

### مقاله پژوهشی

## بررسی عوامل کلیدی مؤثر بر دقت محاسبات اشباع آب در مخازن کربناته: سازندهای کنگان و دالان، غرب خلیج فارس

سجاد عمرانی<sup>۱</sup>؛ وحید توکلی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی نفت، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران

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

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۹ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2024.427939.1221

#### چکیده

ارزیابی خصوصیات مخازن کربناته با توجه به ناهمگنی بسیار زیاد این مخازن، همواره با دشواری‌ها و عدم قطعیت‌های زیادی همراه است. اشباع آب یکی از پارامترهای بسیار مهم در ارزیابی این مخازن به شمار می‌آید. علاوه بر این، تأثیر اشباع آب بر مکانیک سنگ به‌عنوان یک پدیده مهم در مهندسی ژئوتکنیک شناخته می‌شود. رایج‌ترین رابطه برای اشباع آب، معادله آرچی است. دقت اشباع آب محاسبه شده از طریق معادله آرچی به دقت پارامترهای آن از جمله ضریب سیمانی شدن، ضریب پیچایی و ضریب اشباع بستگی دارد. ناهمگنی مخازن کربناته، به طور قابل توجهی بر ضرایب معادله آرچی و در نتیجه محاسبات اشباع آب تأثیر می‌گذارد. در این مطالعه، از ۱۵۷ داده اشباع آب دین استارک، ۵۷ داده فاکتور مقاومت سازند، ۲۰ داده شاخص مقاومت سازند، ۱۳۶۸ مقطع نازک و ۱۱۱۴ داده‌های تخلخل و نفوذپذیری تهیه شده از یک چاه اکتشافی در غرب خلیج فارس استفاده شده است. به منظور مدیریت ناهمگنی، از روش‌های مختلفی از جمله روش راندمان الکتریکی، نشانگر زون جریان و وینلند استفاده شد. پس از دسته‌بندی سنگ‌ها با پارامترهای الکتریکی و پتروفیزیکی مشابه، پارامترهای آرچی در دسته‌های مختلف محاسبه شدند. سپس اشباع آب با استفاده از رابطه آرچی در هر یک از دسته‌های تعیین شده، محاسبه و با اشباع آب دین استارک مقایسه شد. علاوه بر این، پارامترهای تأثیرگذار بر دقت اشباع آب، مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج، اهمیت بررسی ویژگی‌های رفتار الکتریکی و شعاع گلوگاه‌های منفذی به‌عنوان عوامل کلیدی مؤثر بر دقت محاسبات اشباع آب را نشان دادند. بر اساس یافته‌ها، استفاده از پارامترهای ثابت آرچی منجر به محاسبه اشباع آب، بیش از اندازه واقعی و در نتیجه، برآورد کمتر از میزان واقعی هیدروکربور در مخازن می‌شود. یافته‌ها نشان داد که مدیریت ناهمگنی مخزن به روش راندمان الکتریکی، تأثیر قابل توجهی بر افزایش دقت اشباع آب پیش‌بینی شده در مقایسه با دیگر روش‌ها دارد. در مقابل، روش وینلند بیشترین عدم قطعیت را در پیش‌بینی اشباع آب دارد.

#### واژگان کلیدی

گونه‌های سنگی، راندمان الکتریکی، ضرایب آرچی، مدیریت ناهمگنی، اشباع آب، هدایت الکتریکی، دالان و کنگان

#### ۱- پیش‌گفتار

سنگ‌های کربناته منجر به تغییرات نفوذپذیری گسترده برای تخلخل‌های مشابه می‌شود؛ بنابراین چالش‌های زیادی در پیش‌بینی ظرفیت تولید آن‌ها را ایجاد می‌کند [۶]. با وجود تحقیقات گسترده در زمینه مخازن کربناته، همچنان چالش‌های زیادی در ایجاد ارتباط بین ناهمگنی زمین‌شناسی و عملکرد مخازن کربناته باقی‌مانده است [۷-۱۰]. ارزیابی اشباع آب در مخازن هیدروکربنی برای تخمین ذخیره‌ی هیدروکربور و پتانسیل توسعه میدان بسیار مهم است

ارزیابی دقیق ویژگی‌های پتروفیزیکی سنگ‌های کربناته، به دلیل ناهمگنی چشم‌گیر آن‌ها همواره یک چالش مهم در صنعت نفت بوده است. این ناهمگنی منجر به چالش‌های قابل توجهی در ارزیابی این مخازن شده است. توزیع ویژگی‌های پتروفیزیکی در این مخازن پیچیده، متنوع و تحت تأثیر تغییرات رخساره‌ها و فرایندهای دیاژنزی قرار دارد [۵-۱۱]. ناهمگنی در انواع منافذ و توزیع اندازه منافذ در

در نتیجه، تخمین نادرست پارامترهای آرچی می‌تواند منجر به تخمین بیش از حد یا کمتر از میزان واقعی ذخایر هیدروکربوری شود. در نتیجه می‌تواند خسارت‌های مالی قابل توجهی ایجاد کند. چندین محقق پارامترهای آرچی و تأثیر آن‌ها بر محاسبات اشباع آب را بررسی کرده‌اند [۲۳-۲۹].

در ارزیابی‌های معمولی مخازن، پارامترهای آرچی ثابت فرض می‌شوند. با این حال، این رویکرد می‌تواند منجر به خطاهای قابل توجهی در محاسبات اشباع آب، به ویژه در مخازن ناهمگنی مانند کربنات‌ها با ساختارهای منفذی پیچیده شود [۲۲ و ۳۰-۳۲]. به عبارت دیگر، به دلیل وجود عدم قطعیت‌های متعدد در تعیین اشباع آب، بسیاری از محققان تلاش کرده‌اند از پارامترهای متغیر آرچی استفاده کنند [۳۳-۳۹]. طبقه‌بندی سنگ‌ها بر اساس خصوصیات زمین‌شناسی و پتروفیزیکی یکسان، به عنوان مهم‌ترین رویکرد مؤثر برای مدیریت ناهمگنی مخازن است [۴۰]. تجزیه و تحلیل پارامترهای زمین‌شناسی و پتروفیزیکی سنگ‌ها نشان می‌دهد که دسته‌بندی نمونه‌ها بر اساس ویژگی‌های مشترک می‌تواند منجر به تخمین دقیق‌تری از پارامترهای آرچی شود [۴۱]. در نتیجه، دسته‌بندی سنگ‌های کربناته بر اساس ویژگی‌های مشترک می‌تواند دقت محاسبات پارامترهای آرچی را افزایش دهد و در نتیجه تخمین اشباع آب را بهبود بخشد. برای ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف و گونه‌های سنگی مختلف بر دقت اشباع آب، اعتبارسنجی آن‌ها با استفاده از داده‌های اشباع آب دین‌استارک<sup>۱</sup> بسیار مهم است. روش دین‌استارک معمولاً در صنعت نفت برای اندازه‌گیری مستقیم اشباع آب در مخازن استفاده می‌شود [۴۲]. در این مطالعه، به شناسایی، ارزیابی و بررسی مؤثرترین رویکرد مدیریت ناهمگنی مخزن با هدف محاسبه اشباع آب و عوامل مؤثر بر دقت آن پرداخته می‌شود. برای دستیابی به این هدف، ابتدا بر اساس رویکردهای مختلف مدیریت ناهمگنی مخزن (روش وینلند<sup>۲</sup>، نشانگر زون جریان<sup>۳</sup> و راندمان الکتریکی<sup>۴</sup>)، سنگ‌ها به کلاس‌های همگن از نظر ویژگی‌های پتروفیزیکی و الکتریکی دسته‌بندی و پارامترهای آرچی به صورت مجزا برای گونه‌های سنگی مختلف محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از معادله آرچی (معادله ۱)، اشباع

