



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

Determining electrofacies of Gadwan Formation using MRGC clustering method by integrating petrophysical logs and FMI image log

Hossein Jahanmohamadi¹, Hossein Mosaddegh^{1*}, Mehran Azizzadeh², Hamid Sarkheil¹, Mohamad Mohamadnia²

1. Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

2. Research and Development in Upstream Petroleum Industry, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

Article info

Article history

Received: 13 May 2022

Accepted: 14 August 2022

Keywords:

Electrofacies,
MRGC,
Image log,
Gadwan Formation,
Abadan plain.



Abstract

The continuous development of the oil industry has led to a significant increase in the number of wells that are simultaneously analyzed. For this purpose, it is important to develop methods that improve the integration of all well information at different scales, while reducing the time required for studies. This article examines the integration of image log (FMI) with other conventional logs (gamma, density, neutron and sonic) to determine electrofacies in the Gadwan Formation in one of the oilfields in Abadan plain, SW Iran. Due to the high resolution, the image logs can provide important information regarding sedimentology, texture, and porosity distribution. This information is very valuable in situations where it is not possible to core from the Formation. To accurately estimate, the necessary environmental corrections were applied to conventional logs. In the next step, electro-facies were created by integrating conventional logs and image log using the graphical clustering method (MRGC) in Geolog software and with the FACIMAGE™ module and finally, the model with 8 facies was selected as the optimal model. Among the determined facies, the electrofacies number 8 was recognized as the best reservoir facies (due to high effective porosity and low shale volume). Comparing the results of lithology, shale volume, porosity and water saturation with the facies determined by the cluster analysis method showed that the use of image logs has greatly improved the separation of electrofacies.

*Corresponding author: Hossein Mosaddegh; E-mail: mosaddegh@khu.ac.ir

How to cite this article: Jahanmohamadi, H., Mosaddegh, H., Azizzadeh, M., Sarkheil, H., Mohamadnia, M., 2022. Determining electrofacies of Gadwan Formation using MRGC clustering method by integrating petrophysical logs and FMI image log. Kharazmi Journal of Earth Sciences 8(1), 97-117



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Identification and interpretation of geological events, obtaining subsurface information, determining the dip of strata, identifying fault zones, and recognizing bedding surfaces are very important in the field of oil exploration. The geologists, petrophysicists, and reservoir engineers need to gain a significant understanding of the compartments within the reservoir that share the same characteristics in order to describe the reservoir characteristics (Askari and Behrouz, 2011). For this reason, electrical facies analysis is very important in representing reservoir characteristics (Ye and Rabiller, 2000). Each of the facies represents specific geological and reservoir characteristics, and since these characteristics are extracted from well logs, they are known as electrical facies. The modern definition of electrical facies was first proposed by Serra and Abbott (1982). According to this definition, the electrical facies is a set of responses of the well logs that characterizes a layer or, in other words, a stratum distinguishes it from other layers (Serra and Abbott, 1982).

There are several methods for clustering data, which can generally be divided into two categories: supervised clustering and unsupervised clustering. The first group includes back-propagation neural networks (BPNN) and fuzzy logic, while the second group includes self-organizing neural networks (SOM), ascending hierarchical classification (AHC), dynamic clustering (D-C), and multi-resolution graph-based clustering. This research aims to improve the method of clustering electrical facies in wells and coreless formations by integrating well logs and advanced image logs (such as FMI) based on the graphical clustering method (MRGC).

Materials and Methods

Electrical facies are defined based on data clustering. The purpose of clustering is to group data from similar well logs and distinguish this group from other groups. In this study, the electrical facies of the Gadwan Formation from one of the wells in the Abadan plain, were determined using the MRGC method. First, in the FACIMAGE™ module of the Geolog software (ver. 20), the most relevant petrophysical logs were selected, including gamma ray (CGR), density (RHOB), neutron (NPHI), compressional acoustic (DTCO), effective porosity (PHIE) and image log (FMI).

Results and Discussion

In this study, the textures in the target formation were first extracted from the FMI image log using the automatic graphical clustering method, and then each texture was considered as a cluster. According to the extracted textures from the FMI image log, the facies of the Gadwan Formation were divided into 8 clusters, as shown in Figure 1, together with a clear image of the textures in the formation, which are separated with high accuracy. Each cluster consists of textures with common characteristics.

The electrical facies of the formation was then determined by merging the well logs with the textural clusters obtained from the FMI image logs. For this purpose, we consider the model that provides the best resolution in determining the facies and the above parameters, taking into account the geological characteristics and other available information, such as the texture map resulted from the image log and the neutron density cross plot. The bestselected model is consisted of 8 clusters resulting from the integration of common well logs with image logs. In Figure 2, each facies has a different color following its petrophysical and lithological characteristics. This model is essentially the same electrical facies as the Gadwan Formation is well-matched to the lithology of the formation. For example,

high shale and low porosity sections, representing poor reservoir quality areas, are represented by facies 1, while sandy and high porosity sections, known as good

reservoir quality areas, are represented by facies 7 and 8. (Fig. 3).

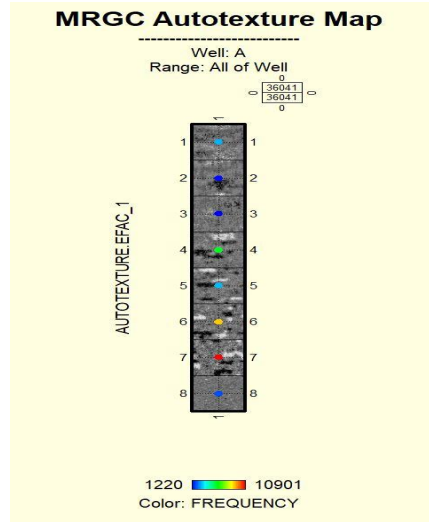


Fig. 1. The map obtained from FMI image log texture analysis in the studied well

	NAME	COL	PAT	WEIGHT	PHIE	CGR_COR	RHO_COR	NPHI_COR	DTCO	EFAC_1
1	FACIES_1			178						
2	FACIES_2			96						
3	FACIES_4			23						
4	FACIES_3			54						
5	FACIES_5			15						
6	FACIES_6			33						
7	FACIES_7			68						
8	FACIES_8			53						

Fig. 2. Clustered facies by MRGC method based on petrophysical logs and FMI image log

Conclusions

In this study, the MRGC method was used to determine the electrical facies of the Gadwan Formation from one of the wells of an oilfield in the Abadan Plain, SW Iran. After running the model in the study well, 8 electrical facies with different geological and reservoir characteristics were identified in the Gadwan Formation. Based on analysis of the petrophysical parameters calculated in each of the electrical facies, facies 8 and 7 were considered to be the best reservoir facies with the highest effective porosity and hydrocarbon volume.

The results of this study show that the MRGC method can be used as a reliable method for predicting electrical facies in detrital formations. Electrical facies were modeled from image log (FMI) and conventional well logs, giving satisfactory results compared to facies from conventional logs alone.

Using this method, a lot of information can be obtained in a short time by considering only petrophysical logs, but the role and influence of other sources of information such as cores and other

geological information on modeling accuracy cannot be ignored.

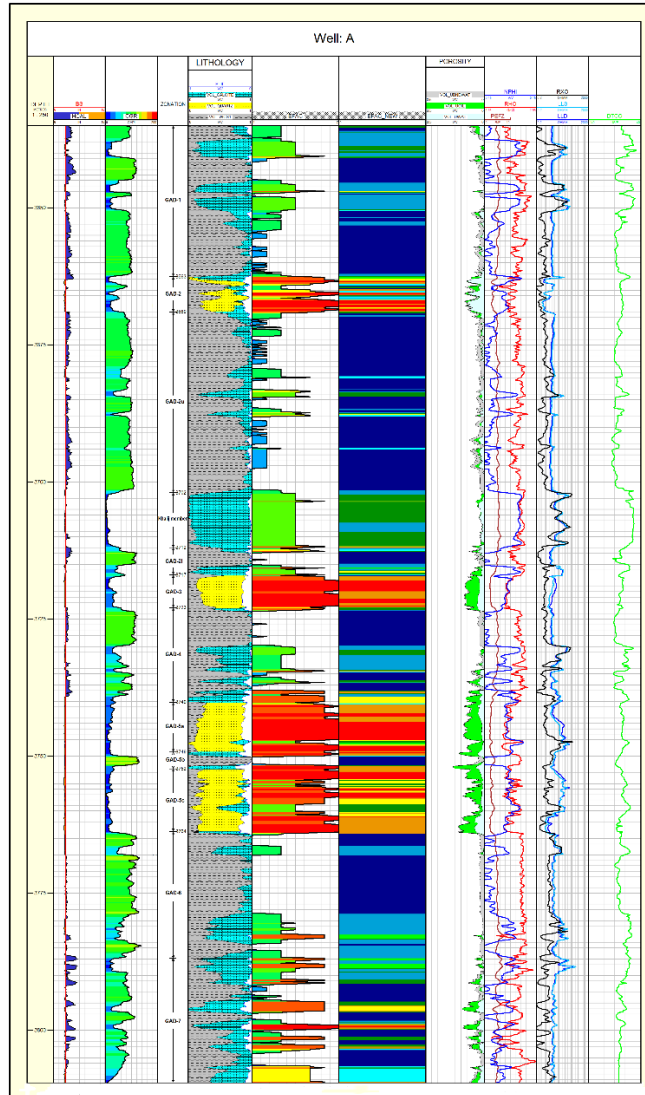


Fig. 3. Electrical facies obtained from petrophysical logs without using image log (column 6) and facies obtained by merging petrophysical logs and image log (column 7) next to the lithology column of Gadwan Formation (column 5)



