

تعیین بهترین ترکیب داده‌های چاه‌پیمایی و رخساره‌های الکتریکی در محاسبه اشباع آب، سازندهای کنگان و دالان در بخش مرکزی خلیج فارس

رضا غلامی و وحید توکلی*

دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم پایه، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۸

چکیده

تعیین اشباع آب یکی از مهم‌ترین پارامترهای مخزنی جهت تعیین حجم هیدروکربن درجا است که باید با دقت بالا محاسبه شود. در این مطالعه پس از آنکه تصحیحات لازم بر روی مغزه‌های پایه آبی سازندهای کنگان و دالان صورت گرفت، به روش آزمایش دین‌استارک اشباع آب مغزه محاسبه گردید. پس از اندازه‌گیری‌هایی الکتریکی و تعیین ضرایب آرچی بر روی مغزه، مقادیر اشباع آب از مدل‌های الکتریکی آرچی، واکسمن اسمیت، آب دوگانه و آرچی-آب دوگانه در نرم‌افزار ژئولاگ ۷ محاسبه شد. برای تعمیم اشباع آب به سایر چاه‌های این میدان، سه مدل رخساره‌ای با روش خوشه‌بندی چند کیفیتی بر پایه نمودار تولید شد و در یکی از میداین بخش مرکزی خلیج فارس اعمال شد. سپس در کل چاه اختلاف میانگین اشباع آب بین روش آزمایش دین‌استارک و مدل‌های الکتریکی در ۳ نوع مدل رخساره‌ای مجزا اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که در هر سه مدل رخساره‌ای ایجاد شده، مقادیر میانگین اشباع آب محاسبه شده از معادلات، نسبت به اشباع آب محاسبه شده از روش آزمایش دین‌استارک بالاتر هستند. از مقایسه بین مدل‌های رخساره‌ای مشخص شد مدل رخساره‌ای که براساس لاگ‌های ورودی مقاومت الکتریکی، صوتی، نوترون و چگالی ایجاد شد، کمترین اختلاف میانگین اشباع آب آزمایش دین‌استارک با مدل‌های الکتریکی را نشان داد. از مقایسه میانگین اشباع آب در روش دین‌استارک و مدل‌های الکتریکی بین رخساره‌های الکتریکی یک مدل براساس لاگ‌های ورودی آن، نتیجه‌گیری شد که پارامترهای پتروفیزیکی تخلخل، زمان عبور موج صوتی، حجم شیل و چگالی برخلاف مقاومت الکتریکی رابطه مستقیم با کاهش اختلاف میانگین اشباع آب دارند، اما سنگ‌شناسی روی اختلاف میانگین اشباع آب بین روش دین‌استارک با مدل‌های الکتریکی تأثیر کمتری دارد. در نتیجه جهت انتخاب نمونه برای تعیین ضرایب آرچی، استفاده از این روش تعیین رخساره الکتریکی با لاگ‌های ورودی آن جهت تخمین اشباع آب مناسب است.

کلمات کلیدی: مدل الکتریکی، آرچی_ آب دوگانه، توان اشباع، دین‌استارک، رخساره الکتریکی

*مسئول مکاتبات

vtavakoli@ut.ac.ir

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2020.4221.2912)

مقدمه

زیرسطحی در میدان‌های نفتی و گازی می‌باشند. از تلفیق لاگ‌ها می‌توان رخساره الکتریکی^۳ را شناسایی کرد. واژه رخساره‌های الکتریکی ابتدا توسط سرا و ابوت به صورت مجموعه‌ای از پاسخ‌های لاگ‌ها که سبب تفکیک یک لایه یا چینه از دیگر لایه‌ها می‌شود، تعریف گردید [۱۵]. روش‌های مختلفی برای دسته‌بندی پاسخ لاگ‌ها جهت تعیین رخساره‌های الکتریکی وجود دارد که یکی از دقیق‌ترین آن‌ها، استفاده از روش خوشه‌سازی چند کیفیتی بر پایه نمودار^۴ است که توسط یو و رایبلر [۱۶] ارائه شده است. برای تعمیم اشباع آب مغزه از یک چاه به کل میدان، نیاز به اعتبارسنجی مقادیر اشباع آب از مدل‌های الکتریکی (آرچی، واکسمن اسمیت، آب دوگانه، آرچی - آب دوگانه) با مقادیر اشباع آب مغزه است. تعمیم مدل‌های اشباع آب برای استفاده در توالی‌هایی از چاه که فاقد مغزه هستند، به وسیله رخساره الکتریکی انجام می‌شود. هدف از این مطالعه، شناسایی داده‌های مؤثر چاه‌پیمایی در محاسبه اشباع آب از روش آرچی در مقایسه با آزمایش دین‌استارک است. همچنین، دقیق‌ترین روش تعیین رخساره الکتریکی برای محاسبه دقیق ضرایب آرچی برای نمونه‌های مخزن ارائه می‌گردد. برای دستیابی به این هدف در کل توالی چاه مورد مطالعه، رخساره الکتریکی تعیین گردید و سپس در هر رخساره، میانگین اشباع آب در روش آزمایش دین‌استارک و مدل‌های الکتریکی محاسبه شد. از اهداف دیگر این تحقیق، تعیین اختلاف اشباع آب از آزمایش دین‌استارک و مدل الکتریکی به منظور شناسایی دقت اشباع آب مدل‌های الکتریکی در سازندهای کربناته است. این پژوهش بهینه‌ترین روش تعیین رخساره الکتریکی براساس لاگ‌های ورودی، جهت محاسبه دقیق اشباع آب و ضرایب آرچی را ارائه می‌دهد.

مخازن کربناته دارای ناهمگنی بیشتری نسبت به مخازن آواری هستند که این ناهمگنی باعث عدم قطعیت در محاسبه پارامترهای پتروفیزیکی در مخازن کربناته شده است [۱ و ۲]. یکی از مهم‌ترین مسائل در صنعت نفت، محاسبه صحیح اشباع آب در بالای مرز آب-نفت سازند برای محاسبه هیدروکربن درجا است. پیش‌بینی میزان اشباع آب به دلیل پیچیدگی و ناهمگنی مخازن کربناته، همواره امری بسیار دشوار بوده است. از طرفی، کارشناسان سعی دارند روش‌های مختلفی را به منظور محاسبه دقیق اشباع آب در سازندهای کربناته بیابند. روش‌های معمول برای محاسبه اشباع آب در صنعت نفت، استفاده مستقیم از مغزه و اندازه‌گیری حجم آب توسط دستگاه دین‌استارک^۱ و محاسبه اشباع‌شدگی به صورت غیرمستقیم با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی بر مبنای رابطه آرچی^۲ یا روابط مشتق‌شده از آن است. در سال‌های گذشته مطالعات بسیاری بر روی نگارهای چاه‌پیمایی و تصحیحات مربوطه و فرمول‌های اشباع‌شدگی آب، به خصوص معادله آرچی، به عنوان یک معادله اساسی به منظور محاسبه اشباع‌شدگی آب در عمق‌های مختلف چاه صورت گرفته است [۳]. پارامترهای لازم برای محاسبه اشباع‌شدگی آب با استفاده از داده‌های چاه‌پیمایی، به عوامل و شرایط مختلف حساس بوده و دقت این روش در شرایط مختلف موضوع بحث‌های بسیاری بوده است [۴-۱۰]. از نمونه‌های مغزه توسط آزمایش دین‌استارک (به دلیل دقت بالا در نتایج) به منظور محاسبه اشباع‌شدگی آب در نقاط مختلف مخازن هیدروکربوری استفاده می‌شود [۱۱]. روش آزمایش دین‌استارک، به نمونه پلاگ آسیب نمی‌زند و اشباع آب محاسبه شده از مغزه توسط آزمایش دین‌استارک به دلیل صحت آن همواره از روش‌های اصلی برای محاسبه اشباع آب بوده است [۱۲-۱۴].

