه شامل سازندهای گورپی، سروک، کژدمی، داریان، گدوان، فهلیان بالایی و نیز در میدان فروزان واقع در شمال باختر خلیج فارس با استفاده از نتایج آنالیز ژئوشیمیایی پیرولیز راک اول و انعکاس ویترنایت می‌باشد. در این راستا، تعیین کمیت، کیفیت و بلوغ ماده آلی توالی‌های ژوراسیک-کرتاسه ارزیابی گردیده و سنگ مادرهای احتمالی میدان مورد مطالعه معرفی شده است. همچنین نتایج این پژوهش کمک فراوانی به تحلیل سیستم‌های نفتی و مدل‌سازی آن‌ها و بررسی سنگ



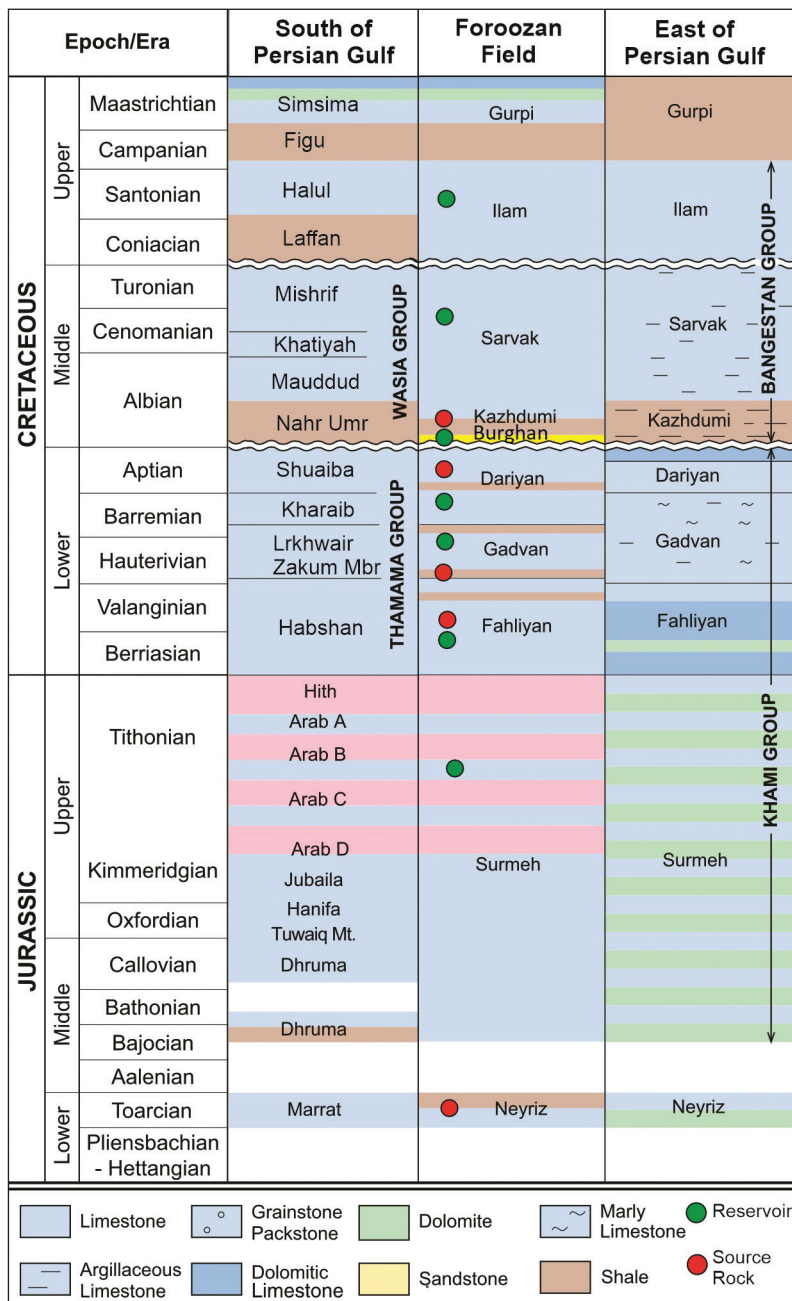
شکل ۱- موقعیت مکانی میدان فروزان واقع در شمال باختر خلیج فارس.

Figure 1. Location of the Foroozan field in the northwest part of the Persian Gulf.

تتیس جوان (نئوتتیس) (میوسن تا زمان حال) دارای روند شمال باختری-جنوب خاوری است.

مطالعات مخزنی و حفاری‌های جدید نشان داده است که بخش‌های ماسه سنگی آسماری، بخش کربناته سازند سروک، ماسه‌های ستر بخش بورگان A و B از سازند کژدمی و کربناته‌های داریان، فهلیان و سورمه می‌توانند به‌عنوان سنگ مخزن در میدان فروزان عمل کنند (Ghazban, 2007). از سوی دیگر، سازندهای نیزیز، بخش بالایی سازند فهلیان، سازند گدوان، سازند داریان، بخش شیلی سازند کژدمی، سازند سروک و سازند گورپی می‌توانند به‌عنوان سنگ مادر احتمالی (بالقوه) برای مخازن این میدان عمل کنند (Alipour, 2022; Sfidari et al., 2024). شکل ۲ ستون چینه‌شناسی در میدان فروزان (مرجان) را نشان می‌دهد.

میدان فروزان و میداین اطراف آن نتیجه برهمکنش رژیم‌های زمین‌ساختی فشاری زاگرس و عمان می‌باشند. در طول پرکامبرین تا کرتاسه پسین منطقه مورد مطالعه یکی از مناطق زمین‌ساختی فعال و دارای گسل‌های چرخشی بوده است. همگرایی صفحات در دوره پرکامبرین و کرتاسه بالایی جهت تنش‌های (استرس‌ها) افقی اصلی را کنترل کرده و در این زمان‌ها گسل‌های چرخشی نیز شکل گرفته‌اند. جهت فعلی تنش افقی اصلی چیره در منطقه در جهت خاوری-باختری است که به‌عنوان تنش عمان شناخته می‌شود و مسئول تشکیل کوه عمان در اواخر کرتاسه بود (Marzouk and Sattar, 1994). تداوم این رژیم تنشی در بخش عربی صفحه به ایجاد چین‌ها و بالاآمدگی‌های گسترده با جهت شمالی-جنوبی در ناحیه انجامیده است. در مقابل، تغییر شکل‌ها در ناحیه زاگرس در ارتباط با بسته شدن اقیانوس



شکل ۲- ستون چینه‌شناسی ژوراسیک تا کرتاسه میدان فروزان و مقایسه با بخش شمالی و جنوبی خلیج فارس (Al-Husseini, 2007).

Figure 2. Jurassic to Cretaceous lithostratigraphy of the Foroozan field and their correlation with Noth and South part of the Persian Gulf (Al-Husseini, 2007).

۲-۱- پیرولیز راک‌اول

تجزیه و تحلیل پیرولیز راک‌اول یکی از سریع‌ترین و ساده‌ترین روش‌هایی است که برای ارزیابی پتانسیل هیدروکربن‌زایی سنگ‌های مادر مورد استفاده قرار می‌گیرد (Espitalié et al., 1985). پیرولیز راک‌اول، نتایج مربوط به محتوای آلی، نوع سنگ‌ها و بلوغ ماده آلی را بیان می‌کند. پیرولیز حرارت دادن ماده آلی در نبود اکسیژن (هلیم یا نیتروژن) برای تولید و آزاد کردن هیدروکربن از آن و تعیین پتانسیل هیدروکربن‌زایی مواد آلی باقی‌مانده موجود در سنگ است. پیرولیز در آزمایشگاه و در یک شرایط دمایی برنامه‌ریزی شده انجام می‌گردد. این کار در واقع تقلیدی از

۲-۲- روش پژوهش

ارزیابی توالی‌های ژوراسیک-کرتاسه به‌عنوان سنگ مادرهای احتمالی در میدان فروزان بر اساس روش ژئوشیمیایی مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است. برای انجام این کار تعداد ۱۰۱ نمونه خرده حفاری از سازندهای مورد نظر انتخاب گردیده و مورد آنالیز پیرولیز راک‌اول قرار گرفته است. همچنین جهت بررسی بلوغ سازندهای مختلف از ۱۱ نمونه خرده حفاری قرص‌های لازم جهت اندازه‌گیری انعکاس و پترینایت تهیه گردیده است. در ادامه، مراحل کاری این روش‌ها آورده شده است.

