

مروری بر مطالعات انجام شده روی ضریب سیمان‌شدگی و عوامل موثر بر آن و مقایسه‌ی نتایج روابط تجربی و آنالیز مغزه در یکی از میداین جنوب ایران

احمد آزادی‌وش^۱، دانشجوی دکتری مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر ■ ولی مهدی‌پور، کارشناس مدل‌سازی زمین‌شناسی شرکت دانا انرژی

چکیده

تعیین مقدار حجمی هیدروکربن در برنامه‌ریزی و توسعه‌ی میداین نفت و گاز از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است و محاسبه‌ی میزان آب اشباع‌شدگی مخازن یکی از مهم‌ترین فاکتورها است. در محاسبه‌ی میزان آب اشباع‌شدگی مخازن هیدروکربوری، معادله‌ی آرچی اساسی‌ترین رابطه است. این رابطه سه پارامتر ضریب سیمان‌شدگی (m)، نمای اشباع (n) و پیچاپیچی (a) دارد که پارامترهای آرچی نامیده می‌شوند. تغییرات اندک در هر یک از این ضرایب باعث خطای زیادی در محاسبه‌ی آب اشباع‌شدگی و در نتیجه میزان حجم هیدروکربور در جای مخزن می‌شود. در این مقاله سعی شده است مروری بر مطالعات پیشین روی روابط تجربی به دست آمده برای ضریب سیمان‌شدگی، میزان دامنه‌ی تغییرات ضرایب سیمان‌شدگی بر اساس مطالعات محققان مختلف و همچنین عوامل و پارامترهای اثرگذار روی این ضریب انجام شود. نتایج مرور بر مطالعات گذشته نشان داد که در سنگ‌های کربناته بر خلاف ماسه‌سنگ‌ها تنوع زیاد لیتولوژیکی از نظر نوع بافت و شکل منافذ وجود دارد و چون ضرایب آرچی نیز تحت‌تأثیر عوامل لیتولوژیکی، به ویژه نوع منافذ هستند، در نتیجه باید ضرایب آرچی برای انواع گونه‌های سنگی در یک مخزن کربناته محاسبه شوند. در ادامه مشخص شد که ثابت در نظر گرفتن مقادیر ضرایب آرچی با توجه به وابسته بودن این ضرایب به عوامل متعدد در سنگ‌ها صحیح نبوده و باعث بروز خطا در نتایج ارزیابی آب اشباع‌شدگی می‌شود. بنابراین استفاده از آنالیزهای عدم قطعیت در محاسبه‌ی آب اشباع‌شدگی نقش بسزایی در برآورد حجم دقیق هیدروکربور در جای مخزن دارد. در انتها نیز میزان ضریب سیمان‌شدگی در یکی از مخازن جنوب ایران با استفاده از نتایج آنالیز مغزه و روابط تجربی با یکدیگر مقایسه شدند و مشخص شد روابط تجربی نمی‌توانند در سازندهایی غیر از سازندی که این روابط برایشان تعریف شده، نتایج دقیقی ارائه دهند.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۹/۰۶/۰۹
تاریخ ارسال به داور: ۹۹/۰۶/۱۶
تاریخ پذیرش داور: ۹۹/۱۲/۲۳

واژگان کلیدی:

آب اشباع‌شدگی، تخلخل، معادله آرچی، ضریب سیمان‌شدگی، نمای اشباع، پیچاپیچی.

مقدمه

گاز از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است و مسلماً میزان درصد اشباع نفت یکی از فاکتورهای مهم در این محاسبات است. هرگونه اشتباه در محاسبه‌ی این پارامتر می‌تواند منجر به از دست دادن لایه‌های تولیدکننده‌ی نفت شود. اگر در محاسبه‌ی آب اشباع‌شدگی خطای قابل‌توجهی رخ دهد، ممکن است تخمین زیاد اشباع‌شدگی در مورد مخزنی با اشباع‌شدگی کم سبب شود تا آن مخزن بلااستفاده رها شود. عکس این پدیده نیز ممکن است به وقوع بپیوندد، بدین صورت که مخزنی دارای اشباع‌شدگی آب زیاد باشد و به دلیل خطای محاسبه، مقدار آن کمتر تخمین زده شود و در نتیجه هزینه‌های هنگفت صرف مخزنی شود که تولیدکننده نیست. [۱] به دست آوردن مقدار آب اشباع‌شدگی با دقت بالا به تشخیص دقیق زون‌های تولیدی کمک شایانی می‌کند و از صرف هزینه‌های اضافی جداسازی آب از نفت در مراحل تولید و بهره‌برداری می‌کاهد.

ارزیابی مخزن، نقش بسیار مهمی در صنعت نفت ایفا می‌کند. یکی از مهم‌ترین متغیرها در ارزیابی خواص مخزنی و تخمین هیدروکربن درجا^۱، تعیین درجه‌ی آب اشباع‌شدگی^۲ است. آب اشباع‌شدگی عبارت است از میزان حجم آبی که در فضای متخلخل وجود دارد و به طور مثال برای یک مخزن اگر درجه‌ی آب اشباع‌شدگی ۴۰ درصد باشد، این مفهوم را می‌رساند که از کل حجم فضای خالی سنگ ۴۰ درصد را آب و ۶۰ درصد را سیالات هیدروکربوری تشکیل می‌دهند. تعیین دقیق درجه‌ی آب اشباع‌شدگی از آن جهت اهمیت دارد که در تعیین حجم ذخیره‌ی هیدروکربوری مخزن نقش کلیدی دارد و کوچک‌ترین خطایی در محاسبه‌ی آب اشباع‌شدگی، خطای بسیاری را در محاسبه‌ی حجم ذخیره‌ی مخزن ایجاد می‌کند. محاسبات حجمی هیدروکربوری در برنامه‌ریزی و توسعه‌ی میداین نفت و

* نویسنده‌ی عهد‌دار مکاتبات (azadiahmad26@gmail.com)

۱- روش‌های محاسبه‌ی اشباع

اگر مغزه با گل حفاری پایه‌ی روغنی به دست آمده و همچنین در حالت آب کاهش نیافتنی قرار داشته باشد، اشباع آب محاسبه شده در این حالت برابر با مقدار واقعی آن می‌شود.