لاگ‌ها امروزه یکی از منابع اصلی تهیه اطلاعات

1. Dean Stark

2. Archie

3. Electrofacies

4. Multi Resolution Graph-based Clustering (MRGC)

K3 و K4 تقسیم‌شده است در حالی که دالان پایینی، K5 نام‌گذاری شده و توسط یک ناپیوستگی بر روی سازند فراقون قرار گرفته است [۲۳ و ۲۴]. داشتن ناهمگنی بسیار زیاد مهم‌ترین ویژگی سازندهای کنگان و دالان است که منجر به مطبق‌شدگی مخزن در میدان مورد مطالعه شده است [۱۹ و ۲۵]. لایه‌های انیدریتی که ضخامت کمی دارند به‌عنوان منشأ مطبق‌شدگی در این سازندها هستند [۱۹]. در این مطالعه، بر واحدهای مخزنی K1, K2, K3, K4 در بخش کنگان پایینی و قسمت فوقانی سازند دالان در یکی از میداین بخش مرکزی خلیج فارس تمرکز شده است (شکل ۱).

مواد و روش‌ها

این تحقیق بر روی سازندهای پرمین-تریاس (کنگان-دالان) در یک چاه از یکی از میداین گازی بخش مرکزی خلیج فارس انجام شده است. در آزمایش آنالیز معمول مغزه از ۲۷۰ m توالی، در مجموع ۱۲۵۳ اندازه‌گیری تخلخل و تراوایی انجام شده و ۱۳۰۸ مقطع نازک در همان عمق از این چاه از واحدهای K1 و K2 (سازند کنگان)، K3 و K4 (سازند دالان) تهیه شد.

مقایسه مدل‌های مختلف با داده‌های لاگ متفاوت، نقش هریک از این داده‌ها را جهت محاسبه دقیق اشباع آب در چاه‌های فاقد مغزه مشخص نموده است.

زمین‌شناسی و چینه‌شناسی

سازندهای کنگان و دالان (معادل آن‌ها در صفحه عربی سازند خوف^۱) به سن پرمین-تریاس در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. این سازندها شامل فواصل تبخیری، کربناتی است که بیش از ۶۰۰ m در مناطق ساحلی ایران ضخامت دارد و ضخامت این سازندها در مناطق دور از ساحل خلیج فارس به بیش از ۶۰۰ m می‌رسد [۱۷]. در ایران سازندهای کنگان و دالان مخازن گازی بسیار بزرگی را تشکیل می‌دهند. این سازندها به پنج واحد مخزنی شامل K1 تا K5 تقسیم می‌شوند. سازند کنگان به سن تریاس به واحدهای مخزنی K1 و K2 تقسیم‌شده است. سازند شیلی دشتک پوش‌سنگ سازند کربناته کنگان را تشکیل داده است [۱۸ و ۱۹]. سازند دالان به عضوهای کربنات بالایی و پایینی تقسیم می‌شود که توسط لایه انیدریتی به نام نار جدا شده‌اند [۲۰-۲۲]. سازند دالان فوقانی به واحدهای مخزن



شکل ۱ الف) موقعیت جغرافیایی حوضه مرکزی خلیج فارس [۲۵] (منطقه مورد مطالعه) و ب) چینه‌شناسی سازندهای دالان و کنگان در این منطقه

همه آنها معادله آرچی است.

$$S_w = \left[\frac{aR_w}{(\phi^m Rt)} \right] \left(\frac{1}{n} \right) \quad (1)$$

که در آن a ضریب پیچاپیچی^۴ m توان سیمانی شدن^۵، n توان اشباع، R_t مقاومت الکتریکی سازند و R_w مقاومت الکتریکی آب و ϕ تخلخل است. از ۳ ترکیب گوناگون از لاگ‌های پتروفیزیکی به‌عنوان ورودی برای مدل‌های رخساره‌ای استفاده شد و با استفاده از روش خوشه‌سازی چند کیفیتی بر پایه نمودار در نرم‌افزار ژئولاگ ۷ رخساره‌های الکتریکی در توالی مخزن مورد مطالعه شناسایی گردید. علت انتخاب روش MRGC جهت تعیین رخساره الکتریکی به جهت دقت آن نسبت به سایر روش‌های دسته‌بندی داده‌ها است [۲۸]. بعد از ایجاد مدل‌های رخساره‌ای در هر رخساره الکتریکی، میانگین اشباع آب در روش آزمایش دین‌استارک و مدل الکتریکی برای کل چاه و هر رخساره به طور جداگانه محاسبه شد. پس از مقایسه اختلاف میانگین اشباع آب مدل‌های الکتریکی با میانگین اشباع آب دین‌استارک در هر رخساره الکتریکی، پارامترهای پتروفیزیکی مؤثر در اختلاف اشباع آب بین دو روش مشخص شد. پس از مقایسه سه مدل رخساره‌ای، بهترین مدل رخساره‌ای از لحاظ دقت در محاسبه پارامترهای آرچی و تعیین اشباع آب مشخص گردید.

نتایج

تعیین رخساره الکتریکی

با استفاده از روش خوشه‌بندی گرافیکی به تعیین رخساره الکتریکی در میدان مورد نظر پرداخته شده است. با توجه به اینکه دقت رخساره الکتریکی بستگی به لاگ‌های ورودی آن دارد [۲۹] از سه مدل رخساره‌ای با لاگ‌های ورودی مختلف، رخساره الکتریکی تعیین شد.

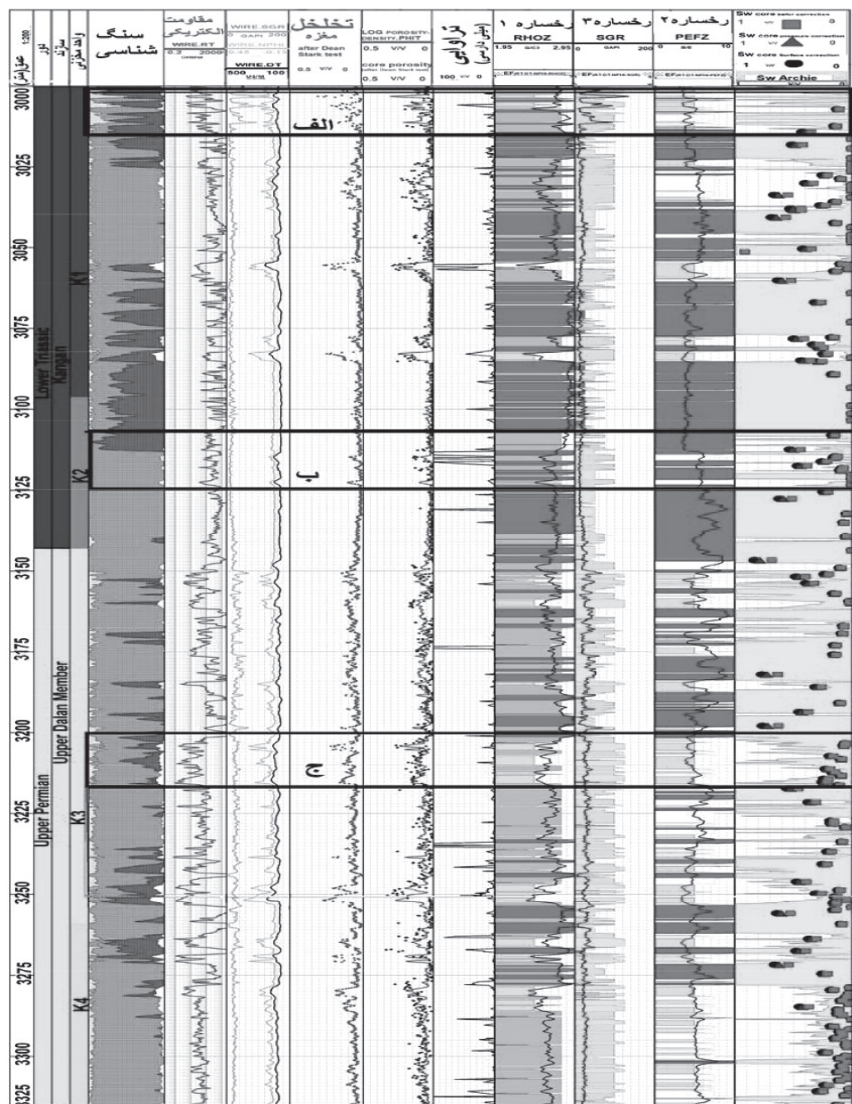
از این تعداد، ۱۶۰ پلاگ برای آزمایش دین‌استارک انتخاب گردید. برای تشخیص کلسیت از دولومیت، مقاطع نازک توسط آلیزارین رد-اس رنگ‌آمیزی شد. در آزمایشگاه پلاگ‌ها به سرعت درون دستگاه دین‌استارک قرار گرفتند و پس از جوشاندن حلال (تولون) تا در دمای ۱۱۰°C، در معرض استخراج مایعات قرار گرفتند [۲۶]. در بخش کاندانسور آب چگالش‌شده در ظرف مدرج کالیبره‌شده، جمع‌آوری شدند و پس از حذف نمک‌های باقی‌مانده درون فضای خالی موجود در پلاگ‌ها به‌وسیله محلول‌های شیمیایی کلروفرم-متانول، اندازه‌گیری تخلخل از آزمایش تخلخل هلیوم انجام شد و اشباع آب محاسبه گردید. در این پژوهش از نرم‌افزار Geolog7 و Excel برای محاسبات و رسم شکل‌ها استفاده شده است.

