



Imam Khomeini International University

Vol. 7, No. 2, Summer 2022



نشریه مهندسی منابع معدنی

Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Comparison of Core Water Saturation with Electric Models in Kangan and Dalan Formations in the Central Part of the Persian Gulf

Gholami R.¹, Tavakoli V.^{2*}

1- M.Sc, Dept. of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Dept. of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 29 Sep. 2020

Accepted: 09 Jun. 2021

Abstract: Reliable and accurate determination of water saturation above the oil-water contact of the hydrocarbon-bearing formations is essential for calculating hydrocarbon in place. In this study, water saturations were measured directly from 160 core samples by Dean-stark test in one well and thin sections have been used to identify geological properties. Archie coefficients were also determined on plug samples. The water saturation values obtained from the electrical models including Archie, Waxman-Smith, and dual water were measured in Geolog7 software and applied in Kangan and Dalan formations in one of the fields in the Central Persian Gulf. In this study, four methods have been used to determine the rock types, including Winland, reservoir quality index, pore type, and depositional texture to identify the parameters affecting the distribution of water saturation. Results showed that pore throat radius is a parameter that affects water saturation and this parameter is directly related to the increased permeability and reduction of the difference between the water saturation values of Archie with the Dean-stark test. Determination of rock types based on depositional texture and pore type revealed that the cement type and texture and the pore types, control the permeability and distribution of water saturation in the reservoir. It was also found that depositional texture, unlike pore throat radius, well separates sedimentary environments. The results of water saturation calculations showed that if the Archie coefficients are calculated in each flow unit, the water saturation resulting from it would be very close to the water saturation values in the core (Dean-Stark). The electrical model of water saturation, with different coefficients in samples with different reservoir quality index or pore types, yields the most accurate water saturation values compared to Dean-Stark.

Keywords: Dean-Stark, Electrical Model, Rock types, Reservoir quality index, Kangan and Dalan Formations.

How to cite this article

Gholami, R., and Tavakoli, V. (2022). "Comparison of core water saturation with electric models in Kangan and Dalan formations in the central part of the Persian Gulf". Journal of Mineral Resources Engineering, 7(2): 47-66.

DOI: [10.30479/JMRE.2021.14244.1450](https://doi.org/10.30479/JMRE.2021.14244.1450)

*Corresponding Author Email: vtavakoli@ut.ac.ir

COPYRIGHTS



©2022 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

INTRODUCTION

Calculating water saturation is one of the most important steps for determining the volume of oil and gas in place. Accurate calculation of this parameter in carbonate reservoirs due to their heterogeneity has always been one of the main challenges in the oil industry. Distribution of petrophysical properties in these reservoirs is diverse due to facies changes as well as diagenetic processes[1]. Kangan and Dalan carbonate-evaporative formations are the most important gas formations in Iran, which have a very high heterogeneity. One of the most common relationships for calculating water saturation is Archie equation [2]. Categorization of carbonate rocks based on hydraulic flow units, petrophysical flow units, depositional textures and pore types leads to increased accuracy of these parameters and water saturation calculations [3]. Therefore, identification of geological parameters (depositional texture, lithology, pore type, pore throat radius and cement type) and petrophysical characteristics (porosity and permeability) affecting the reservoir heterogeneity, is very important. Also, increasing the accuracy of Archie coefficients and water saturation through providing the best classification scheme of carbonate rocks, are essential for calculating hydrocarbon in place. The diversity of the presented parameters suggests that the effect of these parameters on water saturation accuracy in the studied reservoirs should be compared with the actual data obtained from the core tests. Direct measurements of water saturation of the core by the Dean-stark experiment is one of the common methods in the industry for calculating water saturation [4]. The purpose of this study is to identify the reservoir parameters affecting water saturation to calculate in situ hydrocarbons, based on rock types and flow units. Another goal of this study is to provide the best rock type and reservoir unit to calculate the optimal water saturation and accurately determine the Archie parameters.

MATERIALS AND METHODS

The available data are from 1 exploratory well and include 270 meters of cores, 270 meters of electrical resistivity logs and 1308 thin sections. After determining Archie's coefficients, water saturation was calculated based on Archie's equation (equation1).

$$S_w = [(aR_w) / (\phi^m R_t)](1/n) \quad (1)$$

This equation determines the S_w based on the porosity (ϕ), resistivity of the formation (R_t), formation water resistivity (R_w), cementation (m) and saturation exponents(n).

In this study, a total of 1252 porosity and permeability tests were performed on plug samples. Dean-Stark extraction method was used to determine core water saturation. Then, to identify the petrophysical and geological parameters effective in the average water saturation difference, rock types were determined based on Winland, reservoir quality index, pore type and depositional texture methods.

Pore type

In this study, pore types have been classified based on Choquette and Pray classification scheme [5]. Petrographical analysis indicate that 7 pore types, including fracture, interparticle, intraparticle, moldic, fenestral, vuggy and intercrystalline, are present in Kangan and Dalan formations.

Depositional texture

Depositional textures have been arranged based on Dunham classification [6] system. Determination of rock types based on sedimentary textures shows the existence of 5 rock types including mudstone, wackestone, packstone, grainstone and boundstone for Kangan and Dalan formations.

Water saturation

To determine the values of cementation exponents and to determine the relationship between porosity and formation resistivity factor, the laboratory measured porosity (helium porosity test) and the electrical resistance of the saturated sample on clean plug have been used. Then, from the plot of the formation resistivity factor against porosity, the amount of cementation exponents in the whole well and then in each rock type was calculated (Figure 1A, Figure 1B). To determine the values of saturation exponents and the relationship between the formation resistivity index and water saturation, the amount of formation

resistivity in different saturations was measured in the laboratory on clean plugs. Then, from the plot of the formation resistivity index against water saturation, the amount of saturation exponents in the whole well and then in each rock types was calculated (Figure 1C, Figure 1D).

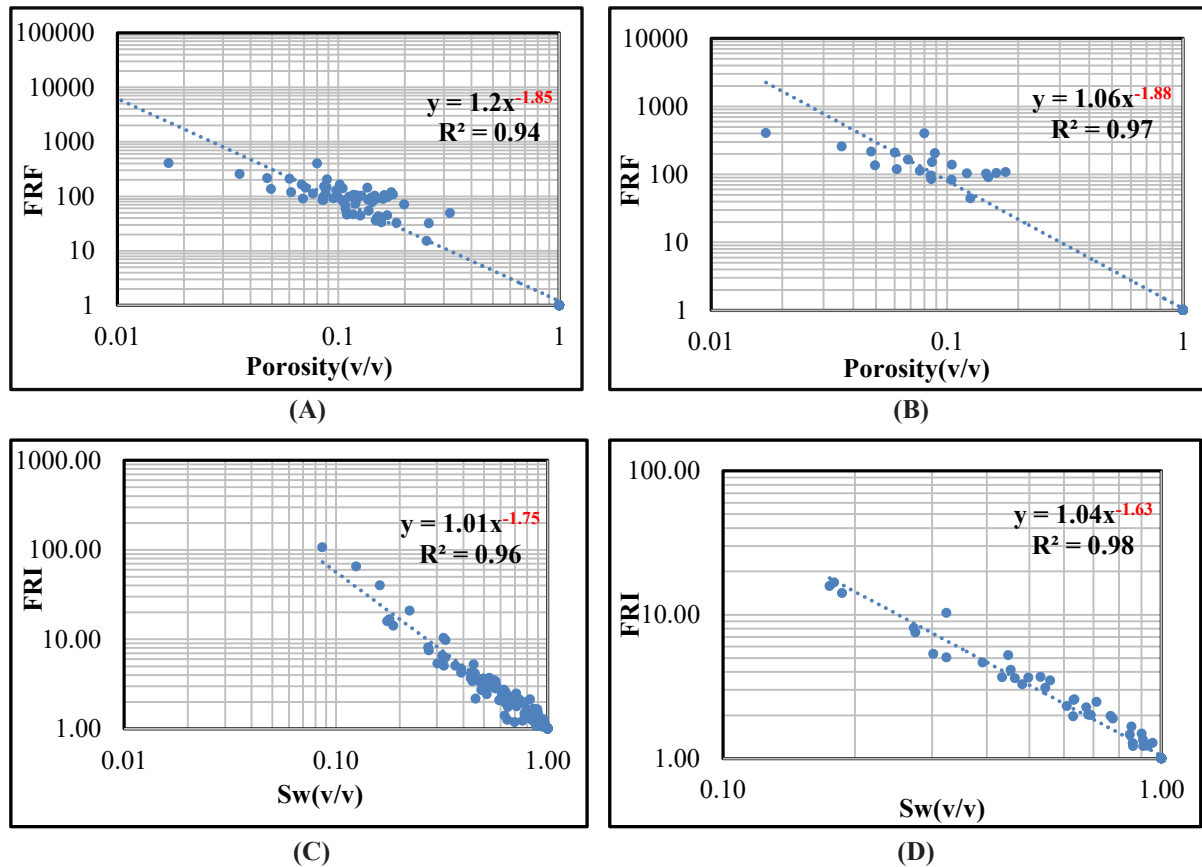


Figure 1. An example of log–log cross plot of porosity versus FRF for specified Winland method; **A:** Winland method (pore throat radius of 2-5 microns) **B:** Winland method in the whole well, An example of log–log cross plot of water saturation versus FRI for specified Winland method, **C:** Winland method (pore throat radius of 2-5 microns), **D:** Winland method in the whole well. R2, a and m are obvious

RESULTS AND DISCUSSION

Comparison of water saturation of the electrical models with the Dean-Stark between different rock types

To determine the best rock types for calculating the correct water saturation in the reservoir, the values of water saturation in different rock types including Winland, reservoir quality index, depositional texture and pore type were calculated. The lowest average water saturation difference between the Dean-stark method and the electrical model shows the best rock typing method in calculating water saturation and determining Archie’s coefficients. The results showed that determining the rock types based on the reservoir quality index and pore typing yields the lowest difference between Dean-Stark water saturation and electrical models, while determining the rock types based on depositional texture and Winland method will have higher water saturation difference between the two methods (Figure 2).