اگر آب در جای مخزن در حالت آب کاهش نیافتنی قرار نداشته باشد، ممکن است تراویده‌ی گل حفاری مقداری از آب را جابجا کند و باعث شود میزان اشباع آب برآورده شده در آزمایشگاه بسیار ناچیز باشد. از آنجا که مغزه از فشار و دمای بالای مخزن به فشار و دمای پایین آزمایشگاه آورده می‌شود، در اشباع سیالات به دست آمده در آزمایشگاه با میزان واقعی آنها تفاوت وجود دارد. اگر گاز آزاد وجود داشته باشد، منبسط شده و نفت و آب را خارج می‌کند.

گاز محلول در نفت نیز از آن بیرون آمده، منبسط شده و باعث کاهش حجم آب و نفت می‌شود. آزاد شدن گاز باعث کاهش حجم نفت می‌شود. این تغییرات باعث می‌شود تا اشباع سیالات به دست آمده از آنالیز مغزه با مقادیر در جای آنها در مخزن یکسان نباشد. به عبارت دیگر، این تغییرات باعث می‌شوند حتی اگر در شرایط اولیه‌ی مخزن، گاز آزاد وجود نداشته باشد، اشباع گاز بیش از اندازه شود.

اگرچه اشباع سیالات به دست آمده از روش‌های مستقیم بر روی مغزه نمی‌تواند بیانگر مقادیر واقعی آنها در مخزن باشد، اما اطلاعات مفیدی از شرایط مخزن را فراهم می‌کنند. محاسبات اشباع سیالات را می‌توان جهت مشخص کردن مکان‌های تقریبی سطوح تماس آب-نفت و گاز-نفت در مخزن (اگر موجود باشند)، مورد استفاده قرار داد. [۲]

۲-۱- روش غیرمستقیم

محاسبه‌ی اشباع آب و اشباع هیدروکربور، به طور غیرمستقیم با استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی^۹ و فرمول‌های مختلفی که در آن از این نمودارها استفاده می‌شود، به دست می‌آید.

رایج‌ترین و اولین فرمول محاسبه‌ی اشباع آب، رابطه‌ی آرچی^{۱۰} است. طی سال‌های متمادی توسط محققین مختلف این رابطه تکمیل شده است، به طوری که روابط دوال واتر^{۱۱}، واکسمن اسمیتز^{۱۲}، ایندونیازیا^{۱۳}، جوسز^{۱۴} و سیمندوکس^{۱۵} تکمیل شده‌ی رابطه‌ی آرچی هستند.

همه‌ی این روابط دارای سه ضریب سیمان‌شدگی^{۱۶} (m)، پیچایی^{۱۷} (a) و توان اشباع آب^{۱۸} (n) می‌باشند. آرچی این ضرایب را بر اساس آزمایشات خود بر روی مخازن ماسه‌سنگی تمیز بدون شیل تعیین و اعداد ثابتی را ارائه کرد. اما سنگ‌های کربناته و ماسه‌سنگ‌های شیلی برخلاف ماسه‌سنگ‌های تمیز دارای تنوع زیادی با توجه به نوع بافت و شکل منافذ هستند. در مخازن کربناته مقدار ضریب سیمان‌شدگی به مقدار و نوع تخلخل، تراوایی، بافت سنگ، شوری آب سازند، نحوه‌ی توزیع حفرات^{۱۹} و نحوه‌ی ارتباط این حفرات بستگی دارد و از نمونه‌ای به نمونه‌ی دیگر تغییر می‌کند.

دو راه کلی جهت تعیین اشباع در جای سیالات درون سنگ‌های مخزن هیدروکربوری وجود دارد: روش مستقیم و غیرمستقیم. روش مستقیم آن است که اشباع سیالات مستقیماً از طریق مغزه‌های بریده شده از مخزن به دست آید. روش دیگر که غیرمستقیم است با تعیین پارامترهای دیگری که به نوعی با اشباع سیالات مرتبط است، محاسبه می‌شود. [۲]

۱-۱- روش مستقیم

یکی از روش‌های مستقیم تعیین اشباع سیالات، روش ریتورت^۳ است. در این روش ابتدا به نمونه‌ی مغزه^۴ گرما داده می‌شود تا آب و نفت آن بخار شود. سپس میعانات آنها در ظرف مدرجی جمع‌آوری می‌شود. با تقسیم حجم آب و نفت جمع‌آوری شده به حجم فضای خالی نمونه، اشباع هر سیال جداگانه به دست می‌آید.

اشباع گاز نیز با تفریق مجموع اشباع آب و نفت از عدد یک تعیین می‌شود. در روش ریتورت جهت محاسبه‌ی اشباع سیالات، دو اشکال وجود دارد. برای خارج کردن تمام نفت موجود بایستی دمای نمونه به ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه‌ی فارنهایت برسد. در این دما، آب متبلور (هیدراسیون) شده‌ی سنگ خارج شده و در نتیجه اشباع آب را بالاتر از مقدار واقعی و در جای آن نشان می‌دهد. از دیگر معایب این دستگاه این است که نفت در دمای گفته شده تمایل زیادی به شکسته شدن و تبدیل شدن به زغال دارد. این شکسته و زغال شدن باعث شده اشباع نفت کمتر از مقدار واقعی آن نشان داده شود. جهت واقعی بودن نتایج دستگاه ریتورت، می‌بایست تصحیحاتی بر روی آن انجام شود. [۲] روش دیگر مستقیم اندازه‌گیری اشباع، استخراج توسط حلال می‌باشد.