داده‌های لاگ در این مطالعه شامل لاگ‌های مقاومت الکتریکی (RT)، نوترون (NPHI)، صوتی (DT)، سنگ‌شناسی (PEF)، چگالی (RHOZ) و گاما (SGR) در همان عمق دارای مغزه است. مقادیر تخلخل از لاگ الکتریکی نوترون-چگالی پس از کالیبره کردن با داده‌های تخلخل مغزه (آزمایش تخلخل هلیوم) مورد استفاده قرار گرفت [۲۷]. از آزمایش آنالیز ویژه مغزه در مجموع ۵۸ نمونه آزمایش فاکتور مقاومت سازند^۱ و ۲۳ نمونه آزمایش شاخص مقاومت سازند^۲ برای تعیین ضرایب آرچی در همان عمق از این چاه اندازه‌گیری شد. مقاومت الکتریکی آب سازند نیز پس از اندازه‌گیری غلظت کلرید در مغزه اندازه‌گیری گردید. پس از اندازه‌گیری‌های الکتریکی، مقادیر توان سیمان‌شدگی و توان اشباع^۳ به ترتیب از رسم نمودار لگاریتمی-لگاریتمی تخلخل در مقابل فاکتور مقاومت سازند و نمودار لگاریتمی-لگاریتمی اشباع آب در مقابل شاخص مقاومت سازند و با روش کمترین برآزش مربعات خط به‌دست آمد. پس از آن اشباع آب طبق معادله آرچی محاسبه شد (رابطه ۱). محاسبه اشباع آب در سایر مدل‌های الکتریکی دارای پارامترهای بیشتری هست که اساس

1. Formation Resistivity Factor
2. Resistivity Index
3. Saturation Exponents
4. Tortuosity Factor
5. Cementation Exponents

توالی چاه اعمال شد و توالی مخزن مورد مطالعه به بخش‌های مختلفی براساس مدل مورد استفاده تقسیم‌بندی گردید. شکل ۲ توالی چاه پس از اعمال مدل رخساره‌ای را نشان می‌دهد که لاگ ورودی تفکیک‌کننده هر مدل رخساره‌ای، روی ستون همان مدل رخساره‌ای نمایش داده شده است. در این شکل همچنین نحوه پراکندگی و توزیع عمقی لاگ‌های الکتریکی در ستون‌های شماره ۶ و ۷ و توزیع تخلخل و تراوایی مغزه در ستون‌های ۸ و ۱۰ نشان داده شده است.

برای شناخت پارامترهای پتروفیزیکی مؤثر در اختلاف اشباع آب، از لاگ‌های مقاومت الکتریکی، صوتی، نوترون و چگالی برای مدل رخساره‌ای ۱ با ۷ رخساره الکتریکی، از لاگ‌های مقاومت الکتریکی، صوتی، نوترون و سنگ‌شناسی برای مدل رخساره‌ای ۲ با ۵ رخساره الکتریکی و برای مدل رخساره‌ای ۳ با ۹ رخساره الکتریکی از لاگ‌های مقاومت الکتریکی، صوتی، نوترون و گاما برای میدان مورد مطالعه استفاده گردید. سه مدل رخساره‌ای تهیه شده با روش چند کیفیتی بر پایه نمودار در



شکل ۲ مقایسه اشباع آب آزمایش دین‌استارک با مدل الکتریکی در رخساره‌های الکتریکی براساس لاگ‌های الکتریکی ورودی. مدل رخساره‌ای ۱ براساس لاگ‌های مقاومت الکتریکی، صوتی، نوترون و چگالی در ستون شماره ۱۱، مدل رخساره‌ای ۳ براساس لاگ‌های الکتریکی مقاومت الکتریکی، صوتی، نوترون و گاما در ستون شماره ۱۲ و مدل رخساره‌ای ۲ براساس لاگ‌های الکتریکی مقاومت الکتریکی، صوتی، نوترون و سنگ‌شناسی در ستون شماره ۱۳ قرار دارند.

مقایسه اشباع آب مدل‌های الکتریکی با مغزه در هر رخساره الکتریکی

صوتی، نوترون و سنگ‌شناسی در جدول ۲ و مدل رخساره الکتریکی شماره ۳ براساس لاگ‌های ورودی مقاومت الکتریکی، صوتی، نوترون و گاما در جدول ۳ ثبت شدند و همچنین، میانگین لاگ‌های ورودی در هر یک از رخساره‌ها اندازه‌گیری و ثبت شد. بهترین رخساره الکتریکی کمترین اختلاف میانگین اشباع آب بین روش دین‌استارک و مدل الکتریکی (آرچی و مدل‌های مشتق‌شده از آن) را دارد. برای تشخیص پارامترهای پتروفیزیکی مؤثر، اشباع آب براساس مدل‌های گوناگون در هر رخساره الکتریکی محاسبه شد.

برای تشخیص بهترین رخساره الکتریکی جهت پیش‌بینی اشباع آب صحیح در حجم مخزن، مقادیر میانگین اشباع آب در سه مدل رخساره‌ای محاسبه شد. مقادیر میانگین اشباع آب دین‌استارک با مدل‌های الکتریکی به‌ترتیب در مدل رخساره الکتریکی شماره ۱ براساس لاگ‌های ورودی مقاومت الکتریکی، صوتی، نوترون و چگالی در جدول ۱ و مدل رخساره الکتریکی شماره ۲ براساس لاگ‌های ورودی مقاومت الکتریکی،

جدول ۱ میانگین اشباع آب آزمایش دین‌استارک و مدل‌های الکتریکی در رخساره‌های الکتریکی در سازندهای کنگان، دالان براساس لاگ‌های ورودی صوتی، مقاومت الکتریکی، نوترون و چگالی و میانگین آنها در هر رخساره الکتریکی

میانگین لاگ‌های الکتریکی ورودی				میانگین اشباع آب آزمایش دین‌استارک و مدل‌های الکتریکی						
RT (OHMM)	DT (US/M)	NPHI (v/v)	RHOZ (G/C3)	آرچی با ضرایب آزمایشگاهی	آرچی با ضرایب ثابت (۲،۲،۱)	آب دوگانه	واکسمن-اسمیت	آرچی-آب دوگانه	دین‌استارک	شماره رخساره
۸/۰۸	۱۹۷/۲۲	۰/۱۴	۲/۷۰	۰/۳۹	۰/۴۶	۰/۳۹	۰/۳۷	۰/۶۰	۰/۱۲	رخساره شماره ۴
۶۴/۵۵	۱۷۳/۴۳	۰/۰۲	۲/۵۷	۰/۷۶	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۷۴	۰/۵۹	۰/۱۷	رخساره شماره ۶
۱۴۹۰/۸۶	۱۶۳/۳۶	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۸۰	۰/۷۴	۰/۸۰	۰/۷۳	۰/۹۲	۰/۱۸	رخساره شماره ۷
				۰/۶۵	۰/۶۶	۰/۶۵	۰/۶۱	۰/۷۰	۰/۱۵	میلگین

جدول ۲ میانگین اشباع آب آزمایش دین‌استارک و مدل‌های الکتریکی در رخساره الکتریکی در سازندهای کنگان، دالان براساس لاگ‌های الکتریکی صوتی، مقاومت الکتریکی، نوترون و سنگ‌شناسی (PEFZ) و میانگین آنها در هر رخساره الکتریکی