CONCLUSIONS

The results of this study indicate that in carbonate reservoirs, the water saturation values of the Dean-Stark test are different from Archie method and other electrical models. To determine the geological and petrophysical parameters affecting the water saturation distribution in carbonate reservoirs, a comparison

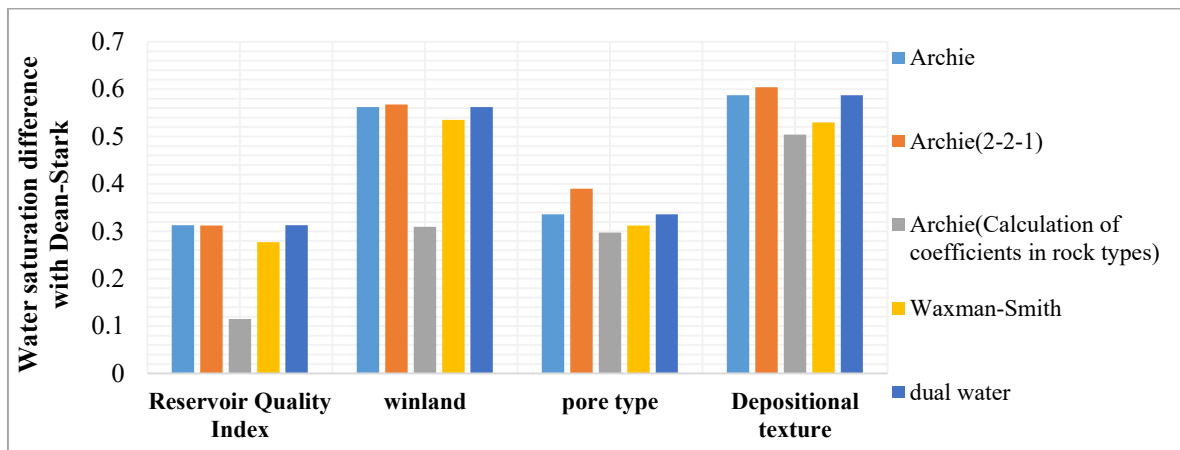


Figure 2. Water saturation difference from Dean-Stark experiment with Archie model with laboratory coefficients and Archie model with constant coefficients (2,2,1) and Waxman-Smith and dual water model and Archie method (calculation of coefficients in rock types) in different rock types

of the average water saturation difference of the electrical models was performed with the Dean-Stark tests. The results of water saturation in rock types showed that pore throat radius is a parameter that is the product of geological processes and affects water saturation and petrophysical properties of rocks. This parameter is directly related to the increased permeability and reduction of the difference between the water saturation values of Archie with the Dean-stark tests. Regarding the determination of rock types based on depositional textures and pore type, it was found that the cement types, sediment textures and pore type that is affected by diagenetic processes and sedimentary environment (facies) control the permeability and distribution of water saturation in the reservoir. The results showed that changes in water saturation in Kangan and Dalan formations have been affected by sedimentation and diagenetic processes. Comparing the water saturation of electrical models with Dean-Stark test, it was found that if the rock type is determined and the Archie coefficients are calculated in each flow unit, the resulting water saturation is very close to the core water saturation values (Dean-Stark). Also, a comparison between different rock types showed that the electrical model of water saturation, whose coefficients are measured in rock types based on the reservoir quality index method and pore type, is the best response is obtained from water saturation values compared to Dean-Stark. The average difference of water saturation between electrical models and Dean-Stark in the reservoir quality index method is 27%, which is 24% and 29% less than the Winland method and depositional texture, respectively. The values of the average difference of water saturation between electrical models and Dean-Stark in the pore type method are 33%, which is 18% and 23% less than the Winland method and depositional texture, respectively. These results show that in order to select the sample to determine the coefficients of Archie, these two methods of determining rock types in these formations are appropriate. Therefore, considering the necessity of determining rock types and also the very high ability of these two rock types in calculating water saturation and therefore accurately calculating the amount of hydrocarbons in reservoirs, the use of rock species determination by reservoir quality index and pore type is the best way to achieve accurate and reliable results is water saturation. Therefore, using these methods for other wells in this field, can also be a good idea for more accurate analysis and estimation of water saturation of nearby wells.

REFERENCES

- [1] Rustichelli, A., Tondi, E., Agosta, F., Di Celma, C., and Giorgioni, M. (2013). "Sedimentologic and diagenetic controls on pore-network characteristics of Oligocene–Miocene ramp carbonates (Majella Mountain, central Italy) Sedimentologic and Diagenetic Controls on Pore-Network Characteristics". *American Association of Petroleum Geologists*, 97(3): 487-524.
- [2] Archie, G. E. (1942). "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics". *Transactions*

of AIME, 146(01): 54-62.

- [3] Mazzullo, S. J., and Chilingarian, G. V. (1992). "*Diagenesis and origin of porosity*". *Developments in Petroleum Science*, 30(C): 199-270.
- [4] Hammadi, M. A., Al-Maskari, S., and El-Sayed, R. (2008). "*Improving oil in place estimation through an improve water saturation prediction - A case study in the middle east*". *Society of Petroleum Engineers*, 13th Abu Dhabi Int. Pet. Exhib. Conf. ADIPEC 2008, 3: 1369-1374.
- [5] Choquette, P. W., and Pray, L. C. (1970). "*Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates*". *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 54(2): 207-250.
- [6] Dunham, R. J. (1962): "*Classification of carbonate rocks according to depositional textures*". *American Association of Petroleum Geologists*, 12(2): 1-13.



مقایسه اشباع آب مغزه با مدل‌های الکتریکی در سازندهای کنگان و دالان بخش مرکزی خلیج فارس

رضا غلامی^۱، وحید توکلی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران

۲- دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۹

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۸

چکیده

محاسبه قابل اطمینان و صحیح اشباع آب در بالای مرز آب-نفت سازند برای محاسبه هیدروکربن درجا امری ضروری است. در این مطالعه در یک چاه، اشباع آب به طور مستقیم به وسیله آزمایش دین‌استارک بر روی ۱۶۰ نمونه مغزه اندازه‌گیری و از مقاطع نازک، برای شناخت شاخص‌های زمین‌شناسی استفاده شده است، سپس ضرایب آرچی بر روی نمونه‌های پلاگ تعیین شد. مقادیر اشباع آب حاصل از مدل‌های الکتریکی آرچی، واکسمن-اسمیت و آب دوگانه در نرم‌افزار Geolog7 اندازه‌گیری و در سازندهای کنگان و دالان در یکی از میادین بخش مرکزی خلیج فارس اعمال شد. در این پژوهش از چهار روش تعیین گونه سنگی شامل وینلند، شاخص کیفیت مخرنی، نوع تخلخل و بافت رسوبی برای شناخت پارامترهای موثر بر توزیع اشباع آب استفاده شده است. نتایج نشان داد که شعاع گلوگاه حفرات پارامتری است که روی اشباع آب تاثیرگذار است و این پارامتر رابطه مستقیمی با افزایش تراوایی و کاهش اختلاف اشباع آب آرچی از آزمایش دین‌استارک دارد. تعیین گونه سنگی بر روش بافت رسوبی و نوع تخلخل مشخص کرد که نوع سیمان، بافت و نوع تخلخل نیز، کنترل‌کننده تراوایی و توزیع اشباع آب در مخزن است. همچنین مشخص شد که بافت رسوبی، برخلاف شعاع گلوگاه حفرات به خوبی محیط‌های رسوبی را از هم تفکیک می‌کند. نتایج اشباع آب نشان داد که اگر ضرایب آرچی در هر واحد جریان محاسبه شود، اشباع آب حاصل از آن بسیار به مقادیر اشباع آب مغزه (دین‌استارک) نزدیک می‌شود. همچنین مشخص شد مدل الکتریکی اشباع آبی که ضرایب آن در گونه‌های سنگی بر اساس روش شاخص کیفیت مخرنی و نوع تخلخل انجام گیرد، به بهترین پاسخ در مقادیر اشباع آب با دین‌استارک منجر می‌شود.

کلمات کلیدی

دین‌استارک، مدل الکتریکی، گونه‌های سنگی، شاخص کیفیت مخرنی، سازندهای کنگان و دالان.

استناد به این مقاله

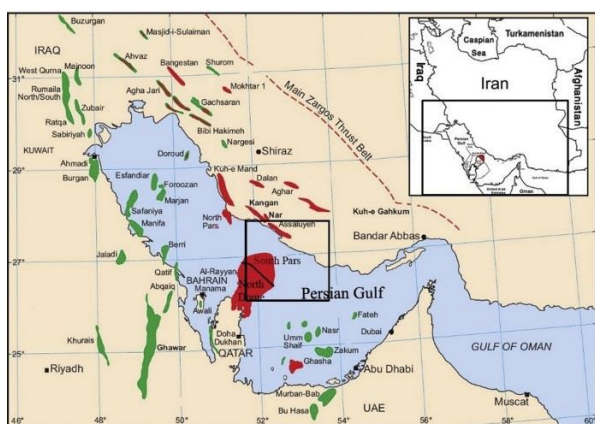
غلامی، ر.، توکلی، ف.؛ ۱۴۰۱؛ "مقایسه اشباع آب مغزه با مدل‌های الکتریکی در سازندهای کنگان و دالان بخش مرکزی خلیج فارس". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هفتم، شماره ۲، ص ۶۶-۴۷.

DOI: 10.30479/JMRE.2021.14244.1450



۱- مقدمه

برای محاسبه اشباع آب سازند است [۱۵]. صحت این روش در برخی موارد به دلیل هجوم گل به مغزه و تاثیر ترشوندگی بر روی مغزه و عدم محاسبه آب ساختاری رس‌ها مورد تردید بوده است [۱۶]، اما مطالعات گذشته نشان دادند که با مقایسه اشباع آب در بخش داخلی و خارجی مغزه هیچ جابه‌جایی آبی به وسیله فیلترای گل تا سطح ۵۰٪ اشباع آب صورت نمی‌گیرد و اشباع آب این مغزه‌ها که تصحیحات محیطی بر روی آن‌ها انجام شود، دقت بالایی دارند [۱۷، ۱۸]. این مطالعه بر روی سازندهای کنگان و دالان در یکی از میداین هیدروکربنی ایران انجام شده و به علت محرمانه بودن داده‌ها، چاه تحت عنوان چاه شماره ۱ مورد بحث قرار گرفته است. مطالعات گسترده‌ای بر روی توالی پرمین-تریاس بالایی در خلیج فارس انجام شده است [۲۴-۱۹]. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی میدان مورد مطالعه در محل چاه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. هدف از این مطالعه شناسایی پارامترهای مخزنی موثر بر اشباع آب برای محاسبه هیدروکربن در چاه مورد مطالعه در مقیاس‌های میکروسکوپی و میدانی بر اساس گونه‌های سنگی و واحدهای جریانی است. از اهداف دیگر این مطالعه ارایه بهترین گونه سنگی و واحد مخزنی، برای محاسبه اشباع آب بهینه و تعیین دقیق پارامترهای آرچی است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوزه مرکزی خلیج فارس (منطقه مورد مطالعه) [۲۵]

۲- مواد و روش‌ها

داده‌های موجود از ۱ چاه اکتشافی و شامل ۲۷۰ متر مغزه، ۲۷۰ متر لاگ‌های مقاومت الکتریکی و ۱۳۰۸ مقطع نازک است.

تعیین دقیق اشباع آب مخزن یکی از مهم‌ترین پارامترها، در ارزیابی‌های پتروفیزیکی برای تعیین حجم نفت و گاز درجا است. محاسبه دقیق این پارامتر در مخازن کربناته به علت ناهمگنی آن همواره یکی از چالش‌های اساسی در صنعت نفت بوده است. توزیع ویژگی‌های پتروفیزیکی در این مخازن به دلیل تغییرات رخساره‌ای و همچنین فرآیندهای دیاژنزی متنوع و پیچیده است [۲۰]. سازندهای کربناته-تبخیری کنگان و دالان مهم‌ترین سازندهای هیدروکربنی ایران هستند که ناهمگنی بسیار بالایی دارند. کیفیت مخزنی اینگونه مخازن به وسیله پارامترهای مختلفی مانند رخساره و دیاژنز کنترل می‌شود [۴، ۳]. از رایج‌ترین رابطه‌ها برای محاسبه اشباع‌شدگی آب به صورت غیرمستقیم، رابطه آرچی است [۵]. دقت اشباع آب به دست آمده از معادله آرچی به دقت پارامترهای ورودی و ضرایب آن بستگی دارد [۶]. پارامترهای آرچی نسبت به ترشوندگی و توزیع فضای خالی و رخساره حساس‌اند [۹-۷]. اندازه‌گیری صحیح مقادیر توان اشباع^۱، توان سیمانی شدن^۲ و ضریب پیچاپیچی^۳ که تحت تاثیر ترشوندگی و هندسه منافذند، روی اشباع آب بسیار تاثیر دارند [۱۰]. از آنجا که ارتباط ساده‌ای بین تخلخل، تراوایی و مقاومت ویژه الکتریکی در سنگ‌های مخازن کربناته ناهمگن وجود ندارد از این رو برای محاسبه ضرایب آرچی نیاز به تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی است [۱۱]. مطالعات گذشته نشان دادند که دسته‌بندی سنگ‌های کربناته بر اساس واحدهای جریان هیدرولیکی، واحدهای جریان پتروفیزیکی، بافت رسوبی^۴ و نوع تخلخل^۵ به افزایش دقت پارامترهای آرچی و اشباع آب حاصل از آنها منجر می‌شوند [۱۲، ۱۳]. تغییرات نوع تخلخل و بافت رسوبی در کربناته‌ها سبب ناهمگنی مخزنی و همچنین ناهمگنی در توزیع اشباع آب مخازن شده است [۱۴]. بنابراین شناسایی پارامترهای زمین‌شناسی (بافت رسوبی، جنس سنگ، نوع تخلخل، شعاع گلوگاه حفرات^۶ و نوع سیمان) و پتروفیزیکی (تخلخل و تراوایی) موثر بر کاهش ناهمگنی مخزن و افزایش دقت ضرایب آرچی و اشباع آب، برای ارایه بهترین دسته‌بندی سنگ‌های کربناته برای محاسبه دقیق هیدروکربن درجا ضروری است. تنوع پارامترهای ارایه شده بیانگر این مطلب است که تاثیر این پارامترها بر دقت اشباع آب در مخازن مورد مطالعه باید با داده‌های واقعی حاصل از آزمایش مغزه تطابق داده شوند. اندازه‌گیری مستقیم اشباع آب مغزه با آزمایش دین‌استارک^۷، از روش‌های معمول در صنعت