[۱۱-۱۵]. محاسبه دقیق اشباع آب در مخازن هیدروکربونی در مراحل اولیه برای ارزیابی قابل اعتماد مخازن و کاهش عدم قطعیت‌های اقتصادی مرتبط با توسعه میادین بسیار مهم است [۱۶-۱۷]. همچنین بررسی اشباع آب می‌تواند در مطالعه مکانیک سنگ و میزان تأثیرگذاری آب بر روی پارامترهای مکانیک سنگ مانند مقاومت فشاری، ضریب شکست و نفوذپذیری سنگ، به ما کمک کند [۱۸]. بنابراین جهت درک رفتار سنگ‌ها و ارزیابی میزان ذخیره هیدروکربور، پی‌بردن به اشباع آب مخازن از اهمیت بالایی برخوردار است. اشباع آب در مخازن هیدروکربوری به صورت مستقیم با استفاده روش دین استارک و غیرمستقیم با استفاده از داده‌ها و معادلات مختلف مانند معادله آرچی، لاگ‌های چاه‌پیمایی و منحنی‌های فشار موئینگی محاسبه می‌شود. محاسبه اشباع آب با استفاده از روش دین استارک دقت بالایی دارد؛ اما در مقابل بسیار پرهزینه، وقت‌گیر و فقط از چاه‌هایی که از آن‌ها مغزه گرفته شده، قابل محاسبه است. برآورد اشباع آب با استفاده لاگ‌های چاه‌پیمایی از طریق آنالیز لاگ‌های مقاومت، نوترون و تشدید مغناطیسی هسته‌ای صورت می‌گیرد. عوامل محیطی مانند فشار و دما، نفوذ گل حفاری و کالیبراسیون ابزار به طور بالقوه می‌تواند بر اندازه‌گیری‌های لاگ‌های مختلف و ایجاد خطا در اندازه‌گیری‌ها همراه باشد؛ بنابراین برآورد اشباع آب با استفاده از این روش می‌تواند با عدم قطعیت‌های قابل توجه همراه باشد. معادله آرچی [۱۹]، رایج‌ترین رابطه برای محاسبه اشباع آب به صورت غیرمستقیم است. این رابطه، شامل سه پارامتر ضریب سیمانی شدن ( $m$ )، ضریب پیچاپیچی ( $a$ ) و ضریب اشباع ( $n$ ) است. معادله آرچی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{a \times R_w}{\phi^m \times R_t}} \quad (1)$$

که در آن،  $\phi$  تخلخل (درصد)،  $R_t$  مقاومت سازند  $(\Omega.m)$ ،  $R_w$  مقاومت آب سازندی  $(\Omega.m)$ ،  $a$  ضریب پیچاپیچی،  $n$  ضریب اشباع،  $m$  ضریب سیمانی شدن و  $S_w$  اشباع آب (درصد) است. دقت اشباع آب به دست آمده از معادله آرچی به دقت پارامترهای ورودی آن ( $n, m, a$ ) بستگی دارد [۲۰-۲۲].

<sup>۳</sup> current zone indicator

<sup>۴</sup> Electrical efficiency

<sup>۱</sup> Dean-stark

<sup>۲</sup> Winland method

جدا می‌شود. K4 با سنگ‌شناسی دولومیت و آهک دارای کیفیت مخزنی بالایی است و به نظر بسیاری از پژوهشگران مهم‌ترین افق مخزنی در منطقه خلیج فارس، از جمله در میدان مورد مطالعه می‌باشد [۴۷-۴۸، ۴]. واحد مخزنی K3 عمدتاً از دولومیت و سنگ‌آهک دولومیتی تشکیل شده و توسط لایه‌های انیدریتی از واحد مخزن K4 جدا می‌شود. سازند دالان و کنگان با یک ناپیوستگی منطقه‌ای از هم جدا شده‌اند [۴۵، ۴۹، ۵۰]. این سطح ناپیوسته بین سازند دالان و کنگان به عنوان مرز پرمین-تریاس در خلیج فارس شناخته می‌شود [۱]. K2 دارای سنگ‌شناسی آهک، دولومیت و KI از آهک، دولومیت و انیدریتی همراه با میان لایه‌های شیلی تشکیل شده است. واحد مخزنی K2 در میدانی فراساحلی برخلاف میدانی واقع در خشکی از اهمیت زیادی برخوردار و بعد از دالان بالایی در مرتبه دوم از لحاظ ارزش اقتصادی در منطقه است [۴۶]. سازند دشتک، متعلق به دوران تریاس میانی تا پسین، به عنوان سنگ پوش ایمن برای مخازن هیدروکربوری سازندهای دالان و کنگان عمل می‌کند. این سازند عمدتاً دارای سنگ‌شناسی شیلی و تبخیری است [۵۱، ۵۲].

### ۳- مواد و روش‌ها

مجموعه داده این مطالعه، از یک میدان گازی عظیم واقع در غرب خلیج فارس تهیه است. به منظور دستیابی به اهداف این مطالعه، ۵۷ داده فاکتور مقاومت سازند، ۲۰ داده شاخص مقاومت سازند، ۱۵۷ داده اشباع آب دین استارک، ۱۱۱۴ داده تخلخل و نفوذپذیری و ۱۳۶۸ مقطع نازک از یک چاه اکتشافی تهیه شدند. مقاطع نازک به‌عنوان بخشی از داده‌های مستقیم مخزن برای تشخیص کانی‌شناسی و انواع تخلخل استفاده شد. برای تشخیص کلسیت و دولومیت، مقاطع نازک با آلزارین رد - اس رنگ‌آمیزی شدند. علاوه بر این، نیمی از نمونه‌ها با هدف تشخیص انواع منافذ، بافت و اندازه دانه با اپوکسی آبی رنگ‌آمیزی شدند. بافت و درصد گونه‌های منفذی مختلف، نمونه‌ها با آنالیز مقاطع نازک با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان تعیین و با نمودارهای استاندارد مقایسه شدند. داده‌های تخلخل و نفوذپذیری به‌منظور درک تغییرات کیفیت مخزنی، محاسبات اشباع آب و تعیین گونه‌های سنگی بکار گرفته شدند. نمونه‌های پلاگ مغزه با استفاده از روش

آب در گونه‌های سنگی مختلف محاسبه می‌شود. در انتها، نتایج اشباع آب محاسبه‌شده با استفاده از روش‌های مختلف مدیریت ناهمگنی با داده‌های مستقیم اشباع آب (دین استارک) مقایسه و ارزیابی می‌شوند.

### ۲- زمین‌شناسی و چینه‌شناسی

این مطالعه بر روی سازندهای دالان و کنگان به سن پرمین پسین - تریاس پیشین در یکی از میدانی گازی واقع در غرب خلیج فارس صورت گرفته است (شکل ۱). پرمین پسین با جدایش بلوک ایران مرکزی از بلوک عربی در امتداد گسل اصلی زاگرس، و حرکت آن به سمت شمال و تشکیل اقیانوس نئوتتیس<sup>۵</sup> بین این دو بلوک همراه بوده است. تشکیل اقیانوس نئوتتیس باعث ته‌نشین شدن توالی‌های ضخیم رسوبات در بخش‌های شرقی بلوک عربی و حوزه خلیج فارس شده است [۴۳]. توالی‌های پرمین پسین - تریاس پیشین در محدوده‌ی کشورهای جنوب خلیج فارس به نام سازند خوف<sup>۶</sup> و در ایران به نام سازندهای دالان و کنگان شناخته می‌شوند [۴۴]. این سازندها، سنگ مخزن بسیاری از میدانی هیدروکربوری گول‌پیکر واقع در خلیج فارس و خاورمیانه هستند [۴، ۴۵].



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی خلیج فارس، میدان مورد مطالعه (دایره زرد) و برخی از میدانی هیدروکربوری منطقه نشان داده شده است.

سازند دالان به ترتیب از پایین به بالا از ۳ عضو دالان پایین، نار و دالان بالایی تشکیل شده است [۴۶]. دالان پایین معادل واحد مخزنی K5 و دالان بالایی به واحدهای مخزنی K4 و K3 تقسیم می‌شود. واحد مخزنی دالان پایین یا K5 توسط عضو تبخیری نار (با ضخامت حدود ۲۰ متر) از واحد مخزنی K4

<sup>۶</sup> Khuff Formation

<sup>۵</sup> Neotethys

متعاقباً سیالات داخل پلاگ (آب و هیدروکربن) با جوشاندن حلال (تولوئن) در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد حل شده و سپس در ظرف مدرج جمع‌آوری شدند. در این مرحله سیالات بر اساس چگالی خاص خود در داخل ظرف مدرج جداسازی شدند. سپس در فواصل زمانی معین میزان آب انباشته شده اندازه‌گیری و با دانستن مقادیر تخلخل نمونه‌ها (با استفاده از روش قانون بویل)، اشباع آب مستقیماً محاسبه شد. پس از محاسبه اشباع آب با استفاده از روش‌های دین استارک و معادله آرچی برای گونه‌های سنگی مختلف، اشباع آب نیز با استفاده از ضرایب ثابت آرچی (۲-۲-۱) تعیین شد. پس از آن، اشباع آب به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف با اشباع آب دین استارک مقایسه، ارزیابی و تأثیر پارامترهای مختلف بر دقت اشباع آب پیش‌بینی شده مورد مطالعه قرار گرفت.