S3 و در واحد میلی گرم CO₂ در هر گرم سنگ نمایش داده می شود، Tmax (میزان دمایی که پیک S2 به بالاترین حد خود می رسد، بر حسب درجه سانتی گراد) و TOC (Total Organic Carbon)، بر حسب درصد وزنی) می باشد. با بهره گیری از موارد گفته شده می توان اندیس هیدروژن (Hydrogen Index: HI=100*S2/) (TOC Petroleum)، اندیس اکسیژن (Oxygen Index: OI=100*S3/TOC)، اندیس تولید (Production Index: PI=S1/(S1+S2)) و پتانسیل هیدروکربن زایی (Potential: PP=S1+S2) را محاسبه کرد (Espitalié et al., 1977; Peters, 1986; Hosseiny and Barati Boldaji, 2020; Hosseiny and Mohseni, 2023).

در این مطالعه، بر روی ۱۰۱ نمونه خرده حفاری از سازندهای گورپی، سروک، کژدمی، داریان، گدوان، فهلیان بالایی و نیریز در یکی از چاه های میدان مورد مطالعه، پیرولیز راک اول به منظور تعیین نوع کروژن، محتوای TOC و بلوغ حرارتی، جهت بررسی کمیت، کیفیت و بلوغ مواد آلی موجود در سنگ های مادر و توان هیدروکربن زایی آن ها استفاده شده است (Espitalié et al., 1985). نتایج پیرولیز راک اول نمونه ها در جدول ۱ نمایش داده شده است.

تولید طبیعی هیدروکربن در طبیعت در طول مرحله کاتائز است (Barker, 1974). روش تحلیلی و بحث در مورد پارامترهای راک اول توسط پژوهشگران بسیاری ارائه شده است (Espitalié et al., 1977; Peters, 1986; Peters and Cassa, 1994; Bordenave and Burwood, 1995). با استفاده از نتایج پیرولیز می توان کمیت، کیفیت و بلوغ مواد آلی موجود در سنگ های مادر و توان هیدروکربن زایی آن ها را در یک سیستم نفتی موجود در حوضه رسوبی بررسی نمود (Taylor et al., 1998). تمامی آنالیزهای این مطالعه توسط دستگاه پیرولیز راک اول ۶ انجام گرفته است. پارامترهای اندازه گیری شده در آنالیز پیرولیز راک اول شامل S1 (مقادیر هیدروکربن آزاد شده ای است که در دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد بخار می گردد، بر حسب میلی گرم هیدروکربن به گرم سنگ)، S2 (مقادیر هیدروکربن و ترکیبات دارای اکسیژن که در محدوده دمای ۳۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی گراد بر اثر شکست حرارتی کروژن و ترکیبات سنگین تری همانند رزین و آسفالتین آزاد می گردد، بر حسب میلی گرم هیدروکربن به گرم سنگ)، S3 (ترکیبات اکسیژن دار که در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد تجزیه و نیز به صورت گاز CO₂ آزاد شده که به صورت پیک

جدول ۱- نتایج پیرولیز راک اول نمونه های میدان مورد مطالعه.

Table 1. Rock-Eval pyrolysis result of the studied Field.

Formation	Sample	Depth(m)	TOC(%)	S1	S2	S3	HI	OI	Tmax	PI	PP	S1/TOC
Gurpi	RE-1883	1744-45	1.29	0.56	4.39	1.04	340	81	427	0.11	4.95	0.43
	RE-1882	1738-39	1.11	0.53	2.61	1.53	235	138	431	0.17	3.14	0.48
	RE-1884	1747-48	0.97	0.51	2.69	1.20	277	124	429	0.16	3.20	0.53
	Max	-	1.29	0.56	4.39	1.53	340	138	431	0.17	4.95	0.53
	Ave		1.12	0.53	3.23	1.26	284	114	429	0.15	3.76	0.48
	Min		0.97	0.51	2.61	1.04	235	81	427	0.11	3.14	0.43
Sarvak	RE-1889	1891-92	1.18	0.47	2.03	1.56	172	132	430	0.19	2.50	0.40
	RE-1886	1885-86	0.87	0.39	0.93	1.83	107	210	426	0.30	1.32	0.45
	Max	-	1.18	0.47	2.03	1.83	172	210	430	0.30	2.50	0.45
	Ave		1.03	0.43	1.48	1.69	140	171	428	0.24	1.91	0.42
	Min		0.87	0.39	0.93	1.56	107	132	426	0.19	1.32	0.40
Kazhdumi	RE-1901	2033-34	1.10	0.44	2.56	2.38	233	216	434	0.15	3.00	0.40
	RE-1907	2065-66	0.95	0.43	2.18	1.23	229	129	435	0.16	2.61	0.45
	RE-1904	2050-51	0.90	0.49	1.83	0.95	203	106	435	0.21	2.32	0.54
	RE-1902	2039-40	0.85	0.50	1.61	1.18	189	139	427	0.24	2.11	0.59
	RE-1910	2079-80	1.58	0.96	11.63	0.93	736	59	437	0.08	12.59	0.61
	RE-1899	2023-24	1.23	0.90	4.04	0.85	328	69	436	0.18	4.94	0.73
	RE-1895	2004-06	0.70	0.54	2.14	1.24	306	177	431	0.20	2.68	0.77
	RE-1909	2075-76	0.78	0.64	4.79	1.28	614	164	438	0.12	5.43	0.82
	RE-1900	2028-29	0.75	0.63	2.52	1.10	336	147	435	0.20	3.15	0.84
	RE-1911	2170-71	1.13	1.02	7.09	1.99	627	176	438	0.13	8.11	0.90
	RE-1897	2014-16	0.83	0.79	4.46	1.12	537	135	434	0.15	5.25	0.95
	RE-1893	1994-96	1.09	1.09	6.16	0.82	565	75	437	0.15	7.25	1.00
	RE-1896	2008-10	0.62	0.67	3.09	0.72	498	116	434	0.18	3.76	1.08
	RE-1894	2000-02	1.29	1.45	8.76	0.94	679	73	438	0.14	10.21	1.12
	RE-1908	2070-71	0.87	1.07	4.62	0.84	531	97	437	0.19	5.69	1.23
	Max	-	1.58	1.45	11.63	2.38	736	216	438	0.24	12.59	1.23
	Ave		0.98	0.77	4.50	1.17	441	125	435	0.16	5.27	0.80
	Min		0.62	0.43	1.61	0.72	189	59	427	0.08	2.11	0.40

ادامه جدول ۱- نتایج پیرولیز راکتاول نمونه‌های میدان مورد مطالعه.

Continued from Table 1. Rock-Eval pyrolysis result of the studied Field.