اشباع آب در مقابل شاخص مقاومت سازند و محاسبه شیب بهترین خط برازش از آنها به دست آمد. پس از آن اشباع آب طبق معادله آرچی محاسبه شد (رابطه ۳). محاسبه اشباع آب در سایر مدل های الکتریکی غیرشیلی پارامترهای بیشتری دارد که اساس همه آنها معادله آرچی است.

$$S_w = [(aR_w) / (\phi^m R_d)] (1/n) \quad (3)$$

که در آن:

Sw : اشباع آب (درصد)

a : ضریب پیچاپیچی

m : توان سیمانی شدن

n : توان اشباع است.

در مجموع ۱۲۵۲ اندازه گیری تخلخل و تراوایی بر روی نمونه های پلاگ برای مطالعه این پژوهش، انجام شد که از این تعداد اندازه گیری، ۶۲۹ مورد مربوط به سازند کنگان و ۶۲۳ مورد آن متعلق به سازند دالان است. نتایج اندازه گیری حاصل از آزمایش تخلخل مغزه پس از تصحیح فشار روباره با مقادیر تخلخل به دست آمده از لاگ نوترون کالیبره شد. در این مطالعه از روش استخراج دین استارک [۲۶] برای تعیین اشباع آب ۱۶۰ نمونه از مغزه استفاده شد. در این روش پس از آنکه پلاگ های تازه از قسمت مرکزی مغزه گرفته شدند، به سرعت درون دستگاه دین استارک قرار گرفته و پس از جوشاندن حلال (تولوئن) تا دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد در معرض استخراج مایعات قرار گرفتند. در بخش کاندانسور آب چگالش شده در ظرف مدرج کالیبره شده، جمع آوری شد. در این مرحله نمک های باقی مانده در منافذ پس از استخراج دین استارک با حجم معینی از آب مقطر شسته شدند که پس از آن، مقاومت غلظت کلرید در آب سازند تعیین شد. استخراج کلروفرم-متانول برای حذف نمک های باقی مانده درون فضای خالی انجام شد. پس از آن برای شناخت پارامترهای پتروفیزیکی و زمین شناختی موثر در اختلاف متوسط اشباع آب، تعیین گونه های سنگی بر اساس روش های وینلند^۱، شاخص کیفیت مخرنی^{۱۱}، نوع تخلخل و بافت رسوبی انجام شد. در این مطالعه از نرم افزار Excel و Geolog7 برای محاسبات، تحلیل و رسم شکل ها استفاده شده است.

۱-۲- تعیین واحدهای جریان پتروفیزیکی به روش وینلند

روش متداولی که برای ارزیابی کیفیت مخازن بر اساس اندازه گلوگاه تخلخل استفاده می شود، روش وینلند (R35)

از این تعداد، ۶۷۵ مقطع نازک از سازند کنگان و ۶۳۳ مقطع نازک دیگر آن از سازند دالان در راستای مطالعه این پژوهش، تهیه شده است. برای تشخیص کلسیت از دولومیت، یک سوم از هر مقطع نازک به وسیله آلیزارین قرمز-اس رنگ آمیزی شد. نیمی از نمونه ها با اپوکسی آبی رنگ آغشته شدند تا انواع منافذ و اندازه آنها مشخص شود. مقاطع نازک تهیه شده از مغزه ها به عنوان بخشی از اطلاعات واقعی مخزن برای تعیین سنگ شناسی غالب، نوع سیمان و همچنین شناخت رخساره ها برای تعیین محیط رسوبی هر گونه سنگی استفاده شده است. ویژگی های نمونه ها بر حسب درصد، با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان و مقایسه با نمودارهای استاندارد و درصد های فراوانی بیشتر از ۵ درصد در هر گونه سنگی به عنوان مقدار غالب سنگ شناسی و محیط رسوبی و بر اساس ترتیب فراوانی هر یک از آنها، ثبت شدند. در مجموع ۵۸ نمونه پلاگ برای آزمایش فاکتور مقاومت سازند^۱ و ۲۳ نمونه پلاگ برای آزمایش شاخص مقاومت سازند^۱ برای تعیین توان سیمان شدگی و توان اشباع مورد آزمایش قرار گرفتند. مقاومت الکتریکی آب از آزمایش آب سازندی اندازه گیری شد.

فاکتور مقاومت سازند (FRF) از تقسیم مقاومت نمونه اشباع از آب سازند (Ro) به مقاومت آب سازند (RW) به دست می آید (رابطه ۱). همچنین، شاخص مقاومت ویژه سازند (FRI) حاصل تقسیم مقاومت نمونه اشباع از آب سازند (Ro) به مقاومت واقعی سازند (Rt) است (رابطه ۲).

$$FRF = \frac{R_o}{R_w} = \frac{a}{\phi^m} \quad (1)$$

$$FRI = \frac{R_o}{R_t} = \frac{1}{S_w^n} \quad (2)$$

که در این روابط:

R_o : مقاومت الکتریکی نمونه اشباع از آب سازند (Ω.m)

R_w : مقاومت الکتریکی آب سازند (Ω.m)

R_t : مقاومت الکتریکی سازند (Ω.m)

a : ضریب پیچاپیچی

m : توان سیمانی شدن

n : توان اشباع

φ : تخلخل (درصد) است.

پس از اندازه گیری های الکتریکی، مقادیر توان سیمان شدگی و توان اشباع از رسم نمودار لگاریتمی-لگاریتمی تخلخل در مقابل فاکتور مقاومت سازند و نمودار لگاریتمی-لگاریتمی

سپس شاخص کیفیت مخزن (RQI) شاخص منطقه جریان^{۱۷} و تخلخل نرمالیزه شده (ØZ)^{۱۸} را به صورت رابطه‌های ۵، ۶ و ۷ تعریف کرد [۲۸].

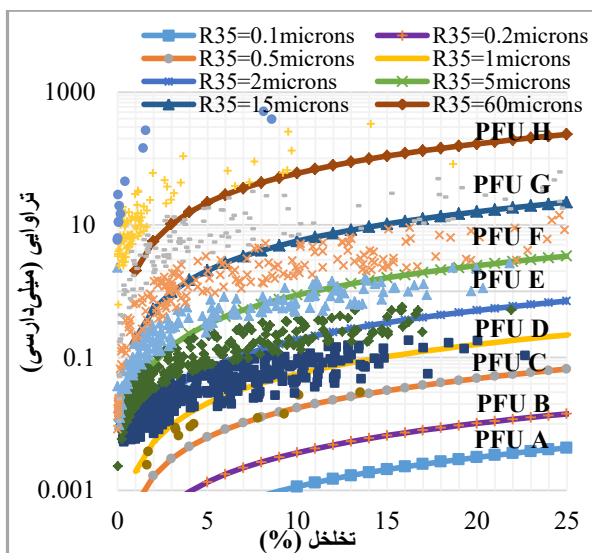
$$RQI = 0.0314 K/\emptyset \quad (۵)$$

$$FZI = \frac{RQI}{\emptyset Z} \quad (۶)$$

$$\emptyset Z = \frac{\emptyset e}{1-\emptyset e} \quad (۷)$$

که در آن‌ها:

RQI : شاخص کیفیت مخزن (µm)



شکل ۲: نمودار تخلخل در مقابل تراوایی و تعیین گونه‌های سنگی به روش وینلند بر اساس شعاع گلوگاه در ۳۵٪ اشباع جیوه

است. این روش تخلخل، تراوایی و شعاع گلوگاه تخلخل در ۳۵ درصد اشباع فاز غیرترکونده (جیوه) را به هم مرتبط می‌کند. معادله وینلند به صورت زیر تعریف شده است (رابطه ۴) [۲۷].

$$\text{Log}(R35) = 0.732 + 0.588 \log(K) - 0.864 \log(\emptyset) \quad (۴)$$

که در آن:

K : تراوایی هوای تصحیح نشده (میلی داریسی)

Ø : تخلخل (درصد)

R35 : شعاع گلوگاه تخلخل در ۳۵٪ اشباع جیوه از آزمون

فشار موئینه تزریق جیوه^{۱۲} (میکرون) است.

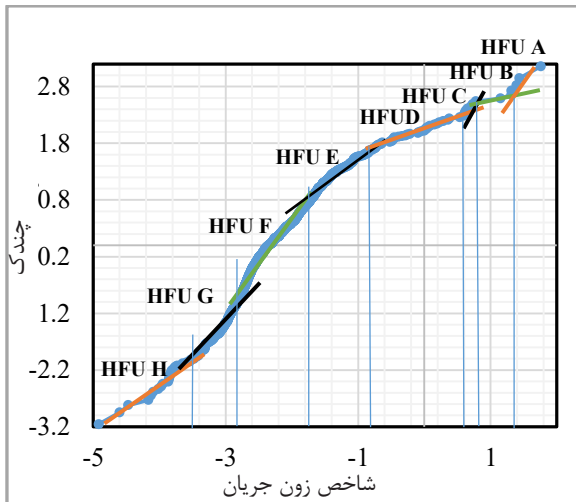
اندازه شعاع گلوگاه منافذ تحت تاثیر نوع منافذی است که حاصل فرآیندهای زمین‌شناسی‌اند. پس از تعیین واحد جریان پتروفیزیکی به روش وینلند از بررسی مقاطع نازک مرتبط با هر واحد جریان، سنگ‌شناسی غالب و محیط رسوبی غالب، در هر واحد جریان پتروفیزیکی (PFU) تعیین شدند. داده‌های تخلخل مغزه پس از کالیبره کردن با داده‌های لاگ نوترون به همراه مقادیر تراوایی در هر واحد جریان ارائه شدند. در این مطالعه بر اساس شعاع گلوگاه، ۸ واحد جریان پتروفیزیکی تعریف شد که توزیع تخلخل در برابر تراوایی آنها در شکل ۲ نشان داده و ویژگی‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی هر یک از آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۲- تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی به روش شاخص کیفیت مخزنی

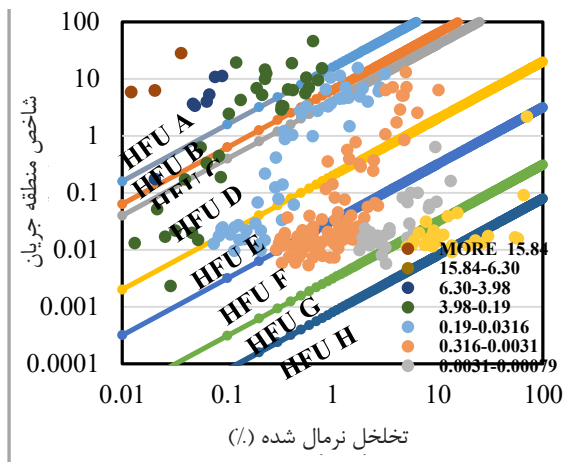
آمیفول^{۱۴} و همکاران با اضافه کردن مفهوم شاخص منطقه‌ای جریان معادله کوزنی^{۱۵} و کارمن^{۱۶} را تغییر داده و

