

## بهبود محاسبه‌ی اشباع آب با استفاده از داده‌های فشار موئینگی در یکی از مخازن گازی جنوب غربی ایران

مهدي رستگاریا، شرکت پتروپارس زاگرس ■ علی صنعتی، دانشگاه حکیم سبزواری

### چکیده

اشباع سیالات موجود در مخازن از متغیرهای مهم جهت تخمین هیدروکربن درجاست و دقت در محاسبه‌ی آن از اهمیت خاصی برخوردار است. تخمین نادرست اشباع آب در یک مخزن می‌تواند به بلااستفاده رها کردن آن مخزن منجر شود. به همین دلیل تاکنون روش‌های آزمایشگاهی و غیرآزمایشگاهی مختلفی برای اندازه‌گیری اشباع آب موجود در منافذ سنگ مخزن ارائه شده است. روش معمول، استفاده از نگارهای الکتریکی با استفاده از روابط آرچی است. اما در بعضی موارد به دلیل ناهمگنی مخازن (به خصوص مخازن کربناته) و حساسیت این گونه نگارها به اشباع‌شدگی آب در منافذ متصل و غیرمتصل به یکدیگر و همچنین عدم وجود ارتباط مشخص بین ضرایب آرچی (ضریب سیمان‌شدگی (m) و توان اشباع (n)) با کانی‌شناسی و حفره‌های موجود در مخزن دقت لازم و کافی ندارد. روش متعارف دیگر استفاده از داده‌های آزمایشگاهی است که دقت زیادی دارند اما این گونه روش‌ها با توجه به هزینه‌ی زیاد و کندی، تنها در تعداد محدودی از چاه‌ها قابل پیاده‌سازی هستند. در این مطالعه تلاش شده با استفاده از داده‌های آنالیز مغزه‌ی موجود، رابطه‌ی جهت بهبود محاسبه‌ی اشباع آب تعیین شود که بتوان آنرا به کل میدان تعمیم داد. برای این منظور با استفاده از تلفیق داده‌های آزمایشگاهی فشار موئینگی به روش تزریق جیوه و همچنین به کارگیری تابع بروکس و کوری و ارتباط آن با تخلخل مؤثر، مقدار اشباع آب در چاه‌های مورد مطالعه بررسی شده و در پایان نتایج حاصل از این روش با مقادیر اشباع آب محاسبه شده از نگارهای چاه‌پیمایی مقایسه شده است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد در حالتی که داده‌های مغزه در چاه‌های دیگر موجود نباشد برای محاسبه‌ی فشار موئینگی می‌توان از مدل تجربی بروکس و کوری که نسبت به روش چاه‌نگاری خطای کمتر و دقتی مناسبی دارد استفاده کرد.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۱۱/۱۲

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش داور: ۹۷/۰۲/۱۱

### واژگان کلیدی:

فشار موئینگی، روش بروکس و کوری، محاسبه‌ی اشباع آب، مخازن گازی کربناته

### مقدمه

به‌ویژه در جنوب کشور دارد. در این پژوهش عملکرد مدل تجربی اندازه‌گیری اشباع آب برای داده‌های منابع گازی جنوب ایران بررسی می‌شود.

### ۱- روش‌های اندازه‌گیری فشار موئینگی

روش‌های آزمایشگاهی متفاوتی برای شبیه‌سازی نیروهای جابه‌جاکننده در یک مخزن، تعیین بزرگی نیروی موئینگی و همچنین توزیع اشباع سیالات و درجه‌ی اشباع آب کاهش نیافتنی ارائه شده‌اند که عبارتند از روش تزریق<sup>۱</sup> جیوه، روش موئینگی برگشتی<sup>۲</sup>، روش پویا<sup>۳</sup> و روش گریز از مرکز<sup>۴</sup>.

### ۱-۱- روش تزریق جیوه

تزریق جیوه یکی از متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده در اندازه‌گیری فشار موئینگی نمونه‌های سنگ مخزن است. این روش در ۱۹۴۹ توسط پورسل ارائه شد. در این روش ابتدا نمونه‌ای تمیز و

فشار موئینگی<sup>۲</sup> که عامل حرکت سیال در محیط متخلخل است به صورت اختلاف فشار فاز تر و غیرتر تعریف می‌شود [۱]. یکی از کاربردهای مهم مفهوم فشار موئینگی به دست آوردن توزیع سیالات در یک مخزن، قبل از استخراج نفت است. علاوه بر این، با رسم نمودار فشار موئینگی می‌توان اطلاعاتی از قبیل اشباع آب اولیه و فشار جابجایی<sup>۳</sup> را برای حرکت سیال در محیط متخلخل محاسبه کرد.