Formation	Sample	Depth(m)	TOC(%)	S1	S2	S3	HI	OI	Tmax	PI	PP	S1/TOC
Dariyan	RE-1916	2195-96	1.17	0.59	4.19	0.94	358	80	438	0.12	4.78	0.50
	RE-1913	2180-81	1.03	0.72	3.21	1.05	312	102	437	0.18	3.93	0.70
	RE-1914	2185-86	1.20	0.87	8.33	0.82	694	68	440	0.09	9.20	0.73
	RE-1918	2205-06	0.80	0.59	1.79	1.15	224	144	431	0.25	2.38	0.74
	RE-1922	2285-86	0.97	0.81	1.80	0.84	186	87	426	0.31	2.61	0.84
	RE-1917	2200-01	1.47	1.32	7.04	2.03	479	138	439	0.16	8.36	0.90
	RE-1923	2290-91	1.40	1.42	4.75	1.54	339	110	431	0.23	6.17	1.01
	RE-1920	2215-16	1.10	1.12	8.31	0.89	755	81	453	0.12	9.43	1.02
	RE-1915	2190-91	0.63	0.67	3.19	1.00	506	159	435	0.17	3.86	1.06
	RE-1919	2210-11	0.71	0.90	3.06	1.07	431	151	435	0.23	3.96	1.27
	RE-1924	2294-95	1.09	1.49	4.57	1.24	419	114	430	0.25	6.06	1.37
	Max	-	1.47	1.49	8.33	2.03	755	159	453	0.31	9.43	1.37
	Ave		1.05	0.95	4.57	1.14	428	112	436	0.19	5.52	0.92
Min	0.63		0.59	1.79	0.82	186	68	426	0.09	2.38	0.50	
Gadvan	RE-1934	2351-52	1.21	0.80	3.44	1.55	284	128	426	0.19	4.24	0.66
	RE-1931	2341-42	1.24	1.03	3.72	1.29	300	104	433	0.22	4.75	0.83
	RE-1938	2367-8	1.10	0.92	3.93	1.55	357	141	435	0.19	4.85	0.84
	RE-1933	2349-50	1.51	1.34	12.44	0.76	824	50	432	0.10	13.78	0.89
	RE-1936	2356-57	0.85	0.78	2.59	1.60	305	188	428	0.23	3.37	0.92
	RE-1926	2304-05	1.41	1.39	6.53	0.99	463	70	438	0.18	7.92	0.99
	RE-1927	2309-10	1.52	1.75	9.32	1.12	613	74	440	0.16	11.07	1.15
	RE-1937	2363-64	2.29	2.66	12.84	2.59	561	113	451	0.17	15.50	1.16
	RE-1929	2320-21	1.09	1.39	6.35	1.81	583	166	438	0.18	7.74	1.28
	RE-1928	2314-15	0.84	1.19	5.67	0.95	675	113	435	0.17	6.86	1.42
	Max	-	2.29	2.66	12.84	2.58	824	188	451	0.23	15.50	1.41
	Ave		1.31	1.33	6.68	1.42	497	115	436	0.18	8.01	1.01
	Min		0.84	0.78	2.59	0.75	284	50	426	0.09	3.37	0.66
U.Fahliyan	RE-1941	2380-81	1.19	0.75	2.66	2.11	224	177	429	0.22	3.41	0.63
	RE-1940	2375-6	0.85	0.72	1.36	1.59	160	187	431	0.35	2.08	0.85
	Max	-	1.19	0.75	2.66	2.11	224	187	431	0.35	3.41	0.85
	Ave		1.02	0.74	2.01	1.85	192	182	430	0.28	2.75	0.74
	Min		0.85	0.72	1.36	1.59	160	177	429	0.22	2.08	0.63
Neyriz	RE-1957	4135-36	1.46	0.71	4.96	0.80	340	55	458	0.13	5.67	0.49
	RE-1955	4127-28	0.77	0.60	2.85	0.75	370	97	454	0.17	3.45	0.78
	RE-1954	4120-21	1.14	1.02	2.37	1.54	208	135	427	0.30	3.39	0.89
	RE-1980	4208-9	1.12	0.24	1.71	1.30	153	116	454	0.12	1.95	0.21
	Max	-	1.46	1.02	4.96	1.54	370	135	458	0.30	5.67	0.89
	Ave		1.12	0.78	3.39	1.03	306	96	446	0.20	4.17	0.72
	Min		0.77	0.24	1.71	0.75	153	55	427	0.12	1.95	0.21

اندازه‌گیری انعکاس ویترنایت به روش تصادفی با روش استاندارد ASTM انجام می‌شود. مقدار انعکاس تصادفی با نور غیرقطبی اندازه‌گیری می‌شود. پس از کالیبره کردن دستگاه‌ها و میکروسکوپ، روغن غوطه‌ورکننده به سرعت روی نمونه ریخته

۲-۲- انعکاس ویترنایت

انعکاس ویترنایت موجود در کروژن یکی از متداول‌ترین و قابل اعتمادترین روش‌های بررسی بلوغ حرارتی سنگ مادر می‌باشد (Attarian et al., 2016).

پیدا می‌کند. این اطلاعات درجه‌بندی با ارزشی برای بازسازی پیشینه تدفین را فراهم می‌کند (Dow, 1977). بلوغ حرارتی سازندهای میدان مورد مطالعه بر اساس شدت انعکاس ویتترینایت (Vitrinite Reflectance: Ro%) اندازه‌گیری شده و به‌عنوان پروکسی با مقادیر Tmax حاصل از پیرولیز مقایسه می‌شوند. برای این کار ۱۱ نمونه خرده حفاری از سازندهای گورپی، سروک، کژدمی، داریان، گدوان، فهلیان بالایی و نیریز جهت اندازه‌گیری ضریب انعکاس ویتترینایت انتخاب شده‌اند. نتایج این اندازه‌گیری‌ها بر اساس مقادیر میانگین انعکاس ویتترینایت در جدول ۲ آورده شده است.

شده و نمونه روی صفحه میکروسکوپ قرار می‌گیرد. بعد از گذشت ۳۰ دقیقه، نمونه از روی صفحه میکروسکوپ برداشته و روغن غوطه‌وری تمیز می‌شود و جهت بررسی کالیبراسیون دستگاه، مقدار انعکاس نمونه استاندارد دوباره اندازه گرفته می‌شود. اگر مقدار انحراف از معیار اندازه‌گیری انعکاس نمونه استاندارد بیش از ۰/۰۱ درصد باشد، دستگاه دوباره کالیبره شده و اندازه‌گیری‌ها تکرار می‌شوند. اندازه‌گیری مقدار انعکاس روی قطعات ویتترینایتی تا ثبت ۲۰ تا ۳۰ اندازه‌گیری ادامه می‌یابد (ASTM, 2011). ضریب انعکاس ویتترینایت به طور پیوسته با زیاد شدن ژرفا افزایش

جدول ۲- مقادیر میانگین انعکاس ویتترینایت اندازه‌گیری شده بر روی سنگ مادرهای احتمالی در میدان فروزان.

Table 2. Mean of vitrinite reflectance measurements of potential source rocks in the studied field.

Formation	Depth(m)	Tmax	Value	Ro(%)	Standard deviation(%)	Measure count
Gurpi	1738.5	431	Max	0.50	0.03	8
			Ave	0.46		
			Min	0.39		
Sarvak	1891.5	430	Max	0.61	0.06	11
			Ave	0.5		
			Min	0.34		
Kazhdumi	2000.5	438	Max	0.63	0.06	30
			Ave	0.51		
			Min	0.37		
	2023.5	436	Max	0.66	0.06	40
			Ave	0.54		
			Min	0.38		
	2065.5	435	Max	0.68	0.06	30
			Ave	0.55		
			Min	0.42		
2079.5	437	Max	0.66	0.07	40	
		Ave	0.53			
		Min	0.40			
Dariyan	2195.5	438	Max	0.62	0.06	35
			Ave	0.51		
			Min	0.40		
	2290.5	431	Max	0.63	0.06	21
			Ave	0.51		
			Min	0.40		
Gadvan	2341.5	433	Max	0.66	0.08	15
			Ave	0.56		
			Min	0.41		
	2367.5	435	Max	0.66	0.06	58
			Ave	0.53		
			Min	0.37		
Neyriz	4135.5	458	Max	1.12	0.09	46
			Ave	0.95		
			Min	0.74		