#### ۴- نتایج

ناهمگنی در مخازن کربناته، به طور قابل توجهی بر پارامترهای آرچی و اشباع آب تأثیر می‌گذارد. برای کاهش این تأثیر، از روش طبقه‌بندی سنگ‌های مخزن به گروه‌های همگن با ویژگی‌های الکتریکی، زمین‌شناسی و پتروفیزیکی مشابه، به‌عنوان گونه‌های سنگی استفاده شده است [۵۵، ۴۰]. علاوه بر این، مطالعات متعدد نشان داده‌اند که طبقه‌بندی مخازن به واحدهای همگن از نظر پتروفیزیکی، زمین‌شناسی و رسانایی الکتریکی می‌تواند منجر به افزایش دقت در پارامترهای آرچی شود [۵۶، ۵]. در این مطالعه از روش‌های متنوعی برای ارزیابی و مدیریت ناهمگنی استفاده و دقت هر یک از این روش‌ها در پیش‌بینی اشباع آب مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

#### ۴-۱- روش راندمان الکتریکی

سلیمان‌زاده و همکاران (۲۰۲۱) [۵۴]، راندمان الکتریکی را به‌عنوان مبنایی برای طبقه‌بندی سنگ‌ها به گونه‌های سنگی الکتریکی متمایز معرفی کردند. آن‌ها رفتار الکتریکی سنگ‌ها را مبنایی برای دسته‌بندی آن‌ها به دسته‌های مختلف مطرح کردند. معادله راندمان الکتریکی به شرح زیر است:

$$\eta_e = \frac{1}{FRF \times \emptyset} \quad (۶)$$

که در آن،  $\eta_e$  راندمان الکتریکی،  $FRF$  فاکتور مقاومت سازند و  $\emptyset$  تخلخل ( $V/V$ ) است. سلیمان‌زاده و همکاران (۲۰۲۱)، معتقدند که نمونه‌هایی با کارایی الکتریکی مشابه، رفتار

استخراج سوکسله تمیز و سپس خشک شدند. اندازه‌گیری تخلخل و نفوذپذیری نمونه‌ها به ترتیب با استفاده از قوانین بویل و داریسی انجام شد.

روش‌های تعیین گونه‌های سنگی مطالعه شده در این پژوهش به منظور مدیریت ناهمگنی مخزن، شامل روش‌های ویلند [۵۳]، نشانگر زون جریان [۲۵] و راندمان الکتریکی [۵۴] می‌باشند. محاسبه فاکتور مقاومت سازند و شاخص مقاومت سازند در شرایط محیطی به ترتیب با استفاده از رابطه‌های (۲) و (۳) انجام شد:

$$FRF = \frac{C_w}{C_o} = \frac{R_o}{R_w} \quad (۲)$$

$$FRI = \frac{R_o}{R_t} \quad (۳)$$

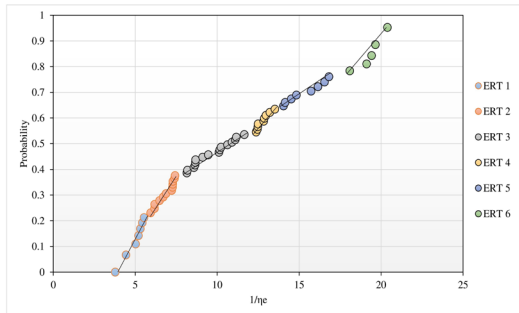
که در آن‌ها،  $C_o$  رسانایی الکتریکی سنگ صددرد صد اشباع از آب،  $C_w$  رسانایی الکتریکی آب،  $R_o$  مقاومت الکتریکی سنگ کاملاً اشباع از آب ( $\Omega.m$ )،  $R_t$  مقاومت الکتریکی سازند ( $\Omega.m$ ) و  $R_w$  مقاومت الکتریکی آب سازندی ( $\Omega.m$ ) است. پس از اندازه‌گیری فاکتور مقاومت سازند و شاخص مقاومت سازند، ضریب سیمانی شدن و ضریب اشباع، به ترتیب با رسم نمودار لگاریتمی - لگاریتمی تخلخل در مقابل فاکتور مقاومت سازند و اشباع آب در مقابل شاخص مقاومت سازند، مطابق با رابطه‌های زیر تعیین شدند:

$$FRF = \frac{a}{\emptyset^m} \quad (۴)$$

$$FRI = \frac{1}{S_w^n} \quad (۵)$$

که در آن‌ها،  $a$  ضریب پیچ‌پیچی،  $m$  ضریب سیمانی شدن،  $n$  ضریب اشباع،  $S_w$  اشباع آب ( $V/V$ )،  $\emptyset$  تخلخل ( $V/V$ )،  $FRI$  شاخص مقاومت سازند و  $FRF$  فاکتور مقاومت سازند است. ناهمگنی داده‌ها، در گونه‌های سنگی تعیین شده به روش‌های مختلف، با استفاده از ضریب تعیین ارزیابی شدند. ضریب تعیین میزان ارتباط خطی بین دو متغیر را اندازه‌گیری می‌کند. پس از به دست آوردن پارامترهای آرچی در گونه‌های سنگی مختلف، اشباع آب با استفاده از رابطه آرچی (۱)، محاسبه شد. برای محاسبه اشباع آب به روش دین استارک، پلاگ‌های مغزه دست‌نخورده به‌دست‌آمده از قسمت مرکزی مغزه به‌سرعت در داخل دستگاه دین استارک قرار داده شدند.

دین‌استارک مقایسه شد (جدول ۲). لازم به ذکر است به دلیل تعداد کم داده‌های ضریب اشباع و سیمانی شدن قرار گرفته در ERTI، پارامترهای آرچی و اشباع آب در این دسته محاسبه نشده است.



شکل ۲. تعیین گونه‌های سنگی الکتریکی به روش راندمان الکتریکی بر اساس تغییر شیب داده‌ها، ۶ گونه‌ی سنگی الکتریکی مختلف شناسایی شدند.

الکتریکی مشابهی را نشان می‌دهند که منجر به تشکیل گونه‌های سنگ‌های الکتریکی متمایز می‌شود. در واقع، تمامی نمونه‌ها با مقادیر راندمان الکتریکی مشابه، روی یک خط مستقیم با شیب ۱- و قطع  $\frac{1}{\eta_e}$  روی نمودار لگاریتمی-لگاریتمی فاکتور مقاومت سازند در مقابل تخلخل قرار دارند. در ادامه، به منظور طبقه‌بندی سنگ‌ها با رفتار الکتریکی مشابه، نمودار توزیع نرمال در برابر  $\frac{1}{\eta_e}$  ایجاد شد (شکل ۲). بر اساس خطوط مستقیم در شکل ۲، شش گونه سنگی الکتریکی مجزا متمایز شناسایی شدند.

در مرحله بعد، برای هر گونه‌ی سنگی الکتریکی منحصربه‌فرد شناسایی شده، مقادیر فاکتور مقاومت سازند در برابر تخلخل (شکل ۳)، و شاخص مقاومت سازند در برابر اشباع آب (به عنوان مثال، شکل ۴)، برای به دست آوردن پارامترهای آرچی ترسیم شدند (جدول ۱). در انتها، اشباع آب در هر گونه‌ی سنگی الکتریکی تعیین شده محاسبه، و با اشباع آب

جدول ۱. ضریب پیچایی، ضریب سیمانی شدن و ضریب اشباع محاسبه شده در گونه‌های سنگی تعیین شده بر اساس روش راندمان الکتریکی ارائه شده است. ضریب تعیین بین فاکتور مقاومت سازند و تخلخل، همچنین شاخص مقاومت سازند و اشباع آب در دسته‌های مختلف قابل مشاهده هستند.

ERT	Interval	a	m	R <sup>2</sup> (FRF- $\emptyset$ )	n	R <sup>2</sup> (FRI-Sw)
1	$3.5 < 1/\eta_e < 5.6$	-	-	-	-	-
2	$5.6 < 1/\eta_e < 8$	6.66	1.01	0.99	1.55	0.99
3	$8 < 1/\eta_e < 12$	9.33	1.01	0.94	1.83	0.98
4	$12 < 1/\eta_e < 14$	14.46	0.95	0.99	1.46	0.85
5	$14 < 1/\eta_e < 18$	15.12	1.01	0.96	1.64	0.90
6	$18 < 1/\eta_e < 21$	24.43	0.88	0.99	1.55	0.95
Average	-	14	0.97	0.97	1.61	0.93

جدول ۲. میانگین اشباع آب محاسبه شده با پارامترهای ثابت و متغیر آرچی، همچنین اختلاف اشباع آب دین‌استارک با اشباع آب محاسبه شده با پارامترهای تعیین شده برای گونه‌های سنگی الکتریکی مختلف ارائه شده است.