با توجه به اهمیت مفهوم فشار موئینگی، روش‌های آزمایشگاهی مختلفی برای محاسبه‌ی فشار موئینگی وجود دارد. از آنجا که روش‌های آزمایشگاهی پرهزینه و زمان‌بر هستند مدل‌هایی برای محاسبه‌ی فشار موئینگی ارائه شده‌اند. نتایج این مدل‌ها معمولاً به صورت تجربی و با استفاده از داده‌های میدانی خاص حاصل می‌شوند و ممکن است برای داده‌های میدانی دیگر کارایی مناسبی نداشته و قابل تعمیم به نمونه‌های سایر میدانی نباشند. ایران یکی از مهم‌ترین کشورهای نفت خیز دنیا است که منابع نفتی متعددی

\* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (mahdi65.rastegarnia@gmail.com)

جابجایی فاز تر درون مغزه دقیقاً برابر نیروهای موئینگی نگهدارنده‌ی آب باقیمانده در مغزه بعد از تعادل است می‌توان برای رسم نمودار از داده‌های فشار موئینگی استفاده کرد. یکی از مهم‌ترین معایب این روش زمان‌بر بودن آنست [۳].

### ۱-۳- روش پویا

مشخصه‌ی اصلی این روش، کنترل فشار موئینگی در دو انتهای نمونه است. این مسأله با قرار دادن نمونه‌ی مورد نظر بین دو صفحه‌ی متخلخل که نسبت به سیال ترشونده تراواست امکان‌پذیر می‌شود که باعث ایجاد اشباع یکسان در طول مغزه، حتی در نرخ‌های کم می‌گردد. این دو صفحه موجب اندازه‌گیری فشار بین دو فاز می‌شود. در نتیجه فشار موئینگی برابر است با اختلاف فشار بین فاز تر و غیرتر. پس از برقراری تعادل، نمونه خارج می‌شود و اشباع آن توسط اندازه‌گیری وزن نمونه به‌دست می‌آید [۴].

### ۱-۴- روش گریز از مرکز

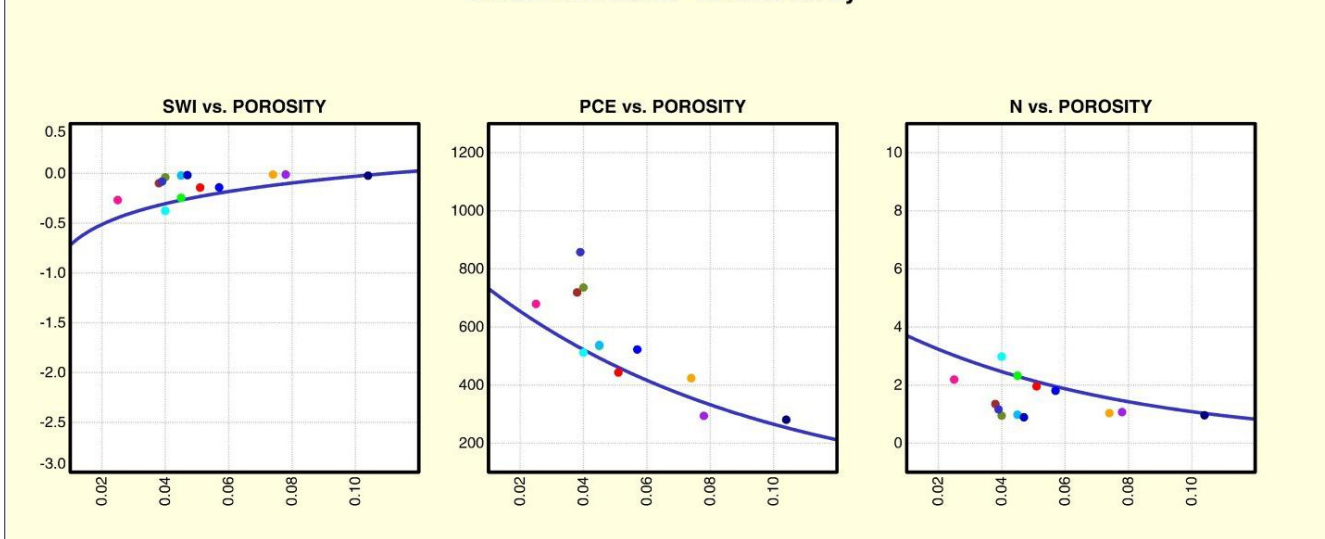
هاسلر و برنر اولین بار در ۱۹۴۵ طی مقاله‌ای روش سانتریفیوژ را برای نمونه‌ی مشخصی ارائه کردند. در این روش ابتدا نمونه با آب (یا نفت) اشباع می‌شود، سپس درون محفظه‌ای قرار می‌گیرد و به درون دستگاه سانتریفیوژ منتقل می‌گردد. سرعت دستگاه به‌طور مرحله‌ای افزایش می‌یابد و با توجه به حجم خوانده شده‌ی مایع، میانگین اشباع محاسبه می‌گردد. پس از اتمام آزمایش، نمونه را خارج کرده و وزن آنرا اندازه‌گیری می‌کنند و میانگین اشباع مشخص می‌شود. با توجه به وزن نمونه‌ی خشک و اشباع شده و داده‌های حاصل، نمودار فشار