۳- داده‌ها و بحث

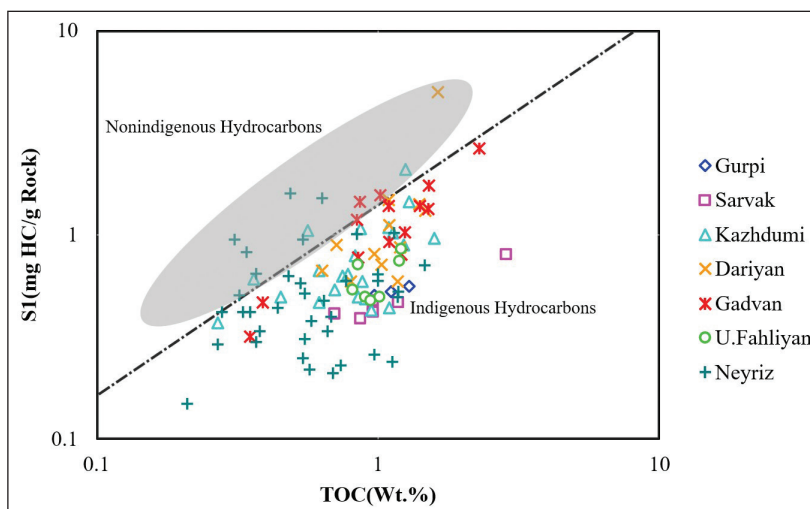
مطالعه ماده آلی استخراج شده از سنگ مادر قطعاً پتانسیل سنگ مادر بررسی شده و آلودگی که جزو پتانسیل تولید سنگ مادر نباشد وجود نخواهد داشت. از مجموع ۱۰۱ نمونه فقط ۱۳ نمونه شامل ۳ نمونه سازند کژدمی، ۱ نمونه سازند داریان، ۲ نمونه سازند گدوان و ۷ نمونه سازند نیریز، مقادیر S1/TOC بالاتر از ۱/۵ که بیانگر آلودگی است را دارند که این نمونه‌های آلوده تفسیر را با خطا مواجه می‌کنند، بنابراین حذف گردیده و در ادامه تحلیل مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. همچنین با بررسی بیشتر مقادیر نمونه‌های پیرولیز، مشاهده شد که تعدادی از نمونه‌ها مقادیر TOC پایین و Tmax نامتعارفی دارند که در تفسیر نمودارها باعث خطا شده و نتایج را دچار تغییر می‌کنند. نمونه‌های یاد شده نیز به دلیل عدم قطعیت از درست بودن آن‌ها، حذف شده و در تفسیر نهایی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. این آلودگی‌ها می‌تواند ناشی از هرزروی گل حفاری و یا مهاجرت هیدروکربن باشند. در مجموع در این پژوهش سعی شد که تفسیر نهایی بر اساس نمونه‌های با مقدار TOC بیشتر از ۱ انجام پذیرد (جدول ۱).

پس از انجام آزمایشات پیرولیز راکت‌اول و اندازه‌گیری مقادیر انعکاس ویترنایت بر روی نمونه‌ها، کمیت، کیفیت و بلوغ مواد آلی موجود در سنگ‌های مادر و توان هیدروکربن‌زایی آن‌ها به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۱- شاخص مهاجرت و تعیین میزان آلودگی

نخستین قدم در یک پژوهش ژئوشیمیایی، بررسی آلودگی نمونه‌های خرده حفاری است. زیرا آلودگی نمونه‌های مورد مطالعه تاثیر مستقیم بر روی نتایج حاصل از پیرولیز می‌گذارد. یکی از روش‌های تعیین این آلودگی، استفاده از منحنی تغییرات S1 در برابر TOC است (Hunt, 1996; Peters et al., 2005). همچنین PI بالای ۰/۵ نیز بیانگر آلودگی نمونه و هیدروکربن نابرجا (Non-indigenous Hydrocarbon) می‌باشد (Hunt, 1996).

با توجه به شکل ۳ بیشتر نمونه‌های مورد مطالعه در زیر خط آلودگی ($S1/TOC < 1.5$) قرار دارند که نشان دهنده عدم آلودگی نمونه‌ها است. از این رو، در



شکل ۳- نمودار شاخص مهاجرت جهت تعیین آلودگی نمونه‌های میدان فروزان (Hunt, 1996).

Figure 3. Migration index diagram to determine the contamination of Foroozan field samples (Hunt, 1996).

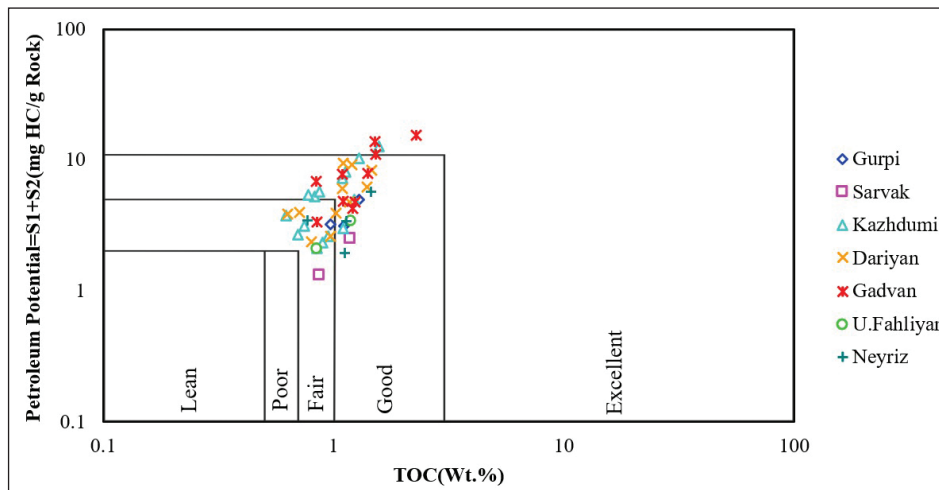
که از نظر کمیتی در محدوده خوب قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج راکت‌اول، مقادیر TOC سازند کژدمی بین ۱/۵۸-۰/۶۲ درصد وزنی متغیر می‌باشد که بیانگر کمیت متوسط تا خوب این سازند است. مقدار میانگین TOC سازند کژدمی برابر ۰/۹۷ درصد وزنی که نشان دهنده وضعیت متوسط این سازند است. بر اساس مقادیر TOC سازند داریان، مقدار کنونی ماده آلی این سازند بین ۱/۴۷-۰/۶۳ درصد وزنی متغیر بوده که نشان دهنده وضعیت متوسط تا خوب این سازند است. مقدار متوسط TOC این سازند برابر ۱/۰۵ درصد وزنی در محدوده خوب می‌باشد. مقدار کنونی ماده آلی سازند گدوان بر اساس مقادیر TOC بین ۲/۲۹-۰/۸۴ درصد وزنی متغیر است که نشان دهنده وضعیت متوسط تا بسیار خوب سازند گدوان می‌باشد. TOC میانگین این سازند برابر با ۱/۳۰ درصد وزنی است که بیانگر کمیتی در بازه خوب می‌باشد. مقادیر TOC سازند فهلیان، مقدار ماده آلی حال حاضر این سازند را بین ۱/۱۹-۰/۸۵ درصد وزنی نشان می‌دهد که بیانگر وضعیت متوسط تا خوب این سازند می‌باشد. همچنین مقدار میانگین TOC این سازند نیز برابر ۱/۰۲ درصد وزنی و بیانگر بازه

۳-۲- کمیت مواد آلی

برای ارزیابی پتانسیل ژنتیکی سنگ مادر از پارامترهای محتوای کربن آلی (TOC)، محتوای بیتومین (Extractable Organic Material: EOM)، مقادیر S1 و S2 استفاده می‌شود (Huang et al., 2003). از رسم نمودار تغییرات اندیس پتانسیل هیدروکربن‌زایی در برابر تغییرات TOC برای ارزیابی کمیت مواد آلی استفاده می‌کنیم (Hosseiny et al., 2016). مقادیر پایین‌تر از ۶ اندیس پتانسیل هیدروکربن‌زایی، بیانگر توان ضعیف تا متوسط سنگ مادر می‌باشد، در صورتی که اعداد بالاتر از ۶ برای این اندیس سنگ مادری خوب و عالی را نشان می‌دهد (Tissot and Welte, 1984). مقادیر TOC برای بررسی کمیت ماده آلی سازند گورپی بین ۱/۲۹-۰/۹۷ درصد وزنی در محدوده متوسط تا خوب قرار دارد که مقدار میانگین TOC این سازند برابر با ۱/۱۲ درصد وزنی می‌باشد که از منظر کمیتی در محدوده خوب قرار می‌گیرد. مقادیر TOC برای سازند سروک بین ۱/۱۸-۰/۸۷ درصد وزنی در محدوده متوسط تا خوب قرار دارد که مقدار میانگین TOC این سازند برابر با ۱/۰۲ درصد وزنی می‌باشد

بر اساس مقادیر TOC، سازندهای کژدمی، داریان و گدوان مقادیری تقریباً بالاتر از ۱ درصد وزنی داشته که بیشترین توان هیدروکربن‌زایی را نسبت به سازندهای گورپی، سروک، فهلیان بالایی و نیریز با مقادیر نزدیک به ۱ درصد وزنی را دارند (شکل ۴).