این عمل توسط دستگاه تقطیر دین استارک^۵ انجام می‌شود. مغزه در این دستگاه به صورتی قرار می‌گیرد تا بخار حلال (به طور مثال تولوئن) در طول مغزه بالا رفته و میعانات آن به مغزه بازگردد. در این فرآیند نفت و آب در پایین نگهدارنده قرار گرفته در حالی که حلال به طرف گرمادهنده برمی‌گردد.

این فرآیند استخراج تا جایی ادامه می‌یابد که دیگر آبی در ظرف نگهدارنده قرار نگیرد. اشباع نفت به طور غیرمستقیم با اندازه‌گیری وزن نمونه‌ی اشباع شده‌ی قبل از تقطیر، وزن نمونه‌ی خشک بعد از تقطیر و وزن آب جمع‌آوری شده از نمونه به دست می‌آید. همچنین اشباع گاز بار دیگر با تفریق مجموع اشباع آب و نفت از عدد یک تعیین می‌شود. [۲]

اگر مغزه با گل حفاری پایه‌ی آبی^۶ به دست آمده باشد، ممکن است تحت تاثیر تراویده‌ی گل حفاری^۷ قرار گرفته و در نتیجه اشباع آب را بیشتر از مقدار واقعی و دست‌نخورده‌ی سازند نشان دهد. همچنین اشباع نفت اندازه‌گیری شده در حقیقت اشباع نفت پس از سیلاب‌زنی آب^۸ است و بنابراین کمتر از مقدار واقعی اشباع نفت می‌باشد.

نمونه‌هایی که حاوی هیدروکربن بودند، آزمایش شدند. بر این اساس فاکتور دیگری توسط آرچی معرفی شد که بعدها آن را اندیس یا شاخص مقاومت ویژه^{۲۳} (I_R) نامید.

$$I_R = \frac{R_t}{R_o} \quad \text{رابطه ی (۳)}$$

که در این رابطه، R_t مقاومت ویژه‌ی سازند است. به علت مشکلات فراوان در اندازه‌گیری مقاومت ویژه در نمونه‌های حاوی هیدروکربن، آرچی از نمونه‌های محققان قبلی استفاده کرد و با رسم آب اشباع‌شدگی (S_w) و اندیس مقاومت ویژه در نمودار لگاریتمی رابطه‌ی ۴ را به دست آورد.

$$I_R = \frac{1}{S_w^n} \quad \text{رابطه ی (۴)}$$

در این رابطه، n نمای اشباع‌شدگی است و آرچی آن را برابر ثابت فرض کرد. با تلفیق روابط ۱ تا ۴، آرچی فرمول معروف خود را به صورت رابطه‌ی ۵ بیان کرد که شکل دیگر و متداول تر آن با رابطه‌ی ۶ آورده شده است.

$$R_t = \frac{aR_w}{\phi^m S_w^n} \quad \text{رابطه ی (۵)}$$

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{aR_w}{\phi^m R_t}} \quad \text{رابطه ی (۶)}$$

آرچی مقدار m را برای سنگ‌های سخت شده، ۲ و برای سنگ‌های سست برابر ۱/۳ بیان کرد. از این رو به نظر می‌آید که مقدار m با افزایش سنگ‌شدگی و سیمان‌شدگی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین m را ضریب سیمان‌شدگی نامید. [۳]

۱-۲- مفهوم ضریب سیمان‌شدگی (m)

برای اولین بار مفهوم فاکتور یا ضریب سیمان‌شدگی را آرچی در سال ۱۹۴۲ بیان کرد. در واقع او عبارت فاکتور سیمان‌شدگی را به کار نبرد، ولی متوجه شد که این فاکتور یا توان به توصیف رابطه‌ی تجربی بین تخلخل (ϕ) و فاکتور سازندی (F) کمک می‌کند. [۳] همچنین این رابطه کاربرد بسیار خوبی در مطالعات کمی لاگ‌های الکتریکی دارد.

در ابتدا او رابطه‌ی بین مقاومت ویژه‌ی (R_o) ماسه‌سنگی با اشباع کامل ($S_w=1$) از آب‌شور و مقاومت ویژه‌ی آب‌شور (R_w) برای تعداد زیادی نمونه‌ی مغزه‌ی اشباع از آب‌شور را به صورت رابطه‌ی ۱ بیان کرد. سپس متوجه شد که فاکتور سازندی تابعی از نوع سازند با تخلخل متفاوت است. این رابطه‌ی اساسی ۲ مبنایی برای دسته‌بندی سازندهای ماسه‌ای شد. [۵]

همان‌طور که بیان شد مقدار فاکتور سیمان‌شدگی m در ماسه‌سنگ‌های سست و تمیز (بدون شیل) توسط آرچی به کمک مطالعات آزمایشگاهی برابر ۱/۳ و برای ماسه‌سنگ‌های متراکم و یکپارچه در دامنه‌ی ۱/۸ تا ۲ است. [۳] گایود در سال