خشک‌شده با حجم و تراوایی مطلق مشخص را در محفظه‌ای قرار داده و به آن جیوه تزریق می‌کنند. بر اثر فشار ناشی از تزریق، جیوه وارد خلل و فرج سنگ شده و هوا را جابجا می‌کند. حجم جیوه‌ی تزریق شده در هر فشار، اشباع فاز غیرتر را تعیین می‌کند؛ زیرا جیوه معمولاً فاز تر و هوا فاز غیرتر است. روند تزریق تا جایی ادامه می‌یابد که نمونه‌ی مغزه کاملاً با جیوه پر شود یا فشار تزریق به مقدار از پیش تعیین شده‌ای برسد. فشارها و اشباع‌های اندازه‌گیری شده با این روش، منحنی تخلیه‌ی اشباع فشار موئینگی را تعیین می‌کنند (جیوه هوا را جابجا می‌کند). از بین رفتن نمونه بعد از انجام آزمایش و استفاده از جیوه در انجام آزمایش که بخارات خطرناکی برای سلامتی انسان دارد از جمله معایب این روش است [۲].

### ۱-۲- روش موئینگی برگشتی

این آزمایش با اشباع نمونه تا صد درصد از آب مخزن و سپس قرار دادن آن روی غشایی متخلخل که صد درصد با آب اشباع شده و تنها نسبت به آب نفوذپذیر است شروع می‌شود. در مرحله‌ی بعد هوا به درون محفظه تزریق می‌شود و فشار را افزایش می‌دهد، آب مقداری جابجا شده و از غشای متخلخل نیمه‌تراوا به استوانه‌ای مدرج وارد می‌گردد. تا وقتی آبی جابه‌جا نشود فشار ثابت نگه داشته می‌شود. این فرآیند ممکن است چندین روز یا هفته طول بکشد. در مرحله‌ی بعد نمونه برداشته شده و درجه‌ی اشباع آن با اندازه‌گیری وزن تعیین می‌شود. در گام بعدی نمونه دوباره در محفظه قرار می‌گیرد، فشار دوباره افزایش می‌یابد و فرآیند دوباره تکرار می‌شود تا درجه‌ی اشباع آب کمینه شود. به دلیل آنکه فشار لازم برای

Model Parameters - Brooks-Corey



۱ | رگرسیون داده‌های آزمایشگاهی با متغیرهای مدل کوری در محیط نرم افزار ژنولگ



می‌شود. از آنجا که نمونه‌ی سنگ را قبل از تزریق کاملاً تمیز می‌کنند رس پراکنده‌ی موجود در منافذ نیز شسته می‌شود. بنابراین تأثیر رس بر نمودار فشار موئینگی در نظر گرفته نمی‌شود که باید تصحیح گردد.

### ۳-۲- تصحیح فشار جانبی

بسیاری از آزمایش‌های فشار موئینگی در فشار جو انجام می‌شوند. برای نزدیک کردن نتایج به واقعیت باید اثر فشار محصورکننده نیز به صورت تصحیحی روی داده‌ها اعمال شود [۶].

### ۳-۳- مدل‌های فشار موئینگی

به دلیل هزینه‌بر و وقت‌گیر بودن آزمایش‌های فشار موئینگی همواره افرادی به دنبال ارائه‌ی مدل‌هایی برای محاسبه‌ی فشار موئینگی بوده‌اند که هدف تمامی آنها ارائه‌ی مدلی بوده که به مقدار حقیقی فشار موئینگی نزدیک‌تر باشد. مهم‌ترین این روش‌ها به شرح زیر است [۷]:

- لورت<sup>۱</sup> (۱۹۴۱)
- بردین<sup>۲</sup> (۱۹۵۳)
- بروکس و کوری<sup>۳</sup> (۱۹۶۴)
- نون و پیکت<sup>۴</sup> (۱۹۷۵)
- بنتسن و همکاران<sup>۵</sup> (۱۹۷۶)

موئینگی برای هر نمونه رسم می‌گردد [۵]. در این مطالعه برای به دست آوردن داده‌های آزمایشگاهی فشار موئینگی برای نمونه‌های موجود از روش تزریق جیوه استفاده شده است.