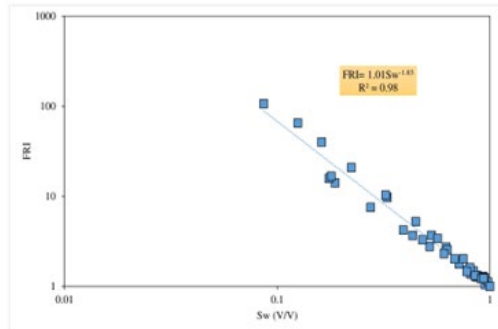
ERT	Sw(RT)	Sw(DS)	Sw(1-2-2)	Sw(RT)-Sw(DS)
2	0.29	0.25	0.50	0.04
3	0.37	0.17	0.48	0.20
4	0.23	0.16	0.34	0.07
5	0.22	0.12	0.22	0.10
6	0.17	0.10	0.22	0.07
Average	0.26	0.16	0.35	0.10

جریان می‌تواند برای جداسازی نمونه‌هایی با ضریب سیمانی شدن و ضریب پیچایی نسبتاً یکسان استفاده شود. با این حال، تغییر در ضریب سیمانی شدن فقط تابع تخلخل است. معادله نشانگر زون جریان به شرح زیر است:

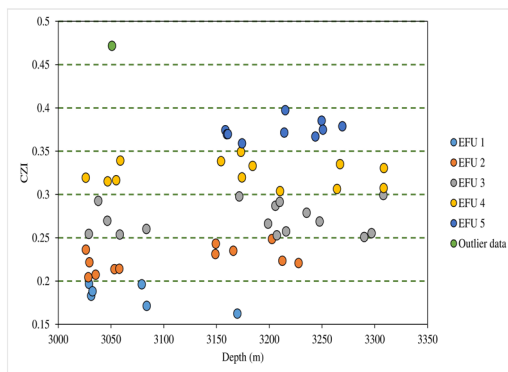
#### ۴-۲- روش نشانگر زون جریان

رضایی و همکاران (۲۰۰۷) [۲۵]، نشانگر زون جریان را بر اساس شاخص شعاع الکتریکی نمونه‌ها و نسبت تخلخل به ماتریکس تعریف کردند. آن‌ها نشان دادند که نشانگر زون

دین‌استارک مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت (جدول ۴). لازم به ذکر است که اشباع آب در کلاس ۵، به دلیل تعداد محدود داده‌های ضریب اشباع و سیمانی‌شدن قرار گرفته در این دسته، محاسبه نشده است.



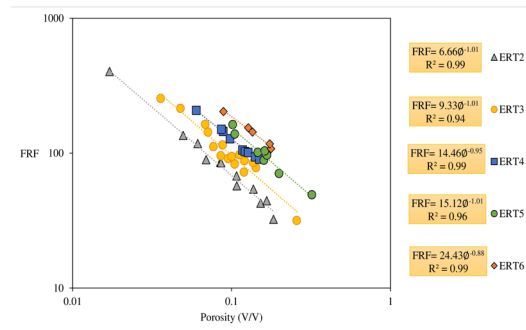
شکل ۴. شاخص مقاومت سازند (FRI) در برابر اشباع آب (Sw)، به عنوان مثال برای ERT3، معادله و ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) مربوط به آن قابل مشاهده هستند.



شکل ۵. مقادیر نشانگر زون جریان نمونه‌های مختلف در توالی‌های مورد مطالعه. محدوده‌ی تغییرات به ۵ کلاس، با گام‌های ۰,۰۵ طبقه‌بندی شد. داده‌های پرت از ادامه روند مطالعه کنار گذاشته شدند.

$$CZI = \frac{\sqrt{\phi}}{\phi_z} \quad (7)$$

که در آن،  $\phi$  تخلخل ( $V/V$ )،  $F$  فاکتور مقاومت سازند و  $\phi_z$  تخلخل نرمال شده ( $V/V$ ) است. براساس این روش، مقادیر نشانگر زون جریان در نمونه‌های مختلف محاسبه شد. مقادیر نشانگر زون جریان نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش، بین ۰,۱۶ تا ۰,۴۷ متغیر بود. پس از محاسبه‌ی نشانگر زون جریان هر یک از نمونه‌ها، نمونه‌ها در ۵ کلاس واحد جریانی الکتریکی، با گام‌های ۰,۰۵ دسته‌بندی شدند (شکل ۵).

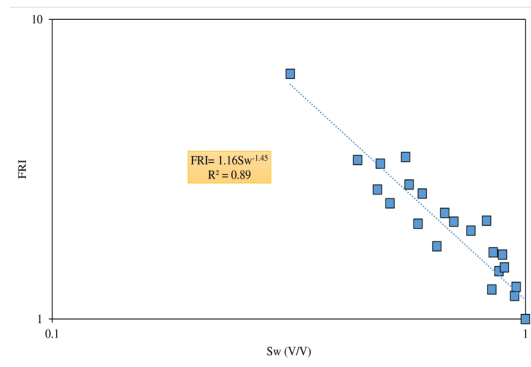


شکل ۳. تخلخل ( $\phi$ ) در برابر فاکتور مقاومت سازند (FRF) در گونه‌های سنگی تعیین شده بر اساس روش راندمان الکتریکی، ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) و معادلات مربوط به دسته‌های مختلف قابل مشاهده هستند.

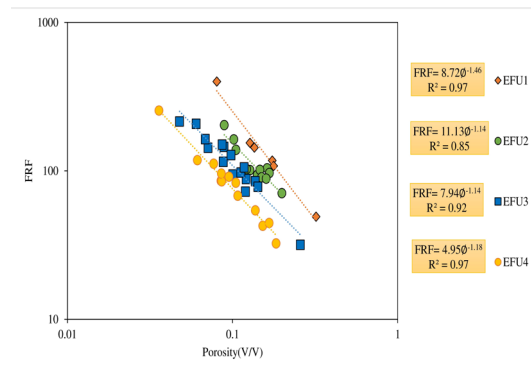
پس از دسته‌بندی نمونه‌ها به کلاس‌های مختلف، پارامترهای آرچی در واحدهای جریانی الکتریکی مختلف محاسبه شدند (شکل ۶) (شکل ۷). در جدول ۳، پارامترهای آرچی محاسبه شده در کلاس‌های مختلف ارائه شدند. در انتها، اشباع آب با استفاده از پارامترهای آرچی، محاسبه و با اشباع آب

جدول ۳. پارامترهای آرچی محاسبه شده در کلاس‌های مختلف بر اساس روش نشانگر زون جریان ارائه شده است. ضرایب تعیین بین فاکتور مقاومت سازند و تخلخل همچنین شاخص مقاومت سازند و اشباع آب در کلاس‌های مختلف قابل مشاهده هستند.

EFU	a	m	R <sup>2</sup> (FRF- $\phi$ )	n	R <sup>2</sup> (FRI-Sw)
EFU 1 (less than 0.2)	8.72	1.46	0.97	1.53	0.97
EFU 2 (0.2 - 0.25)	11.13	1.14	0.85	1.45	0.89
EFU 3 (0.25-0.3)	7.94	1.14	0.92	1.85	0.97
EFU 4 (0.3-0.35)	4.95	1.18	0.97	1.57	0.99
EFU 5 (0.35<CZI)	-	-	-	-	-
Average	8.19	1.23	0.93	1.6	0.96



شکل ۷. شاخص مقاومت سازند در برابر اشباع آب (به عنوان مثال، EFU2) قابل مشاهده است. معادله و ضریب تعیین نیز ارائه شده است.

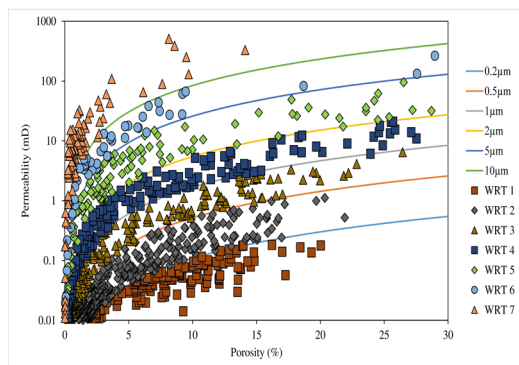


شکل ۸. تخلخل در برابر فاکتور مقاومت سازند برای کلاس‌های مختلف تعیین شده براساس روش نشانگر زون جریان روی نمودار پلات شدند. همچنین معادلات و ضرایب تعیین مربوط به کلاس‌های مختلف قابل مشاهده هستند.

جدول ۴. اشباع آب محاسبه شده در واحدهای جریان الکتریکی مختلف، اختلاف میانگین اشباع آب محاسبه شده و دین استارک قابل مشاهده است.