تعیین رخساره‌های الکتریکی سازند گدوان به روش خوشه‌بندی MRGC با ادغام نمودارهای پتروفیزیکی و نمودار تصویری FMI

حسین جهان‌محمدی^۱، حسین مصدق^{۱*}، مهران عزیززاده^۲، حمید سرخیل^۱، محمد محمدنیا^۲

۱- دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>تاریخچه مقاله دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۳ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۳</p> <p>واژه‌های کلیدی رخساره الکتریکی، خوشه‌بندی گرافیکی (MRGC)، نمودار تصویری، دشت آبادان، سازند گدوان</p> 	<p>توسعه مستمر صنعت نفت منجر به افزایش قابل توجه تعداد چاه‌هایی شده است که به طور همزمان مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. به همین منظور، توسعه روش‌هایی که ادغام همه اطلاعات چاه را در مقیاس‌های مختلف بهبود بخشیده، ولی زمان لازم برای مطالعات را کاهش می‌دهند، از اهمیت بسیاری برخوردارند. این مقاله به بررسی ادغام نمودارهای تصویرگر (FMI) با دیگر نمودارهای چاه‌پیمایی متداول (نمودارهای گاما، چگالی، تخلخل نوترون، صوتی) برای تعیین رخساره‌های الکتریکی در سازند گدوان در یکی از چاه‌های میدین دشت آبادان می‌پردازد. با توجه به قدرت تفکیک بالا، نمودارهای تصویرگر می‌توانند اطلاعات مهمی در رابطه با رسوب‌شناسی، بافت و توزیع تخلخل فراهم نمایند. این اطلاعات در شرایطی که امکان مغزه‌گیری از سازند وجود ندارد، بسیار با ارزش هستند. جهت تخمین دقیق، تصحیحات محیطی لازم بر روی نمودارهای متداول صورت گرفت. در مرحله بعد رخساره‌های الکتریکی با ادغام نمودارهای چاه‌پیمایی متداول و نمودار تصویرگر با استفاده از روش خوشه‌بندی گرافیکی (MRGC) در نرم افزار ژئولاگ و با استفاده از ماژول FACIMAGETM ساخته شدند و در نهایت مدل ۸ رخساره ای به عنوان مدل بهینه انتخاب گردید. از میان رخساره‌های تعیین شده، رخساره الکتریکی شماره ۸ به عنوان بهترین رخساره مخزنی (با توجه به تخلخل مؤثر بالا و حجم شیل پایین) تشخیص داده شد. مقایسه نتایج سنگ‌شناسی، حجم شیل، تخلخل و اشباع آب با رخساره‌های تعیین شده توسط روش آنالیز خوشه‌ای نشان داد که به کارگیری نمودارهای تصویرگر موجب بهبود تفکیک رخساره‌های الکتریکی می‌شود.</p>

*نویسنده مسئول: حسین مصدق mosaddegh@khu.ac.ir

استناد به این مقاله: جهان‌محمدی، ح.، مصدق، ح.، عزیززاده، م.، سرخیل، ح.، محمدنیا، م. (۱۴۰۱) تعیین رخساره‌های الکتریکی سازند گدوان به روش خوشه‌بندی MRGC با ادغام نمودارهای پتروفیزیکی و نمودار تصویری FMI، ایران. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۸، شماره ۱، صفحه ۹۷ تا ۱۱۷



مقدمه

شناسایی و تفسیر وقایع زمین‌شناسی، به دست آوردن اطلاعات زیرسطحی، تعیین شیب طبقات، تعیین زون‌های ریزشی و تشخیص گسل‌ها و سطوح لایه‌بندی در حوزه اکتشاف نفت بسیار حائز اهمیت است. با استفاده از ترکیب کانی‌شناسی، بافت و ساخت‌های رسوبی، خصوصیات مخزنی از قبیل تخلخل و تراوایی را می‌توان به صورت غیرمستقیم و با هزینه بسیار کمتر از مغزه‌ها فراهم نمود. مغزه‌گیری از چاه یکی از روش‌های کاربردی جهت دسترسی به اطلاعات زیرسطحی است که روشی زمان‌بر و پرهزینه است و در سازندهای دارای شکستگی‌های فراوان و با لیتولوژی سست به دلیل کاهش ضریب بازیافت مغزه توصیه نمی‌شود. لذا بهتر است از ابزارهای دیگری استفاده گردد (اقتباس از Serra and Abbott, 1982).

زمین‌شناسان، پتروفیزیک‌ها و مهندسان مخزن به منظور ارائه توصیف درست از خصوصیات مخزن باید به شناخت قابل‌توجهی از بخش‌های درون مخزن که ویژگی‌های یکسانی با هم دارند، دست یابند (Askari and Behrouz, 2011). به همین سبب تجزیه و تحلیل رخساره‌های الکتریکی برای بیان خصوصیات مخزن بسیار مهم است (Ye and Rabiller, 2000). تحلیل رخساره‌های الکتریکی روشی برای تقسیم‌بندی نمودارهای چاه‌پیمایی به زیرمجموعه‌هایی است که نشان‌دهنده رخساره‌های زمین‌شناسی مخزنی هستند (Rabiller, 2005). هر یک از رخساره‌ها بیانگر ویژگی‌های زمین‌شناسی و مخزنی خاصی می‌باشند و به جهت اینکه این ویژگی‌ها از طریق نمودارهای چاه‌پیمایی استخراج می‌گردند، تحت عنوان رخساره

الکتریکی شناخته می‌شوند. تعریف رخساره الکتریکی به معنای امروزی نخستین بار توسط سراً^۱ و ابوت (Serra and Abbott, 1982) ارائه شد. بر طبق این تعریف، رخساره الکتریکی عبارت است از مجموعه‌ای از پاسخ‌های نمودارهای چاه‌پیمایی که مشخص‌کننده یک لایه و یا به عبارت دیگر یک چینه بوده و باعث تشخیص آن از لایه‌های دیگر می‌شود. روش‌های مختلفی برای خوشه‌بندی داده‌ها وجود دارد که به طور کلی می‌توان آنها را به دو دسته مبتنی بر ناظر و بدون ناظر تقسیم‌بندی کرد (رحیمی‌بهار و پرهام، ۱۳۹۱). از گروه اول می‌توان به شبکه‌های عصبی پس انتشار خطا^۲ (BPNN) و منطق فازی^۳ و از گروه دوم نیز به شبکه‌های عصبی خود سازمان^۴ (SOM)، طبقه‌بندی سلسله مراتبی صعودی^۵ (AHC)، خوشه‌بندی دینامیک^۶ (D-C) و خوشه‌بندی گرافیکی با تفکیک چندگانه^۷ (MRGC) نام برد. یکی از تکنیک‌های آزمایش شده، روش MRGC می‌باشد که مناسب‌ترین نتایج را در شناسایی رخساره‌های الکتریکی در مخازن ارائه می‌دهد. در این روش، معایب دیگر روش‌های خوشه‌بندی مانند نیاز به دانش قبلی در مورد تعداد خوشه‌ها حذف شده است. تجزیه و تحلیل مغزه‌ها یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها در زمینه تعیین رخساره‌های مخزنی می‌باشد، اما ممکن است مغزه‌گیری در کل مخزن و یا بخش‌های غیرمخزنی به دلیل برخی مسائل از جمله هزینه‌ی بالا و زمان‌بر بودن و یا ریزشی بودن سازند مورد نظر امکان‌پذیر نباشد. یک ابزار مناسب و به صرفه در هزینه و زمان، تصویربرداری از چاه است که در صنعت نفت با توجه به اطلاعات مغزه‌ای محدود،