خوب می‌باشد. با توجه به این که مقادیر TOC سازند نیریز بین ۱/۴۶-۰/۷۷ درصد وزنی متغیر است، از این رو، این سازند از نظر ماده آلی در وضعیت متوسط تا خوب قرار دارد. همچنین مقدار میانگین این سازند نیز برابر با ۱/۱۲ درصد وزنی و کمیت خوب می‌باشد.



شکل ۴- نمودار اندیس پتانسیل هیدروکربن‌زایی در برابر TOC در میدان فروزان (Tissot and Welte, 1984).

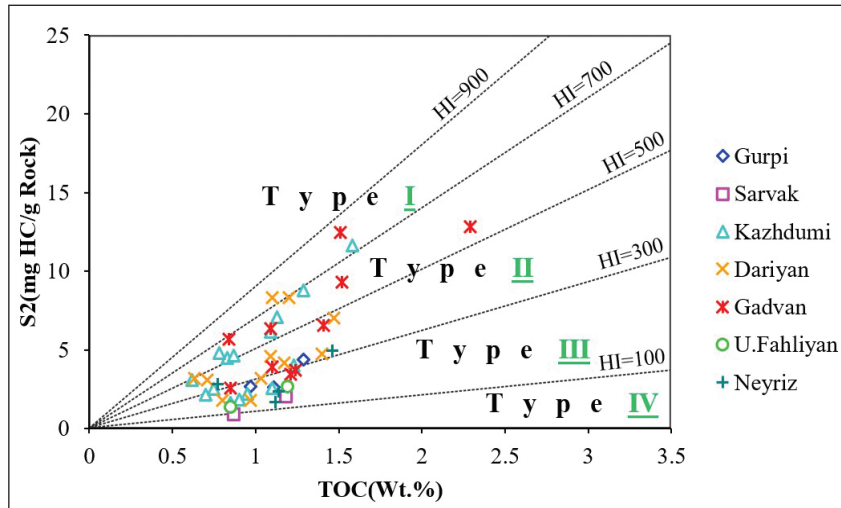
Figure 4. Plot of petroleum potential versus TOC in the Foroozan field (Tissot and Welte, 1984).

هیدروکربن ندارد (Tissot and Welte, 1984).

مقادیر اندیس هیدروژن برای سازند گورپی بین ۲۳۵ تا ۳۴۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) است که بیانگر تلفیق کروژن نوع II و III می‌باشد. مقادیر اندیس هیدروژن سازند سروک بین ۱۰۷ تا ۱۷۲ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) متغیر بوده که نشان دهنده نوع III کروژن است. در سازند کژدمی مقادیر اندیس هیدروژن بین ۷۳۶-۱۸۹ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) متغیر بوده که از مجموع نمونه‌های این سازند، یک نمونه دارای اندیس هیدروژن کمتر از ۲۰۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) می‌باشند. بیشتر نمونه‌ها مقادیری بین ۲۰۰ تا ۶۰۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) را داشته که نشان‌دهنده تلفیق کروژن نوع II و III است. همچنین ۴ نمونه مقادیری بالاتر از ۶۰۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) را داشته که بیانگر نوع I کروژن می‌باشد. بازه اندیس هیدروژن سازند داریان بین ۵۰۶-۱۸۶ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) متغیر است. دو نمونه از این سازند مقادیر اندیس هیدروژن بیشتر از ۶۰۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) را دارند. از این رو، کروژن غالب تلفیق نوع II/III می‌باشند. در سازند گدوان بازه اندیس هیدروژن نیز بین ۵۸۳-۲۸۴ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) متغیر بوده و فقط ۳ نمونه مقادیر بیشتر از ۶۰۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) را نشان می‌دهند. از این رو، نشان دهنده کروژن نوع II هستند. مقادیر اندیس هیدروژن سازند فهلیان بین بازه ۲۲۴-۱۶۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) متغیر بوده که نوع III کروژن را نشان می‌دهد. اندیس هیدروژن تمامی نمونه‌های سازند نیریز در بازه ۳۷۰-۱۵۳ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) متغیر است که نشان دهنده تلفیق کروژن نوع II/III می‌باشند (شکل ۵). نمودار اندیس هیدروژن در برابر اندیس اکسیژن هم نتایج یاد شده را تایید می‌کند (شکل ۶).

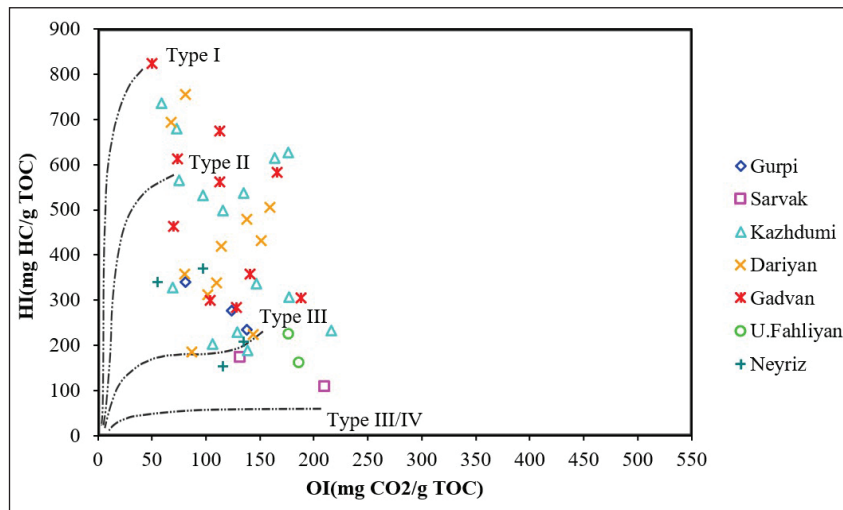
۳-۳- کیفیت مواد آلی

کروژن، ماده آلی انحلال‌ناپذیر در حلال‌های آلی می‌باشد که از انواع ماسرال‌ها تشکیل شده است. منشأ کروژن از اجزای گیاهان، جانوران و باکتری‌ها است که در سنگ‌های رسوبی تشکیل می‌شوند (Batten, 1996). هر اندازه مقدار نسبی هیدروژن در کروژن بالا باشد، پتانسیل زایش نفتی آن نیز بیشتر بوده و نشان دهنده کیفیت بالای مواد آلی می‌باشد. با توجه به این که نفت و گاز از نظر محتوای هیدروژن غنی‌تر از کروژن هستند، بنابراین تولید این محصولات در طول فرایند بلوغ، سبب خروج هیدروژن از کروژن و تغلیظ عنصر کربن در آن می‌گردد (Peters and Cassa, 1994). برای تعیین نوع کروژن و میزان بلوغ آن از نمودار تغییرات اندیس هیدروژن در برابر اندیس اکسیژن و یا نمودار ون کروژن تصحیح شده (Modified Van-Krevelen Diagram) استفاده می‌شود. همچنین از نمودار تغییرات Tmax در برابر برابر تغییرات اندیس هیدروژن برای تایید نتایج استفاده می‌شود. از پارامتر S2 در برابر TOC به صورت محدوده‌های مجزا و گروه‌های کروژنی در نمودارهای استاندارد برای تعیین کیفیت و نوع کروژن نیز استفاده می‌شود. شایان ذکر است که در استفاده از این پارامترها در تعیین نوع ماده آلی باید در نظر داشت که این پارامترها افزون بر نوع ماده آلی تحت تاثیر بلوغ و فرایندهای ثانویه تاثیرگذار بر روی مواد آلی می‌باشند. اندیس هیدروژن بزرگ‌تر از ۶۰۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) معرف نوع I و مقدار بین ۳۵۰ تا ۶۰۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) معرف نوع II کروژن می‌باشد. برای کروژن نوع III اندیس هیدروژن بین ۵۰ تا ۲۰۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) قرار می‌گیرد (Langford and Blanc-Valleron, 1990; Peters and Cassa, 1994; Hunt, 1996). اندیس هیدروژن کمتر از ۵۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) مربوط به کروژن نوع IV که هیچ پتانسیلی برای تولید



شکل ۵- نمودار S2 در برابر TOC برای تعیین نوع کروژن موجود در سازندهای میدان فروزان (Langford and Blanc-Valleron, 1990).