میانگین لاگ‌های الکتریکی ورودی				میانگین اشباع آب آزمایش دین‌استارک و مدل‌های الکتریکی						
RT (OHMM)	DT (US/M)	NPHI (v/v)	PEFZ (B/E)	آرچی با ضرایب آزمایشگاهی	آرچی با ضرایب ثابت (۲،۲،۱)	آب دوگانه	واکسمن-اسمیت	آرچی-آب دوگانه	دین‌استارک	شماره رخساره
۱۴/۴۷	۱۹۶/۲۹	۰/۱۱	۴/۵۸	۰/۴۷	۰/۵۲	۰/۴۷	۰/۴۵	۰/۶۱	۰/۱۱	رخساره شماره ۳
۵۶/۸	۱۷۹/۶۸	۰/۰۲	۵/۳	۰/۷۶	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۷۳	۰/۴۲	۰/۱۲	رخساره شماره ۴
۷۴۵/۱	۱۶۲/۵۱	۰	۳/۲	۰/۸۳	۰/۷۹	۰/۸۳	۰/۷۸	۰/۸۹	۰/۱۹	رخساره شماره ۵
				۰/۶۹	۰/۷۰	۰/۶۹	۰/۶۵	۰/۶۴	۰/۱۴	میلگین

جدول ۳ میانگین اشباع آب آزمایش دین‌استارک و مدل‌های الکتریکی در رخساره الکتریکی در سازندهای کنگان، دالان براساس لاگ‌های الکتریکی صوتی، مقاومت الکتریکی، نوترون و گاما و میانگین آنها در هر رخساره الکتریکی

میانگین لاگ‌های الکتریکی ورودی				میانگین اشباع آب آزمایش دین‌استارک و مدل‌های الکتریکی						
RT (OHMM)	DT (US/M)	NPHI (v/v)	SGR (GAPI)	آرچی با ضرایب آزمایشگاهی	آرچی با ضرایب ثابت (۲،۲،۱)	آب دوگانه	واکسمن-اسمیت	آرچی-آب دوگانه	دین استارک	شماره رخساره
۲۸۸۹/۹۴	۱۵۷/۶۵	۰	۱۳/۵۸	۰/۷۶	۰/۶۸	۰/۷۶	۰/۶۶	۱/۰۰	۰/۲۰	رخساره شماره ۲
۵۹۴/۵۴	۱۶۴/۳۵	۰	۲۴/۲	۰/۸۲	۰/۸۱	۰/۸۲	۰/۸۰	۰/۹۲	۰/۲۱	رخساره شماره ۳
۱۳۴/۶۵	۱۶۳/۴۶	۰/۱۰	۲۰	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۵	۰/۸۰	۰/۱۴	رخساره شماره ۴
۷۵/۸۱	۱۷۸/۸۲	۰/۳۰	۲۲/۵۲	۰/۶۸	۰/۶۷	۰/۶۸	۰/۶۳	۰/۶۵	۰/۱۲	رخساره شماره ۵
۸/۵۷	۱۹۲/۳۱	۱/۱۰	۳۲/۳۹	۰/۴۲	۰/۴۹	۰/۴۲	۰/۴۰	۰/۶۰	۰/۱۱	رخساره شماره ۶
۷/۰۶	۲۸۱/۳۷	۱۷/۰	۷۵/۰۹	۰/۶۸	۰/۷۳	۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۴۹	۰/۰۰	رخساره شماره ۹
				۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۶۷	۰/۷۱	۰/۱۳	میلگین

و محاسبه شیب بهترین خط برازش، مقدار توان اشباع در کل چاه و سپس در هر رخساره الکتریکی محاسبه گردید [۳] [۲۷] (شکل ۳). پس از تعیین ضرایب آرچی مقادیر میانگین اشباع آب توسط رابطه آرچی در کل چاه و در هر رخساره الکتریکی محاسبه شد.

اشباع آب مغزه پایه آبی^۲

آب استخراجی در دستگاه دین‌استارک، آب مقطر در فشار و دمای آزمایشگاهی است که باید حجم آب تصحیح (افزایش) یابد تا شرایط فشار، دما، شوری آب و ضریب انبساط گاز در مخزن را نشان دهد. روش آزمایش دین‌استارک، نمک را در پلاگ باقی می‌گذارد. بنابراین، تخلخلی که بعد از آزمایش دین‌استارک گرفته شده دست کم گرفته می‌شود و به افزایش نادرست اشباع آب محاسبه شده منجر می‌شود که این امر ضرورت تصحیح تخلخل برای تعیین اشباع آب را نشان می‌دهد [۱۲].

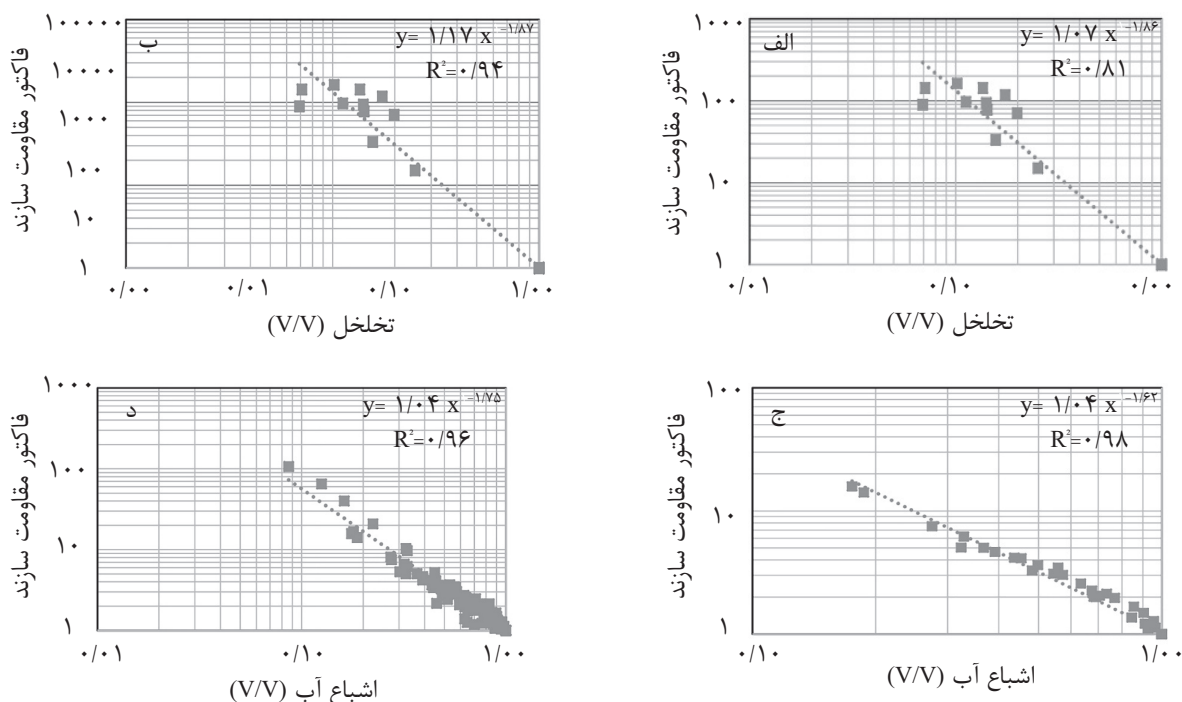
سپس در هر رخساره الکتریکی اختلاف میانگین اشباع آب مدل‌های الکتریکی با آزمایش دین‌استارک برای تعیین پارامترهای پتروفیزیکی مؤثر در دقت اشباع آب محاسبه شد.

فاکتور و شاخص مقاومت سازند

در آزمایشگاه برای تعیین مقادیر توان سیمان‌شدگی و تعیین رابطه بین تخلخل و فاکتور مقاومت سازند بر روی پلاگ‌ها مقدار تخلخل و مقاومت الکتریکی نمونه اشباع اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از نمودار لگاریتمی- لگاریتمی فاکتور مقاومت سازند در مقابل تخلخل و محاسبه شیب بهترین خط برازش، مقدار توان سیمان‌شدگی در کل چاه و سپس، در هر رخساره الکتریکی محاسبه گردید. برای تعیین مقادیر توان اشباع و تعیین رابطه بین شاخص مقاومت سازند و اشباع آب در آزمایشگاه بر روی پلاگ‌ها مقدار مقاومت سازند^۱ در اشباع‌های مختلف اندازه‌گیری شد. سپس از نمودار لگاریتمی- لگاریتمی شاخص مقاومت سازند در مقابل اشباع آب

1. True Resistivity

2. Water-base-core



شکل ۳ نمونه‌ای از نمودار لگاریتمی- لگاریتمی تخلخل در مقابل فاکتور مقاومت سازند الف) رخساره شماره ۴ براساس لاگ‌های مقاومت الکتریکی، صوتی، نوترون، چگالی، ب) نمودار فاکتور مقاومت سازند در برابر تخلخل از کل داده‌های چاه ج) نمودار لگاریتمی- لگاریتمی اشباع آب در برابر شاخص مقاومت سازند در رخساره شماره ۴ که براساس لاگ‌های مقاومت الکتریکی، صوتی، نوترون و چگالی تعیین شده است، د) نمودار شاخص مقاومت سازند در برابر اشباع آب از کل داده‌ها در چاه مورد مطالعه

میانگین اشباع آب از مدل‌های الکتریکی آرچی با ضرایب ثابت (۲، ۲، ۱)، آرچی با ضرایب متغیر (توان سیمان‌شدگی و توان اشباع متغیر براساس کار آزمایشگاهی)، واکسمن-اسمیت [۳۱]، آب دوگانه [۳۲] و مدل الکتریکی آرچی- آب دوگانه (توان سیمان‌شدگی و توان اشباع متغیر براساس کار آزمایشگاهی) در سه مدل رخساره الکتریکی تعیین و مقایسه شد (شکل ۴). نتایج کمی اختلاف میانگین اشباع آب مدل‌های الکتریکی از دین‌استارک در جدول ۴ ارائه شده است.