^۱ Ascendant Hierarchical Clustering

^۲ Dynamic Clustering

^۳ Multi Resolution Graph-base Clustering

^۱ Serra

^۲ Back-Propagation Neural Networks

^۳ Fuzzy Logic

^۴ Self-Organizing Map

روش‌ها برای تخمین تراوایی مخزن کربناته سازند ایلام در یکی از میادین جنوب غرب ایران استفاده کردند. تیان و همکاران (Tian et al., 2016) در پژوهشی رخساره‌های الکتریکی و رخساره‌های سنگی را با استفاده از روش خوشه‌بندی گرافیکی با تفکیک چندگانه (MRGC)، برای میدان گازی واقع در حوضه آمودریا^۱ تعیین کردند. سپهری و زینلی (۱۳۹۶) با استفاده از روش خوشه‌بندی MRGC و اطلاعات نمودارهای پتروفیزیکی، تعداد بهینه رخساره‌های الکتریکی برای سازند A یکی از میادین نفتی ایران را تعیین نمودند. هدف از این پژوهش، بهبود روش خوشه‌سازی رخساره‌های الکتریکی در چاه و سازندهای فاقد مغزه با استفاده از ادغام نمودارهای چاه‌پیمایی متداول و نمودارهای تصویرگر پیشرفته همچون FMI^۲ بر مبنای روش خوشه‌بندی گرافیکی با تفکیک چندگانه (MRGC) می‌باشد. به همین سبب نمودارهای چاه‌پیمایی متداول پس از انجام تصحیحات محیطی لازم از شرایط موجود در چاه، با نمودار تصویرگر FMI ادغام شده و با استفاده از یک روش خوشه‌بندی پیشرفته و سازگار با ماهیت این داده‌ها به نام MRGC در محیط نرم افزار ژئولاگ رخساره‌های الکتریکی خوشه‌بندی می‌شوند. مدل‌های مبتنی بر این روش می‌توانند برای برون‌یابی ویژگی‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی برای چاه‌های بدون مغزه حفر شده در سازندهای مشابه مورد استفاده قرار گیرند. نمودارهای تصویری چاه اطلاعات مهمی در مورد بافت و ساختار سازندها فراهم می‌کنند. این تصاویر با توجه به وضوح عمودی بالا و پوشش نسبتاً زیاد از دیواره چاه، می‌توانند اطلاعاتی در مورد زمین‌شناسی و توزیع تخلخل ارائه دهند، در حالی که امکان تشخیص اطلاعات بافتی مانند

برای تجزیه و تحلیل محیط رسوبی مخزن توسعه داده شده‌است (Moghaddas et al., 2017).

تعیین رخساره‌های الکتریکی در توالی مخزنی به طور پراکنده توسط محققان مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است. یو و رابیلر (Ye and Rabbiller, 2000) در مطالعه‌ای با عنوان معرفی روشی جدید برای تجزیه و تحلیل رخساره‌های الکتریکی (خوشه‌بندی گرافیکی با تفکیک چندگانه)، روش MRGC را به عنوان روشی ارزشمند برای شناسایی رخساره‌های زمین‌شناسی معرفی نمودند. کنت و همکاران (Knecht et al., 2004) در مطالعه‌ای جهت مدل‌سازی رخساره‌های الکتریکی و نفوذپذیری مخازن کربناته از روش خوشه‌بندی گرافیکی با تفکیک چندگانه و تحلیل بافت‌های حاصل از نمودارهای تصویرگر استفاده کردند. محمودی و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از روش خوشه‌بندی گرافیکی با تفکیک چندگانه در چاه نمک غربی شماره-۱ بندرعباس، رخساره‌های الکتریکی را شناسایی و زون‌بندی نمودند. پایخش و همکاران (Pabakhsh et al., 2012) از روش خوشه‌بندی MRGC برای تخمین نمودار فوتوالکتریک و شناسایی سنگ‌شناسی سازند استفاده کردند. رحیمی‌بهار و پورصیامی (۱۳۹۱) در مطالعه‌ای جهت تفکیک زون‌های مختلف مخزن هیدروکربنی ابتدا پارامترهای مخزنی نظیر تخلخل و تراوایی را از طریق اطلاعات مغزه به دست آوردند، سپس با استفاده از نمودارهای چاه‌پیمایی و خوشه‌بندی به روش MRGC رخساره‌های الکتریکی یکی از میادین جنوب ایران را تهیه کردند. معلمی و همکاران (۱۳۹۴) کاربرد روش‌های مختلف خوشه‌سازی (SOM، AHC، MRGC) را برای تعیین تراوایی معرفی نموده و از این

^۲ Formation Micro-Imager

^۱ Amu Darya

تخلخل حفره‌ای را نیز فراهم می‌سازند. این تصاویر به عنوان مکمل و در مواردی نظیر شناسایی زون‌های ریزشی که ضریب بازیافت مغزه در آن‌ها بسیار پایین است، جانشین مناسبی برای مغزه‌ها در نظر گرفته می‌شوند (Ye et al., 1998). در این پژوهش از تکنیک‌های مختلف عددی جهت خوشه‌بندی رخساره‌های الکتریکی استفاده شده است. همچنین با بکارگیری نمودارهای تصویرگر، مشکل عدم دسترسی به مغزه جهت تعیین خصوصیات پتروفیزیکی به طور قابل ملاحظه‌ای جبران گردیده است.

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

رسوبات کرتاسه در نواحی جنوب غرب ایران، از اصلی‌ترین منابع هیدروکربوری در بخش خاورمیانه و جهان می‌باشند. بخش اعظم این منابع درون رسوبات کربناته قرار داشته و تنها تعداد کمی از آن‌ها در سازندهای آواری شناسایی شده‌است. از جمله این مخازن می‌توان به سازند گدوان (بارمین-آپتین پایینی) در ناحیه دشت آبادان (به عنوان یکی از زیرپهنه‌های ناحیه زاگرس) اشاره کرد که برخلاف ترکیب سنگ‌شناسی گزارش شده از سایر زیرپهنه‌های زاگرس، عمدتاً ماهیت آواری دارد و در ادامه دلتای زبیر گسترش یافته است (Hollis, 2011; Al-Fares et al., 1998; Wells et al., 2015).

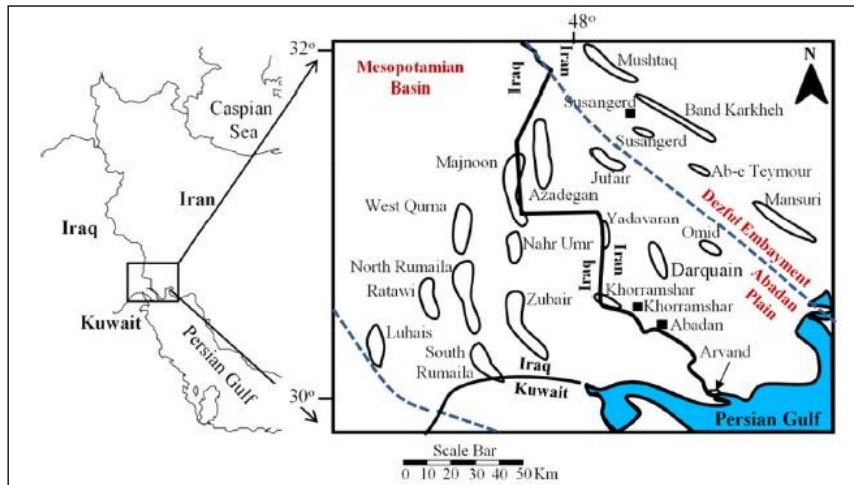
ناحیه دشت آبادان به عنوان بخشی از حوضه رسوبی زاگرس یکی از مهمترین مناطق هیدروکربنی ایران محسوب می‌شود (Alavi, 2007). میادین هیدروکربنی این ناحیه دارای دو امتداد اصلی در پهنه زاگرس و صفحه عربی هستند که در پهنه زاگرس به صورت شمال غربی-جنوب شرقی و در صفحه عربی به صورت شمالی-جنوبی و شمال شرقی-جنوب غربی هستند. میدان نفتی مورد مطالعه در دشت آبادان و در

۸۰ کیلومتری غرب شهرستان اهواز قرار گرفته است. میدان نفتی مورد مطالعه با روند شمالی-جنوبی و بر روی بلندای دیرینه بورگان واقع شده است و شباهت زیادی به حوضه بین‌النهرین عراق دارد (Alavi, 2007; Abdollahie Fard et al., 2006). در این میدان نفتی چهار سازند سروک، کزدمی (ماسه‌سنگ بورگان)، گدوان (ماسه‌سنگ زبیر) و فهلیان به عنوان سنگ مخزن شناخته شده‌اند. سازند گدوان معادل سازند زبیر در حوضه بین‌النهرین در عراق و کویت، بیاض در عربستان و خرایب در امارات و عمان است (Sharland et al., 2001; Nairn and Alsharhan, 1997). این سازند در کشورهای عراق و کویت دارای سنگ‌شناسی آواری بوده و از آن به عنوان یکی از منابع مهم هیدروکربوری بهره‌برداری شده است. بدین ترتیب مطالعات مخزنی این سازند که در دشت آبادان دارای تعدادی افق ماسه سنگی مستعد مخزن بوده، بسیار پر اهمیت است. سازند گدوان از نظر سنگ‌شناسی دربرگیرنده تناوبی از آهک‌های دارای خرده‌های صدفی به رنگ خاکستری تیره و مارن‌های خاکستری تا سبز مایل به قهوه‌ای است (مطیعی، ۱۳۷۴). به جز عضو کربناته خلیج که در منطقه مطالعه شده بین ۷-۱۵ متر ضخامت دارد، عمده ضخامت ۲۰۰-۳۰۰ متری این سازند در میادین دشت آبادان از ماسه‌سنگ و شیل تشکیل شده‌است (Enayati-Bidgoli and Saemi, 2019). سازند گدوان در میدان مورد مطالعه به دوازده زون^۱ تقسیم می‌شود که به ترتیب عبارتند از: Gad-1, GAD-2, GAD-2u, GAD-2l, Khalij, GAD-3, GAD-4, GAD-5a, GAD-5b, GAD-5c, GAD-6 و GAD-7. ضخامت زون فرعی خلیج بسیار نازک است و از نظر سنگ‌شناسی دارای سنگ آهک تمیز قهوه‌ای‌رنگ و سنگ آهک توده‌ای نیمه سخت است.