جدول ۱: ویژگی‌های رسوبی و پتروفیزیکی واحدهای جریان پتروفیزیکی تعریف شده بر اساس روش وینلند در چاه مورد مطالعه

شعاع گلوگاه در ۳۵٪ اشباع جیوه	سنگ‌شناسی غالب	محیط رسوبی غالب	اندازه شعاع گلوگاه	Φ _m %	K _m mD	PFU
(۰٫۱-۰٫۲)	آهک، دولوستون	سد، لاگون	Microport	۵٫۶۶	۰٫۰۱	A
(۰٫۲-۰٫۵)	آهک	سد	Microport	۵٫۰۰	۰٫۰۴	B
(۰٫۵-۱)	دولوستون، آهک	سد	Mesoport	۴٫۶۷	۰٫۱۱	C
(۱-۲)	دولوستون، آهک	سد، لاگون، جزر و مدی	Mesoport	۵٫۶۹	۰٫۴۳	D
(۲-۵)	دولوستون، آهک	سد، لاگون، جزر و مدی	Macroport	۷٫۹۵	۲٫۴۸	E
(۵-۱۵)	دولوستون	سد-لاگون	Macroport	۷٫۸۵	۱۱٫۹۰	F
(۱۵-۶۰)	آهنگ، دولوستون، انیدریت	لاگون، جزر و مدی	Megaport	۲٫۵۲	۲۸٫۶۳	G
>۶۰	دولوستون، انیدریت	لاگون، سابخا، جزر و مدی	Megaport	۱٫۷۲	۱۲۰٫۴۱	H



شکل ۳: نمودار احتمال نرمال برای مقادیر لگاریتمی شاخص منطقه جریان و هشت نوع واحد هیدرولیک جریان در چاه های مورد مطالعه



شکل ۴: نمودار لگاریتمی شاخص کیفیت مخزنی در مقابل تخلخل نرمالیزه شده برای هشت واحد جریان هیدرولیکی

جدول ۲: ویژگی های رسوبی و پتروفیزیکی انواع گونه های سنگی بر اساس شاخص کیفیت مخزنی در چاه مورد مطالعه

سنگ شناسی غالب	محیط رسوبی غالب	تخلخل (%)	تراوایی (mD)	RQI (μm)	ϕ_z	FZI (μm)	HFU
دولوستون، آهک	لاگون، جزر و مدی، سد	۰.۰۱	۸,۱۱	۰,۴۶	۰,۰۲	۳,۰۰۷	A
دولوستون	سد	۰.۰۰	۰,۰۲	۰,۰۶	۰,۰۰	۱۴,۱۹	B
انیدریت، آهک، دولوستون	سد	۰.۰۵	۵,۴۷	۰,۲۸	۰,۰۶	۴,۷۵	C
انیدریت، آهک، دولوستون	سابخا، جزر و مدی	۰.۰۴	۲۱,۱۴	۰,۱۴	۰,۲۰	۰,۹۹	D
دولوستون، آهک	سد، لagoon، جزر و مدی	۶,۵۳	۳۴,۸۶	۰,۰۷	۱,۰۸	۰,۰۷	E
دولوستون، آهک	سد، لagoon	۷,۰۴	۲,۲۸	۰,۰۲	۱,۵۲	۰,۰۱	F
آهک	سد، لagoon	۴,۶۹	۰,۰۸	۰,۰۱	۲,۲۶	۰,۰۰	G
آهک، دولوستون	سد	۲,۰۲	۰,۷۸	۰,۰۱	۳۶,۵۴	۰,۰۰	H

K : تراوایی (mD)

ϕ_e : تخلخل موثر

ϕ_z : تخلخل نرمالیزه شده

FZI : شاخص زون جریان (μm) است.

برای تعیین تعداد واحدهای جریانی از روش های مختلفی مانند آنالیز هیستوگرام، احتمال نرمال، مجموع مربعات خطاها (SSE)، روش وینلند R35، نمودار SMLP، نمودار RQI و روش DRT استفاده می شود. در مطالعات پیشین دقت نمودار احتمال نرمال لگاریتم شاخص زون جریان در تعیین تعداد گونه های سنگی و کاربرد آن در جدایش واحدهای جریانی ثابت شد [۲۹]، بنابراین با توجه به تایید اعتبار این روش در مطالعات پیشین در این مطالعه نیز برای تفکیک و تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی به وسیله روش شاخص کیفیت مخزنی از نمودار احتمال نرمال لگاریتم شاخص زون جریان استفاده شد (شکل ۳). تعیین گونه سنگی به روش شاخص کیفیت مخزنی از نسبت تراوایی به تخلخل که پارامترهای پتروفیزیکی اند به دست می آید و بر اساس تغییرات آنها در هر واحد جریان، تاثیر پارامترهای پتروفیزیکی بر اشباع آب تشخیص داده می شود. پس از تعیین واحد جریان هیدرولیکی به روش شاخص کیفیت مخزنی از بررسی مقاطع نازک مرتبط با هر واحد جریان، سنگ شناسی غالب و محیط رسوبی غالب که تحت تاثیر فرآیندهای زمین شناسی اند، در هر واحد جریان هیدرولیکی تعیین شدند. در این مطالعه بر اساس شاخص منطقه ای جریان، ۸ واحد جریان هیدرولیکی تعریف شده که در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین ویژگی های زمین شناسی و پتروفیزیکی هر یک از واحدهای جریان در جدول ۲ آرایه شده است.

۲-۳- روش نوع تخلخل

در این مطالعه نامگذاری نوع منافذ بر مبنای طبقه‌بندی چوکت-پری^{۱۹} انجام گرفته است [۳۰]. تعیین گونه سنگی بر اساس نوع تخلخل وجود ۷ نوع تخلخل شامل شکستگی، بین‌دانه‌ای، درون‌دانه‌ای، قالبی، حفره‌ای، روزنه‌ای و بین‌بلوری را برای سازندهای کنگان و دالان نشان می‌دهد. فراوانی نوع تخلخل در سازندهای کنگان و دالان به ترتیب تخلخل قالبی، تخلخل بین‌دانه‌ای، تخلخل درون‌دانه‌ای، تخلخل بین‌بلوری و شکستگی است و نوع تخلخل حفره‌ای و روزنه‌ای فراوانی خیلی کمی دارند (شکل ۵). پس از تعیین گونه سنگی به روش نوع تخلخل از بررسی مقاطع نازک مرتبط با همان گونه سنگی، سنگ‌شناسی و محیط رسوبی غالب، نوع سیمان و نوع فرآیند دولومیتی شدن بر اساس ترتیب فراوانی در همان گونه سنگی تعیین شد. پس از اندازه‌گیری آزمایش تخلخل هلیم، مقادیر تخلخل مغزه با داده‌های لاگ نوترون کالیبره شده و به همراه مقادیر تراوایی در هر گونه سنگی به صورت متوسط آنها ارایه شدند. ویژگی‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی هر یک از انواع تخلخل‌ها در جدول ۳ ارایه شده است.

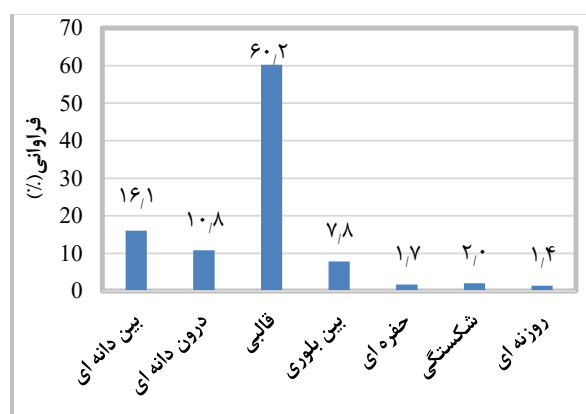
۲-۴- بافت رسوبی

در این مطالعه نامگذاری بافت رسوبی بر مبنای طبقه‌بندی دانهام انجام گرفته است [۳۱]. تعیین گونه سنگی بر اساس بافت رسوبی وجود ۵ نوع بافت بر حسب فراوانی شامل گرینستون، مادستون، وکستون، پکستون و باندستون را برای سازندهای کنگان و دالان نشان می‌دهد (شکل ۶). پس از

تعیین گونه سنگی به روش بافت رسوبی از بررسی مقاطع نازک مرتبط با هر گونه سنگی، سنگ‌شناسی غالب و محیط رسوبی غالب و نوع سیمان در همان گونه سنگی تعیین شد. پس از اندازه‌گیری آزمایش تخلخل هلیم، مقادیر تخلخل مغزه با داده‌های لاگ نوترون کالیبره شده و به همراه مقادیر تراوایی در هر گونه سنگی به صورت متوسط آنها ارایه شدند. ویژگی‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی هر یک از بافت‌ها در جدول ۴ ارایه شده است.

۲-۵- اشباع آب

برای تعیین مقادیر توان سیمان‌شدگی و تعیین رابطه بین تخلخل و فاکتور مقاومت سازند، در آزمایشگاه بر روی پلاگ‌های تمیز مقدار تخلخل و مقاومت الکتریکی نمونه اشباع



شکل ۵: فراوانی نوع تخلخل‌ها در سازندهای کنگان و دالان (که بر اساس مطالعات مقاطع نازک میکروسکوپی به دست آمده است).

جدول ۳: طبقه‌بندی نمونه‌های سنگ مخزن بر اساس ویژگی‌های پتروگرافی نوع تخلخل در چاه مورد مطالعه

نوع تخلخل	نوع سیمان	نوع فرآیند دولومیتی شدن	K_m (m D)	Φ_m (%)	محیط رسوبی غالب	سنگ‌شناسی غالب
شکستگی	انیدریتی	نوشکلی، میکرایتی شدن	۱۱٫۸۳	۴٫۵۴	لاگون، جزر و مدی	آهک، دولوستون
بین دانه‌ای	فیبری هم‌ضخامت	میکرایتی شدن	۱۶٫۹۴	۹٫۱۴	سد	آهک، دولوستون
درون دانه‌ای	فیبری هم‌ضخامت، بلوکی	میکرایتی شدن	۶٫۸۸	۷٫۳۷	سد	آهک
قالبی	فیبری هم‌ضخامت	نوشکلی، میکرایتی شدن	۴٫۹۲	۹٫۹۱	سد	آهک
حفره‌ای	فیبری هم‌ضخامت	نوشکلی	۳٫۹۶	۱۰٫۷۵	لاگون، جزر و مدی	دولوستون، آهک
روزنه‌ای	بدون سیمان	دولومیکرایت	۸٫۴۶	۷٫۳۶	جزر و مدی	دولوستون
بین بلوری	انیدریتی، فیبری هم‌ضخامت	دولومیکرایت، نوشکلی	۳٫۸۴	۸٫۷۵	لاگون	دولوستون

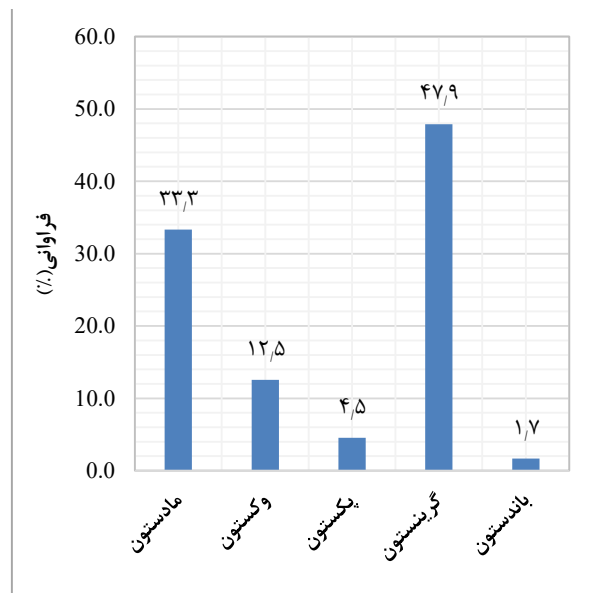
مدل های الکتریکی به ترتیب مدل الکتریکی آرچی (محاسبه شده ضرایب در هر گونه سنگی)، آرچی (بدون تعیین گونه سنگی)، آرچی با ضرایب ثابت، آب دوگانه و واکسمن-اسمیت اندازه گیری و ترسیم شده است. توزیع عمقی گونه های سنگی تعیین شده بر اساس روش وینلند، شاخص کیفیت مخزنی، نوع تخلخل و بافت رسوبی به ترتیب در ستون های ۱۸ تا ۲۱ رسم شده است. در این شکل همچنین نحوه پراکندگی و توزیع عمقی رخساره ها و محیط رسوبی مورد مطالعه را به همراه توزیع تخلخل و تراوایی نشان داده شده است.