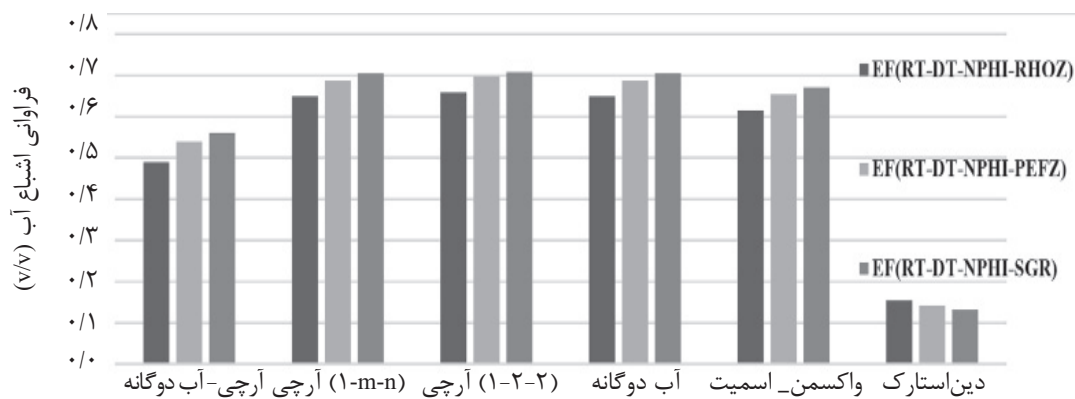
بحث و نتایج

از مقایسه میانگین اشباع آب مدل‌های الکتریکی با مغزه در مدل‌های رخساره‌ای جهت شناخت مدل رخساره‌ای بهینه اشباع آب استفاده شد.

در مطالعات پیشین ضریب تصحیح جابه‌جایی آب به وسیله هجوم فیلتره گل^۱ به مغزه در حین مغزه‌گیری و همچنین، تصحیح نمک‌های باقی‌مانده در دستگاه دین‌استارک و اثر کاهش فشار روباره بر فاز آب، اندازه‌گیری شده بود که در این مطالعه نیز از همان ضرایب برای تصحیح مقادیر اشباع آب به شرایط اشباع آب مخزن استفاده شد [۱۴ و ۲۵]. ستون آخر در شکل ۲ اشباع آب دین‌استارک را قبل و بعد از تصحیح انجام گرفته نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به تأیید اعتبار داده‌های مغزه (دین‌استارک) در مطالعات پیشین [۱۲-۱۴ و ۳۰] در این مطالعه نیز داده‌های مغزه تصحیح‌شده (دین‌استارک) مبنای اعتبارسنجی سایر مدل‌های الکتریکی قرار گرفت. سپس میانگین اشباع آب در روش آزمایش دین‌استارک در کل داده‌ها و در هر رخساره الکتریکی محاسبه شد.

مقایسه میانگین اشباع آب مدل‌های الکتریکی با مغزه در مدل‌های رخساره‌ای

میانگین اشباع آب از آزمایش دین‌استارک با



شکل ۴ مقایسه میانگین اشباع آب آزمایش دین استارک با میانگین اشباع آب مدل‌های الکتریکی (آرچی با ضرایب آزمایشگاهی، آرچی با ضرایب ثابت، آرچی-آب دوگانه، واکسمن_اسمیت، آب دوگانه) در سه مدل رخساره الکتریکی

جدول ۴ میانگین اختلاف اشباع مدل‌های الکتریکی از دین استارک در مدل‌های رخساره ای در سازندهای کنگان، دالان

نام مدل رخساره الکتریکی	آرچی (1-m-n)	آرچی (1-2-2)	آرچی-آب دوگانه	آب دوگانه	واکسمن_اسمیت	میانگین
EF1(RT-DT-NPHI-RHOZ)	0.49	0.50	0.34	0.49	0.46	0.46
EF2(RT-DT-NPHI-PEFZ)	0.55	0.56	0.50	0.55	0.51	0.53
EF3(RT-DT-NPHI-SGR)	0.57	0.58	0.54	0.57	0.54	0.56

می‌آید شامل حجم آب آزاد و مقداری حجم آب چسپیده 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 [۳۳]. اما در روش آرچی کل آب موجود در ساختار سنگ محاسبه می‌گردد که این باعث افزایش اشباع آب آرچی نسبت به روش دین استارک شده است.

نتایج ارائه شده در جدول ۴ نشان می‌دهند که اگر براساس لاگ‌های مقاومت الکتریکی، صوتی، نوترون و چگالی تعیین رخساره الکتریکی انجام گیرد، کمترین اختلاف میانگین در مقادیر اشباع آب مدل‌های الکتریکی از اشباع آب مغزه (دین استارک) به دست می‌آید. تفاوت در اختلاف مقادیر اشباع آب آرچی از روش دین استارک با توجه به یکسان بودن ورودی سه لاگ مقاومت الکتریکی، صوتی و نوترون در هر سه مدل رخساره‌ای بستگی به لاگ ورودی چهارم دارد. بنابراین، چگالی نسبت به سنگ‌شناسی و حجم شیل تأثیر بیشتری روی کاهش اختلاف

این مقایسه نشان داد که در سازندهای کربناته کنگان و دالان به علت ناهمگنی زیاد، محاسبه اشباع آب از معادله آرچی با توان اشباع و توان سیمان‌شدگی و فاکتور پیچاپیچی ثابت (۲،۲،۱) در کل چاه و بدون در نظر گرفتن رخساره الکتریکی منجر به اختلاف زیادی با میانگین اشباع آب از آزمایش دین استارک (صحت در اشباع آب) شده است. برای کاهش عدم اطمینان اشباع آب از مدل‌های الکتریکی آرچی-آب دوگانه، مقادیر اشباع آب در هر رخساره الکتریکی با ضرایب توان اشباع و توان سیمانی شدن مربوط به همان رخساره الکتریکی محاسبه شد. این کار باعث شد مقادیر میانگین اشباع آب از مدل‌های الکتریکی آرچی-آب دوگانه بسیار به مقادیر میانگین اشباع آب مغزه (دین استارک) در کل مدل رخساره‌ای نزدیک‌تر شود (شکل ۴). با این حال مقادیر میانگین اشباع آب آزمایش دین استارک کمتر از میانگین اشباع آب مدل‌های الکتریکی در هر ۳ نوع مدل رخساره الکتریکی است که علت امر ناشی از این است که در آنالیز مغزه، حجم آبی که توسط دستگاه آزمایش دین استارک به دست

میانگین اشباع آب مدل الکتریکی با اشباع آب از مغزه (دین استارک) می‌شود، اما سنگ‌شناسی بر روی صحت اشباع آب تأثیر کمی دارد (جدول ۲). مدل رخساره‌ای ۳ که براساس لاگ‌های الکتریکی مقاومت الکتریکی، صوتی، نوترون و گاما ایجاد شد دارای ۹ رخساره الکتریکی برای سازندهای کنگان و دالان می‌باشد (شکل ۲). نتایج ارائه شده در جدول ۳ نشان می‌دهند که رخساره شماره ۶ و ۹ کمترین اختلاف میانگین اشباع آب از مدل‌های الکتریکی با مقایسه با اشباع آب دین استارک را دارند و پس از آن رخساره شماره ۵ با افزایش اختلاف میانگین و در نهایت رخساره‌های شماره ۲، ۳ و ۴ بیشترین اختلاف میانگین اشباع آب از مدل‌های الکتریکی در مقایسه با اشباع آب دین استارک را نشان می‌دهند. رخساره‌های ۱ و ۷ به دلیل تعداد کم داده در این مقایسه مورد ارزیابی و مقایسه قرار دادند. رخساره‌های ۱، ۲، ۳ و ۵ به دلیل تعداد کم داده در این مقایسه مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. رخساره شماره ۶ و ۹ دارای میزان گاما، تخلخل و زمان عبور موج صوتی بالا و مقاومت الکتریکی بسیار پایین‌تری نسبت به رخساره‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ هستند. بنابراین، افزایش حجم شیل و تخلخل و زمان عبور موج صوتی و کاهش مقاومت الکتریکی باعث کاهش اختلاف میانگین اشباع آب مدل الکتریکی با اشباع آب از مغزه (دین استارک) می‌شود که حجم شیل تأثیر مستقیمی بر روی اختلاف میانگین اشباع آب دارد (جدول ۳).