¹ Zone

روشن و زرد مایل به قهوه‌ای روشن می‌باشد و زون Gad-5 که به عنوان مخزن نفتی اصلی حاوی نفت سبک شناخته می‌شود، به صورت مجموعه‌ای از لایه‌های متناوب شیل نیمه سخت خاکستری و خاکستری تیره و ماسه‌سنگ کانالی تمیز حاوی نفت قهوه‌ای تا قهوه‌ای روشن است (هنرمند، ۱۳۹۷).

عضو خلیج دارای خصوصیات مخزنی بسیار ضعیفی بوده و در میدان مورد مطالعه به عنوان یک مخزن متراکم^۱ شناخته می‌شود. از میان این دوازده زون، تنها زون‌های Gad-3 و Gad-5a و Gad-5c در گدوان پایینی دارای قابلیت مخزنی می‌باشند. زون Gad-3 دارای سنگ‌شناسی ماسه‌سنگ کانالی تمیز با نفت قهوه‌ای



شکل ۱- نقشه موقعیت میدان‌های هیدروکربوری در ناحیه دشت آبادان و بین‌النهرین (Zeinalzadeh et al., 2015)

Fig. 1. Location map of hydrocarbon fields in Abadan plain and Mesopotamia

مواد و روش‌ها

چاه‌پیمایی و مغزه‌های حفاری است. این تکنیک مبتنی بر تشخیص الگوی نقطه‌ای چند بُعدی بر مبنای نزدیکترین همسایگی و نمایش گرافیکی داده‌ها است. از مزایای این روش نسبت به سایر روش‌ها می‌توان به عدم نیاز به داشتن دانش اولیه از مجموعه داده‌ها و تولید خودکار تعداد بهینه خوشه‌ها بدون دخالت ناظر اشاره کرد. همچنین این روش یک روش آماری غیر پارامتریک است که مشکل وابستگی به بُعد را از بین می‌برد و اطلاعات مفیدی از رخساره‌های زمین‌شناسی را با استفاده از ساختار خود داده‌ها به دست می‌آورد. در واقع، این روش تلفیقی از هوش مصنوعی و روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی است. در این روش دو شاخص اضافه شده است که نقاط قوت روش MRGC

رخساره الکتریکی بر مبنای خوشه‌بندی داده‌ها تعریف می‌شود. هدف از خوشه‌بندی، گروه‌بندی داده‌های حاصل از نمودارهای چاه‌پیمایی مشابه و متمایز ساختن این گروه‌ها می‌باشد. جهت دسته‌بندی داده‌ها می‌توان از آنالیزهای آماری مختلفی مانند آنالیز اجزای اصلی، آنالیز تفریقی و آنالیز خوشه‌ای و همچنین از روش شبکه عصبی استفاده نمود (Ye and Rabiller, 2000). در این مطالعه از روش آنالیز خوشه‌ای گرافیکی با تفکیک چندگانه (MRGC) استفاده شده است. روش MRGC یکی از معدود روش‌های آماری غیر پارامتریک^۲ و بسیار مناسب برای مطالعه و تحلیل خوشه‌ای داده‌های حاصل از نمودارهای

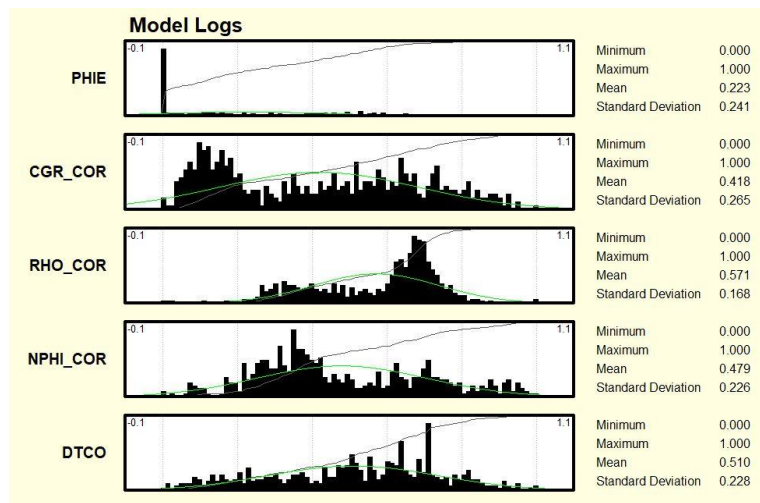
² Non-parametric statistics

¹ Tight

از نرم افزار ژئولاگ^۳ صورت گرفت. ابتدا در ماژول FACIMAGETM نرم افزار، از بین نمودارهای پتروفیزیکی، نمودارهای اشعه گاما (CGR)، چگالی (RHOB)، نوترون (NPHI)، صوتی تراکمی (DTCO) و تخلخل موثر (PHIE) که بیشترین ارتباط را با هدف مورد مطالعه داشتند، انتخاب شده و مورد آموزش قرار گرفتند. تصویری از هیستوگرام‌های مربوط به توزیع داده‌های ورودی با روش MRGC در شکل ۲ نشان داده شده است. در ادامه با استفاده از خوشه‌بندی به روش MRGC، تعداد خوشه‌های بهینه بصورت خودکار توسط نرم افزار تعیین شد. در این روش کاربر هیچگونه دخالتی در نحوه خوشه‌بندی نداشته و این خود نرم افزار است که به صورت کاملاً هوشمند تعداد خوشه‌ها را تعیین می‌نماید و کاربر فقط می‌تواند از بین خوشه‌های تعیین شده، خوشه‌ای که بهترین تفکیک را در رخساره‌ها انجام داده است را برگزیند. رخساره‌های حاصل از این مدل، بدون استفاده از نمودار تصویرگر FMI حاصل شده‌اند. در این حالت تعداد ۷ خوشه به عنوان تعداد خوشه‌های بهینه تعیین شدند.

نسبت به سایر روش‌های سلسله مراتبی می‌باشد که شامل شاخص KRI^۱ و شاخص NI^۲ می‌باشد. NI پارامتر شاخص همسایگی که موقعیت نزدیک بودن هر نقطه در یک مجموعه داده را به قله یا قعر تابع چگالی احتمالی داده‌ها را مشخص می‌کند و KRI پارامتر شاخص هسته خوشه که شاخصی جهت تعیین نقاط مستعد برای نمایندگی به عنوان هسته یا مرکز خوشه است، ارزیابی می‌شود. این دو شاخص نشانه‌های رابطه همسایگی میان داده‌ها می‌باشند که برای ایجاد یک محدوده مناسب در تعیین تعداد خوشه‌ها ضروری هستند. در تحلیل نمودارهای متقاطع، مخصوصاً در نمودار متقاطع NPHI - DT، اگر دو نقطه نزدیک به هم وجود داشته باشد ولی هیچ‌گونه شباهتی بین آنها وجود نداشته باشد این روش می‌تواند این دو نقطه را از یکدیگر تفکیک کند (Ye and Rabiller, 2000; Rabiller, 2005).

این پژوهش بر روی سازند گدوان در یکی از چاه‌های واقع در میدین دشت آبادان با هدف تعیین رخساره‌های الکتریکی با روش خوشه‌بندی و با استفاده



شکل ۲- وضعیت پراکندگی نمودارهای چاه‌پیمایی ورودی در مدل اول بدون استفاده از نمودار FMI
Fig. 2. Dispersion status of input well survey logs in the first model without using FMI log

³ Geolog

¹ Kernel Representative Index

² Neighboring Index

تجزیه و تحلیل خودکار بافت به روش خوشه‌بندی گرافیکی^۱

بافت سنگ یکی از ویژگی‌های مهم زمین‌شناسی محسوب می‌گردد، زیرا تاثیر قابل توجهی بر روی جریان سیال و ضریب بازیافت دارد و سازوکار رسوبگذاری و ته‌نشست که ساختمان و گستردگی مخزن را کنترل می‌نمایند را نمایش می‌دهد. شناسایی و تفسیر بافت تنها با استفاده از مغزه‌گیری و یا استفاده از نمودارهای تصویرگر امکان‌پذیر می‌باشد (Ye and Rabiller, 2000). امروزه روش‌های گوناگونی برای طبقه‌بندی پارامترهای آماری همچون تشخیص خودکار بافت مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش خوشه‌بندی گرافیکی خودکار بافت^۲ و نقشه خود سازمان بافت^۳ اشاره کرد (Ye et al., 1998).