به همین دلیل این ضرایب، به خصوص ضریب سیمان‌شدگی را نمی‌توان ثابت در نظر گرفت. همچنین استفاده از روابط تجربی^{۲۰} غیربومی جهت این ضریب، منجر به خطای زیادی در محاسبات اشباع آب می‌شود. در صورتی که از مقادیر پیش فرض و یا روابط تجربی غیربومی استفاده شود، خطایی حدود ۱۰ تا ۴۰ درصد در محاسبه‌ی متوسط خواص پتروفیزیکی مخزن به وجود می‌آید و در نتیجه محاسبه‌ی حجم هیدروکربور درجا نیز با خطای زیادی روبرو می‌شود. [۲]

۲- تعریف رابطه‌ی آرچی

در سال ۱۹۴۲ آرچی مقاله‌ای تحت عنوان "نگار الکتریکی، ابزاری برای تعیین بعضی از خواص مخزنی" منتشر کرد. مقاله‌ای که شاید بتوان آن را مهم‌ترین مقاله‌ی پتروفیزیکی تا به حال نامید.

تا پیش از انتشار این مقاله، تعیین میزان ذخیره‌ی مخزن بسیار دشوار و پرهزینه بود. تنها راه مطمئن برای این کار، مغزه‌گیری با استفاده از گل پایه‌ی نفتی^{۲۱} و محاسبه‌ی اشباع‌شدگی در آزمایشگاه بود. نگارهای الکتریکی به صورت کیفی برای تعیین زون‌های حاوی هیدروکربن به کار برده می‌شدند و کاربرد کمی نداشتند.

با انتشار رابطه‌ی آرچی که خواص الکتریکی سنگ و تخلخل را مرتبط می‌کرد، امکان استفاده‌ی کمی از نگارها میسر شد. [۲] البته در آن زمان کانی‌های رس‌ها مدنظر آرچی نبودند و او کار خود را بر روی نمونه‌ی مغزه‌های بسیار زیادی از سازند تمیزی در گلف کست متمرکز کرد.

او تخلخل، تراوایی و مقاومت ویژه‌ی نمونه‌ها را با شوری‌های مختلف که از ۲۰ تا ۱۰۰۰۰ ppm اشباع شده بودند، اندازه‌گیری کرد. آرچی بیان کرد که مقاومت ویژه‌ی هر نمونه اشباع از آب‌شور (R_o) به صورت خطی با افزایش مقاومت ویژه‌ی آب‌شور (R_w) افزایش پیدا می‌کند. او این نسبت ثابت را، فاکتور مقاومت ویژه‌ی سازندی^{۲۲} (F) نامید.

$$F = \frac{R_o}{R_w} \quad \text{رابطه ی (۱)}$$

البته این نسبت ۱۰ سال قبل از آرچی توسط ساندبرگ در سال ۱۹۳۲ بیان شده بود، ولی وی به علت عدم وجود داده، نتوانست آن را ثابت کند. [۴] سپس آرچی فاکتور مقاومت سازندی را در مقابل تخلخل بر روی نمودار لگاریتمی رسم کرده و رابطه‌ی خطی دیگری را به دست آورد، این رابطه به صورت ریاضی چنین بیان می‌شود:

$$F = \frac{1}{\phi^m} \quad \text{رابطه ی (۲)}$$

توان m که ضریب سیمان‌شدگی نامیده می‌شود، شیب منفی خط را نشان می‌دهد. رابطه‌ی ۲ را می‌توان به صورت صحیح‌تر و کلی‌تر $F=a/\phi^m$ نشان داد که در آن، a فاکتور یا ضریب پیچاپیچی سازند نام دارد. در ادامه

استفاده از روابط تجربی ارائه شده در شرایط مختلف مقدار آن را برآورد کرد. تعدادی از این روابط تجربی در ادامه بیان می‌شود:

۱- رابطه‌ی وایلی و رز برای ماسه‌سنگ‌ها [۸]۱۹۴۹

$$m = \frac{\ln\left(\frac{\phi}{a^{0.5}}\right)}{\ln \phi} \quad \text{رابطه‌ی (۸):}$$