بررسی دقت محاسبه اشباع آب

در عمق‌های ۳۰۰۰ تا ۳۰۱۵ m از سازندهای مورد مطالعه، لاگ گاما با مقادیر بالا ثبت شده است. در این توالی به علت وجود زمینه رسی رسانا مقادیر مقاومت الکتریکی بسیار پایین ثبت شده است. بنابراین در این عمق‌ها، مقدار اشباع آب محاسبه شده از مدل‌های آرچی بیش از حد محاسبه شده و دارای عدم اطمینان می‌باشد. در این توالی بهتر است از اشباع آب مغزه یا از معادلات شیلی که در آن ظرفیت تبادل کاتیونی لحاظ شده است، استفاده شود (ناحیه الف در شکل ۲).

میانگین اشباع آب مدل الکتریکی از اشباع آب مغزه (دین استارک) دارد (شکل ۴). برای تشخیص پارامترهای پتروفیزیکی مؤثر بر اشباع آب مدل‌های رخساره‌ای براساس لاگ‌های ورودی ایجاد شد. در مدل رخساره‌ای ۱ که براساس لاگ‌های مقاومت الکتریکی، صوتی، نوترون و چگالی ایجاد شد دارای ۷ رخساره الکتریکی برای سازندهای کنگان و دالان می‌باشد (شکل ۲). نتایج ارائه شده در جدول ۱ نشان می‌دهند که رخساره شماره ۴ کمترین اختلاف میانگین اشباع آب از مدل‌های الکتریکی در مقایسه با اشباع آب دین استارک را دارد و پس از آن رخساره شماره ۶، ۷ اختلاف میانگین بیشتری نشان دادند. رخساره‌های ۱، ۲، ۳ و ۵ به دلیل تعداد کم داده در این مقایسه مورد ارزیابی و مقایسه قرار نگرفت. رخساره شماره ۴ دارای تخلخل، چگالی و زمان عبور موج صوتی بالا و مقاومت الکتریکی بسیار پایین‌تری نسبت به رخساره‌های ۶ و ۷ است و بنابراین، افزایش تخلخل، چگالی و زمان عبور موج صوتی و کاهش مقاومت الکتریکی، باعث کاهش اختلاف میانگین اشباع آب مدل الکتریکی با اشباع آب از مغزه (دین استارک) شد (جدول ۱). در مدل رخساره‌ای ۲ که براساس لاگ‌های مقاومت الکتریکی، صوتی، نوترون و سنگ شناسی ایجاد شد دارای ۵ رخساره الکتریکی برای سازندهای کنگان و دالان می‌باشد (شکل ۲). نتایج ارائه شده در جدول ۲ نشان می‌دهند که رخساره شماره ۳ کمترین اختلاف میانگین اشباع آب از مدل‌های الکتریکی در مقایسه با اشباع آب دین استارک را نشان می‌دهد و پس از آن رخساره شماره ۴ و ۵ اختلاف میانگین بیشتری نشان دادند. رخساره‌های ۱ و ۲ به دلیل تعداد کم داده در این مقایسه مورد ارزیابی و مقایسه قرار نگرفت. رخساره شماره ۳ تخلخل و زمان عبور موج صوتی بالا و مقاومت الکتریکی بسیار پایین‌تری نسبت به رخساره‌های ۴ و ۵ دارد بنابراین، افزایش تخلخل و زمان عبور موج صوتی و کاهش مقاومت الکتریکی، باعث کاهش اختلاف

رخساره الکتریکی محاسبه گردد، اشباع آب حاصل از مدل‌های الکتریکی بسیار به مقادیر اشباع آب دین‌استارک نزدیک می‌شود. اشباع آب محاسبه شده از معادله آرچی و معادلات شیلی مشتق شده از آن با ضرایب ثابت و متغیر آزمایشگاهی دارای مقادیر میانگین بسیار بالاتری نسبت به اشباع آب محاسبه شده از روش آزمایش دین‌استارک است. توالی‌هایی از این‌چاه که مقادیر میانگین اشباع آب از مغزه (دین‌استارک) با مقادیر اشباع آب مدل الکتریکی آرچی - آب دوگانه دارای اختلاف است، تعیین گردید و علت این اختلاف اشباع آب بین دو روش بیان شد. برای تعمیم مدل‌های اشباع آب تصحیح شده به چاه‌های فاقد مغزه، سه مدل رخساره‌ای با لاگ‌های ورودی متفاوت با روش خوشه‌بندی چند کیفیتی بر پایه نمودار تعیین گردید. از مقایسه بین سه مدل رخساره‌ای مشخص شد مدل‌های رخساره‌ای که براساس لاگ‌های ورودی مقاومت الکتریکی، صوتی، نوترون و چگالی ایجاد می‌شود، کمترین اختلاف اشباع آب مدل‌های الکتریکی در مقایسه با میانگین اشباع آب آزمایش دین‌استارک را نشان می‌دهند. تفاضل میانگین اشباع آب بین مدل‌های الکتریکی با دین‌استارک در این مدل با لاگ‌های ورودی بهینه، ۴۶٪ است که نسبت به مدل رخساره‌ای دوم و سوم به ترتیب ۶٪ و ۹٪ اشباع آب کمتری دارد. بنابراین جهت انتخاب نمونه برای تعیین ضرایب آرچی، این روش تعیین رخساره الکتریکی مناسب است. از مقایسه اختلاف اشباع آب در بین رخساره‌های الکتریکی یک مدل رخساره‌ای، نتیجه‌گیری شد که تخلخل و تراوایی و چگالی برخلاف مقاومت الکتریکی رابطه مستقیم با افزایش صحت اشباع آب دارد. همچنین براساس نوع لاگ ورودی تشکیل‌دهنده هر مدل رخساره‌ای، مشخص شد که سنگ‌شناسی و حجم شیل روی صحت اشباع آب تأثیر کمتری نسبت به چگالی دارد.

افزایش تراوایی سازند منجر به افزایش نفوذ گل پایه آبی به مغزه و در نتیجه کاهش صحت اشباع آب از مغزه می‌شود [۱۲]. در توالی ۳۱۱۰ تا ۳۱۲۰ m از سازند کنگان که تراوایی بالایی دارد، تعیین اشباع آب از مغزه‌های پایه آبی به روش آزمایش دین‌استارک به علت هجوم گل و حجم آب خارج شده در حین فرایند مغزه‌گیری و آوردن مغزه به سطح دارای عدم قطعیت می‌باشد. اما به علت ایجاد سله گل با تراوایی کم روی قسمت خارجی مغزه، میزان نفوذ آب به مغزه و تغییر حجم آب کم است بنابراین بهتر است در توالی‌هایی با تراوایی بالا، محاسبه اشباع آب از مدل آرچی و مدل‌های مشتق شده از آن که از اطمینان بیشتری نسبت به آزمایش دین‌استارک برخوردار است، استفاده گردد (ناحیه ب در شکل ۲).