در این مطالعه، با استفاده از روش خوشه‌بندی گرافیکی پارامترهای مختلف آماری بافت بر اساس شباهت ظاهری (اندازه دانه‌ها و میزان جورشدگی) خوشه‌بندی شده‌اند. از مزایای این خوشه‌بندی می‌توان به این نکته اشاره کرد که هیچ اطلاعات اولیه‌ای برای مشاهده بافت ضروری نیست و این مورد انحراف و خطایی که ممکن است توسط فرد تفسیرکننده ایجاد شود را کاهش می‌دهد (سپهری و زینلی، ۱۳۹۶). الگوریتم MRGC یک رویکرد خوشه‌بندی شناخته شده است و امکان تجزیه و تحلیل نمودارهای تصویرگر را به منظور به دست آوردن رخساره‌های بافتی برای استفاده به عنوان داده ورودی برای تفسیرهای تکمیلی (روش‌های تجزیه و تحلیل خوشه‌ای یا تعیین گونه سنگی) فراهم می‌کند. با استفاده از خوشه‌بندی گرافیکی، بافت از نمودارهای تصویرگر شناسایی شده و

به صورت یک نقشه مصنوعی به همراه بافت‌های موجود که هر کدام را به عنوان یک خوشه در نظر می‌گیرد نمایش داده می‌شود. این روش شامل چهار مرحله اصلی است (Galli et al., 2019):

نرمال‌سازی تصویر^۴

هدف آن حذف تغییرات عمده فرکانس پایین در یک نمودار تصویرگر نرمال شده است که به دلیل تأثیر زمینه سازند ایجاد می‌شود. این فرآیند به برجسته کردن ویژگی‌های بافتی متمرکز شده و باید تصویری ایجاد کند که بتوان از آن برای تشخیص بافت براساس تغییرات فرکانس بالای مقاومت استفاده نمود.

استخراج پارامترها^۵

این مرحله یک نمودار ویژگی آماری به منظور طبقه‌بندی بافت‌های حاصل از یک نمودار تصویرگر نرمال شده ایجاد می‌کند. نمودار ویژگی آرایه‌ای است که شامل یک هیستوگرام برای مشخص کردن تغییرات فضایی در امتداد نمودار تصویرگر است. خروجی^۲ مرحله اول در شکل ۳ نشان داده شده است.

استخراج نقشه^۶

این مرحله یک نقشه یک‌بعدی از بافت‌ها ایجاد می‌کند که در آن کاربر می‌تواند حداکثر تعداد خوشه‌ها را برای جستجو مشخص کند. خروجی بیش‌ترین تعداد بافت‌شده در این محدوده خواهد بود.

تشخیص بافت^۷

این مرحله با مقایسه نمودار ویژگی^۸ با نقشه بافت^۹ ایجاد شده، محل وقوع تغییرات بافت در داده‌های تصویر اصلی را مشخص می‌کند و یک پروفیل پیوسته از رخساره‌های بافتی را تولید می‌کند که نشان می‌دهد کدام دسته بافت در هر عمق شناسایی شده است.

^۶ Map Extraction

^۷ Texture detection

^۸ Feature log

^۹ Texture map

^۱ Automatic Texture MRGC

^۲ Auto Texture MRGC

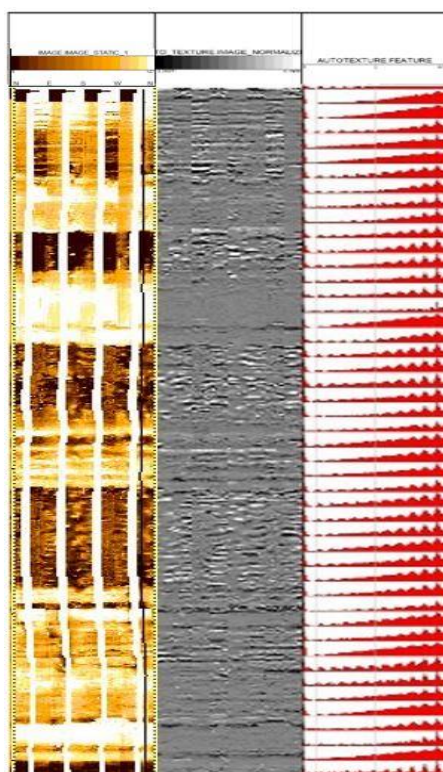
^۳ Auto Texture SOM

^۴ Image Normalization

^۵ Parameter Extraction

در مواقعی که مغزه وجود نداشته باشد، این روش اطلاعات جامع مبتنی بر بافت‌های شناسایی شده را برای زمین‌شناسان فراهم می‌کند و دقت تعیین رخساره‌های الکتریکی را افزایش می‌دهد.

نمودار رخساره را می‌توان به عنوان ورودی در تجزیه و تحلیل رخساره الکتریکی مرسوم استفاده کرد تا با افزودن اطلاعات بافتی از نمودارهای تصویرگر به اطلاعات پتروفیزیکی از نمودارهای معمول، تفسیر نهایی را بهبود بخشید.



شکل ۳- بخشی از تصویر استاتیک و تصویر نرمال‌سازی شده به همراه نمودار ویژگی در چاه مورد مطالعه

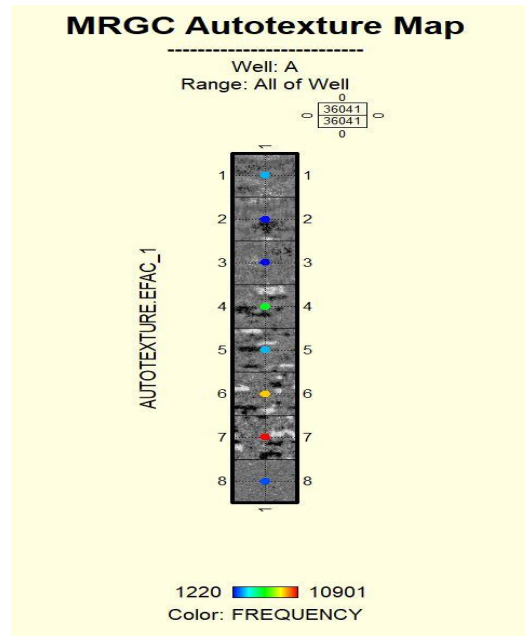
Fig. 3. Part of the static image and the normalized image along with the feature log in the studied well

تصویرگر با دیگر نمودارهای متداول چاه برای تعیین رخساره الکتریکی استفاده شده است. در این مطالعه نخست بافت‌های موجود در سازند مورد نظر با استفاده از روش خوشه‌بندی گرافیکی خودکار از روی نمودار تصویر FMI استخراج شد، سپس هر کدام از این بافت‌ها به عنوان یک خوشه در نظر گرفته شد. طبق بافت‌های استخراج شده از نمودار تصویری FMI، رخساره‌های تعیین شده برای سازند مورد نظر در ۸ خوشه تعریف شد که همراه تصویری واضح از بافت‌های موجود در سازند که با دقت بالایی از یکدیگر متمایز شده‌اند، در

بحث و نتایج

در این مطالعه جهت تعیین رخساره الکتریکی سازند گدوان از روش خوشه‌بندی گرافیکی (MRGC) استفاده شده است. جهت تعیین رخساره الکتریکی از ترکیب نمودارهای متداولی همچون CGR، RHOB، DTCO، NPHI و PHIE که هر کدام از آنها خصوصیات مخزنی خاصی را نمایش می‌دهند، استفاده شده است. با توجه به اینکه ترکیب نمودارهای مختلف در میزان دقت رخساره الکتریکی نقش زیادی دارد و با توجه به ویژگی‌هایی که برای نمودارهای تصویرگر اشاره شد و عدم دسترسی به اطلاعات مغزه، از ادغام نمودار

شکل ۴ نمایش داده شده‌است و هر خوشه متشکل از بافت‌هایی است که دارای خصوصیات مشترکی هستند.