۳- بحث و نتایج

در صنعت نفت از روش های مختلفی مانند روش وینلند، شاخص کیفیت مخزنی، نوع تخلخل و بافت رسوبی برای تعیین گونه های سنگی و واحدهای جریانی استفاده می شود. دقت هر گونه سنگی در تفکیک پارامترهای مخزنی به پارامترهای زمین شناسی و پتروفیزیکی به کار رفته در همان گونه سنگی بستگی دارد. هنگامی که مشخصات پتروفیزیکی و زمین شناسی یک گونه سنگی در نظر گرفته شود، باعث می شود آن گونه سنگی از جنبه های گوناگون نشان دهنده رفتار سیال در مخزن باشد. بر همین اساس پس از تعیین گونه های سنگی باید دلیل رفتار مخزنی و تغییرات اشباع آب در آنان بر اساس مشخصه های زمین شناسی و پتروفیزیکی بیان شود. در روش وینلند، واحدهای جریان پتروفیزیکی B شعاع گلوگاه بسیار کوچکی دارند، به همین جهت مقادیر تراوایی در این واحد جریان پتروفیزیکی بسیار پایین ثبت شده است. این واحد جریانی با سنگ شناسی غالب آهک تا مقدار اندکی دولوستون در محیط های سدی دیده شده است (جدول ۱).

اندازه گیری و سپس از نمودار فاکتور مقاومت سازند در مقابل تخلخل، مقدار توان سیمان شدگی در کل چاه و سپس در هر گونه سنگی محاسبه شد. برای تعیین مقادیر توان اشباع و تعیین رابطه بین شاخص مقاومت سازند و اشباع آب، در آزمایشگاه بر روی پلاگ های تمیز مقدار مقاومت سازند^{۲۰} در اشباع های مختلف اندازه گیری شد، سپس از نمودار شاخص مقاومت سازند در مقابل اشباع آب مقدار توان اشباع در کل چاه و سپس در هر گونه سنگی محاسبه شد (شکل ۷).

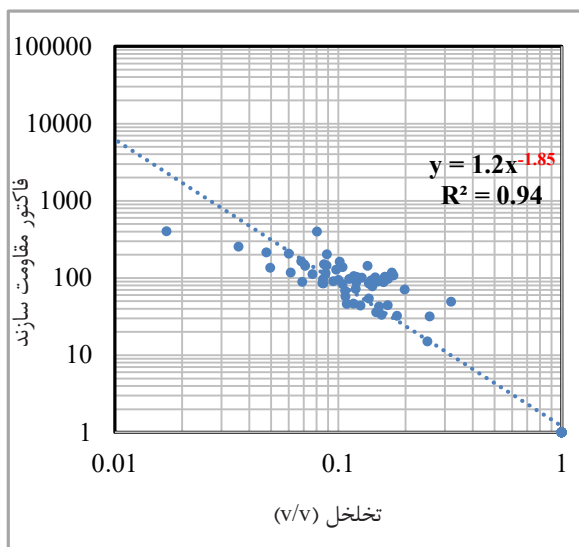
پس از محاسبه ضرایب آرچی، مقادیر متوسط اشباع آب آرچی در کل توالی چاه محاسبه شد. در ستون های ۱۳ تا ۱۷ از شکل ۸ اشباع آب آزمایش دین استارک به همراه اشباع آب



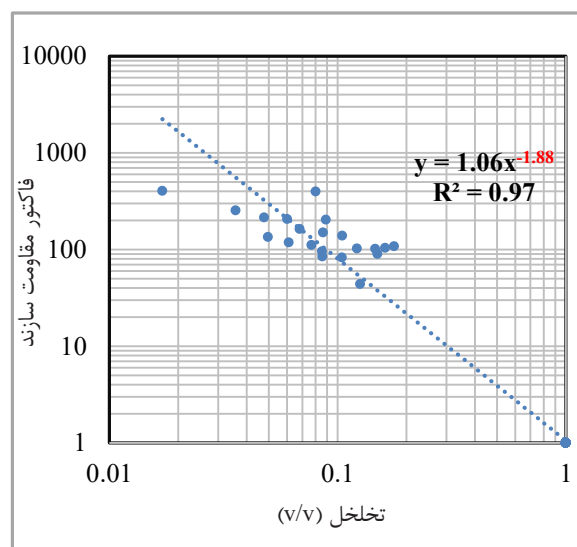
شکل ۶: فراوانی نوع بافت رسوبی در سازندهای کنگان و دالان (که بر اساس مطالعات مقاطع نازک میکروسکوپی به دست آمده است).

جدول ۴: طبقه بندی نمونه های سنگ مخزن بر اساس ویژگی های پتروگرافی بافت رسوبی در چاه مورد مطالعه

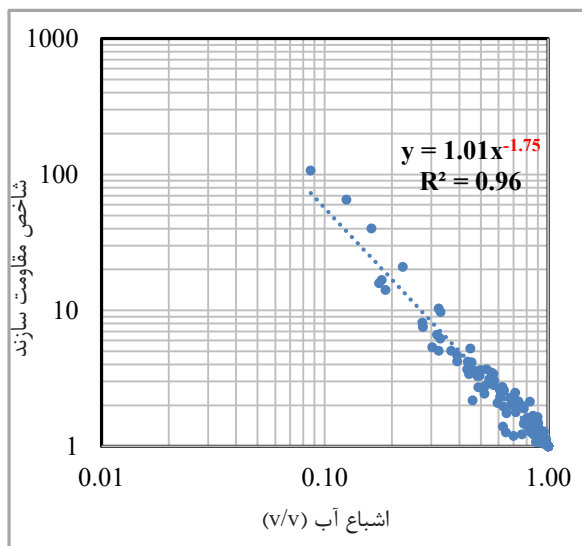
بافت رسوبی	نوع سیمان	نوع فرایند دولومیتی شدن	K_m (m D)	Φ_m (%)	محیط رسوبی غالب	سنگ شناسی غالب
مادستون	انیدریتی	نوشکلی، دولومیکرایت	۷٫۶۷	۷٫۶۵	جزر و مدی، دریای باز	دولوستون، آهک
وکستون	انیدریتی	نوشکلی	۴٫۸۷	۹٫۲۰	لاگون، دریای باز	دولوستون، آهک
پکستون	فیبری انیدریتی، هم ضخامت	میکرایتی شدن نوشکلی،	۱۸٫۲۱	۶٫۸۳	لاگون	آهک، دولوستون
گرنستون	فیبری هم ضخامت بلوکی،	میکرایتی شدن	۱۴٫۰۰	۹٫۳۷	سد	آهک
بانداستون	انیدریتی	دولومیکرایت	۰٫۲۴	۴٫۳۶	جزر و مدی	دولوستون



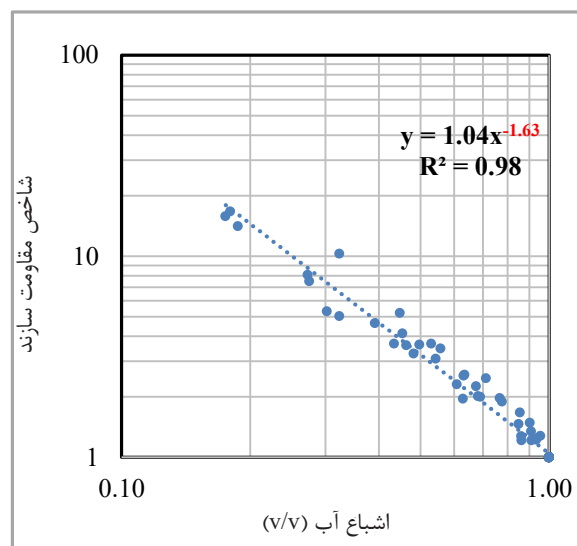
(ب)



(الف)



(د)

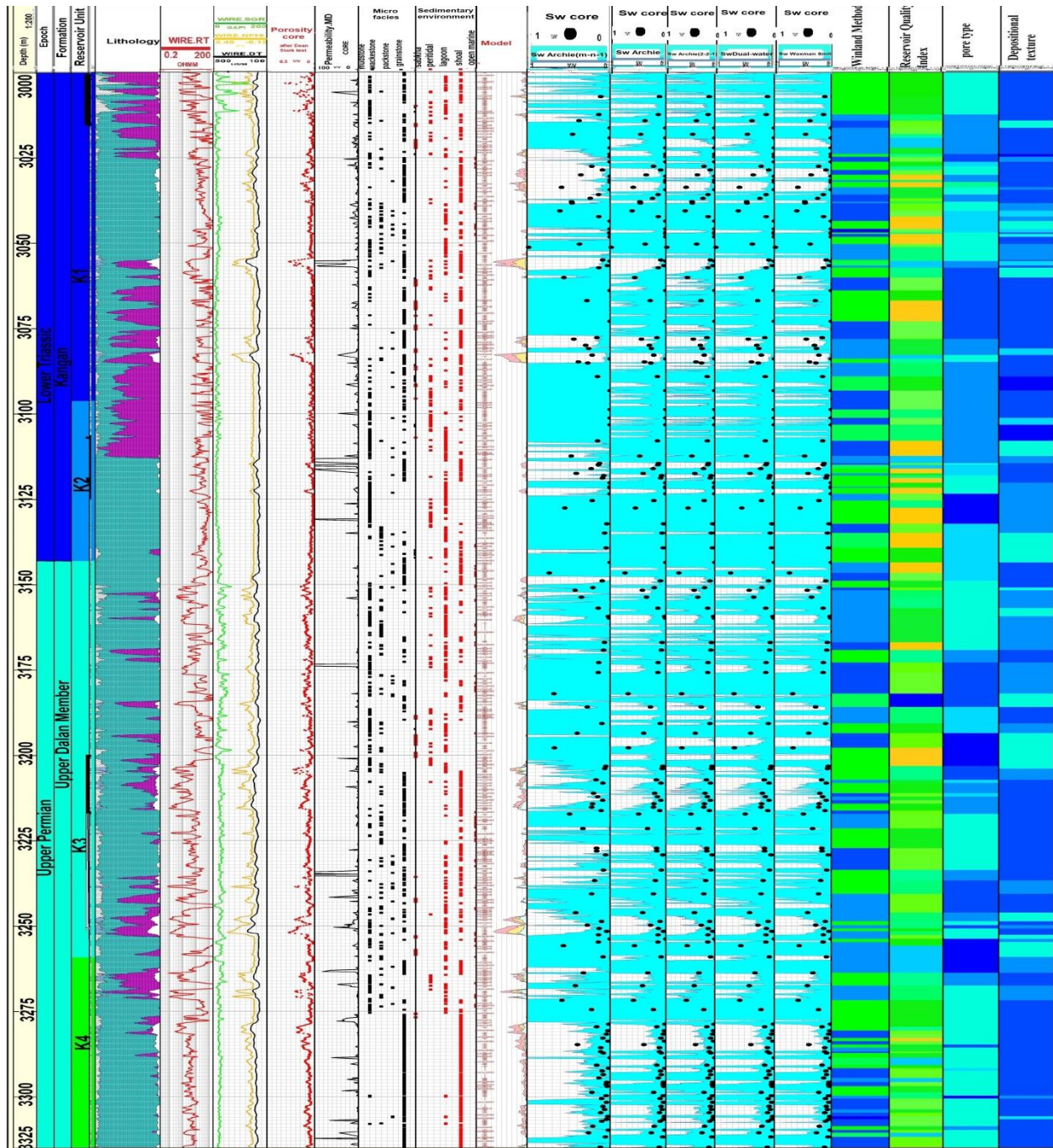


(ج)