EFU	Sw(RT)	Sw(DS)	Sw(1-2-2)	Sw(RT)-Sw(DS)
1	0.29	0.07	0.27	0.22
2	0.22	0.11	0.28	0.11
3	0.40	0.22	0.45	0.18
4	0.27	0.23	0.41	0.04
<b>Average</b>	<b>0.30</b>	<b>0.16</b>	<b>0.35</b>	<b>0.14</b>

شد (شکل ۸). با در نظر گرفتن قرارگیری نمونه‌ها در محدوده‌های مختلف، ۷ گونه‌ی سنگی تعیین شد.



شکل ۸. نمودار تخلخل در برابر نفوذپذیری برای تعیین گونه‌های سنگی مختلف بر اساس روش وینلند، با توجه به قرار گرفتن نمونه‌ها در محدوده‌های مختلف، ۷ گونه‌ی سنگی شناسایی شدند.

پس از شناسایی گونه‌های سنگی با استفاده از این روش، برای

#### ۴-۳- روش وینلند

وینلند، از منحنی‌های فشار مویرگی-تزریق جیوه برای ایجاد رابطه بین تخلخل، نفوذپذیری و شعاع گلوگاه‌های منفذی استفاده کرد. وینلند، از طریق مطالعه نمونه‌های ماسه‌سنگ و کربنات، به این نتیجه رسید که سیستم تخلخلی که عمدتاً جریان سیال را در سنگ کنترل می‌کند، متناسب با ۳۵ درصد اشباع جیوه است [۵۳]. در نمونه‌های وینلند، این مقدار مربوط به منافذ گلوگاه حفرت با اندازه‌ی ۰.۵ میکرومتر است. وینلند معادله تجربی زیر را بین تخلخل، نفوذپذیری (هوا)، و اندازه گلوگاه منافذ مربوط به ۳۵ درصد اشباع جیوه را ایجاد کرد:

$$\log(R_{35}) = 0.732 + 0.588 \log(K_{air}) - 0.864 \log(\emptyset) \quad (8)$$

که در آن  $R_{35}$  شعاع منافذ گلوگاه حفرت در ۳۵ درصد اشباع جیوه (میکرومتر)،  $K_{air}$  نفوذپذیری هوا (میلی داریسی) و  $\emptyset$  تخلخل ( $V/V$ ) است. فرآیند تعیین گونه‌های سنگی با استفاده از نمودار تخلخل در برابر نفوذپذیری، به روش وینلند انجام

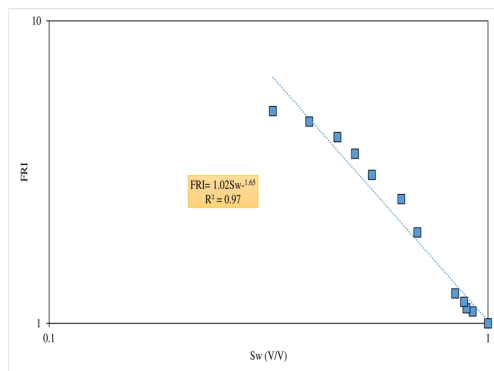


سنگی محاسبه و با اشباع آب دین استارک مقایسه شد (جدول ۶). لازم به ذکر است که به علت تعداد کم داده‌های ضریب اشباع و سیمانی شدن، قرار گرفته در گونه‌های سنگی ۶ و ۷، پارامترهای آرچی و اشباع آب محاسبه نشده است.

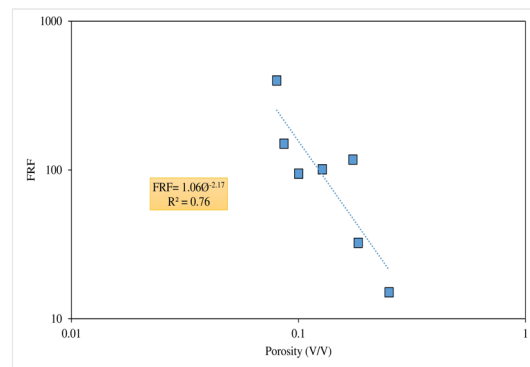
هر گونه‌ی سنگ منحصر به فرد، مقادیر فاکتور مقاومت سازند در برابر تخلخل (به عنوان مثال، شکل ۹)، و شاخص مقاومت سازند در برابر اشباع آب (به عنوان مثال، شکل ۱۰)، برای به دست آوردن پارامترهای آرچی ترسیم شدند (جدول ۵). اشباع آب محاسبه شده، براساس این روش در هر یک از گونه‌های

جدول ۵. پارامترهای آرچی محاسبه شده در گونه‌های سنگی مختلف به روش وینلند ارائه شده‌اند. ضریب تعیین بین فاکتور مقاومت سازند و تخلخل، همچنین شاخص مقاومت سازند و اشباع آب در گونه‌های سنگی مختلف قابل مشاهده هستند.

R35 (µm)	a	m	R <sup>2</sup> (FRF_Ø)	n	R <sup>2</sup> (FRI_Sw)
WRT 1 (R35 <0.2)	19.73	0.78	0.92	1.48	0.98
WRT2 (0.2 - 0.5)	20.04	0.7	0.65	1.63	0.94
WRT3 (0.5-1)	17.28	0.75	0.26	1.38	0.67
WRT4 (1-2)	12.55	0.86	0.83	1.84	0.98
WRT5 (2-5)	1.06	2.17	0.76	1.65	0.97
WRT6 (5-10)	-	-	-	-	-
WRT7 (10 < R35)	-	-	-	-	-
<b>Average</b>	<b>14.13</b>	<b>1.05</b>	<b>0.68</b>	<b>1.60</b>	<b>0.91</b>



شکل ۱۰. شاخص مقاومت سازند در برابر اشباع آب (به عنوان مثال، برای وینلند (۲-۵))، معادله و ضریب تعیین بین شاخص مقاومت سازند و اشباع آب قابل مشاهده هستند.



شکل ۹. نمودار فاکتور مقاومت سازند در برابر تخلخل (به عنوان مثال، برای WRT5 (۲-۵))، معادله و ضریب تعیین بین فاکتور مقاومت سازند و تخلخل قابل مشاهده هستند.

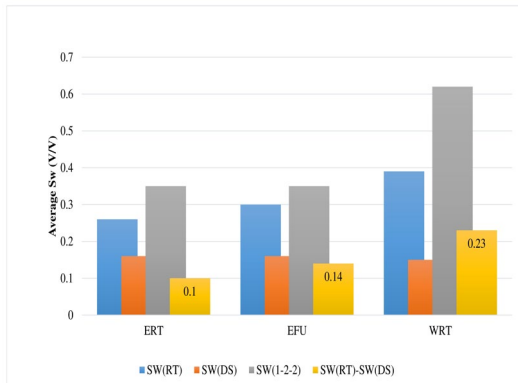
جدول ۶. اشباع آب محاسبه شده در گونه‌های سنگی مختلف تعیین شده بر اساس روش وینلند و میانگین اختلاف اشباع آب محاسبه شده و دین استارک نیز ارائه شده است.

Winland R35	Sw(RT)	Sw(DS)	Sw(1-2-2)	Sw(RT)-Sw(DS)
WRT1	0.28	0.09	0.37	0.19
WRT2	0.24	0.16	0.58	0.09
WRT3	0.35	0.15	0.78	0.19
WRT4	0.41	0.18	0.93	0.23
WRT5	0.66	0.19	0.45	0.47
<b>Average</b>	<b>0.39</b>	<b>0.15</b>	<b>0.62</b>	<b>0.23</b>



## ۵- بحث

اشباع آب محاسبه شده با اشباع آب دین استارک و عدم قطعیت را در پیش بینی اشباع آب به همراه داشته است (شکل ۱۱).



شکل ۱۰. میانگین اشباع آب محاسبه شده در روش های مختلف مدیریت ناهمگنی و اختلاف اشباع آب محاسبه شده در هریک از روش ها و اشباع آب دین استارک قابل مشاهده است.