### ۲- تصحیحات مورد نیاز

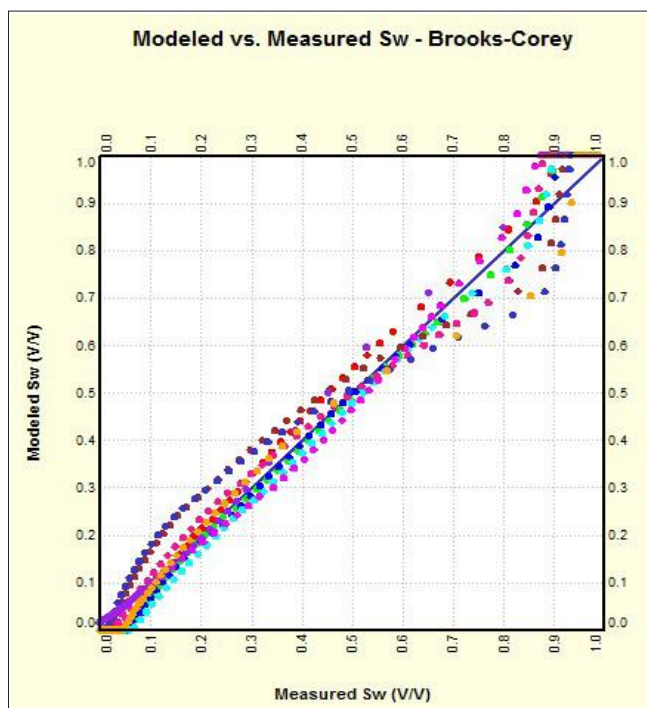
به دلیل فرضیات ساده‌کننده‌ی به کار رفته در روش تزریق جیوه (بدون شکاف بودن نمونه، ثابت بودن زمان، همگن بودن نمونه، اثر انتهایی، فشار موئینگی صفر در شرایط مرزی فرضیات مربوط به فیزیک سیال جایجا شده و غیره)، همواره بین اشباع خوانده شده در این روش و اشباع واقعی تفاوت‌هایی وجود دارد. به همین دلیل قبل از استفاده از این داده‌ها باید تصحیحاتی روی این داده‌ها انجام شود که در ادامه به طور خلاصه بررسی می‌گردد.

### ۱-۲- تصحیح برای حداقل فشار نفوذ

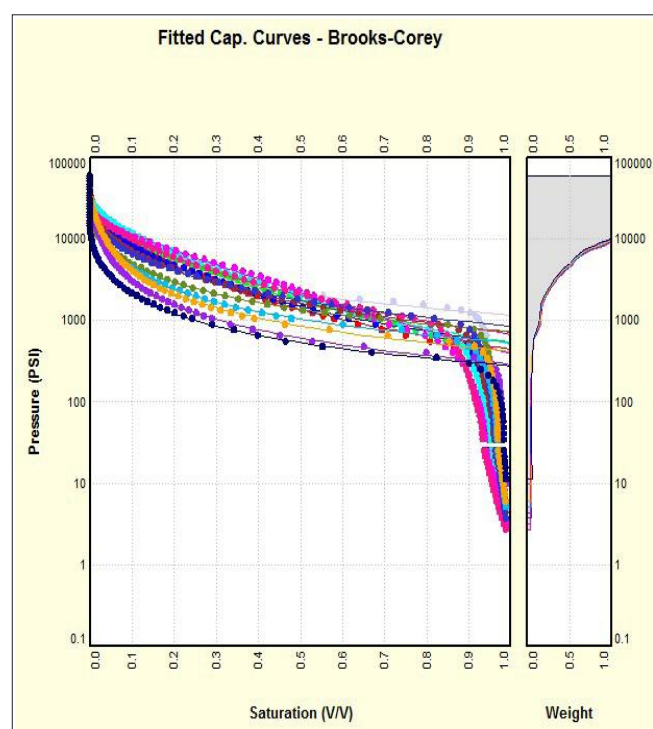
این نوع تصحیح فقط باید در آزمایش تزریق جیوه اعمال شود. با تزریق جیوه به نمونه، ابتدا سطح نمونه کاملاً به جیوه آغشته می‌شود و فشار تزریق افزایش می‌یابد. در این فشار جیوه می‌تواند فاز تر را از منافذ بزرگ سنگ خارج کرده و خود جایگزین آن شود.