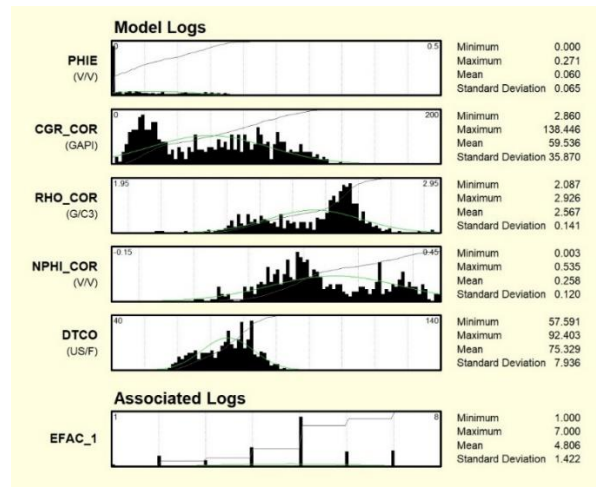


شکل ۴- نقشه حاصل از آنالیز بافت نمودار تصویرگر در چاه مورد مطالعه

Fig. 4. The map obtained from the analysis of image log texture in the studied well

نهایت رخساره‌ها با در نظر گرفتن این مؤلفه‌ها از یکدیگر تفکیک می‌شوند. بدین منظور با در نظر گرفتن ویژگی‌های زمین‌شناسی و سایر اطلاعات در دسترس همچون نقشه بافت حاصل از نمودار تصویرگر (شکل ۴) و نمودار متقاطع نوترون-چگالی، مدلی که بهترین تفکیک را در تعیین رخساره‌ها و پارامترهای مطرح شده ارائه می‌دهد را در نظر می‌گیریم.

در ادامه با ادغام نمودارهای چاه‌پیمایی متداول با خوشه‌های بافتی حاصل از نمودارهای تصویرگر، رخساره الکتریکی در سازند مورد مطالعه تعیین شد. در شکل ۵ هیستوگرام مربوط به توزیع نمودارهای ورودی نمایش داده شده‌است. مدل‌های مختلفی برای رخساره‌ها ساخته شده که هر کدام از رخساره‌های تعیین شده از نظر میزان تخلخل موثر، حجم شیل، چگالی، سرعت موج تراکمی با یکدیگر متفاوت هستند که در

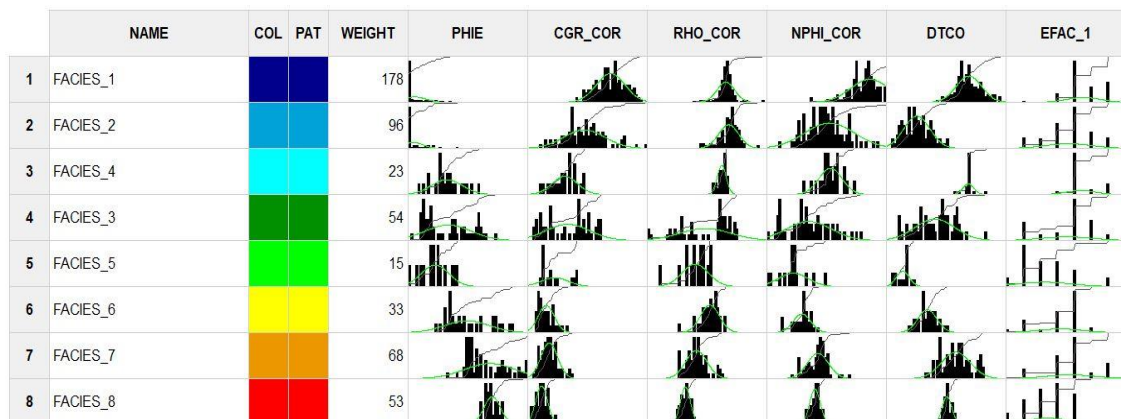


شکل ۵- وضعیت توزیع نمودارهای ورودی (بخش بالا) و داده ناظر (پایین)

Fig. 5. Status of distribution of input logs (upper part) and observer data (lower part)

رنگ خاصی از یکدیگر متمایز شده‌اند، همچنین پارامترهای پتروفیزیکی مربوط به هر یک رخساره‌ها نیز در جدول ۱ قرار گرفته‌است.

در انتها بهترین مدل انتخاب شده از ادغام نمودارهای متداول با نمودارهای تصویرگر متشکل از ۸ خوشه می‌باشد. در شکل ۶ هر کدام از این رخساره‌ها با توجه به ویژگی‌های پتروفیزیکی و سنگ‌شناسی توسط



شکل ۶- رخساره‌های خوشه‌بندی شده با روش MRGC براساس نمودارهای پتروفیزیکی و نمودار تصویری FMI

Fig. 6. Clustered facies by the MRGC method based on petrophysical logs and FMI image log

شماره‌ی ۱ نمایش داده می‌شوند و بخش ماسه‌ای و با تخلخل بالا که به عنوان نواحی با کیفیت مخزنی مناسب شناخته می‌شوند با رخساره‌های شماره ۷ و ۸ نمایش داده شده‌اند (شکل ۷). پس از تعیین مدل رخساره الکتریکی بهینه برای اطمینان از میزان دقت

این مدل در اصل همان رخساره‌های الکتریکی در سازند مورد نظر می‌باشد و از تطابق خوبی با سنگ‌شناسی سازند برخوردار است. به عنوان مثال نواحی با درصد شیل بالا و با تخلخل پایین که بیانگر نواحی با کیفیت مخزنی ضعیف هستند، با رخساره

سنگ‌شناسی این زون عمدتاً از ماسه‌سنگ کانالی^۳ تمیز با نفت قهوه‌ای روشن و زرد مایل به قهوه‌ای روشن است. میانگین تخلخل این زون در حدود ۱۴٪ می‌باشد. ضخامت ناخالص زون GAD-5 در حدود ۲۳ متر و نسبت خالص به ناخالص این زون برابر با ۶۰/۹ درصد می‌باشد. رسوبات GAD-5 مجموعه‌ای از لایه‌های متناوب از شیل نیمه سخت خاکستری و خاکستری تیره و ماسه‌سنگ کانالی تمیز قهوه‌ای و قهوه‌ای روشن است که با سنگ آهک و شیل بخش پایینی در تماس است. میانگین تخلخل این زون نسبتاً خوب (۱۱/۵٪) است. زون GAD-5 از نظر شیلی و ماسه‌سنگ به سه زیر ناحیه تقسیم می‌شود.

رخساره‌های حاصل شده، هر یک از این رخساره‌ها را از نظر میزان تخلخل موثر، حجم شیل، حجم هیدروکربن مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهیم. تعداد ۸ رخساره در سازند گدوان شناسایی شده است که نمودار جعبه‌ای تخلخل موثر، حجم هیدروکربن و حجم شیل آنها به ترتیب در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نمایش داده شده‌اند.

بررسی کیفیت مخزنی سازند مورد مطالعه

طبق اطلاعات به‌دست آمده از تفسیر نمودارهای جعبه‌ای تخلخل موثر، حجم هیدروکربن و حجم شیل، رخساره الکتریکی شماره ۸ با طیف رنگی قرمز به دلیل داشتن تخلخل موثر بین ۱۳-۱۷ درصد و حجم هیدروکربن بین ۱۰-۱۳ درصد و حجم شیل کمتر از ۲۰ درصد، بالاترین کیفیت مخزنی را دارد. پس از آن رخساره شماره ۷ با طیف رنگی نارنجی قرار دارد که از کیفیت مخزنی مناسبی برخوردار است. سنگ‌شناسی معادل این رخساره‌ها شامل ماسه‌سنگ با درصد بسیار کمی شیل است و معرف بخش مخزنی در چاه مورد نظر می‌باشد. از بین دوازده زون موجود، زون‌های GAD-3 و GAD-5a و GAD-5c را می‌توان به عنوان زون‌های مخزنی در نظر گرفت، زیرا بیشترین درصد فراوانی از رخساره‌های شماره ۷ و ۸ که معرف بهترین شرایط مخزنی هستند را دارا می‌باشند و همچنین از تخلخل موثر و حجم هیدروکربن بالا و حجم شیل پایینی برخوردارند (جدول ۲). پس از آنها رخساره‌های شماره ۶ و ۵ نیز دارای شرایط مناسبی می‌باشند. همچنین رخساره‌های شماره ۱ و ۲ با سنگ‌شناسی عمدتاً شیلی دارای ضعیف‌ترین شرایط مخزنی هستند.

زون GAD-3 از ضخامت ناخالص^۱ در حدود ۴/۴ متر تشکیل شده‌است و دارای بالاترین نسبت خالص به ناخالص^۲ ۸۳/۶ درصد در سازند گدوان است.