Figure 5. Plot of S2 versus TOC for determining kerogen type of the studied formations in the Foroozan field (Langford and Blanc-Valleron, 1990).



شکل ۶- نمودار اندیس هیدروژن در برابر اندیس اکسیژن برای سازندهای مطالعه شده در میدان فروزان (Hunt, 1996).

Figure 6. Plot of HI versus OI for the studied formations in the Foroozan field (Hunt, 1996).

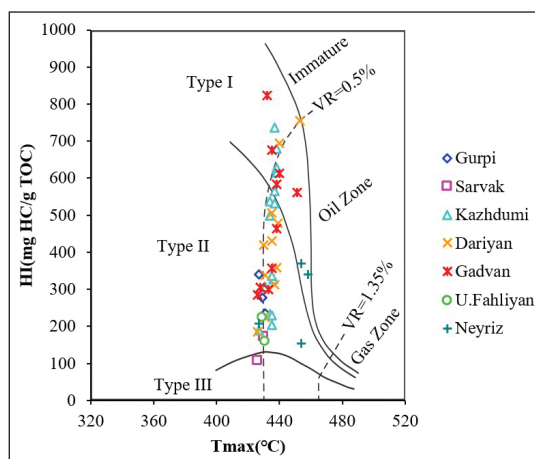
و انعکاس ویتربنایت استفاده می‌کنند، جهت تعیین بلوغ حرارتی استفاده شده است (Espitalié *et al.*, 1985; Hunt, 1996; Sykes and Snowdon, 2002). Tmax به عنوان شاخص بلوغ به کار گرفته می‌شود زیرا با افزایش بلوغ حرارتی کروژن، دمایی که در آن بیشترین نرخ پیرولیز رخ می‌دهد، افزایش پیدا می‌کند (Waples, 1985). کروژن نوع I و II نسبت به نوع III ساختار مولکولی ساده‌تری دارد، بنابراین محدوده دمایی کوچک‌تری از Tmax را شامل می‌شود. کروژن نوع I در محدوده انعکاس ویتربنایت بین ۱/۷ تا ۱ درصد بالغ می‌شود، از این رو، استفاده از پارامتر Tmax در ارزیابی میزان پختگی این کروژن کاربردی ندارد. اما شاخص Tmax در ارزیابی بلوغ کروژن نوع II که فقیر از ویتربنایت است، بهترین پارامتر می‌باشد. همچنین برای کروژن نوع III بین مقادیر Tmax و انعکاس ویتربنایت انطباق خوبی برقرار است (Bordenave, 1993).

۳-۴- بلوغ مواد آلی

به مجموعه تغییرات شیمیایی که عمدتاً در نتیجه تنش‌های حرارتی در مواد آلی موجود در سنگ‌های مادر در طول زمان ایجاد می‌شوند، بلوغ حرارتی گفته می‌شود (Tissot and Welte, 1984). مقدار بلوغ حرارتی به دست آمده با استفاده از بیشتر شاخص‌های بلوغ معمولاً وابسته به نوع مواد آلی مورد آنالیز می‌باشد. بنابراین، یک روند بلوغ حرارتی زمانی معتبر است که تمام نمونه‌های مورد استفاده، از یک توالی رسوبی با ماده آلی همگن انتخاب شده باشند. پارامترهای Tmax و PI افزون بر وابستگی به نوع ماده آلی از مهم‌ترین پارامترهای حاصل از آنالیز راک‌اول جهت ارزیابی بلوغ حرارتی مواد آلی می‌باشند. حدود آستانه تعیین شده در نمودارهایی که از پارامترهای اندیس تولید در برابر Tmax (شکل ۱۰)، اندیس هیدروژن در برابر Tmax (شکل ۷)

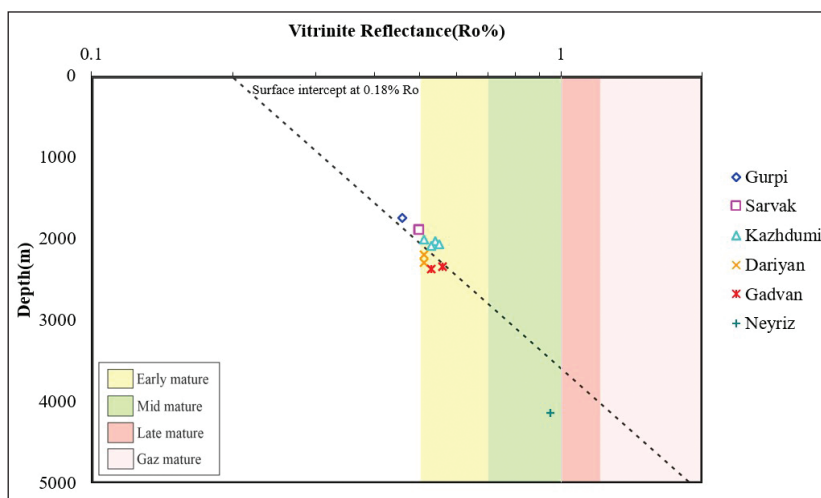
می باشد که بیانگر آن است که سازندهای یاد شده در اوایل بلوغ خود قرار دارند. همچنین سازند نیز با داشتن مقدار میانگین R_o در حدود ۰/۹۵، نشان دهنده بلوغ نمونه های این سازند می باشد. نتایج داده های انعکاس ویترینایت صحت مقادیر بلوغ بر اساس مقادیر T_{max} را تایید می کند. این نتیجه را می توان بر اساس شکل ۹ نیز استنباط کرد. میزان همبستگی بین نمونه های انعکاس ویترینایت و مقادیر T_{max} حاصل از آزمایش پیرولیز راک اول برابر با ۰/۸۸ ($R^2=0.88$) می باشد که نشان از تفسیر درست میزان بلوغ نمونه های انتخابی نهایی است. بر اساس شکل ۹ نیز می توان استنباط کرد که نمونه های سازندهای مورد مطالعه به غیر از سازند نیریز که در زون بالغ قرار دارد، بقیه نمونه ها یا نابالغ هستند یا در ابتدای بلوغ قرار دارند و از دمای کافی برای تولید هیدروکربن برخوردار نیستند.