### ۲-۲- تصحیح برای رس

این نوع تصحیح نیز معمولاً تنها در آزمایش تزریق جیوه اعمال

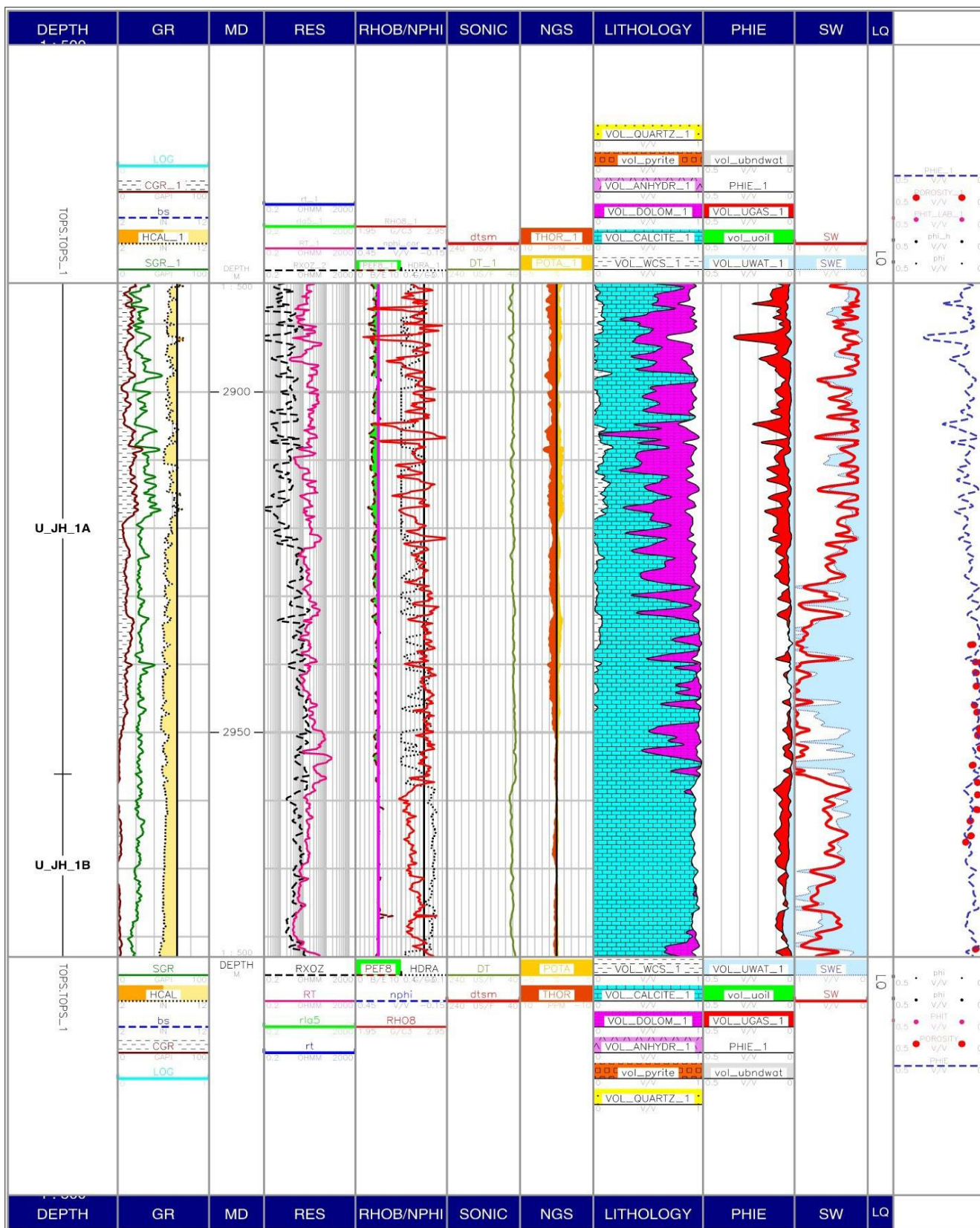


شکل ۳ | مقایسه‌ی اشباع تخمینی با روش کوری با اشباع اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه



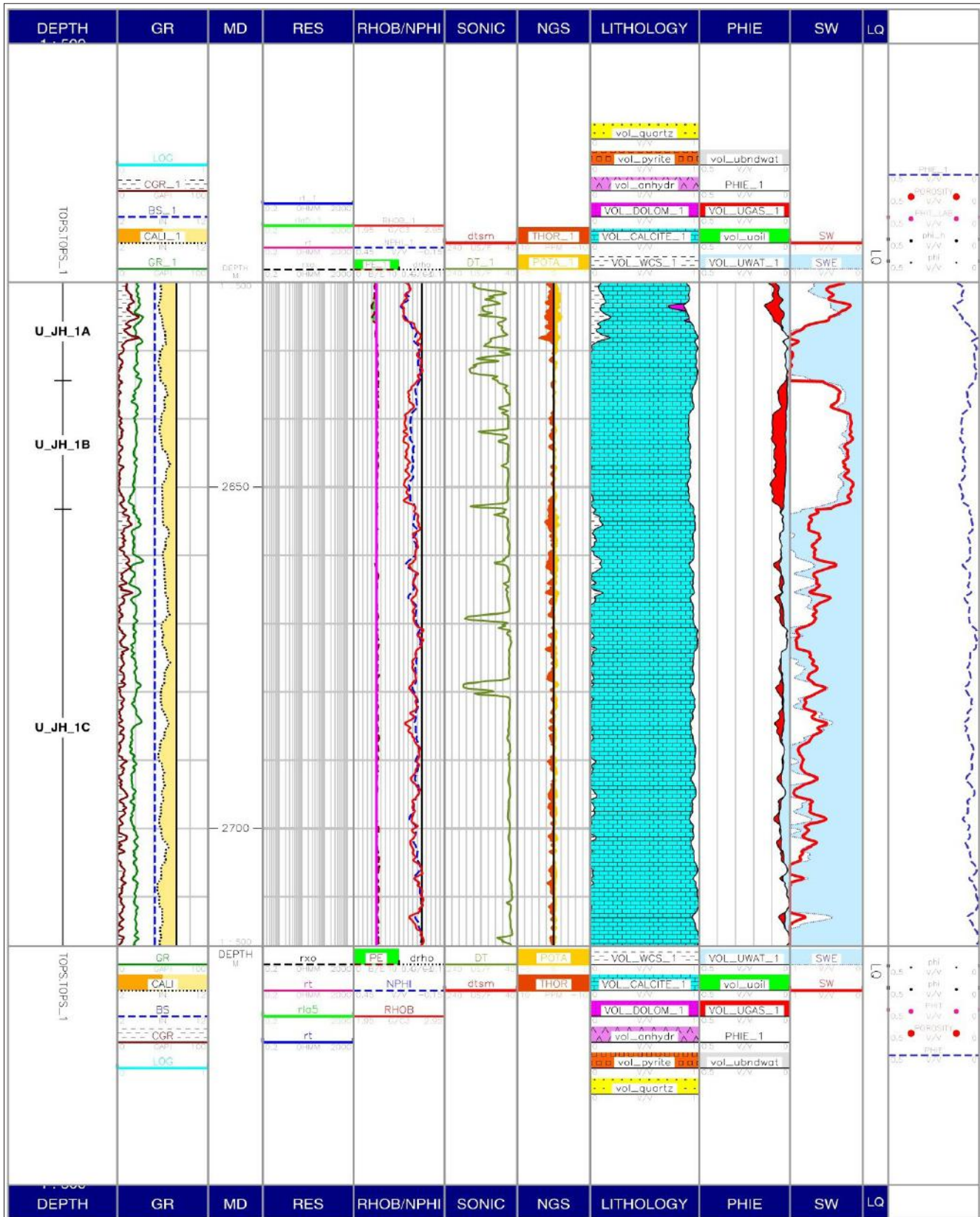
شکل ۲ | مقایسه‌ی نمودارهای فشار موئینگی با معادله‌ی بروکس و کوری





شکل ۴ | مقایسه‌ی اشباع حاصل از روش کوری با اشباع حاصل از ارزیابی پتروفیزیکی در چاهی با داده‌های مغزه‌ی موجود





شکل ۵ | مقایسه‌ی اشباع با نتایج ارزیابی پتروفیزیکی در چاه فاقد مغزه

- گولاز و همکاران<sup>۳</sup> (۱۹۸۰)
- دونالدسون و همکاران<sup>۴</sup> (۱۹۹۱)
- الفسیل<sup>۵</sup> (۲۰۰۳)
- فورد لوملند<sup>۶</sup> (۲۰۰۸)

#### ۴- روش انجام پژوهش

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از مغزه‌های استخراج شده‌ی از یکی از مخازن گازی جنوب ایران به دست آمده‌اند که اشباع آب آنها با قرار گرفتن آنها در دستگاه تزریق جیوه و اعمال فشار روی این مغزه‌ها به دست آمده است. این کار تا زمانی ادامه یافته که با افزایش فشار، دیگر تغییری در اشباع آب موجود در نمونه ایجاد نشود. سپس برای مقایسه با مدل‌های مختلف تجربی داده‌های حاصل در نرم‌افزار ژئولاگ وارد شده و مناسب‌ترین این مدل‌ها انتخاب گردیده است. اکنون در نقاطی که فاقد داده‌های مغزه هستند نیز می‌توان برآوردی نسبتاً دقیق از اشباع آب داشت.