³ channel

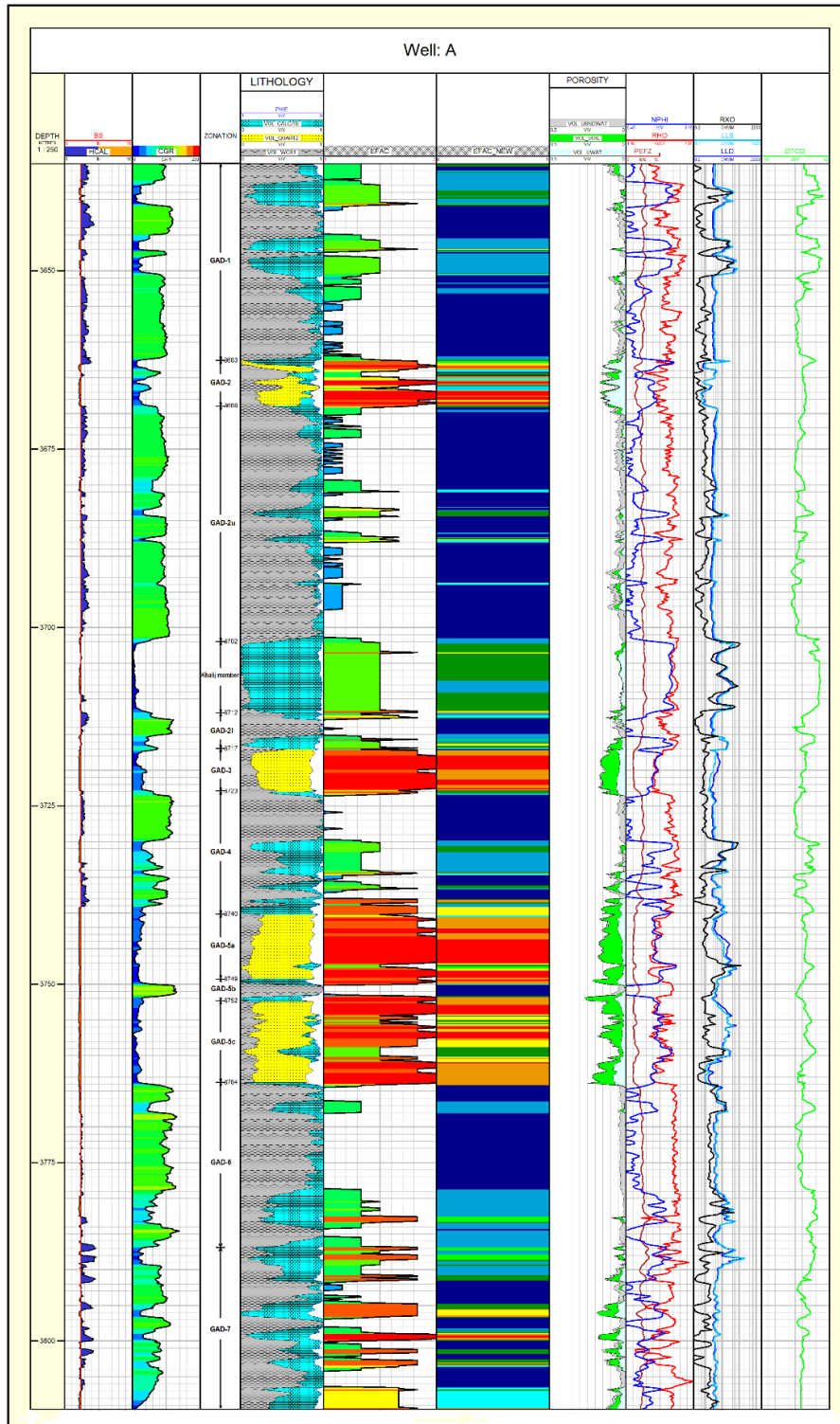
¹ gross

² net/gross

جدول ۱- مقادیر نمودارهای پتروفیزیکی برای هر یک از رخساره‌های تعیین شده

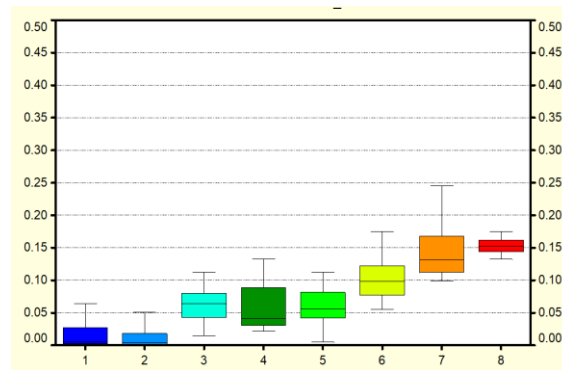
Table 1. Petrophysical log values for each of the determined facies

EFAC-IMAGE	DTCO	RHOB	NPHI	CGR	PHIE	WEIGHT	شماره
۵/۳۳	۸۳	۲/۶۴	۰/۴	۹۷	۰/۰۱	۱۷۸	رخساره-۱
۴/۷۷	۶۸	۲/۶۳	۰/۲۴	۷۰	۰/۰۱	۹۶	رخساره-۲
۵/۰۰	۷۷	۲/۳۶	۰/۲۲	۶۸	۰/۰۵	۲۳	رخساره-۳
۴/۷۶	۷۴	۲/۶۲	۰/۱۷	۳۴	۰/۰۵	۴۹	رخساره-۴
۳/۲۷	۶۲	۲/۴۳	۰/۱۰	۳۲	۰/۰۶	۱۵	رخساره-۵
۴/۱۸	۷۰	۲/۵۴	۰/۱۳	۲۲	۰/۱۱	۳۳	رخساره-۶
۴/۷۸	۷۸	۲/۴۴	۰/۱۹	۲۵	۰/۱۴	۶۸	رخساره-۷
۳/۴۳	۷۶	۲/۳۶	۰/۱۸	۱۶	۰/۱۵	۵۳	رخساره-۸

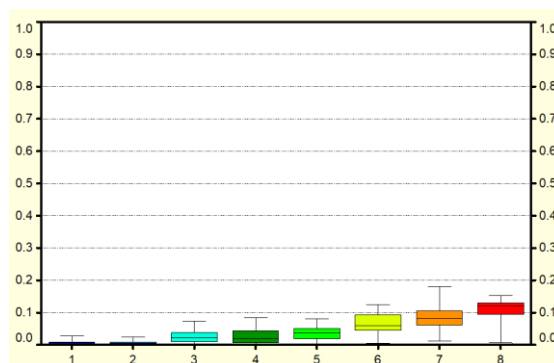


شکل ۷- رخساره‌های الکتریکی حاصل از نمودارهای پتروفیزیکی بدون استفاده از نمودار تصویرگر (ستون ۶) و رخساره‌های حاصل از ادغام نمودارهای پتروفیزیکی و نمودار تصویرگر (ستون ۷) در کنار ستون سنگ‌شناسی سازند گدوان (ستون ۵)

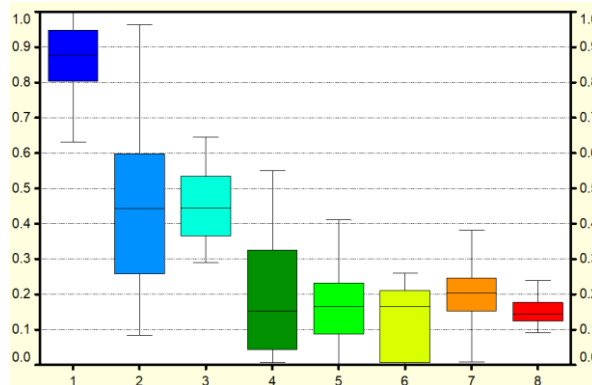
Fig. 7. Electrical facies obtained from petrophysical logs without using image log (column 6) and facies obtained by merging petrophysical logs and image log (column 7) next to the lithology column of Gadwan Formation (column 5)



شکل ۸- نمودار جعبه‌ای تخلخل موثر هر یک از رخساره‌ها



شکل ۹- نمودار جعبه‌ای حجم نفت هر یک از رخساره‌ها



شکل ۱۰- نمودار جعبه‌ای حجم شیل هر یک از رخساره‌ها

جدول ۲- میانگین خصوصیات پتروفیزیکی سازند گدوان به تفکیک زون‌های تعیین شده

Table 2. Average petrophysical properties of Gadwan Formation by the designated zones

Zone	Effective Porosity (PHIE)	Effective Water Saturation (SWE)	Oil Volume Fraction (UOIL)	Shale Volume Fraction (WCS)
GAD-1	۰/۰۱۹	۰/۸۶	۰/۰۰۷	۰/۶۸
GAD-2	۰/۰۹۸	۰/۷۹	۰/۰۲۰	۰/۳۱
GAD-2U	۰/۰۲۰	۰/۸۷	۰/۰۰۵	۰/۸۱
Khali Member	۰/۰۳۵	۰/۷۹	۰/۰۰۸	۰/۰۶
GAD-2I	۰/۰۴۰	۰/۷۳	۰/۰۱۸	۰/۶۲
GAD-3	۰/۱۴۰	۰/۳۳	۰/۰۹۰	۰/۱۷
GAD-4	۰/۰۳۴	۰/۷۵	۰/۰۱۷	۰/۶۴
GAD-5A	۰/۱۳۱	۰/۲۴	۰/۱۰۰	۰/۱۵
GAD-5B	۰/۰۹	۰/۵۳	۰/۰۴۷	۰/۵۳
GAD-5C	۰/۱۲۵	۰/۳۵	۰/۰۸۱	۰/۱۷
GAD-6	۰/۰۰۵	۰/۹۴	۰/۰۰۳	۰/۷۲
GAD-7	۰/۰۵۳	۰/۶۸	۰/۰۲۶	۰/۵۳