۲- رابطه‌ی پیکت برای سنگ‌های عاری از شیل [۹]۱۹۶۶

$$m = \frac{\log R_w - \log R_t}{\log \phi} \quad \text{رابطه‌ی (۹):}$$

۳- رابطه‌ی رایگا-کلمنسائو برای سنگ‌های کربناته [۱۰]۱۹۷۷

$$m = 1.28 + \frac{2}{\log k + 2} \quad \text{رابطه‌ی (۱۰):}$$

۴- رابطه‌ی ناگنت برای کربنات‌های با تخلخل حفره‌ای [۱۱]۱۹۷۸

$$m = \frac{(2 \log \phi_s)}{(\log \phi_t)} \quad \text{رابطه‌ی (۱۱):}$$

۵- رابطه‌ی راسموس برای سنگ‌های کربناته‌ی شکافدار [۱۲]۱۹۸۳

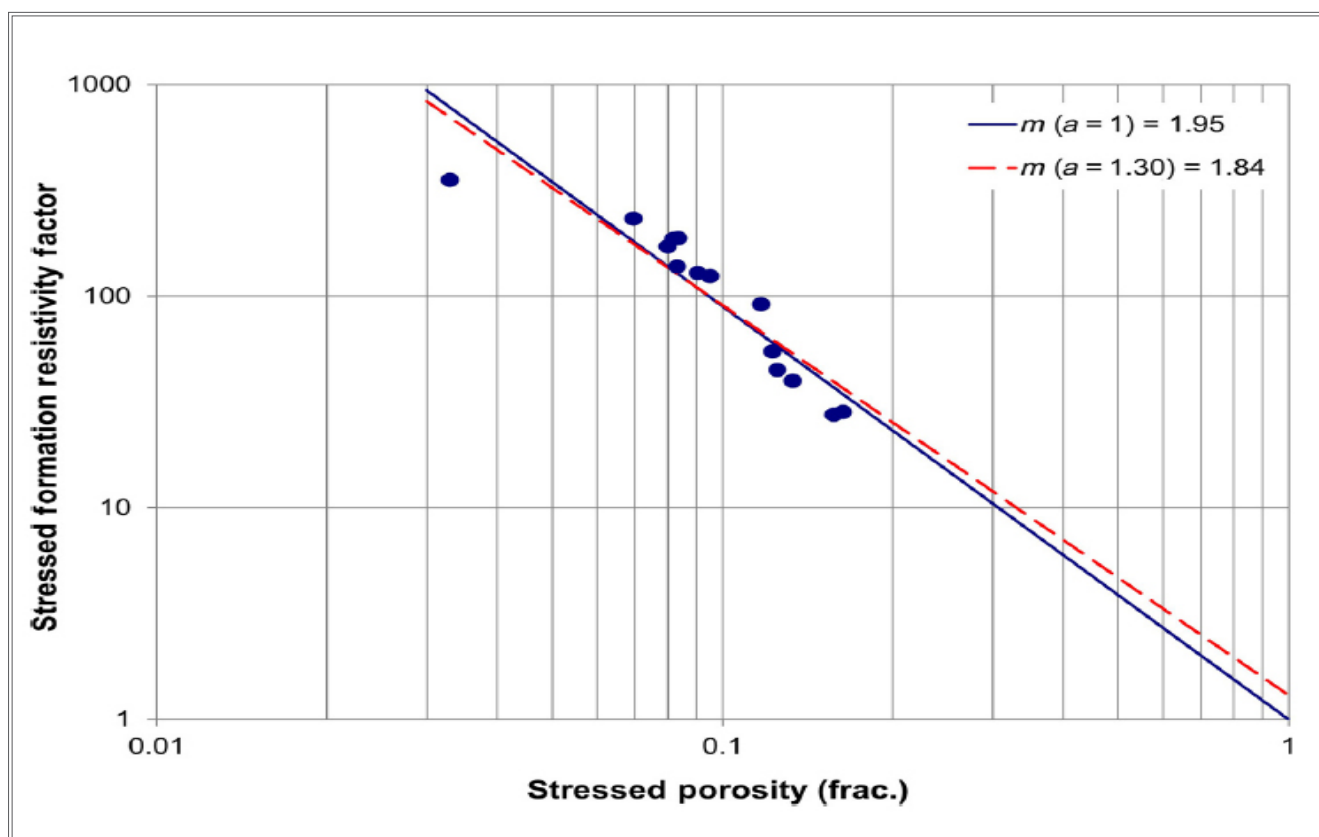
$$m = \frac{\log[\phi_s^3 + \phi_s^2(1 - \phi_t) + (\phi_t - \phi_s)]}{\log \phi_t} \quad \text{رابطه‌ی (۱۲):}$$

۱۹۴۸ توان m را فاکتور سیمان‌شدگی معرفی کرد، زیرا متوجه شد که فاکتور سازندی در یک تخلخل معین با افزایش سیمان‌شدگی افزایش می‌یابد [۶] اما آرچی نیز این توان را با توجه به این که مقدار آن به میزان استحکام و تراکم ماسه‌سنگ بستگی داشت، توان سیمان‌شدگی نامید. تنها راه مطمئن برای اندازه‌گیری فاکتور سیمان‌شدگی از طریق اندازه‌گیری آزمایشگاهی است. برای اندازه‌گیری m ابتدا فاکتور سازندی (F) تعیین می‌شود. برای تعیین F ، نمونه با محلول‌هایی با شوری مختلف اشباع می‌شود و هر بار مقدار R_w و R_0 اندازه‌گیری می‌شود. همان‌طور که در رابطه‌ی ۱ دیده می‌شود با رسم R_w در مقابل R_0 ، خطی به دست می‌آید که شیب آن نشانگر فاکتور سازندی (F) است.

مقدار m به کمک مطالعات آزمایشگاهی از طریق تهیه‌ی نمونه‌های مغزه در طول سازند با تخلخل‌های متفاوت که کاملاً از آب اشباع شده و متعاقباً مقاومت ویژه‌ی آن اندازه‌گیری شده است، به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، با رسم نمودار لگاریتمی-لگاریتمی فاکتور سازند در برابر تخلخل، مقدار m از شیب خط حاصل به دست می‌آید. [۷] در نتیجه با توجه به رابطه‌ی ۷ داریم:

$$\log F = \log a - m \log \phi \quad \text{رابطه‌ی (۷):}$$

در صورتی که m به دست آمده در آزمایشگاه موجود نباشد، می‌توان با



شکل ۱ | نمودار لگاریتمی-لگاریتمی فاکتور سازند در برابر تخلخل، forced fit و best fit فرمز [۷]

بودن مقدار m و n ، می‌توان m را محاسبه کرد. [۱۴]

$$R_{xo} = \frac{R_{mf}}{\phi^m s_{xo}^n} \quad \text{رابطه‌ی (۱۵):}$$

هرچند فرض برابر بودن m و n ممکن است سوال برانگیز باشد، با این حال تجربیات مختلف نشان می‌دهد که تغییر m با عمق، بهتر از فرض ثابت بودن $m=2$ (با هر مقدار دیگری) است. [۵]