در روش نشانگر زون جریان، ضریب پیچاپیچی از  $EFU2$  تا  $EFU4$ ، با بهبود اتصال منافذ و بهبود رسانایی الکتریکی در نمونه ها، کاهش یافته است. بهبود اتصال منافذ با افزایش ضریب تعیین بین فاکتور مقاومت سازند و تخلخل و شاخص مقاومت سازند و اشباع آب در  $EFU2$  تا  $EFU4$  همراه بوده است. ضریب اشباع، در این روش مانند روش وینلند نیز از روند خاصی پیروی نمی کند. به طور کلی، میانگین ضرایب تعیین بین فاکتور مقاومت سازند و تخلخل در دسته های مختلف روش نشانگر زون جریان، با  $۰,۹۳$  بیشتر از وینلند و کمتر از روش بازده الکتریکی است. میانگین ضریب تعیین بین شاخص مقاومت سازند و اشباع آب در این روش با  $۰,۹۶$  بیشتر از روش های دیگر است. میانگین اشباع آب دین استارک در دسته های مختلف روش نشانگر زون جریان، براساس نتایج ارائه شده در جدول ۴، روند افزایشی از  $EFU1$  تا  $EFU4$  را نشان می دهد. در مقابل، اشباع آب محاسبه شده به روش آرچی با پارامترهای ثابت و متغیر روند مشخصی ندارند. اختلاف میانگین اشباع آب محاسبه شده و دین استارک در دسته ها تعیین شده به این روش نیز از روند مشخصی پیروی نمی کنند. بیشترین و کمترین اختلاف اشباع آب محاسبه شده و دین استارک به ترتیب متعلق به  $EFU1$  و  $EFU4$  است. میانگین اشباع آب محاسبه شده با پارامترهای متغیر آرچی،

برای شناسایی مناسب ترین روش مدیریت ناهمگنی باهدف محاسبه دقیق اشباع آب در مخزن، مقادیر اشباع آب در گونه های سنگی مختلف از جمله راندمان الکتریکی، نشانگر زون جریان و وینلند محاسبه، و با یکدیگر مقایسه شدند. کاهش میانگین اختلاف اشباع آب بین اشباع آب دین استارک و مقدار محاسبه شده با پارامترهای محاسبه شده آرچی در روش های ذکر شده، نشان دهنده افزایش دقت روش مدیریت ناهمگنی در پیش بینی ضرایب آرچی، اشباع آب و در نهایت برآورد ذخیره ی در جای هیدروکربور مخزن است.

ضریب پیچاپیچی و ضریب سیمانی شدن در دسته های تعیین شده به روش وینلند، با افزایش قطر گلوگاه حفرات و بهبود اتصال منافذ، از  $WRT2$  تا  $WRT5$  افزایش یافته اند. ضریب اشباع در دسته های مختلف از روند خاصی پیروی نمی کند. میانگین ضرایب تعیین بین فاکتور مقاومت سازند و تخلخل با  $۰,۶۸$  و شاخص مقاومت سازند و اشباع آب با  $۰,۹۱$ ، کمترین ضرایب تعیین را بین سایر روش های تعیین گونه های سنگی دارند. این موضوع بیانگر عدم موفقیت این روش در پیش بینی دقیق پارامترهای آرچی دارد. اختلاف میانگین اشباع آب محاسبه شده و دین استارک در روش وینلند، طبق جدول ۶، از  $WRT2$  تا  $WRT5$  افزایش یافته است. این موضوع نشان دهنده افزایش خطای اشباع آب محاسبه شده، با افزایش میزان اشباع آب واقعی مخزن (دین استارک) و قطر گلوگاه حفرات است. استفاده از پارامترهای ثابت آرچی در مقایسه با پارامترهای متغیر محاسبه شده در دسته های مختلف روش وینلند، به طور قابل ملاحظه ای منجر به افزایش خطای اشباع آب محاسبه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از روش تعیین گونه های سنگی وینلند، افزایش شعاع گلوگاه منفذی، با وجود تغییرات جزئی در تخلخل، منجر به افزایش نفوذپذیری شده است. این به نوبه خود منجر به افزایش میانگین اختلاف بین اشباع آب محاسبه شده و دین استارک شده است. از این رو، شعاع گلوگاه منفذی یک پارامتر برگرفته از فرآیند زمین شناسی است که اشباع آب و خواص پتروفیزیکی سنگ را تحت تأثیر قرار داده است.  $WRT6$  و  $WRT7$  به دلیل در دسترس نبودن داده های آرچی ارزیابی و مقایسه نشدند. در بین روش های مدیریت ناهمگنی مطالعه شده در این پژوهش، روش وینلند بیشترین میانگین اختلاف

(۲۰۲۲) [۵۷]، با استفاده از تابع اشباع-ارتفاع سعی در پیش‌بینی اشباع آب در مخزن کردند. ناهمگنی شدید در مخازن با ایجاد فشار مویرگی متفاوت در بخش‌های مختلف مخزن، می‌تواند باعث افزایش عدم قطعیت در پیش‌بینی اشباع آب با استفاده از این روش همراه باشد. علاوه بر این در این روش به دلیل عدم دسترسی به داده‌های مستقیم اشباع آب، نتایج به دست آمده قابل‌سنجش نیستند. توکلی و همکاران (۲۰۲۲) [۲۷]، با استفاده از گونه‌های سنگی مرسوم به مدیریت ناهمگنی و برآورد اشباع آب پرداختند؛ اما به دلیل عدم دسترسی به داده‌های اشباع آب دین استارک فقط به ارائه نتایج آماری بسنده کردند.

## ۶- نتیجه‌گیری

برآورد اشباع آب یکی از مهم‌ترین پارامترهای پتروفیزیکی، در توسعه‌ی میدین هیدروکربوری است. بر همین اساس در این مطالعه، با آنالیز روش‌های مختلف مدیریت ناهمگنی، دقیق‌ترین روش مدیریت ناهمگنی باهدف محاسبه‌ی اشباع آب، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. مقایسه جامع روش‌های محاسبه‌ی اشباع آب در این مطالعه نشان داد که استفاده از پارامترهای ثابت آرچی منجر به خطای قابل‌توجهی در پیش‌بینی اشباع آب نسبت به پارامترهای متغیر آرچی می‌شود. در نظر گرفتن پارامترهای ثابت آرچی، منجر به برآورد اشباع آب بیش از اندازه واقعی در مخزن می‌شود که در نهایت منجر به برآورد کمتر از میزان واقعی حجم هیدروکربور ذخیره در مخازن می‌شود. طبق نتایج این مطالعه، تعیین گونه‌های سنگی به‌منظور مدیریت ناهمگنی، منجر به برآورد دقیق‌تر پارامترهای آرچی و اشباع آب می‌شود. اشباع آب محاسبه‌شده بر اساس پارامترهای آرچی محاسبه‌شده در گونه‌های سنگی مختلف، همواره بیشتر از اشباع آب دین استارک است. دلیل این امر در این واقعیت نهفته است که در طول تجزیه و تحلیل مغزه، حجم آب اندازه‌گیری شده با روش دین استارک، آب ساختار موجود در شیل را محاسبه نمی‌کند، زیرا استخراج نمی‌شود. در مقابل، روش آرچی تمام آب موجود در ساختار سنگ را محاسبه می‌کند. در نتیجه، منجر به افزایش اشباع آب محاسبه‌شده در مقایسه با روش دین استارک شده است. نتایج نشان می‌دهند که مدیریت ناهمگنی مخزن از طریق روش راندمان الکتریکی منجر به محاسبه‌ی

در  $EFU3$  دارای بیشترین و  $EFU4$  کمترین مقدار می‌باشد. به‌طور کلی، اشباع آب محاسبه‌شده در این روش، نسبت به روش وینلند، دارای عدم قطعیت بسیار پایین‌تری است (شکل ۱۱). باتوجه به در نظر گرفتن فاکتور مقاومت سازند در این روش با هدف طبقه‌بندی سنگ‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که در نظر گرفتن ویژگی‌های الکتریکی نسبت به شعاع گلوگاه‌های منفذی می‌تواند منجر به ارزیابی دقیق‌تری از ناهمگنی مخزن جهت محاسبه اشباع آب خواهد شد. میانگین ضریب پیچاپچی در روش راندمان الکتریکی از  $ERT2$  تا  $ERT6$  افزایش یافته است. این موضوع بیانگر کاهش اتصال منافذ و هدایت جریان الکتریکی در نمونه‌ها، از  $ERT2$  تا  $ERT6$  است. ضریب سیمانی‌شدن و ضریب اشباع در کلاس‌های تعیین‌شده، بر اساس این روش از روند خاصی پیروی نمی‌کنند. میانگین ضریب تعیین بین فاکتور مقاومت سازند و تخلخل در این روش بیشتر از سایر روش‌های مطالعه شده در این پژوهش است. براساس نتایج ارائه شده در جدول ۲، اشباع آب محاسبه‌شده در  $ERT3$  بیشترین و  $ERT6$  کمترین مقدار را نشان می‌دهند. در تمامی دسته‌ها تعیین‌شده بر اساس روش راندمان الکتریکی، میانگین اشباع آب از  $ERT6$  به  $ERT2$  افزایش را نشان می‌دهد (به جز اشباع آب محاسبه‌شده با پارامترهای متغیر آرچی در  $ERT2$ ). میانگین اختلاف اشباع آب محاسبه‌شده با پارامترهای متغیر آرچی و دین استارک روند مشخصی را نشان نمی‌دهد. بیشترین خطای اشباع آب محاسبه‌شده در این روش متعلق به  $ERT3$  است. به‌طور کلی، میانگین اشباع آب محاسبه‌شده در دسته‌های مختلف روش راندمان الکتریکی، نسبت به روش‌های دیگر تعیین گونه‌های سنگی، پایین‌تر است (شکل ۱۱). این موضوع نشان‌دهنده‌ی موفقیت این روش در مدیریت ناهمگنی مخزن باهدف پیش‌بینی اشباع آب، با در نظر گرفتن رفتار الکتریکی سنگ‌ها است. نتایج این پژوهش، می‌تواند مهندسان مخازن و زمین‌شناسان را در تدوین راهبردهای مؤثرتر توسعه میدین هیدروکربوری به‌منظور افزایش ارزش اقتصادی مخازن کمک کند. علاوه بر این، نتایج این مطالعه مسیر را برای تحقیقات بیشتر و پیشرفت در تکنیک‌های شناسایی مخازن باز می‌کند. تاکنون مطالعات محدودی در زمینه مدیریت ناهمگنی باهدف برآورد اشباع آب انجام‌شده است. اسماعیلی و همکاران