با توجه به شکل ۷، مقادیر T_{max} نمونه های مورد مطالعه نشان می دهند که سازندهای گورپی و سروک در مرحله نابالغ قرار دارند. نتایج مقادیر T_{max} نمونه های سازندهای کژدمی، داریان، گدوان و فهلیان بالایی نشان می دهند که نمونه ها هنوز نابالغ تا ابتدای زون بالغ قرار دارند و به پنجره نفتی برای تولید هیدروکربن نرسیده اند. مقادیر T_{max} نمونه های سازند نیریز نیز نشان می دهند که این سازند میدان مورد مطالعه در محدوده بلوغ قرار دارد. با این وجود اظهار نظر در مورد بلوغ نمونه ها بر اساس انعکاس ویترینایت اطلاعات بهتری ارائه می دهد. تغییرات انعکاس ویترینایت نسبت به ژرفا در شکل ۸ رسم شده است. بر اساس شکل، نمونه سازند گورپی مقادیر انعکاس ویترینایت پایین تر از ۰/۵ را داشته که نابالغ هستند. در سازندهای سروک، کژدمی، داریان و گدوان مقادیر متوسط انعکاس ویترینایت بین ۰/۵۶-۰/۵ درصد



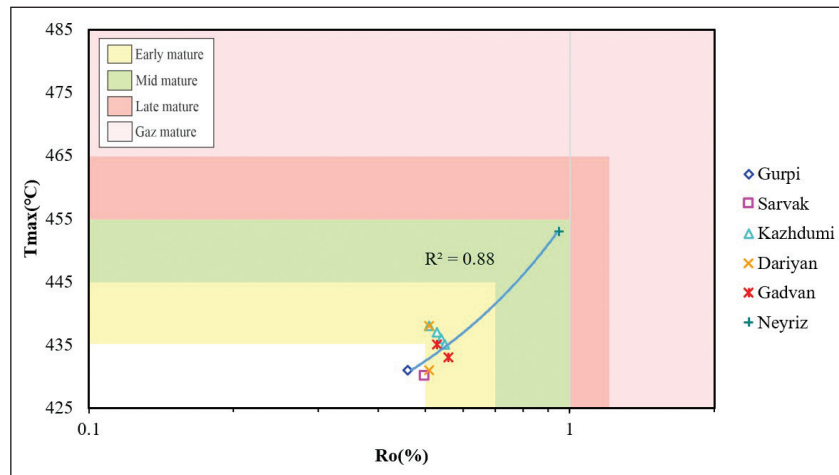
شکل ۷- نمودار اندیس هیدروژن در برابر T_{max} برای تعیین نوع کروژن و بلوغ نمونه های میدان فروزان (Espitalié *et al.*, 1985).

Figure 7. Plot of HI versus T_{max} indicating kerogen type and maturity in the studied formations of the Foroozan field (Espitalié *et al.*, 1985).



شکل ۸- نمودار میانگین انعکاس ویترینایت اندازه گیری شده در برابر ژرفا برای نمونه های سنگ های مادر احتمالی میدان فروزان.

Figure 8. Plot of measured mean of vitrinite reflectance versus depth for potential source rock samples in the Foroozan field.

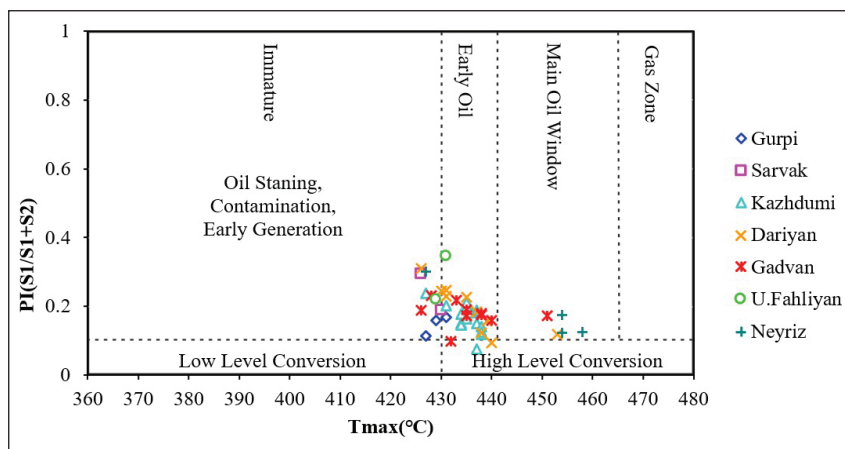


شکل ۹- نمودار میانگین انعکاس ویتترینیت اندازه گیری شده در برابر Tmax برای سنگ‌های مادر احتمالی میدان فروزان.

Figure 9. Plot of measured mean of vitrinite reflectance versus Tmax for potential source rock samples in the Foroozan field.

شکل ۱۰ تغییرات پارامتر Tmax در برابر اندیس تولید و بالعکس را نشان می‌دهد. بنا به شکل سازند گورپی به بلوغ کافی جهت تولید هیدروکربن نرسیده است و سازندهای سروک، کزدمی، داریان و گدوان در اوایل محدوده بلوغ قرار گرفته و سازند نیریز نیز نشان دهنده بلوغ می‌باشد. اگر چه سازند نیریز بر اساس مقادیر انعکاس ویتترینیت در محدوده بالغ قرار دارد ولی به دلیل نوع کروژن موجود در آن سازند (کروژن نوع III یا گاززا) فاقد توان تولید نفت می‌باشد.

برای تعیین نوع محصولات تولیدی احتمالی توسط سنگ‌های مادر و مشخص کردن نفت‌زا و یا گاززا بودن آن‌ها از نمودارهای استاندارد مختلفی استفاده می‌گردد (Ehinola *et al.*, 2008). در این نمودارها وضعیت سازندهای مورد نظر از جنبه میزان بلوغ مواد آلی و محصولات تولیدی هیدروکربنی مورد بررسی و نمایش داده شده است. نمودار تغییرات اندیس هیدروژن در برابر مقادیر کل کربن آلی موجود در سازندهای مورد بررسی نیز می‌تواند وضعیت نوع هیدروکربن تولیدی قابل انتظار را بیان نماید (Hunt, 1996).



شکل ۱۰- نمودار اندیس تولید در برابر Tmax جهت تعیین نوع محصولات احتمالی تولیدی در سازندهای میدان فروزان (Ehinola *et al.*, 2008).

Figure 10. Plot of PI versus Tmax indicating type of potential products of studied formations in the Foroozan field (Ehinola *et al.*, 2008).

۴- نتیجه گیری

کافی برای تولید هیدروکربن را دارا نیستند. از طرف دیگر، سازندهای کژدمی، داریان و گدوان دارای کروژن نوع II هستند و در ابتدای محدوده بلوغ در میدان مورد مطالعه قرار دارند و هنوز وارد پنجره نفت‌زایی نشده‌اند. به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی می‌توان اظهار کرد که سازندهای کژدمی، داریان و گدوان مستعد سنگ مادر مناسب در میدان فروزان به شمار می‌روند. با این وجود، این سازندها در میدان مورد مطالعه از آنجا که بر روی بلندای قدیمه قرار گرفته‌اند در ابتدای محدوده بلوغ قرار دارند ولی همین سازندها یا معادل آن‌ها در بخش‌های ژرف‌تر حوضه می‌توانند به‌عنوان سنگ مادرهای فعال عمل کرده باشند. از سوی دیگر، اگر چه سازند نیریز در زون بالغ قرار دارد با این وجود به دلیل نوع مواد آلی موجود در سازند (کروژن نوع III یا گاززا) توان تولید نفت را دارا نبوده و هنوز به بلوغ کافی برای تولید گاز نیز نرسیده است.

حوضه خلیج فارس یکی از مهم‌ترین حوضه‌های نفتی جهان به شمار می‌رود که بخش شمال باختری آن میداین هیدروکربنی فراوانی در بخش‌های ایرانی و عربی خود را در بر گرفته است. میدان فروزان همراه با بخش عربی آن (میدان مرجان) از میداین مهم شمال باختر خلیج فارس است که بر روی بلندای قدیمه خفجی-نوروز قرار گرفته است.