شکل ۷: نمونه‌ای از نمودار لگاریتمی-لگاریتمی تخلخل در مقابل فاکتور مقاومت سازند الف) روش وینلند (شعاع گلوگاه ۵-۲ میکرون)، ب) روش وینلند در کل چاه. نمونه‌ای از نمودار لگاریتمی-لگاریتمی اشباع آب در مقابل شاخص مقاومت سازند، ج) روش وینلند (شعاع گلوگاه ۵-۲ میکرون)، د) روش وینلند در کل چاه (مقادیر توان اشباع، توان سیمان‌شدگی ضریب پیچاپچی، ضریب برازش (R^2) مشخص است).

گلوگاه حفرات، تراوایی بالایی دارد. این گونه سنگی کمترین اختلاف اشباع آب نسبت به گونه‌های سنگی قبلی خود دارد. واحدهای جریان پتروفیزیکی A و H به دلیل تعداد کم داده در این گونه سنگی مورد ارزیابی و مقایسه قرار نگرفتند. مطابق این طبقه‌بندی، افزایش شعاع گلوگاه حفرات به افزایش تراوایی منجر شده که باعث کاهش اختلاف متوسط اشباع آب آرچی با دین‌استارک می‌شود، بنابراین شعاع گلوگاه حفرات پارامتری است که محصول فرآیندهای زمین‌شناسی است و بر روی

بر اساس نتایج اشباع آب ارایه شده در جدول ۵ این واحد جریان بیشترین اختلاف اشباع آب آرچی را با دین‌استارک نشان می‌دهد. واحدهای جریان پتروفیزیکی C، D، E، F شعاع گلوگاه بزرگتری نسبت به واحد جریان پتروفیزیکی قبلی دارند. این واحدهای جریانی با سنگ‌شناسی غالب دولوستون و آهک در محیط‌های سدی تا لاگون و جزر و مدی دیده شده‌اند و تاثیر بیشتری در کاهش اختلاف اشباع آب آرچی با دین‌استارک، نشان دادند. واحد جریان پتروفیزیکی G با بزرگترین شعاع



شکل ۸: مقایسه مقادیر اشباع آب مغزه حاصل از آزمایش دیناستارک با اشباع آب مدل های الکتریکی (توزیع عمقی تخلخل و تراوایی مغزه و پراکندگی رخساره ها و نوع محیط رسوبی به ترتیب در ستون های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱، اشباع آب حاصل از روش وینلند ستون ۱۸، شاخص کیفیت مخزنی ستون شماره ۱۹، نوع تخلخل ستون ۲۰ و بافت رسوبی در ستون ۲۱ قرار دارند).

واحدهای جریان پتروفیزیکی دارند که علت این امر ناشی از ماهیت این نوع واحد جریان پتروفیزیکی است که واحدهای جریان خود را بر اساس شعاع گلوگاه حفرات تفکیک می کند،

اشباع آب و ویژگی های پتروفیزیکی سنگ تاثیر دارد. ویژگی واحدهای جریان پتروفیزیکی توصیف شده نشان می دهد که مشخصات سنگ شناسی و محیط رسوبی ارتباط ضعیفی با

را بین دو روش نشان دادند. واحدهای جریان هیدرولیکی A، B و H به دلیل تعداد کم داده در این گروه سنگی مورد ارزیابی و مقایسه قرار نگرفتند. مطابق این طبقه‌بندی، افزایش تراوایی که تحت تاثیر قطر گلوگاه حفرات است، نسبت به تخلخل بیشتر بر روی اشباع آب تاثیر دارد. در این گونه سنگی نیز مشخصات سنگ‌شناسی و محیط رسوبی ارتباط ضعیفی با واحدهای جریان هیدرولیکی نشان می‌دهد که ناشی از ماهیت این نوع واحد جریان هیدرولیکی است که واحدهای جریانی خود را بر اساس نسبت تراوایی به تخلخل تفکیک می‌کند، بنابراین نسبت تراوایی به تخلخل که نشان‌دهنده کیفیت زون‌های جریانی است، واحدهای سنگ‌شناسی و محیط رسوبی را از هم تفکیک نمی‌کند و در نتیجه تاثیر سنگ‌شناسی و محیط رسوبی روی اشباع آب و پارامترهای پتروفیزیکی در روش شاخص کیفیت مخزنی قابل تشخیص نیست. مقادیر متوسط اشباع آب مدل‌های الکتریکی و آزمایش دین‌استارک بر اساس نوع تخلخل در جدول ۷ نشان داده شده است. بر این اساس، تخلخل بین دانه‌ای با سنگ‌شناسی غالب

بنابراین پارامتر زمین‌شناسی شعاع گلوگاه حفرات، واحدهای سنگ‌شناسی و محیط رسوبی را از هم تفکیک نمی‌کند و در نتیجه تاثیر سنگ‌شناسی و محیط رسوبی بر روی اشباع آب و پارامترهای پتروفیزیکی در روش وینلند قابل تشخیص نیست. در روش شاخص کیفیت مخزنی، واحد جریان هیدرولیکی E با سنگ‌شناسی غالب دولوستون و آهک عمدتاً در محیط‌های سدی تا لاگون دیده شده است که تراوایی و تخلخل بسیار بالایی دارد. بر اساس نتایج اشباع آب ارایه شده در جدول ۶ این واحد جریان کمترین اختلاف متوسط اشباع آب آرچی را با دین‌استارک نشان می‌دهد. واحدهای جریان هیدرولیکی C و D تراوایی و تخلخل پایین‌تری نسبت به واحد E دارند و سنگ‌شناسی غالب آنها انیدریت تا آهک است (جدول ۲). بر اساس نتایج اشباع آب ارایه شده در جدول ۶ این دو واحد جریان اختلاف اشباع آب بالاتری نسبت به واحد جریان E دارند. واحدهای جریان F و G با سنگ‌شناسی دولوستون تا آهک در محیط‌های سدی دیده شدند که تخلخل بالا اما تراوایی پایینی دارند. این دو واحد جریان بیشترین اختلاف اشباع آب

جدول ۵: اشباع آب آزمایش دین‌استارک و مدل‌های الکتریکی در گونه‌های سنگی به روش وینلند

متوسط اختلاف اشباع آب مدل‌های الکتریکی از دین‌استارک	آرچی (با ضرایب آزمایشگاهی)	آرچی (با ضرایب ۲،۲،۱)	آب دوگانه	واکسمن اسمیت	دین‌استارک	آرچی (محاسبه ضرایب در هر واحد جریان)	واحدهای جریان پتروفیزیکی
۰.۶۰	۰.۶۹	۰.۷۲	۰.۶۵	۰.۷۶	۰.۱۳	۰.۶۴	B
۰.۵۹	۰.۷۱	۰.۶۴	۰.۷۰	۰.۶۲	۰.۱۷	۰.۶۷	C
۰.۵۹	۰.۶۵	۰.۶۴	۰.۷۳	۰.۷۲	۰.۱۵	۰.۶۳	D
۰.۵۰	۰.۵۱	۰.۵۷	۰.۶۷	۰.۶۳	۰.۱۲	۰.۴۸	E
۰.۵۵	۰.۵۴	۰.۶۱	۰.۷۰	۰.۶۷	۰.۲۴	۰.۵۵	F
۰.۴۹	۰.۴۹	۰.۵۷	۰.۵۴	۰.۵۳	۰.۳۳	۰.۴۹	G

جدول ۶: اشباع آب آزمایش دین‌استارک و مدل‌های الکتریکی در گونه‌های سنگی به روش شاخص کیفیت مخزنی

متوسط اختلاف اشباع آب مدل‌های الکتریکی از دین‌استارک	آرچی (با ضرایب آزمایشگاهی)	آرچی (با ضرایب ۲،۲،۱)	آب دوگانه	واکسمن اسمیت	دین‌استارک	آرچی (محاسبه ضرایب در هر واحد جریان)	واحدهای جریان هیدرولیکی
۰.۵۸	۰.۵۹	۰.۷۳	۰.۷۴	۰.۶۹	۰.۱۹	۰.۵۶	C
۰.۵۹	۰.۶۶	۰.۶۷	۰.۶۶	۰.۶۳	۰.۳۲	۰.۶۰	D
۰.۳۳	۰.۴۴	۰.۴۳	۰.۴۴	۰.۴۰	۰.۱۶	۰.۱۱	E
۰.۶۲	۰.۶۸	۰.۶۸	۰.۷۳	۰.۶۹	۰.۲۶	۰.۶۷	F
۰.۶۰	۰.۶۰	۰.۶۷	۰.۷۱	۰.۷۶	۰.۱۲	۰.۷۱	G

سنگی نوع تخلخل های حفره‌ای، روزنه‌ای و بین بلوری به دلیل تعداد کم داده‌ها در چاه مورد مطالعه، مورد ارزیابی و مقایسه قرار نگرفتند، بنابراین تغییرات تراوایی که تحت تاثیر نوع سیمان و نوع تخلخل و محیط رسوبی هستند بر روی اختلاف اشباع آب تاثیر دارند. همچنین مقدار تخلخل اندازه‌گیری شده به وسیله آزمایش مغزه در شکستگی‌ها تخلخل خمیره سنگ را نشان می‌دهد، به همین جهت از تاثیر تخلخل بر پارامترهای مخزنی خودداری شده است.