uncertainty in petrophysical interpretation and STOIP calculations, in: Soc. Pet. Eng. - 14th Abu Dhabi Int. Pet. Exhib. Conf. 2010, ADIPEC 2010, SPE, 2010: pp. 1139–1155. <https://doi.org/10.2118/137679-ms>.

[8] G.M. Hamada, A.A. Almajed, T.M. Okasha, A.A. Algahe, Uncertainty analysis of Archie's parameters determination techniques in carbonate reservoirs, *J. Pet. Explor. Prod. Technol.* 3 (2013) 1–10. <https://doi.org/10.1007/s13202-012-0042-x>.

[9] H.T. Janjuhah, G. Kontakiotis, A. Wahid, D.M. Khan, S.D. Zarkogiannis, A. Antonarakou, Integrated porosity classification and quantification scheme for enhanced carbonate reservoir quality: Implications from the miocene malaysian carbonates, *J. Mar. Sci. Eng.* 9 (2021) 1410. <https://doi.org/10.3390/jmse9121410>.

[10] H. Sun, H. Belhaj, G. Tao, S. Vega, L. Liu, Rock properties evaluation for carbonate reservoir characterization with multi-scale digital rock images, *J. Pet. Sci. Eng.* 175 (2019) 654–664. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.12.075>.

[11] M.N. Ali Akbar, J.T. Musu, B. Milad, Water saturation interpretation model for organic-rich shale reservoir: A case study of North Sumatra Basin, SPE/AAPG/SEG Unconv. Resour. Technol. Conf. 2018, URTC 2018. (2018). <https://doi.org/10.15530/urtec-2018-2879229>.

[12] A. Alimoradi, A. Moradzadeh, M.R. Bakhtiari, Methods of water saturation estimation: Historical perspective, *J. Pet. Gas Eng.* 2 (2011) 45–53. <http://www.academicjournals.org/JPGGE>.

[13] A.R. Gupta, Kamal, A theoretical approach for water saturation estimation in shaly sandstones, *Geoenergy Sci. Eng.* 228 (2023) 212001. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212001>.

[14] M.I. Miah, M. Tamim, Hydrocarbon Saturation Assessment of Thick Shaly Sand Reservoir Using Hydrocarbon Saturation Assessment of Thick Shaly Sand Reservoir Using Wireline Log Data: A Case Study, 10th Int. Forum Strateg. Technol. (2015) 1–6.

[15] B. Zhang, J. Xu, Methods for the evaluation of water saturation considering TOC in shale reservoirs, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 36 (2016) 800–810. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.11.023>.

[16] H.A. Jumaah, Modified Archie's parameters for estimating water saturation for carbonate reservoir in north of Iraq, *J. Pet. Explor. Prod. Technol.* 11 (2021) 3689–3697. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01258-3>.

[17] E.S. Kazak, A. V. Kazak, A novel laboratory method for reliable water content determination of shale reservoir rocks, *J. Pet. Sci. Eng.* 183 (2019).

دقیق‌تر پارامترهای آرچی و در نتیجه کاهش اختلاف بین اشباع آب محاسبه‌شده و دین استارک شده است. پس از روش راندمان الکتریکی، تعیین گونه‌های سنگی با استفاده از روش نشانگر زون جریان، با در نظر گرفتن تأثیر شعاع الکتریکی سنگ‌ها، دقت پیش‌بینی پارامترهای آرچی را افزایش داده است. در نتیجه، منجر به افزایش دقت برآورد اشباع آب شده است. تعیین گونه‌های سنگی با استفاده از وینلند، منجر به بیشترین اختلاف اشباع آب محاسبه‌شده و دین استارک شده است. در نتیجه، مدیریت ناهمگنی مخزن با استفاده از روش وینلند، با عدم قطعیت‌های بیشتری در مقایسه با روش‌های راندمان الکتریکی و نشانگر زون جریان همراه است.

## ۷- مراجع

[1] J. Abdolmaleki, V. Tavakoli, A. Asadi-Eskandar, Sedimentological and diagenetic controls on reservoir properties in the Permian-Triassic successions of Western Persian Gulf, Southern Iran, *J. Pet. Sci. Eng.* 141 (2016) 90–113. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.01.020>.

[2] C. Hollis, Diagenetic controls on reservoir properties of carbonate successions within the Albian-Turonian of the Arabian Plate, *Pet. Geosci.* 17 (2011) 223–241. <https://doi.org/10.1144/1354-079310-032>.

[3] H. Mehrabi, E. Yahyaee, A. Navidtalab, H. Rahimpour-Bonab, R. Abbasi, M. Omidvar, A. Assadi, J. Honarmand, Depositional and diagenetic controls on reservoir properties along the shallow-marine carbonates of the Sarvak Formation, Zagros Basin: Petrographic, petrophysical, and geochemical evidence, *Sediment. Geol.* 454 (2023) 106457. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2023.106457>.

[4] H. Rahimpour-Bonab, A. Asadi-Eskandari, A. Sonei, Control of Permian-Triassic Boundary over reservoir characteristics of South Pars Gas Field, (2009).

[5] V. Tavakoli, H. Rahimpour-Bonab, B. Esrafil-Dizaji, Diagenetic controlled reservoir quality of South Pars gas field, an integrated approach, *Comptes Rendus Geosci.* 343 (2011) 55–71. <https://doi.org/10.1016/J.CRTE.2010.10.004>.

[6] A.M. Mohamad, G.M. Hamada, Determination techniques of Archie's parameters: A, m and n in heterogeneous reservoirs, *J. Geophys. Eng.* 14 (2017) 1358–1367. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aa805c>.

[7] S.S. El Din, M.R. Dernaika, I. Al Hosani, L. Hannon, S.M. Skjæveland, M.Z. Kalam, Whole core versus plugs: Integrating log and core data to decrease