نتیجه‌گیری

در این مطالعه رخساره‌های الکتریکی سازند گدوان در یکی از چاه‌های واقع در میدین دشت آبادان با استفاده از روش MRGC تعیین شد. داده‌های ورودی به مدل عبارتند از: نمودار گاما، چگالی، نوترون، صوتی تراکمی، تخلخل موثر و رخساره‌های حاصل از نمودار تصویرگر. پس از اجرای مدل در چاه مورد مطالعه، هشت رخساره الکتریکی با ویژگی‌های زمین‌شناسی و مخزنی متفاوت در سازند گدوان مشخص شد. بر اساس تجزیه و تحلیل پارامترهای پتروفیزیکی محاسبه‌شده در هر یک از رخساره‌های الکتریکی، رخساره‌های شماره ۸ و ۷ به عنوان بهترین رخساره مخزنی با بیش‌ترین میزان تخلخل موثر و حجم هیدروکربن در نظر گرفته شدند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که روش MRGC می‌تواند به عنوان یک روش قابل اعتماد جهت پیش‌بینی رخساره‌های الکتریکی در سازندهای آواری مورد استفاده قرار گیرد. رخساره‌های الکتریکی براساس

داده‌های نمودار تصویرگر (FMI) و نمودارهای چاه‌پیمایی متداول مدلسازی شده و نتایج رضایت‌بخشی را در مقایسه با رخساره‌هایی که فقط از نمودارهای چاه‌پیمایی متداول به دست آمده بودند، ارائه می‌دهند. تفاوت کمی بین دو مدل وجود دارد، دلیل اصلی برای این موضوع تفاوت در ماهیت این داده‌ها است، نمودارهای چاه‌پیمایی متداول برای تشخیص سنگ‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حالی که نمودار تصویرگر اطلاعات بافتی را فراهم می‌کند و از قدرت تفکیک بالاتری نیز برخوردارند. با استفاده از این روش می‌توان در زمانی کوتاه اطلاعات زیادی را فقط با در نظر گرفتن نمودارهای پتروفیزیکی به دست آورد، اما همچنان از نقش و تاثیر سایر منابع اطلاعاتی همچون مغزه‌ها و سایر اطلاعات زمین‌شناسی در دقت مدلسازی نمی‌توان چشم‌پوشی کرد.

منابع

- رحیمی بهار، ع. الف. و پورصیامی، ح.، "تفکیک زون‌های مختلف مخزن هیدروکربنی با کمک رخساره‌های الکتریکی"، ماهنامه پژوهش نفت، ۲۲ (۱۳۹۱) ۱۴۴-۱۵۳
- رحیمی بهار، ع. ا.، پرهام، س.، "تجزیه و تحلیل رخساره‌های الکتریکی بر اساس رخساره‌های رسوبی"، دو فصلنامه رخساره‌های رسوبی، ۵ (۱۳۹۱) ۶۱-۷۴
- سپهری، ق.، زینلی، م.، "تعیین الکتروفاسیس‌های مخزن A در یکی از میداین نفتی ایران با استفاده از روش MRGC"، ماهنامه علمی اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۱۴۹ (۱۳۹۶) ۴۴-۴۸
- محمودی، س. ح.، موسوی حرمی، ر.، محبوبی، الف. و مهرگینی، ب.، "شناسایی و زون‌بندی رخساره‌های الکتریکی با استفاده از روش آنالیز خوشه‌ای چند متغیره در چاه نمک غربی ۱ منطقه بندرعباس"، اولین همایش ملی زمین‌شناسی ایران، دانشگاه آزاد شیراز، (1390)
- مطیعی، ه.، "زمین‌شناسی ایران؛ زمین‌شناسی نفت زاگرس"، چاپ نخست، سازمان زمین‌شناسی کشور، (۱۳۷۴) ۱۰۰۹
- معلمی، س. ع.، خوشبخت، ف.، نقدی، س.، "کاربرد روش‌های خوشه‌سازی (MRGC, AHC, DC, SOM) در تعیین تراوایی سنگ مخزن کربناته، سازند ایلام در جنوب‌غرب ایران"، ماهنامه زمین‌شناسی نفت ایران، ۵ (۱۳۹۴) ۶۲-۸۰
- هنرمند، ج.، "مطالعه یکپارچه افق‌های مخزنی دشت آبادان"، گزارش داخلی پژوهشگاه صنعت نفت، (۱۳۹۷) ۵۰۳
- Abdollahie Fard, I.A., Braathen, A., Mokhtari, M., Alavi, S.A., "Interaction of the Zagros Fold-Thrust Belt and the Arabian-type, deep-seated folds in the Abadan Plain and the Dezful Embayment, SW Iran", *Petroleum Geoscience*, 12 (2006) 347-362
- Alavi, M., "Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran", *American Journal of Science*, 307 (2007) 1064-1095
- Al-Fares, A.A., Bouman, M., Jeans, P., "A new look at the Middle to Lower Cretaceous stratigraphy", offshore Kuwait. *GeoArabia*, 3 (1998) 543-560
- Askari, A.A., Behrouz, T., "A fully integrated method for dynamic rock type characterization development in one of Iranian off-shore oil reservoir", *Journal of chemical and petroleum engineering* 45 (2011) 83-96
- Enayati-Bidgoli, A., Saemi, E., "Effects of late diagenesis on primary reservoir quality of a quartz arenite unit: a case study from the lower Cretaceous successions of SW Iran", *Petroleum Science*, 16 (2019) 267-284
- Galli, M.T., Berto, R., Buongiovanni, G., Pirrone, M., "Smart Processing and Analysis of Image Log Data: A Digital Approach for a Robust Facies Modelling in Heterogeneous Carbonate Reservoirs", In *SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition*, Abu Dhabi, UAE, (2019)
- Hollis, C., "Diagenetic controls on reservoir properties of carbonate successions within the Albian-Turonian of the Arabian Plate", *Petroleum Geoscience*, 17 (2011) 223-241
- Knecht, L., Mathis, B., Leduc, J., Vandenabeele, T., Cuia, R.D., "Electrofacies and Permeability Modeling in Carbonate Reservoirs using Image Texture Analysis and Clustering Tools", *Petrophysics*, 45 (2004) 27-37
- Moghaddas, H., Habibnia, B., Ghasemalaskari, M.K., Moallemi, S.A., "Lithofacies classification based on multiresolution graph-based clustering using image log in South Pars gas field", In *SEG International Exposition and Annual Meeting*, Houston, Texas, (2017) 3037-3041

- Nairn, A.E.M., Alsharhan, A.S., "Sedimentary basins and petroleum geology of the Middle East", Elsevier, (1997) 1-878
- Pabakhsh, M., Ahmadi, K., Riahi, M. A., Shahri, A.A., "Prediction of PEF and LITH logs using MRGC approach", Life Science Journal, 9 (2012) 974-982
- Rabiller, P., "Facies prediction and data modeling for reservoir characterization", 1th Ed., Rabiller Geo-consulting, (2005)
- Serra, O. T., H. T. Abbott., "The contribution of logging data to sedimentology and stratigraphy", Society of Petroleum Engineers Journal 22 (1982) 117-131
- Sharland P.R., Archer, R., Casey, D.M., Davies, R.B., Hall, S.H., Heyward, A.P., Horbury, A.D., Simmons, M.D., "Arabian plate sequence stratigraphy", GeoArabia, Special Publication 2, Gulf Petrolink, Bahrain, (2001) 371
- Tian, Y., Xu, H., Zhang, X.Y., Wang, H.J., Guo, T.C., Zhang, L.J., Gong, X.L., "Multi-resolution graph-based clustering analysis for lithofacies identification from well log data: Case study of intraplatform bank gas fields, Amu Darya Basin", Amu Darya Basin, Applied Geophysics, 13 (2016) 598-607
- Wells, M., Brown, R., Bowman, A., Kitching, D., Finucane, D., Kostic, B., "Early Cretaceous Deltaic Deposits of the Zubair Formation, SE Iraq: Depositional Controls on Reservoir Performance", In Third EAGE Workshop on Iraq: European Association of Geoscientists and Engineers, (2015) 1-2
- Ye, S.J., Rabiller, P., Keskes, N., "Automatic high resolution texture analysis on borehole imagery", In SPWLA 39th Annual Logging Symposium, Keystone, Colorado, (1998) 14-27
- Ye, S.J., Rabiller, P., "A new tool for electro-facies analysis: multi-resolution graph-based clustering", SPWLA 41st annual logging symposium. Dallas, Texas, (2000)
- Zeinalzadeh A., Moussavi-Harami R., Mahboubi A., Sajjadian V.A., "Basin and petroleum system modeling of the Cretaceous and Jurassic source rocks of the gas and oil reservoirs in Darquain field southwest Iran", Journal of Natural Gas Science and Engineering, 26 (2015) 419-426