بعضی از شیل و رس‌ها (ژیپس، اسمکتیت و مونت موریلونیت) مقدار قابل توجهی از آب تبلور در دمای ۸۰-۱۰۵ درجه سانتیگراد از خود خارج می‌کنند [۳۴]. به علت اینکه در دمای نسبتاً کم (۱۰۰ °C) در حضور حلال (تولون) آزمایش دین‌استارک انجام می‌شود مقدار کمی آب هیدروکسیل خارج می‌شود [۳۳] که باعث می‌شود تخلخل مغزه بیش از حد تخمین زده شود. در عمق ۳۲۰۰ تا ۳۲۱۵ m از سازند مورد مطالعه مقادیر تخلخل براساس لاگ پایین‌تر از تخلخل آزمایش مغزه ثبت شده است. در این توالی‌ها مقدار اشباع آب محاسبه شده براساس مدل‌های آرچی و مدل‌های مشتق شده از آن تخمین خیلی بالاتری نسبت به اشباع آب مغزه در همان عمق نشان می‌دهند. بنابراین مقدار بالاتر اشباع آب مدل الکتریکی آرچی نسبت به دین‌استارک به علت محاسبه تخلخل کمتر لاگ الکتریکی نوترون - چگالی نسبت به تخلخل مغزه می‌باشد (ناحیه ج در شکل ۲).

نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان داد که اگر ضرایب آرچی در هر

مراجع

- [1]. Ronchi P, Ortenzi A, Borromeo O, Claps M, Zempolich WG (2010) Depositional setting and diagenetic processes and their impact on the reservoir quality in the late Viséan–Bashkirian Kashagan carbonate platform (Pre-Caspian Basin, Kazakhstan), AAPG Bulletin, 94, 9: 1313–1348.
- [2]. Rustichelli A, Tondi E, Agosta F, Di Celma C, Giorgioni M (2013) Sedimentologic and diagenetic controls on pore-network characteristics of Oligocene–Miocene ramp carbonates (Majella Mountain, central Italy), AAPG Bulletin, 97, 3: 487–524.
- [3]. Archie GE (1942) The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Transactions of the AIME, 146, 01: 54–62.
- [4]. Qin Z, Pan H, Ma H, Konaté AA, Hou M, Luo S (2016) Fast prediction method of Archie's cementation exponent, Journal of Natural Gas Science and Engineering 34: 291–297.
- [5]. Glover PWJ (2017) A new theoretical interpretation of Archie's saturation exponent, Solid Earth, 8: 805–816.
- [6]. Soleymanzadeh A, Jamialahmadi M, Helalizadeh A, Soulgani BS (2018) A new technique for electrical rock typing and estimation of cementation factor in carbonate rocks, Journal of Petroleum Science and Engineering, 166: 381–388.
- [7]. Nazemi M, Tavakoli V, Rahimpour-Bonab H, Hosseini M, Sharifi-Yazdi M (2018) The effect of carbonate reservoir heterogeneity on Archie's exponents (a and m), an example from Kangan and Dalan gas formations in the central Persian Gulf, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 59: 297–308.
- [8]. Hamada GM, Almajed AA, Okasha TM, Algahe AA (2013) Uncertainty analysis of Archie's parameters determination techniques in carbonate reservoirs, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 3: 1, 1–10.
- [9]. Galiuk HS, Saadat K, 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.
- [10]. Worthington PF (2011) The petrophysics of problematic reservoirs, Journal of Petroleum Technology, 63, 12: 88–97.
- [11]. Dean EW, Stark DD (1920) A convenient method for the determination of water in petroleum and other organic emulsions, Industrial & Engineering Chemistry, 12, 5: 486–490.
- [12]. Richardson JG, Holstein ED, Rathmell JJ, Warner HR (1994) Investigation of as-received oil-base-core water saturations from the ivishak reservoir, Brudhoe Bay Field, SPE, 28592: 25–28.
- [13]. Woodhouse R (1987) Problems in sw calibration using oil mud cores and core electrical measurements, The Log Analyst, 28, 3: 289–293.
- [14]. Richardson JG, Holstein ED, Rathmell JJ, Warner Jr HR (1997) Validation of as-received oil-based-core water saturations from Prudhoe Bay, SPE Reservoir Engineering, 12, 01: 31–36.
- [15]. Serra O, Abbott HT (1982) The contribution of logging data to sedimentology and stratigraphy, Society of Petroleum Engineers Journal, 22, 01: 117–131.
- [16]. Ye S.J, Rabiller P (2000) A new tool for electro-facies analysis: multi-resolution graph-based clustering, in SPWLA 41st annual logging symposium, Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- [17]. Alsharhan AS (2006) Sedimentological character and hydrocarbon parameters of the middle Permian to Early Triassic Khuff Formation, united Arab Emirates, GeoArabia, 11, 3: 121–158.
- [18]. Aali J, Rahimpour-Bonab H, Kamali MR (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.
- [19]. Rahimpour-Bonab H (2007) A procedure for appraisal of a hydrocarbon reservoir continuity and quantification of its heterogeneity, Journal of Petroleum Science and Engineering, 58, 1–2: 1–12.
- [20]. Szabo F, Kheradpir A (1978) Permian and Triassic stratigraphy, Zagros basin, south-west Iran, Journal of Petroleum Geology, 1, 2: 57–82.
- [21]. Konyuhov AI, Maleki B (2006) The Persian Gulf Basin: geological history, sedimentary formations, and petroleum potential, Lithology and Mineral Resources, 41, 4: 344–361.
- [22]. Ghazban F (2007) Petroleum geology of the Persian Gulf, Joint publication, Tehran University Press and National Iranian Oil Company, Tehran, .
- [23]. 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.
- [24]. Abdolmaleki J, Tavakoli V (2016) Anachronistic facies in the early Triassic successions of the Persian Gulf and its palaeoenvironmental reconstruction, Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 446: 213–224.
- [25]. Insalaco E, Virgone A, Courme B, Gaillot J, Kamali M, Moallemi A, Lotfpour M, 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]. Keelan DK (1997) A critical review of core analysis techniques, Journal of Canadian Petroleum Technology, 11, 02:1972.
- [27]. McCoy DD, Grieves WA () Use of resistivity logs to calculate water saturation at prudhoe bay, SPE Reservoir Engineering, 12, 1: 45–51.

- [28]. Sutadiwirya Y, Abrar B, Henardi D, NuGRoho BH, Wibowo RA (2008) Using MRGC (multi resolution graph-based clustering) method to integrate log data analysis and core facies to define electrofacies, in the Benua Field, in Central Sumatera Basin, Indonesia, International Gas Union Research Conference, IGRC, Paris.
- [29]. Tavakoli V, Jamalian A (2018) Microporosity evolution in Iranian reservoirs, Dalan and Dariyan formations, the central Persian Gulf, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 52: 155–165.
- [30]. Holstein ED, Warner Jr HR (1994) Overview of water saturation determination for the ivishak (sadlerochit) reservoir, prudhoe bay field, in SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
- [31]. Juhasz I (1981) Normalised Qv-the key to shaly sand evaluation using the Waxman-Smits equation in the absence of core data, in SPWLA 22nd Annual Logging Symposium.
- [32]. Clavier C, Coates G, Dumanoir J (1977) Theory and experimental basis for the dual-water model for interpretation of shaly sands, SPE, 6859.
- [33]. Handwerger DA, Willberg D, Pagels M, Rowland B, Keller JF (2012) Reconciling retort versus Dean Stark measurements on tight shales, SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 5, 3932–3945.
- [34]. Kazak ES, Kazak A V (2019) A novel laboratory method for reliable water content determination of shale reservoir rocks, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 183: 106301.



Determining the Best Log Combination and Electrofacies in Water Saturation Calculation, Kangan and Dalan Formations in the Central Persian Gulf

Reza Gholami and Vahid Tavakoli*

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

vtavakoli@ut.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2020.4221.2912

Received: July/10/2020

Accepted: September/08/2020

Introduction

Carbonate reservoirs have more heterogeneity than terrigenous reservoirs, which has led to uncertainty in the calculation of petrophysical parameters in carbonate reservoirs. Predicting water saturation has always been difficult due to the complexity and heterogeneity of carbonate reservoirs. On the other hand, experts are trying to find different ways to accurately calculate water saturation in carbonate formations. Common methods for calculating water saturation in the oil industry are the direct use of the core and the measurement of water volume by the Dean-Stark test, also, the calculation of water saturation is indirectly using petrophysical logs based on the Archie equation or the Archie-derived equations. The parameters required to calculate water saturation using well logging data have been sensitive to different conditions, and the accuracy of this method in different conditions has been the subject of much discussion [1]. Water saturation calculated from the core by the Dean-Stark test has always been one of the main methods for calculating water saturation due to its accuracy in calculating water saturation [2]. Electric logs at this time are one of the main sources of subsurface information in oil and gas fields. By combining the logs, the electrical facies can be identified. The word electrical facies was first defined by Serra and Abbott as a set of log responses that separate one layer or layer from other layers [3]. Generalization of water saturation models for use in sequences of wells that do not have a core is performed

by an electrical facies. The purpose of this study was to identify the effective petrophysical parameters in the calculated water saturation difference from the Archie method with the Dean-Stark experiment. Also, the most accurate method of determining electrical facies is presented to accurately calculate Archie coefficients. To achieve this goal, an electrical facies was determined along the entire sequence of the studied wells. Then, in each electrical facies, the average water saturation in the Dean-Stark test method and the electrical models were calculated. Other goals of this study are to determine the difference in water saturation from the Dean-Stark test and the electrical model to identify the accuracy of water saturation of electrical models in carbonate formations.