۷- در سال ۱۹۸۷ بورای مشاهده کرد که میان نتایج حاصل از لاگ و تست اختلاف وجود دارد. بر اساس داده‌های لاگ و مغزه از ۵ سازند با ۱۴ ساختار، رابطه‌ی تجربی مناسب‌تری برای m به دست آورد. این رابطه‌ی تجربی جدید با موفقیت، اختلاف بین نتایج لاگ و تست را کاهش داد. او اعتبار پارامترهای مختلف مورد استفاده در تفسیر لاگ را مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که دلیل اصلی برای این اختلاف، استفاده از ضریب سیمان‌شدگی نادرست است. رابطه‌ی بورای برای سازندهای کربناته‌ی دور از خشکی ابوظیبی با تخلخل کم به این شکل بود: [۱۵]

$$m = 2.02 - \frac{0.035}{\phi + 0.042} \quad \text{رابطه‌ی (۱۶):}$$

۸- رابطه‌ی شل (واتفا و نورمی) در سال ۱۹۸۷ برای سنگ‌های کربناته‌ی فاقد شکاف با تخلخل کمتر از ۱۰ درصد. [۱۶]

$$m = 1.87 + \frac{0.019}{\phi} \quad \text{رابطه‌ی (۱۷):}$$

شکل ۲ مقایسه‌ی تاثیر تخلخل روی ضریب سیمان‌شدگی حاصل از رابطه‌ی تجربی بورای با روابط تجربی آرچی و شل را نشان می‌دهد.

متغیر بودن این فرمول‌ها به دلیل این است که همگی می‌خواهند فاکتور پیچیده‌ای مانند m را با یک یا چند پارامتر و در بیشتر موارد تنها با تخلخل توصیف کنند. این فرمول‌ها کارآیی خود را در مورد کربنات‌ها از دست می‌دهند، به عنوان مثال سنگ‌های کربناته با تخلخل حفره‌ای مقادیری از m را نشان می‌دهند که کاملاً با سنگ‌های دیگر با همان مقدار تخلخل تفاوت دارد.

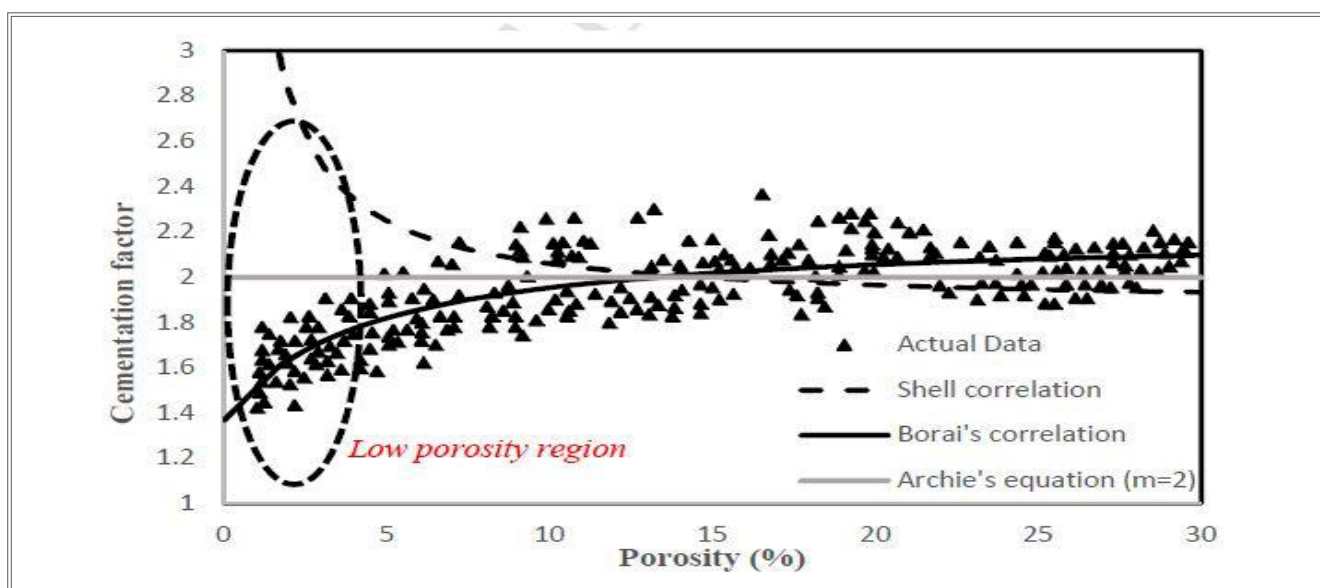
۶- رابطه‌ی لوسیا در سال ۱۹۸۳، برای سنگ‌های کربناته با در نظر گرفتن تاثیر تخلخل حفره‌ای ایزوله بود و مشاهده کرد با افزایش نسبت تخلخل حفره‌ای ایزوله ϕ_{sv}^{24} به تخلخل کل (ϕ_t) ، مقدار m افزایش می‌یابد. [۱۳]

$$m = 2.14 \left(\frac{\phi_{sv}}{\phi_t} \right) + 1.76 \quad \text{رابطه‌ی (۱۳):}$$

مفسران چاه نمودارها بعدها متوجه مدلی بهتر از مدل لوسیا شدند و آن نگار EPT^{25} است. این نگار زمان سیر موج الکترومغناطیس با فرکانس بالا (گیگاهرتز) در طول مسافتی ثابت را اندازه‌گیری می‌کند. یکی از معادلات مرسوم در تفسیر نگار EPT استفاده از معادله‌ی زمان میانگین است:

$$t_{pl} = t_{pma}(1-\phi) + \phi [t_{ph}(1-s_{xo}) + t_{pw}s_{xo}] \quad \text{رابطه‌ی (۱۴):}$$