در این مطالعه سازندهای گورپی، سروک، کژدمی، داریان، گدوان، فهلیان بالایی و نیریز در یکی از چاه‌های میدان فروزان بر اساس آنالیز پیرولیز راک‌اول و انعکاس و تیرنایت مورد ارزیابی ژئوشیمیایی سنگ مادر قرار گرفت. نتایج مطالعات نشان داد که میانگین میزان مواد آلی سازندهای مورد مطالعه در میدان فروزان در محدوده ضعیف تا خیلی خوب می‌باشند. با این وجود، نوع مواد آلی سازندهای گورپی، سروک، فهلیان بالایی و نیریز در محدوده کروژن نوع III قرار دارند و بلوغ

References

- Al-Husseini, M.I., 2007. Iran's crude oil reserves and production. *GeoArabia*, 12(2), 69-94, doi: <https://doi.org/10.2113/geoarabia120269>.
- 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, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105887>.
- Alsharhan, A.S., and Salah, M.G., 1997. Tectonic implications of diapirism on hydrocarbon accumulation in the United Arab Emirates. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 45(3), 279-296, doi: <https://doi.org/10.35767/gscpgbull.45.3.279>.
- ASTM, 2011. Standard Test Method for Microscopical Determination of the Reflectance of Vitrinite Dispersed in Sedimentary Rocks. Geneva: Wiley Publications.
- Attarian, M., Moalemmi, S.A., and Memariani, M., 2016. Evaluation of burial history and thermal modeling of oil field located in the east of the Persian Gulf. In *Proceedings of the 20th Conference of the Geological Society of Iran*, 1735-1742 p.
- Barker, C., 1974. Pyrolysis techniques for source-rock evaluation. *AAPG Bulletin*, 58(11), 2349-2361, doi: <https://doi.org/10.1306/83D91BAF-16C7-11D7-8645000102C1865D>.
- Batten, D.J., 1996. Palynofacies and Palaeoenvironmental Interpretation. In: Jansonius, J., and McGregor, D.C., Eds., *Palynology: Principles and Applications*, Vol 3, American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation, College Station, 1011-1064 p.
- Bordenave, M.L., 1993. Applied petroleum geochemistry. Editions Technip, Paris.
- Bordenave, M.L., and Burwood, R., 1995. The Albian Kazhdumi Formation of the Dezful Embayment, Iran: One of the Most Efficient Petroleum Generating Systems. In: Katz, B.J. (eds) *Petroleum Source Rocks. Casebooks in Earth Sciences*. Springer, Berlin, Heidelberg, 183-207, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-78911-3_11.
- Bordenave, M.L., and Huc, A.Y., 1995. The Cretaceous source rocks in the Zagros foothills of Iran. *Revue de L'institut Français du Pétrole*, 50(6), 727-752, doi: <https://doi.org/10.2516/ogst:1995044>.
- Dow, W.G., 1977. Kerogen studies and geological interpretations. *Journal of geochemical exploration*, 7, 79-99, doi: [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(77\)90078-4](https://doi.org/10.1016/0375-6742(77)90078-4).
- Ehinola, O.A., Sonibare, O.O., Javie, D.M., and Oluwale, E.A., 2008. Geochemical appraisal of organic matter in the mid-cretaceous sediments of the Calabar Flank, Southeastern Nigeria. *European Journal of Scientific Research*, 4(23), 567-577.
- England, W.A., 2007. Reservoir geochemistry—A reservoir engineering perspective. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 58(3-4), 344-354, doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.12.012>.
- Espitalié, J., Deroo, G., and Marquis, F., 1985. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. Deuxième partie. *Revue de l'Institut français du Pétrole*, 40(6), 755-784, doi: <https://doi.org/10.2516/ogst:1985045>.
- Espitalié, J., Laporte, J.L., Madec, M., Marquis, F., Leplat, P., and Paulet, J., 1977. Méthode rapide de caractérisation des roches mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution, *Revue Institut Français du Pétrole*, 32(1), 23-42, doi: <https://doi.org/10.2516/ogst:1977002>.
- Ghazban, F., 2007. *Petroleum Geology of the Persian Gulf*. Tehran University and National Iranian Oil Company Publications, Tehran, 707 p.
- Hood, A.C.C.M., Gutjahr, C.C.M., and Heacock, R.L., 1975. Organic Metamorphism and the Generation of Petroleum. *AAPG bulletin*, 59(6), 986-996, doi: <https://doi.org/10.1306/83D91F06-16C7-11D7-8645000102C1865D>.

- Hosseiny, E., and Barati Boldaji, S., 2020. Evaluation of Hydrocarbon Generation Potential of Sargelu Source Rock in Southwestern Iran and the Northwestern Persian Gulf. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 10(23), 79-89, doi: <https://doi.org/10.29252/anm.2020.14351.1451>.
- Hosseiny, E., and Mohseni, A., 2023. Garau Formation as an unconventional hydrocarbon resource in southwestern Iran: a geochemical investigation. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 13(7), 1535-1549, doi: <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01634-1>.
- Hosseiny, E., Rabbani, A.R., and Moallemi, S.A., 2016. Source rock characterization of the Cretaceous Sarvak Formation in the eastern part of the Iranian sector of Persian Gulf. *Organic geochemistry*, 99, 53-66, doi: <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2016.06.005>.
- Huang, B., Xiao, X., and Zhang, M., 2003. Geochemistry, grouping and origins of crude oils in the Western Pearl River Mouth Basin, offshore South China Sea. *Organic Geochemistry*, 34(7), 993-1008, doi: [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(03\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(03)00035-4).
- Hunt, J.M., 1996. *Petroleum Geochemistry and Geology*. 2nd Edition, W.H. Freeman and Company, New York, 743 p.
- Langford, F.F., and Blanc-Valleron, M.M., 1990. Interpreting Rock-Eval Pyrolysis Data Using Graphs of Pyrolizable Hydrocarbons vs. Total Organic Carbon. *AAPG bulletin*, 74(6), 799-804, doi: <https://doi.org/10.1306/0C9B238F-1710-11D7-8645000102C1865D>.
- Marzouk, I., and Sattar, M.A.E., 1994. Wrench tectonics in Abu Dahbi, United Arab Emirates, in M. Al-Husseini, ed., *Geo 94, The Middle East Petroleum Geosciences*, Gulf Petrolink, 1, 655-668.
- Passey, Q.R., Creaney, S., Kulla, J.B., Moretti, F.J., and Stroud, J.D., 1990. A Practical Model for Organic Richness from Porosity and Resistivity Logs. *AAPG bulletin*, 74(12), 1777-1794, doi: <https://doi.org/10.1306/0C9B25C9-1710-11D7-8645000102C1865D>.
- Peters, K.E., 1986. Guidelines for Evaluating Petroleum Source Rock Using Programmed Pyrolysis. *AAPG bulletin*, 70(3), 318-329, doi: <https://doi.org/10.1306/94885688-1704-11D7-8645000102C1865D>.
- Peters, K.E., and Cassa, M.R., 1994. Applied Source-Rock Geochemistry. In: Magoon, L.B., and Dow, W.G., Eds., *The Petroleum System. From Source to Trap*, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, 93-120 p.
- Peters, K.E., and Fowler, M.G., 2002. Applications of petroleum geochemistry to exploration and reservoir management. *Organic Geochemistry*, 33(1), 5-36, doi: [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(01\)00125-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(01)00125-5).
- Peters, K.E., Walters, C.C., and Moldowan, J.M., 2005. *The Biomarker Guide*, second ed. Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History. Cambridge University Press, Cambridge, 683 p.
- Rabbani, A.R., 2008. Geochemistry of crude oil samples from the Iranian sector of the Persian Gulf. *Journal of Petroleum Geology*, 31(3), 303-316, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2008.00422.x>.
- Sfidari, E., Sharifi, M., Yazdi-Moghadam, M., and Hakimi-Zanouz, A., 2024. Geochemical pyrolysis, petrographical analysis and burial history reconstructions of the Kazhdumi Formation in the Hendijan and Soroosh oil fields, northwestern Persian Gulf. *Journal of African Earth Sciences*, 105158, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105158>.
- Sykes, R., and Snowdon, L.R., 2002. Guidelines for assessing the petroleum potential of coaly source rocks using Rock-Eval pyrolysis. *Organic geochemistry*, 33(12), 1441-1455, doi: [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00183-3](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00183-3).
- Taylor, G.H., Teichmüller, M., Davis, A.C.F.K., Diessel, C.F.K., Littke, R., and Robert, P., 1998. *Organic petrology*: Berlin. Gebrüder Borntraeger, 704 p.
- Tissot, B.P., and Welte, D.H., 1984. *Petroleum Formation and Occurrence* Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, New York, Tokio, 699 p.
- Waples, D.W., 1985. Predicting Thermal Maturity. In: *Geochemistry in Petroleum Exploration*. Geological Sciences Series. Springer, Dordrecht, 121-154, doi: https://doi.org/10.1007/978-94-009-5436-6_9.