مقادیر متوسط اشباع آب مدل‌های الکتریکی و آزمایش دین‌استارک بر اساس بافت رسوبی در جدول ۸ نشان داده شده است. در این گونه سنگی، گرینستون‌ها با سنگ‌شناسی غالب آهک در محیط‌های سدی دیده شده‌اند (جدول ۴). به علت حفظ‌شدگی حفرات و گلوگاه‌ها به وسیله سیمان‌های بلوکی و سیمان فیبری هم‌ضخامت در طی مراحل دیاژنز، تراوایی و تخلخل در این گونه سنگی بالا است. این نوع بافت رسوبی کمترین اختلاف اشباع آب بین مدل‌های الکتریکی با آزمایش دین‌استارک را نشان می‌دهد. وجود سیمان انیدریتی در مادستون‌ها و وکستون‌ها سبب شده که مقدار تراوایی بسیار پایین‌تری نسبت به گرینستون‌ها داشته باشد. این دو نوع بافت رسوبی که اختلاف اشباع آب بالاتری نسبت به گرینستون‌ها

آهک تا دولستون در محیط‌های سدی دیده شدند (جدول ۳). مقادیر بسیار بالایی تراوایی و تخلخل ثبت شده در این گونه سنگی به علت ماهیت این نوع تخلخل و همچنین وجود سیمان فیبری هم‌ضخامت که موجب حفظ‌شدگی حفرات و گلوگاه منافذ در طول مراحل دیاژنزی می‌شود است. بر اساس نتایج حاصل از اندازه‌گیری اشباع آب، این نوع تخلخل کمترین اختلاف اشباع آب بین دو روش را نشان می‌دهند. شکستگی‌ها به عنوان زون‌های فوق تراوا هستند، بنابراین مقادیر بالایی تراوایی ثبت شده در این گونه سنگی به علت ماهیت شکستگی‌ها است اما وجود سیمان انیدریتی مقادیر تراوایی آن را اندکی نسبت به تخلخل بین دانه‌ای کاهش می‌دهد. این نوع تخلخل با سنگ‌شناسی غالب آهک تا دولستون در محیط‌های لاگونی دیده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۷ شکستگی‌ها، اختلاف اشباع آب بالاتری نسبت به تخلخل بین دانه‌ای دارند. در گونه‌های سنگی با تخلخل قالبی و درون دانه‌ای به سبب مجزا بودن تخلخل‌ها، تراوایی افزایش چندانی نداشته است. این دو نوع تخلخل با سنگ‌شناسی غالب آهک در محیط‌های سدی دیده شده است. بر اساس محاسبات اشباع آب این نوع تخلخل‌ها نیز اختلاف اشباع آب بالاتری نسبت به تخلخل بین دانه‌ای دارند. لازم به ذکر است که در این گونه

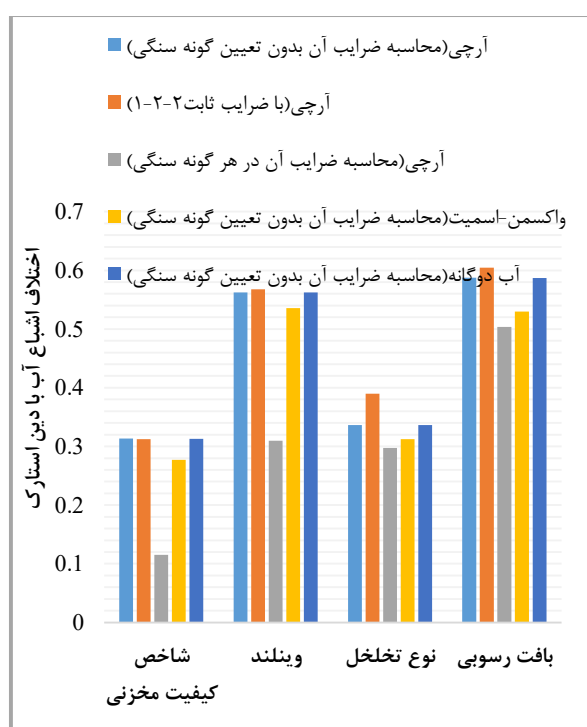
جدول ۷: اشباع آب آزمایش دین‌استارک و مدل‌های الکتریکی در گونه‌های سنگی به روش نوع تخلخل

نوع تخلخل	آرچی (محاسبه ضرایب در هر واحد جریان)	دین‌استارک	واکسمن اسمیت	آب دوگانه	آرچی (با ضرایب ۲،۲،۱)	آرچی (با آزمایشگاهی)	متوسط اختلاف اشباع آب مدل‌های الکتریکی از دین‌استارک
شکستگی	۰،۵۷	۰،۱۰	۰،۳۹	۰،۴۰	۰،۴۶	۰،۴۰	۰،۳۹
تخلخل بین دانه‌ای	۰،۲۳	۰،۱۸	۰،۲۶	۰،۲۹	۰،۳۵	۰،۲۹	۰،۲۷
تخلخل درون دانه‌ای	۰،۶۴	۰،۱۶	۰،۴۶	۰،۴۷	۰،۵۷	۰،۴۷	۰،۴۶
تخلخل قالبی	۰،۶۲	۰،۱۱	۰،۷۰	۰،۷۴	۰،۷۲	۰،۷۴	۰،۶۱

جدول ۸: اشباع آب آزمایش دین‌استارک و مدل‌های الکتریکی در گونه‌های سنگی به روش بافت رسوبی

نوع بافت رسوبی	آرچی (محاسبه ضرایب در هر واحد جریان)	دین‌استارک	واکسمن اسمیت	آب دوگانه	آرچی (با ضرایب ۲،۲،۱)	آرچی (با آزمایشگاهی)	متوسط اختلاف اشباع آب مدل‌های الکتریکی از دین‌استارک
گرینستون	۰،۵۱	۰،۱۳	۰،۶۸	۰،۷۰	۰،۷۱	۰،۷۰	۰،۵۷
وکستون	۰،۶۳	۰،۱۶	۰،۶۹	۰،۶۶	۰،۷۳	۰،۶۵	۰،۵۹
مادستون	۰،۸۲	۰،۲۰	۰،۷۱	۰،۸۰	۰،۸۲	۰،۸۰	۰،۶۹

روش دین استارک شده است. بنابراین علت این اختلاف ناشی از محاسبه آب ساختاری موجود در شیل‌ها و رس‌ها است، که در آزمایش دین استارک نادیده گرفته می‌شود. به علت ناهنگی زیاد مخازن کربناته، اشباع آب حاصل از ضرایب ثابت آرچی و یا ضرایب محاسبه شده، بدون در نظر گرفتن گونه‌های سنگی، اختلاف اشباع زیادی با دین استارک دارد. همان‌طور که در شکل ۹ و جدول ۹ مشاهده می‌شود اشباع آب حاصل از مدل‌های الکتریکی آرچی که ضرایب آن در هر واحد جریان محاسبه شد، بسیار به مقادیر اشباع آب مغزه (دین استارک)



شکل ۹: مقایسه متوسط اختلاف اشباع آب آزمایش دین استارک با مدل‌های الکتریکی آرچی، واکسمن-اسمیت و آب دوگانه در گونه‌های سنگی مختلف

دارند در محیط‌های لاگون تا جزر و مدی دیده شده‌اند. لازم به ذکر است که در این گونه سنگی نوع بافت‌های رسوبی پکستون و باندستون به دلیل تعداد کم داده‌ها در چاه مورد مطالعه، مورد ارزیابی و مقایسه قرار نگرفتند. ویژگی بافت رسوبی توصیف شده نشان می‌دهد که مشخصات محیط رسوبی، که تحت تاثیر رخساره‌اند، با نوع بافت رسوبی ارتباط دارند، بنابراین پارامتر زمین‌شناسی بافت رسوبی، محیط‌های رسوبی را به خوبی از هم تفکیک می‌کند. در نتیجه تاثیر محیط رسوبی بر روی پارامترهای پتروفیزیکی و توزیع اشباع آب بر اساس نوع بافت قابل تشخیص است. بنابراین نوع سیمان و بافت، که تحت تاثیر فرآیندهای دیاژنزی و محیط رسوبی (رخساره) هستند کنترل‌کننده تراوایی و در نتیجه اشباع آب‌اند.

۳-۱- مقایسه اشباع آب مدل‌های الکتریکی با دین استارک، بین گونه‌های سنگی مختلف

استفاده از مدل‌های شیلی (مدل آب دوگانه^{۲۱} [۳۲])، واکسمن-اسمیت^{۲۲} [۳۳]) برای تعیین اشباع آب بدون در نظر گرفتن گونه‌های سنگی، دارای اختلاف زیادی با مقادیر اشباع آب از آزمایش دین استارک است و همواره مقادیر متوسط اشباع آب حاصل از مغزه پایین‌تر از متوسط اشباع آب مدل‌های الکتریکی ثبت می‌شوند (شکل ۹). علت این امر ناشی از این است که در آنالیز مغزه، حجم آبی که به وسیله دستگاه آزمایش دین استارک اندازه‌گیری می‌شود شامل حجم آب آزاد و مقداری حجم آب چسبیده به رس‌ها (حضور حلال باعث شکستن پیوند بین مولکولی آب و سطح سنگ می‌شود) است، بنابراین آزمایش دین استارک آب ساختاری در رس‌ها را خارج نمی‌کند [۳۴]، اما در روش آرچی و سایر مدل‌های الکتریکی، کل آب موجود در ساختار سنگ محاسبه می‌شود که این باعث افزایش اشباع آب مدل‌های الکتریکی نسبت به

جدول ۳: طبقه‌بندی نمونه‌های سنگ مخزن بر اساس ویژگی‌های پتروگرافی نوع تخلخل در چاه مورد مطالعه

نام گونه سنگی	آرچی (ضرایب آزمایشگاهی)	آرچی (ضرایب (۲،۲،۱))	آب دوگانه	واکسمن-اسمیت	آرچی (محاسبه ضرایب در هر واحد جریان)	میانگین
شاخص کیفیت مخزنی	۰.۳۱	۰.۳۱	۰.۳۱	۰.۲۸	۰.۱۲	۰.۲۷
وینلند	۰.۵۶	۰.۵۷	۰.۵۶	۰.۵۴	۰.۳۱	۰.۵۱
نوع تخلخل	۰.۳۴	۰.۳۹	۰.۳۴	۰.۳۱	۰.۳۰	۰.۳۳
بافت رسوبی	۰.۵۹	۰.۶۰	۰.۵۹	۰.۵۳	۰.۵۰	۰.۵۶

دین استارک دارد. پارامتر زمین شناسی شعاع گلوگاه حفرات و همچنین نسبت تراوایی به تخلخل، واحدهای سنگ شناسی و محیط رسوبی را از هم تفکیک نمی کند، بنابراین بهتر است از روش وینلند و روش شاخص کیفیت مخزنی برای تفکیک واحدهای سنگ شناسی و محیط رسوبی استفاده نشود. تعیین گونه سنگی به روش بافت رسوبی و نوع تخلخل نشان داد که نوع سیمان، بافت رسوبی و نوع تخلخل که تحت تاثیر فرآیندهای دیاژنزی و محیط رسوبی (رخساره) هستند، تراوایی و توزیع اشباع آب در مخزن را کنترل می کنند. همچنین تعیین گونه سنگی بر اساس بافت رسوبی نشان داد که بافت رسوبی به خوبی محیط های رسوبی را از هم تفکیک می کند. نتایج به دست آمده نشان داد که تغییرات اشباع آب در سازندهای کنگان و دالان تحت تاثیر فرآیندهای رسوب گذاری و دیاژنزی بوده است. از مقایسه اشباع آب مدل های الکتریکی با آزمایش دین استارک مشخص شد که اگر تعیین گونه سنگی انجام گیرد و ضرایب آرچی در هر واحد جریان محاسبه شود، اشباع آب حاصل از آن بسیار به مقادیر اشباع آب مغزه (دین استارک) نزدیک است. همچنین از مقایسه بین گونه های سنگی مختلف مشخص شد مدل الکتریکی اشباع آبی که ضرایب آن در گونه های سنگی به روش شاخص کیفیت مخزنی و نوع تخلخل انجام گیرد، بهترین پاسخ را در مقادیر اشباع آب با دین استارک در پی دارد. تفاضل متوسط اشباع آب بین مدل های الکتریکی با دین استارک در روش شاخص کیفیت مخزنی ۲۷٪ است که نسبت به روش وینلند و بافت رسوبی به ترتیب ۲۴٪ و ۲۹٪ اشباع آب کمتری دارد. مقادیر این تفاضل متوسط اشباع آب بین مدل های الکتریکی با دین استارک در روش نوع تخلخل ۳۳٪ است که نسبت به روش وینلند و بافت رسوبی به ترتیب ۱۸٪ و ۲۳٪ اشباع آب کمتری دارد. این نتایج نشان می دهد که برای انتخاب نمونه برای تعیین ضرایب آرچی، این دو روش تعیین گونه های سنگی در این سازندها مناسب است، بنابراین با توجه به ضرورت تعیین گونه سنگی و همچنین قابلیت بسیار بالای این دو گونه سنگی در محاسبه اشباع آب سازندها و در نتیجه محاسبه دقیق میزان هیدروکربن های موجود در مخازن، به نظر می رسد استفاده از تعیین گونه سنگی به روش شاخص کیفیت مخزنی و نوع تخلخل بهترین وسیله برای رسیدن به نتایج دقیق و مطمئن اشباع آب است، بنابراین استفاده از این روش ها برای سایر چاه های این میدان، نیز می تواند ایده مناسبی برای تحلیل و تخمین دقیق تر اشباع آب چاه های مجاور باشد.