با دانستن مقادیر زمان سیر موج در آب (t_{pw}) ، ماتریس سنگ (t_{pma}) ، هیدروکربن موج در سنگ (t_{ph}) و زمان سیر موج در نمونه (t_{pl}) ، مقدار s_{xo}^{26} قابل محاسبه است. مقدار s_{xo} از آن رو به جای s_w وارد شده که قدرت نفوذ در نگار EPT بسیار اندک بوده و زون آغشته 27 را اندازه‌گیری می‌کند. در این معادله با داشتن نگار EPT ، تنها مجهول باقی مانده s_{xo} است. با محاسبه‌ی s_{xo} و قرار دادن آن در فرمول آرچی و با فرض یکسان



شکل ۲ | مقایسه‌ی تاثیر تخلخل روی ضریب سیمان‌شدگی حاصل از رابطه‌ی تجربی بورای با روابط تجربی آرچی و شل

- ۹- رابطه‌ی فوک و مان در سال ۱۹۸۷ برای سنگ‌های کربناته با در نظر گرفتن میزان تراوایی آنها. [۱۷]
- رابطه‌ی (۱۸): $m = 1.2 + 0.1286 \phi$ $k \leq 0.1md$
- ۱۴- رابطه‌ی حسنی-گیو و رحیمی برای سنگ‌های کربناته برای انواع تخلخل [۲۲]. ۲۰۰۸
- رابطه‌ی (۲۷): دولوستون‌های بلوری $m = e^{2.25\phi} + 0.6$
- رابطه‌ی (۱۹): $m = 1.4 + 0.0857 \phi$ $0.1 < k \leq 1md$
- رابطه‌ی (۲۸): پکستون تا گرینستون $m = 2.48 - \frac{0.048}{\phi + 0.01}$
- رابطه‌ی (۲۰): $m = 1.2 + 0.0829 \phi$ $1 < k \leq 100md$
- رابطه‌ی (۲۹): پکستون تا وکستون دولومیتی $m = 2.48 - \frac{0.048}{\phi + 0.01}$
- ۱۵- حیدری و همکاران در سال ۲۰۱۳ با استفاده از یک سیستم هوشمند برای سه نوع سیستم تخلخل شامل شکاف، بین‌ذره‌ای و حفره‌ای در یکی از سازندهای کربناته‌ی جنوب ایران روابط ۳۰ تا ۳۲ ارائه کردند. [۲۳]
- رابطه‌ی (۳۰): تخلخل شکاف $m = 8.9254\phi + 1.4962$
- رابطه‌ی (۲۱): $m = 1.22 + 0.034 \phi$ $k > 100md$
- ۱۰- رابطه‌ی ساها و همکاران در سال ۱۹۹۳ برای سنگ‌های کربناته. [۱۸]
- رابطه‌ی (۲۲): $m = 1.432 \times \phi^{0.432}$
- ۱۱- راگلند در سال ۲۰۰۲ روابط ۲۳ و ۲۴ را برای سنگ‌های کربناته‌ی با تخلخل بین‌ذره‌ای^{۲۸} (ϕ_{int}) و تخلخل قالبی^{۲۹} (ϕ_{moldic}) ارائه کرد. [۱۹]
- رابطه‌ی (۲۳): $m = 2.29 - 0.44\phi_{int}$
- ۱۶- وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ با به‌کارگیری نمودار چاه‌پیمایی NMR رابطه‌ی ۳۳ را برای مخزن کم‌تراوا در کشور چین ارائه کردند که مقادیر حاصل از آن دارای ضریب همبستگی ۰/۹۱ با ضریب سیمان‌شدگی حاصل از آنالیز مغزه بود. [۲۴]
- رابطه‌ی (۲۴): $m = e^{\phi_{moldic}} + 0.7$
- رابطه‌ی (۲۵): $m = \frac{1}{0.36 - 0.08 \ln \phi}$
- ۱۲- رابطه‌ی اسدالهی و همکاران برای سنگ‌های کربناته در سال [۲۰]. ۲۰۰۸
- ۱۳- رابطه‌ی اولسن و همکاران برای سنگ‌های کربناته و ماسه در سال [۲۱]. ۲۰۰۸
- رابطه‌ی (۲۶): $m = 0.09 \times \ln \left(\sqrt{\frac{\phi^3}{2a^2k}} \right) + 1.98$
- ۱۷- سلیمان‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۸ با استفاده از تکنیک تعیین گونه‌ی سنگی به صورت الکتریکی و شاخص کیفیت الکتریکی (EQI) سنگ‌های مخزن کربناته‌ای را به ۹ دسته تقسیم‌بندی کرده و برای هر دسته معادله‌ای برای محاسبه‌ی ضریب سیمان‌شدگی ارائه کردند. [۲۵]

دسته EQI	معادله	ضریب همبستگی	رابطه‌ی
EQI ₁	$m = 7.997\phi + 1.975$	۰/۸۳	رابطه‌ی (۳۴)
EQI ₂	$m = 6.944\phi + 1.834$	۰/۹۹	رابطه‌ی (۳۵)
EQI ₃	$m = 6.188\phi + 1.669$	۰/۹۸	رابطه‌ی (۳۶)
EQI ₄	$m = 6.535\phi + 1.452$	۰/۹۷	رابطه‌ی (۳۷)
EQI ₅	$m = 4.456\phi + 1.526$	۰/۹۵	رابطه‌ی (۳۸)
EQI ₆	$m = 3.209\phi + 1.526$	۰/۹۷	رابطه‌ی (۳۹)
EQI _v	$m = 2.998\phi + 1.486$	۰/۹۲	رابطه‌ی (۴۰)
EQI ₈	$m = 2.725\phi + 1.396$	۰/۹۶	رابطه‌ی (۴۱)
EQI ₉	$m = 2.458\phi + 1.314$	۰/۹۵	رابطه‌ی (۴۲)

واگی در اسکری کانتی^{۳۶} واقع در تگزاس گزارش داد. تحلیل نگاره‌های مقاومت و دانسیته نشان می‌داد که اشباع آب ۲۲ درصد و تخلخل ۲۴ درصد است. با وجود اینکه شرکت، این ناحیه را به صورت میدان نفتی یا گازی محتمل رتبه‌بندی کرد، کافرما درخواست کرد که یک متخصص پتروفیزیک دیگر، این ناحیه را بررسی کند.