- [28] R. Woodhouse, Accurate reservoir water saturations from oil-mud cores: Questions and answers from Prudhoe Bay and beyond, *Log Anal.* 39 (1998) 23–44.
- [29] L. Xiao, C. chun Zou, Z. qiang Mao, Y. jiang Shi, xiao peng Liu, Y. Jin, H. peng Guo, X. xin Hu, Estimation of water saturation from nuclear magnetic resonance (NMR) and conventional logs in low permeability sandstone reservoirs, *J. Pet. Sci. Eng.* 108 (2013) 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.05.009>.
- [30] Z.Q. Mao, C.G. Zhang, C.Z. Lin, J. Ouyang, Q. Wang, C.J. Yan, The effects of pore structure on electrical properties of core samples from various sandstone reservoirs in tarim basin, *SPWLA 36th Annu. Logging Symp.* 1995. (1995).
- [31] M. Miller, K. Shanley, Petrophysics in tight gas reservoirs - Key challenges still remain, *Lead. Edge (Tulsa, OK)*. 29 (2010) 1464–1469. <https://doi.org/10.1190/1.3525361>.
- [32] Z. Qin, H. Pan, H. Ma, A.A. Konaté, M. Hou, S. Luo, Fast prediction method of Archie's cementation exponent, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 34 (2016) 291–297. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.06.070>.
- [33] Y. Ghanbari, M. Mavaddat, Introducing a new correlation for calculating cementation factor in petrophysical evaluation in South Iranian oil reservoirs, 81st EAGE Conf. Exhib. 2019. (2019). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201900982>.
- [34] S. Mahmoodpour, E. Kamari, M.R. Esfahani, A.K. Mehr, Prediction of cementation factor for low-permeability Iranian carbonate reservoirs using particle swarm optimization-artificial neural network model and genetic programming algorithm, *J. Pet. Sci. Eng.* 197 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108102>.
- [35] J. Raiga-Clemenceau, The cementation exponent in the formation factor-porosity relation: The effect of permeability, *SPWLA 18th Annu. Logging Symp.* 1977. (1977).
- [36] H.S. Salem, G. V. Chilingarian, The cementation factor of Archie's equation for shaly sandstone reservoirs, *J. Pet. Sci. Eng.* 23 (1999) 83–93. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(99\)00009-1](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(99)00009-1).
- [37] M. Tabibi, M.A. Emadi, Variable Cementation Factor Determination (Empirical Methods), in: *Proc. Middle East Oil Show, SPE*, 2003: pp. 541–549. <https://doi.org/10.2118/81485-ms>.
- [38] W.Z. Wan Bakar, I. Mohd Saaid, M.R. Ahmad, Z. Amir, N.S. Japperi, M.F.I. Ahmad Fuad, Improved water saturation estimation in shaly sandstone through variable cementation factor, *J. Pet. Explor. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106301>.
- [18] L. Zhuang, K.Y. Kim, M. Diaz, S. Yeom, Evaluation of water saturation effect on mechanical properties and hydraulic fracturing behavior of granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 130 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104321>.
- [19] G.E. Archie, The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, *Trans. AIME*. 146 (1942) 54–62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>.
- [20] S. Gomaa, A.A. Soliman, A. Mohamed, R. Emara, A.M. Attia, New Correlation for Calculating Water Saturation Based on Permeability, Porosity, and Resistivity Index in Carbonate Reservoirs, *ACS Omega*. 7 (2022) 3549–3556. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06044>.
- [21] F. Hadavimoghaddam, M. Ostadhassan, M.A. Sadri, T. Bondarenko, I. Chebyshev, A. Semmani, Prediction of water saturation from well log data by machine learning algorithms: Boosting and super learner, *J. Mar. Sci. Eng.* 9 (2021). <https://doi.org/10.3390/jmse9060666>.
- [22] A. Movahhed, M.N. Bidhendi, M. Masihi, A. Emamzadeh, Introducing a method for calculating water saturation in a carbonate gas reservoir, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 70 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102942>.
- [23] M. Nazemi, V. Tavakoli, H. Rahimpour-Bonab, M. Hosseini, M. Sharifi-Yazdi, 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, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 59 (2018) 297–308. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.09.007>.
- [24] J.C. Rasmus, Variable Cementation Exponent, M, for Fractured Carbonates., *Log Anal.* 24 (1983) 13–23.
- [25] M.R. Rezaee, H. Motiei, E. Kazemzadeh, A new method to acquire m exponent and tortuosity factor for microscopically heterogeneous carbonates, *J. Pet. Sci. Eng.* 56 (2007) 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2006.09.004>.
- [26] A. Soleymanzadeh, M. Jamialahmadi, A. Helalizadeh, B.S. Soulgani, A new technique for electrical rock typing and estimation of cementation factor in carbonate rocks, *J. Pet. Sci. Eng.* 166 (2018) 381–388. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.045>.
- [27] V. Tavakoli, D. Hassani, H. Rahimpour-Bonab, A. Mondak, How petrophysical heterogeneity controls the saturation calculations in carbonates, the Barremian–Aptian of the central Persian Gulf, *J. Pet. Sci. Eng.* 208 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109568>.

<https://doi.org/10.1002/gj.1148>.

[50] V. Tavakoli, Chemostratigraphy of the Permian-Triassic Strata of the Offshore Persian Gulf, Iran, in: Chemostratigraphy Concepts, Tech. Appl., 2015: pp. 373–393. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-419968-2.00014-5>.

[51] J. Aali, H. Rahimpour-Bonab, M.R. Kamali, Geochemistry and origin of the world's largest gas field from Persian Gulf, Iran, J. Pet. Sci. Eng. 50 (2006) 161–175. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.12.004>.

[52] O. Rahmani, M. Khoshnoodkia, H. Mohseni, M. Hajian, Sequence stratigraphy of the Triassic Period: Case from the Dashtak and Khaneh-Kat formations, the Zagros Basin, Iran, J. Pet. Sci. Eng. 167 (2018) 447–457. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.092>.

[53] S. Kolodzie, Analysis Of Pore Throat Size And Use Of The Waxman-Smits Equation To Determine Ooip In Spindle Field, Colorado, in: All Days, SPE, 1980. <https://doi.org/10.2118/9382-MS>.

[54] A. Soleymanzadeh, A. Helalizadeh, M. Jamialahmadi, B.S. Soulgani, Development of a new model for prediction of cementation factor in tight gas sandstones based on electrical rock typing, J. Nat. Gas Sci. Eng. 94 (2021) 104128. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104128>.

[55] V. Tavakoli, Carbonate Reservoir Heterogeneity, Springer International Publishing, Cham, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34773-4>.

[56] P. Kolah-kaj, S. Kord, A. Soleymanzadeh, Application of electrical rock typing for quantification of pore network geometry and cementation factor assessment, J. Pet. Sci. Eng. 208 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109426>.

[57] B. Esmaceli, H. Rahimpour-Bonab, A. Kadkhodaie, A. Ahmadi, S. Hosseinzadeh, Developing a saturation-height function for reservoir rock types and comparing the results with the well log-derived water saturation, a case study from the Fahliyan formation, Dorood oilfield, Southwest of Iran, J. Pet. Sci. Eng. 212 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110268>.

Technol. 12 (2022) 1329–1339. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01391-z>.

[39] M. Wafra, R. Nurmi, S.T. Services, Calculation of Saturation, Secondary Porosity and Producibility in Complex Middle East Carbonate Reservoirs, Middle East. (1987) 1–24.

[40] D. Tiab, E.C. Donaldson, Petrophysics. Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties, Elsevier, 2012. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-64503-7>.

[41] J.W. Focke, D. Munn, Cementation Exponents in Middle Eastern Carbonate Reservoirs., SPE Form. Eval. 2 (1987) 155–167. <https://doi.org/10.2118/13735-PA>.

[42] M. Al Hammadi, S. Al-Maskari, E.-S. Radwan, Improving Oil In Place Estimation through an Improve Water Saturation Prediction – A Case Study in the Middle East, in: All Days, SPE, 2008: pp. 1369–1374. <https://doi.org/10.2118/118126-MS>.

[43] P.R. Sharland, D.M. Archer, R.B. Casey, S.H. Davies, A.P. Hall, A.D. Heward, A.D. Horbury, M.D. Simmons, Arabian plate sequence stratigraphy, Geomarine Spec. Publ. 2. 3 (2001) 56–74.

[44] E. Insalaco, A. Virgone, B. Courme, J. Gaillet, M.R. Kamali, A. Moallemi, M. Lotfpour, S. Monibi, Upper Dalan Member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: Depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture, GeoArabia. 11 (2006) 75–176. <https://doi.org/10.2113/geoarabia110275>.

[45] M.S. Kashfi, GEOLOGY OF THE PERMIAN “SUPER-GIANT” GAS RESERVOIRS IN THE GREATER PERSIAN GULF AREA, J. Pet. Geol. 15 (1992) 465–480. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1992.tb01046.x>.

[46] B. Esrafil-Dizaji, H. Rahimpour-Bonab, A review of permo-triassic reservoir rocks in the zagros area, sw iran: Influence of the qatar-fars arch, J. Pet. Geol. 36 (2013) 257–279. <https://doi.org/10.1111/jjpg.12555>.

[47] A.S. Alsharhan, A.E.M. Naim, Sedimentary basins and petroleum geology of the Middle East, 1997. [https://doi.org/10.1016/s0264-8172\(99\)00008-2](https://doi.org/10.1016/s0264-8172(99)00008-2).

[48] S.N. Dasgupta, M.R. Hong, I.A. Al-Jallal, Accurate reservoir characterization to reduce drilling risk in Khuff-C carbonate, Ghawar field, Saudi Arabia, GeoArabia. 7 (2002) 81–100. <https://doi.org/10.2113/geoarabia070181>.

[49] H. Rahimpour-Bonab, A. Asadi-Eskandar, R. Sonei, Effects of the Permian-Triassic boundary on reservoir characteristics of the South Pars gas field, Persian Gulf, Geol. J. 44 (2009) 341–364.