نزدیک شده است. برای تشخیص بهترین گونه سنگی برای محاسبه اشباع آب صحیح در سطح مخزن، مقادیر اشباع آب در گونه های سنگی مختلف شامل وینلند، شاخص کیفیت مخزنی، بافت رسوبی و نوع تخلخل محاسبه شدند. کمترین اختلاف متوسط اشباع آب بین روش آزمایش دین استارک و مدل های الکتریکی، نشان دهنده بهترین گونه سنگی در محاسبه اشباع آب و تعیین ضرایب آرچی است. نتایج نشان داد تعیین گونه سنگی که بر اساس روش شاخص کیفیت مخزنی و نوع تخلخل انجام گیرد کمترین اختلاف اشباع آب دین استارک با مدل های الکتریکی را نشان می دهد، در صورتی که تعیین گونه سنگی که بر اساس بافت رسوبی و روش وینلند اختلاف متوسط اشباع آب بالاتری بین دو روش خواهد داشت (شکل ۹). متوسط اختلاف اشباع آب بین مدل های الکتریکی با دین استارک در روش شاخص کیفیت مخزنی ۲۷٪ است که نسبت به روش وینلند و بافت رسوبی به ترتیب ۲۴٪ و ۲۹٪ اشباع آب کمتری دارد. مقادیر این اختلاف متوسط اشباع آب بین مدل های الکتریکی با دین استارک در روش نوع تخلخل ۳۳٪ است که نسبت به روش وینلند و بافت رسوبی به ترتیب ۱۸٪ و ۲۳٪ اشباع آب کمتری دارد. از طرفی هر چه اختلاف اشباع آب بین دو روش اندازه گیری کاهش یابد به همان نسبت دقت پارامتر اندازه گیری شده افزایش و عدم قطعیت کاهش می یابد، بنابراین همان طور که در بالا شرح داده شد، برای انتخاب نمونه برای تعیین ضرایب آرچی، روش شاخص کیفیت مخزنی و نوع تخلخل مناسب است. نتایج کمی اختلاف متوسط اشباع آب مدل های الکتریکی از دین استارک در بین واحدهای جریان و گونه های سنگی مختلف در جدول ۹ ارائه شده است.

۴- نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که در مخازن کربناته مقادیر اشباع آب از آزمایش دین استارک نسبت به روش آرچی و سایر مدل های الکتریکی متفاوت است. برای تشخیص پارامترهای زمین شناسی و پتروفیزیکی موثر بر توزیع اشباع آب در مخازن کربناته، مقایسه اختلاف متوسط اشباع آب مدل های الکتریکی با آزمایش دین استارک انجام گرفت. نتایج اشباع آب در هر گونه سنگی نشان داد که پارامتر زمین شناسی شعاع گلوگاه حفرات، بر روی اشباع آب و ویژگی های پتروفیزیکی سنگ بسیار تاثیر گذار است و این پارامتر رابطه مستقیمی با افزایش تراوایی و کاهش اختلاف مقادیر اشباع آب آرچی از آزمایش

exponents (m) in Middle Eastern carbonate reservoirs".
Qatar General Petroleum Corp.

۵- مراجع

- [13] Kazemzadeh, E., Nabi, B. I. D. H. M., and Rezaei, M. R. (2008). "The study of formation resistivity factor by using hydraulic flow units method in carbonate reservoirs". Journal of Science University of Tehran, 34(1): 13-21.
- [14] Mazzullo, S. J., and Chilingarian, G. V. (1992). "Diagenesis and origin of porosity". Developments in Petroleum Science, 30(C): 199-270.
- [15] Hammadi, M. A., Al-Maskari, S., and El-Sayed, R. (2008). "Improving oil in place estimation through an improve water saturation prediction - A case study in the middle east". Society of Petroleum Engineers, 13th Abu Dhabi Int. Pet. Exhib. Conf. ADIPEC 2008, 3: 1369-1374.
- [16] Ringen, J., Halvorsen, C., and Lehne, K. (1999). "Reservoir water saturation measured on cores; case histories and recommendations". 6th Nord. Symp. Petrophysics, Trondheim, Norw., no. May, 1-13.
- [17] Woodhouse, R. (1987). "Problems in sw calibration using oil mud cores and core electrical measurements". Log Analysis, 28(3): 289-293.
- [18] Richardson, J. G., Holstein, E. D., Rathmell, J. J., and Warner Jr, H. R. (1997). "Validation of as-received oil-based-core water saturations from Prudhoe Bay". SPE Reservoir Engineering, 12(01): 31-36.
- [19] Tavakoli, V. (2016). "Ocean chemistry revealed by mineralogical and geochemical evidence at the permian-triassic mass extinction, offshore the Persian Gulf, Iran". Acta Geologica Sinica-English Edition, 90(5): 1852-1864.
- [20] Rahimpour-Bonab, H., Asadi-Eskandar, A., and Sonei, R. (2009). "Effects of the Permian-Triassic boundary on reservoir characteristics of the South Pars gas field, Persian Gulf". Geological Journal, 44(3): 341-364.
- [21] Tavakoli, V. (2015). "Chemostratigraphy of the Permian-Triassic Strata of the Offshore Persian Gulf, Iran". Elsevier Inc.
- [22] Tavakoli, V., and Jamalian, A. (2018). "Microporosity evolution in Iranian reservoirs, Dalan and Dariyan formations, the central Persian Gulf". Journal of Natural Gas Science & Engineering, 52: 155-165.
- [23] Aali, J., Rahimpour-Bonab, H., and Kamali, M. R. (2006). "Geochemistry and origin of the world's largest gas field from Persian Gulf, Iran". Journal of Petroleum Science and Engineering, 50(3-4): 161-175.
- [24] Rahimpour-Bonab, H. (2007). "A procedure for
- [1] Hollis, C. (2011). "Diagenetic controls on reservoir properties of carbonate successions within the Albian-Turonian of the Arabian Plate". Petroleum Geoscience, 17(3): 223-241.
- [2] Rustichelli, A., Tondi, E., Agosta, F., Di Celma, C., and Giorgioni, M. (2013). "Sedimentologic and diagenetic controls on pore-network characteristics of Oligocene-Miocene ramp carbonates (Majella Mountain, central Italy) Sedimentologic and Diagenetic Controls on Pore-Network Characteristics". American Association of Petroleum Geologists, 97(3): 487-524.
- [3] Lucia, F. J. (2007). "Carbonate reservoir characterization: An integrated approach". Springer Science & Business Media.
- [4] Moore, C. H., and Wade, W. J. (2013). "Carbonate reservoirs: Porosity and diagenesis in a sequence stratigraphic framework". Newnes.
- [5] Archie, G. E. (1942). "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics". Transactions of AIME, 146(01): 54-62.
- [6] Woodhouse, R. (1998). "Accurate reservoir water saturations from oil-mud cores: Questions and answers from Prudhoe Bay and beyond". Log Analysis, 39(3): 23-44.
- [7] Anderson, W. G. (1986). "Wettability literature survey-part 3: the effects of wettability on the electrical properties of porous media". Journal of Petroleum Technology, 38(12): 1-371.
- [8] Galiuk, H. S., Saadat, K., and Kazemzadeh, E. (2011). "A case study of saturation exponent measurement on some carbonate cores at full reservoir conditions". In International Symposium of the Society of Core Analysts held in Austin, Texas, USA, 18-21.
- [9] Worthington, P. F. (2011). "The petrophysics of problematic reservoirs". Journal of Petroleum Technology, 63(12): 88-97.
- [10] Hamada, G. M., Almajed, A. A., Okasha, T. M., and Algateh, A. A. (2013). "Uncertainty analysis of Archie's parameters determination techniques in carbonate reservoirs". Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 3(1): 1-10.
- [11] Rezaee, M. R., Motiei, H., and Kazemzadeh, E. (2007). "A new method to acquire m exponent and tortuosity factor for microscopically heterogeneous carbonates". Journal of Petroleum Science and Engineering, 56(4): 241-251.
- [12] Focke, J. W., and Munn, D. (1985). "Cementation

evaluation using the Waxman-Smits equation in the absence of core data". In SPWLA 22nd Annual Logging Symposium, Mexico City, Mexico, Paper Number: SPWLA-1981-Z.

- [34] Handwerker, D. A., Willberg, D., Pagels, M., Rowland, B., and Keller, J. F. (2012). "Reconciling retort versus Dean Stark measurements on tight shales". Proceedings-SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 5: 3932-3945.

appraisal of a hydrocarbon reservoir continuity and quantification of its heterogeneity". Journal of Petroleum Science and Engineering, 58(1-2): 1-12.

- [25] Insalaco, E., Virgone, A., Courme, B., Gaillet, J., Kamali, M., Moallemi, A., Lotfpour, M., and Monibi, S. (2006). "Upper Dalan Member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture". GeoArabia, 11(2): 75-176.

- [26] Dean, E. W., and Stark, D. D. (1920). "A Convenient Method for the Determination of Water in Petroleum and Other Organic Emulsions". Industrial and Engineering Chemistry, 12(5): 486-490.

- [27] Kolodzie, J. S. (1980). "Analysis of pore throat size and use of the Waxman-Smits equation to determine OOIP in Spindle Field, Colorado". In SPE Annual Technical Conference and Exhibition.

- [28] Amaefule, J. O., Altunbay, M., Tiab, D., Kersey, D. G., and Keelan, D. K. (1993). "Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells". in SPE Annual Technical Conference and Exhibition.

- [29] Abbaszadeh, M., Fujii, H., and Fujimoto, F. (1996). "Permeability prediction by hydraulic flow units-theory and applications". SPE Formation Evaluation, 11(04): 263-271.

- [30] Choquette, P. W., and Pray, L. C. (1970). "Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates". American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 54(2): 207-250.

- [31] Dunham, R. J. (1962): "Classification of carbonate rocks according to depositional textures". SPE Journal, 24(2): 153-168.

- [32] Clavier, C., Coates, G., and Dumanoir, J. (1977). "Theory and experimental basis for the dual-water model for interpretation of shaly sands". SPE, 24(2): 153-168. DOI: <https://doi.org/10.2118/6859-PA>.

- [33] Juhasz, I. (1981). "Normalised Q_v -the key to shaly sand

¹ Saturation exponents

² Cementation exponents

³ Tortuosity Factor

⁴ Depositional texture

⁵ Pore type

⁶ Pore Throat Radius

⁷ Dean-Stark test

⁸ Formation Resistivity Factor

⁹ Resistivity index

¹⁰ Winland Method

¹¹ Reservoir Quality Index

¹² Mercury injection capillary pressure

¹³ petrophysical flow unit(PFU)

¹⁴ Amaefule

¹⁵ Kozeny

¹⁶ Carman

¹⁷ Flow Zone Indicator(FZI)

¹⁸ Normalized Porosity Index(ϕ_z)

¹⁹ Choquette and Pray

²⁰ True Resistivity

²¹ dual water

²² Waxman-Smith