#### ۴-۱- ساخت مدل اشباع - ارتفاع با استفاده از نرم‌افزار ژئولاگ

برای ساخت مدل اشباع - ارتفاع دو مرحله مورد نیاز است:

- به دست آوردن متغیرهای مدل از طریق تطابق آن با نمودارهای فشار موئینگی حاصل از آزمایش تزریق
- متغیر سومی که معمولاً تخلخل یا تراوایی است وارد مدل می‌شود و مدل حاصل اشباع آب را به صورت تابعی از آن متغیر و HAFWL (ارتفاع از سطح آب آزاد مخزن) پیش‌بینی می‌کند.

لازم به ذکر است که داده‌های حاصل از آزمایش تزریق قبل از ورود به مرحله تطابق، برای یافتن متغیرهای بهینه‌ی مدل باید توسط معادله‌ی ۱- اصلاح شوند. سیال استفاده شده در آزمایش جیوه است؛ در صورتی که باید آب یا نفت ملاک ارزیابی قرار گیرند. هر سیال در تماس با سطح سنگ، کشش سطحی و ترشوندگی مخصوصی را تجربه می‌کند و بنابراین داده‌های فشار موئینگی متفاوتی به دست خواهد آمد. معادله‌ی ۱- فرمول تبدیل این داده‌ها به داده‌های اصلاح شده است.

$$P_c = P_{c_{lab}} \frac{\sigma \cos \theta}{\sigma_{lab} \cos \theta_{lab}} \quad (1)$$

که در آن  $P_c$  فشار موئینگی اصلاح شده برای سیال مرجع،  $P_{c_{lab}}$  فشار موئینگی تصحیح شده‌ی حاصل از آزمایش تزریق جیوه در آزمایشگاه،  $\sigma$  و  $\theta$  کشش سطحی و زاویه‌ی تماس سیال مرجع و  $\sigma_{lab}$  و  $\theta_{lab}$  کشش سطحی و زاویه‌ی تماس جیوه با سطح سنگ است.

#### ۴-۲- یافتن مناسب‌ترین مدل

پس از انجام تصحیحات اشاره شده روی داده‌های آزمایشگاهی و

با ساخت مدل اشباع - ارتفاع در نرم‌افزار ژئولاگ، مدل بروکس و کوری به عنوان مناسب‌ترین مدل برای تخمین اشباع آب انتخاب شد [۸]. تابع مدل بروکس و کوری طبق معادله‌ی ۲- است:

$$S_w = S_{wi} + (1 - S_{wi}) \left( \frac{P_{ce}}{P_c} \right)^n \quad (2)$$

که  $P_{ce}$  فشار جابجایی،  $S_{wi}$  اشباع آب کاهش نیافتنی و  $n$  ضریب کوری است. برای به دست آوردن هر یک از متغیرهای ذکر شده رابطه‌ای بین آنها و متغیر تخلخل مؤثر ایجاد شد. شکل-۱ رگرسیون داده‌های آزمایشگاهی با متغیرهای مدل کوری را در محیط نرم‌افزار ژئولاگ نشان می‌دهد که متغیر سوم اشاره شده در مدل کوری، تخلخل در نظر گرفته شده است.

در جدول-۱ معادلات حاصل برای هر یک از متغیرهای مدل بروکس و کوری نشان داده شده که در چاه‌های فاقد داده‌های آزمایشگاهی می‌توان متغیرهای مذکور را با استفاده از این روابط به دست آورد.

پس از تعیین متغیرهای مدل، این مدل روی نمونه‌ها رسم شده است (شکل-۲).

در شکل-۳ اشباع تخمینی از روش کوری با اشباع واقعی محاسبه شده در آزمایشگاه در چاه دارای مغزه مقایسه شده است. واضح است که هر چه نقاط به سمت خط با شیب ۴۵ درجه نزدیک شوند کیفیت تخمین مدل بهتر خواهد بود.