Materials and Methods

The study was performed on the Permian-Triassic formations (Kangan-Dalan) in a well in one of the gas fields in the Central Persian Gulf. After determining Archie's coefficients, water saturation was calculated based on Archie's equation (Equation 1).

$$S_w = \left[(aR_w) / (\phi^m R_t) \right] \left(\frac{1}{n} \right) \quad (1)$$

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 (n) exponents. In this study, a total of 1253 porosity and permeability tests were performed on plug samples. In this study, Dean-Stark extraction method was used to determine core water saturation.

Results and Discussion

Comparison of Water Saturation of Electrical Models with Cores in Each Electrical Facies

The average values of Dean-Stark water saturation with electrical models in electrical facies model No. 1 based on input logs including electrical resistance, sonic, neutron, and density were recorded in Table 1. The average values of input logs in each facies were also measured, and recorded in Table 1.

Table 1 Average water saturation of the Dean-Stark test and electrical models in electrical facies in Kangan and Dalan formations based on input logs including sonic log, electrical resistance, neutron and density and calculation of their average in each electrical facies.

Comparison of the Average Water Saturation of Electrical Models with the Dean-Stark Test in Facies Models

average water saturation from Dean-Stark experiment

Table 1 Average water saturation of the Dean-Stark test and electrical models in electrical facies in Kangan and Dalan formations based on input logs including sonic log, electrical resistance, neutron and density and calculation of their average in each electrical facies.

Average input electrical logs				The average water saturation of the Dean-Stark test and the electrical models						
RT	DT	NPHI	RHOZ	Archie with laboratory coefficients	Archie with constant coefficients	Dual water	Waxman-Smith	Archie-Dual water	Dean-Stark	Electrical facies
8	197.2	0.14	2.70	0.39	0.46	0.39	0.37	0.60	0.12	EF-4
64	173.4	0.02	2.57	0.76	0.78	0.76	0.74	0.59	0.17	EF-6
1490	163.4	0.01	0.01	0.80	0.74	0.80	0.73	0.92	0.18	EF-7
853	178.2	0.07	2.64	0.65	0.66	0.65	0.61	0.70	0.15	Average

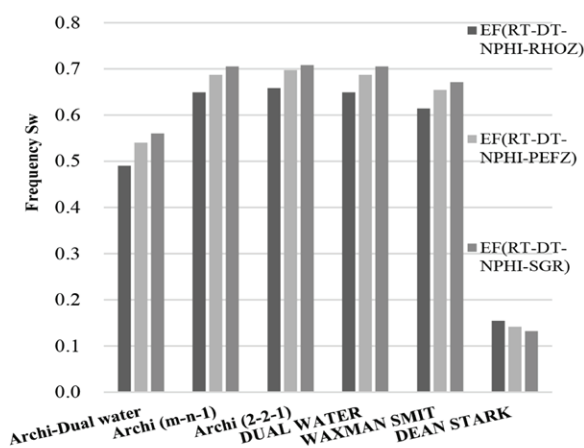


Fig. 1 Comparison of the average water saturation of the Dean-Stark test with the average water saturation of electrical models (Archie with laboratory coefficients, Archie with constant coefficients, Archie-Dual Water, Waxman_Smith, Dual Water) in three models of electrical facies.

with average water saturation from Archie electrical models with constant coefficients (2,2,1), Archie with variable coefficients (cementation exponents and variable saturation exponents based on laboratory work), Waxman-Smith [4], Dual water [5] and Archie-dual water electrical model (cementation exponents and variable saturation exponents based on laboratory work) were determined and compared in three models of electrical facies (Figure 1).

To determine the best electrical facies for predicting the correct water saturation in hydrocarbon reservoirs, the average water saturation values were calculated in three facies models. The best electrical facies has the least difference in the average water saturation between the Dean-Stark method and the electrical model (Archie and Archie-derived models).

The results presented in Table 1 shows that if the input logs, including electrical resistance, sonic, neutron, and density, are determined electrical facies, the minimum difference in the average water saturation of the electrical models with the water saturation of the core (Dean-Stark) is obtained. The reason for the difference in the water saturation values of Archie with the water saturation of Dean-Stark in each facies model depends on its input log. Therefore, density compared to lithology and shale volume has a greater effect on reducing the difference between the average water saturation of the electrical model and the saturation of water in the Dean-Stark (Figure 1).

To determine the petrophysical parameters affecting water saturation, facies models based on input logs were created. In facies model 1, which was created based on the input logs, including electrical resistance, sonic, neutron, and density, has 7 electrical facies for Kangan and Dalan formations. The results presented in Table 1 show that the electrical facies No. 4 has the lowest difference in the average water saturation of the electrical models compared to the water saturation

of Dean-Stark. After that, the electrical facies No. 6, 7 showed a greater average difference between the two methods of water saturation. Electrical facies No. 4 have high porosity, density, and sonic wave transit time, but have much lower electrical resistance than electrical facies 6 and 7. Therefore, increasing the porosity, density, and sonic wave transit time and reducing the electrical resistance, reduced the average water saturation difference of the electrical model with water saturation of the Dean-Stark (Table 1).

Conclusions

This study showed that if the Archie coefficients were calculated in each Electrical facies, the water saturation resulting from the electrical models would be very close to the water saturation values of Dean-Stark test. The calculated water saturation, from the Archie equation and the shaly equations derived from it with constant coefficients and variable laboratory coefficients, has much higher average values than the water saturation calculated from the Dean-Stark test method. Sequences from this well were determined that the mean values of water saturation of the core (Dean-Stark) were different from the values of water saturation of the Archie-Dual Water model. And the reason for this difference in water saturation between the two methods was stated. To generalize the water-saturated models corrected to wells that do not have a core, three facies models with different input logs were determined using a Multi-Resolution Graph-based Clustering (MRGC). Comparison between the three facies models showed that facies models based on input logs, including electrical resistance, sonic, neutron, and density, showed the lowest water saturation difference of the electrical models compared to the average water saturation of the Dean-Stark test. The difference between the average water saturation between the electrical models and Dean-Stark in this

model with optimal input logs is 46%, which is 6% and 9% less water saturation than the second and third facies models, respectively. Therefore, to select the sample to determine the coefficients of Archie, this method of determining the electrical facies is appropriate. Comparing the difference in water saturation between electrical facies, it was concluded that porosity, permeability, and density, in contrast to electrical resistance, is directly related to the increase of water saturation accuracy. Also, based on the type of input log of each facies model, it was found that lithology and shale volume has less effect on water saturation accuracy than density.

References

1. Galiuk HS, Saadat K, Kazemzadeh E (2011) A case study of saturation exponent measurement on some carbonate cores at full reservoir conditions, International Symposium of the Society of Core Analysts held in Austin, Texas, USA, 18–21.
2. Richardson JG, Holstein ED, Rathmell JJ, Warner Jr HR (1997) Validation of as-received oil-based-core water saturations from Prudhoe Bay, SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 12, 01: 31–36.
3. Serra O, Abbott HT (1982) The Contribution of Logging Data to Sedimentology and Stratigraphy, Society of Petroleum Engineers Journal, 22: 117–131.
4. Juhasz I (1981) Normalised Q_v -the key to shaly sand evaluation using the Waxman-Smits equation in the absence of core data, SPWLA 22nd Annual Logging Symposium, Mexico City, Mexico, Paper Number: SPWLA-1981-Z.
5. Clavier C, Coates G, Dumanoir J (1977) Theory and experimental basis for the dual-water model for interpretation of shaly sands, Society of Petroleum Engineers Journal, 24, 2:153–168.