#### ۴-۳- مقایسه‌ی مقادیر اشباع آب محاسبه شده با مقادیر اشباع آب حاصل از چاه‌نگاری

شکل-۴ اشباع حاصل از روش کوری را با اشباع حاصل از ارزیابی پتروفیزیکی در چاهی که داده‌های مغزه داشته مقایسه می‌کند. اشباع حاصل با رنگ قرمز در تراک سوم از سمت چپ نشان داده شده است. سپس از این رابطه برای به دست آوردن اشباع در چاه فاقد مغزه استفاده گردید و نتایج با ارزیابی پتروفیزیکی قیاس شد که نتایج یکدیگر را تأیید می‌کردند (شکل-۵). لازم به ذکر است که روش مورد استفاده برای محاسبه‌ی اشباع آب با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی روش اندونزی بوده است [۹].

#### نتیجه‌گیری

- در این مطالعه با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی فشار موئینگی به روش تزریق جیوه و همچنین با به کارگیری تابع بروکس و کوری و ارتباط آن با تخلخل مؤثر، میزان اشباع آب در چاه‌ها محاسبه گردید و نتایج با مقادیر اشباع آب محاسبه شده از نگارهای چاه‌پیمایی مقایسه گردید که تطابق خوبی را نشان می‌داد.

- نگارهای مقاومت ویژه حساسیت زیادی به اشباع آب مرتبط



ثابت در نظر گرفته می‌شود؛ در حالی که به علت ناهمگنی مخزن این متغیر نمی‌تواند ثابت باشد. بنابراین روش اندونزی دقت لازم و کافی ندارد.

■ جهت محاسبه‌ی اشباع آب در مخازن کربناته نتایج حاصل از روش بروکس و کوری نسبت به نتایج روش چاه‌نگاری از دقت و قابلیت اعتماد بیشتری برخوردار است. ■

دارند؛ در حالی که روش بروکس و کوری فاقد این حساسیت است. در محاسبه‌ی اشباع آب با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی از مدل اندونزی استفاده شد که این مدل عامل مقاومت و حجم شیل را در محاسبات در نظر می‌گیرد اما متغیر توان اشباع (n) در این مدل با کانی‌شناسی و حفزه‌های موجود در مخزن در ارتباط نیست. چراکه معمولاً این متغیر در محاسبات

معادلات حاصل برای هر یک از متغیرهای مدل بروکس و کوری				
معادله‌ی برازش	گرادینان	عرض از مبدا	مدل	متغیر
SWI	لگاریتمی	۰/۶۶۲۸۶۲	۰/۶۹۱۶۲۳	$SWI=0.662862+0.691623*\text{LOG}_{10}(\text{POROSITY})$
PCE	نمایی	۲/۹۱۳۶۰۵	-۴/۹۰۲۵۸۰	$PCE=819.605220*10^{**}(-4.902580*(\text{POROSITY}))$
N	نمایی	۰/۶۲۸۲۲۱	-۵/۹۳۰۷۴۸	$N=4.248352*10^{**}(-5.930748*(\text{POROSITY}))$

## پانویس‌ها

1. a.sanati@hsu.ac.ir
2. Capillary Pressure
3. Displacement Pressure
4. Mercury Injection
5. Porous plate
6. Dynamic Method
7. Centrifuge Method
8. Leverett
9. Burdine
10. Brooks and corey
11. Kwon and Pickett
12. Bentsen et al
13. golaz et al
14. Donaldson et al
15. Al-Fosail
16. FrodeLomeland

## منابع

- [1] Ahmed, T., Reservoir engineering handbook. 2006: Gulf Professional Publishing.
- [2] Torsæter, O. and M. Abtahi, Experimental reservoir engineering laboratory workbook. Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, 2003.
- [3] Dernaika, M., et al., Drainage Capillary Pressure and Resistivity Index from Short-Wait Porous-Plate Experiments. Petrophysics, 2016. 57(04): p. 369376-.
- [4] Brown, H.W., Capillary pressure investigations. Journal of Petroleum Technology, 1951. 3(03): p. 67-74.
- [5] Hassler, G. and E. Brunner, Measurement of capillary pressures in small core samples. Transactions of the AIME, 1945. 160(01): p. 114123-.
- [6] Newsham, K., J. Rushing, and P. Lasswell, A Comparative Study of Laboratory Techniques for Measuring Capillary Pressures in Tight Gas Sands. Paper SPE 89866 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, 26-29 September. 2004.
- [7] Forbes, P., Simple and accurate methods for converting centrifuge data into drainage and imbibition capillary pressure curves. The Log Analyst, 1994. 35(04).
- [8] Lalicata, J., et al. A Saturation Height Function Model Derived From Capillary Pressure, Lower Etchegoin/Williamson Reservoir, Lost Hills Field. in SPE Western Regional Meeting. 2012. Society of Petroleum Engineers.
- [9] Dewan, J.T., Essentials of modern open-hole log interpretation. 1983: PennWell Books.