متخصص دوم اعلام کرد که این ناحیه کاملاً آبرده است. با وجود نظرهای متفاوت متخصصان لاگ، لوله‌ی جداری رانده شده و ناحیه مشبک‌کاری^{۳۷} شد. در طول تست تولید، تنها آب تولید شد و مشخص شد که قضاوت دوم صحیح بوده است.

مشکل این ناحیه، هندسه‌ی پیچیده‌ی منافذ بود که به صورت واگ است. اگر برای ضریب سیمان‌شدگی از مقدار رایج ۲ برای تخلخل‌های بین‌ذره‌ای و بین کریستالی استفاده شود، اشباع آب ۲۲ درصد به دست می‌آید و ناحیه بهره‌ده به نظر می‌رسد. بدون شک اشتباه متخصص اول همین بوده است. تخلخل واگی که در این ناحیه معمول است، نشانه‌ای است مبنی بر اینکه مقدار m از ۲ بیشتر است.

اعمال مقدار ثابت برای ضریب سیمان‌شدگی در فرمول آرچی که رایج‌ترین معادله برای محاسبه‌ی اشباع آب است، به هیچ‌وجه درست نیست. این پارامتر به صورت توان عمل می‌کند. بنابراین تغییرات کوچک به تفاوت‌های بزرگ در مقدار اشباع آب (S_w) منجر خواهد شد. [۲۸]

جدول ۱ مثال‌های متعددی از محدوده‌ی به دست آمده بر اساس تغییرات m را نشان می‌دهد، (تمامی پارامترهای دیگر ثابت فرض شده‌اند) این مثال، میزان حساسیت تخمین نفت درجا را به این پارامتر نشان می‌دهد که به نوبه‌ی خود به صورت گسترده بر اقتصاد تاثیرگذار است.

می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که هرچه میزان تخمین m دقیق‌تر باشد، تخمین میزان نفت درجا نیز بهتر انجام می‌شود. [۲۹]

۱۸- آنیفوس و همکاران در سال ۲۰۱۹ با به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین و نمودارهای چاه‌پیمایی متداول به پیش‌بینی ضریب سیمان‌شدگی پرداختند.

با مقایسه‌ی نتایج حاصل شده، دریافتند که از میان روش‌های ANN^{۳۰}، SVM^{۳۱}، ANN، MLR^{۳۲} و FR-SVM^{۳۳}، نتایج روش FR-ANN همبستگی بیشتری با ضرایب سیمان‌شدگی به دست آمده از آنالیز مغزه نشان می‌دهد. [۲۶]

۱۹- محمودپور و همکاران در سال ۲۰۲۱ با استفاده از الگوریتم PSO^{۳۴}، الگوریتم ژنتیک و شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN) به پیش‌بینی ضریب سیمان‌شدگی در یکی از مخازن کربناته‌ی کم‌تراوای ایران پرداختند. در آن مطالعه از داده‌های تخلخل، تراوایی و چگالی دانه‌ی ۱۷۵ نمونه‌ی مغزه که از ۲۱ میدان کربناته‌ی ایران حاصل شده بود، استفاده شد. نتایج نشان داد که به ترتیب الگوریتم ژنتیک، مدل PSO-ANN و رابطه‌ی برای کمترین خطا را در محاسبه‌ی ضریب سیمان‌شدگی برای مخازن کربناته‌ی ایران ارائه می‌دهند. [۲۷]

۲-۲- اهمیت ضریب سیمان‌شدگی

ضریب سیمان‌شدگی عمده‌ترین عامل عدم قطعیت در محاسبات اشباع هیدروکربن و آب در مخازن کربناته‌ی ناهمگن^{۳۵} است. اشباع‌هایی به اندازه‌ی ۷۰ تا ۸۰ درصد که با مقدار معمول $m=2$ به دست می‌آید، ممکن است با مقادیر ۳ و ۴ برای این پارامتر که در سنگ‌های کربناته رایج است، به کلی دچار تغییر شوند. [۱۷]

الیوت در سال ۱۹۸۳ مطالعه‌ی موردی جالبی را از یک ناحیه‌ی دره ریفی

۱ | میزان حساسیت تخمین نفت درجا به ضریب سیمان‌شدگی [۲۹]

شماره نمونه	ضریب سیمان‌شدگی	درصد آب اشباع شدگی	نفت درجا (MMMSTB)
۱	۲	۳۳	۹/۲
۲	۱/۷۷	۲۱	۱۰/۹
۳	۱/۵	۱۰	۱۱/۹
۴	۱/۳۳	۴	۱۲

۳-۲- عوامل و پارامترهای تاثیرگذار بر ضریب سیمان‌شدگی

عوامل متعددی بر ضریب سیمان‌شدگی موثر است که در ادامه به صورت خلاصه به برخی از آنها اشاره خواهد شد.

شکل ذرات و منافذ در محیط متخلخل یکی از مهم‌ترین عواملی است که بیشترین تاثیر را بر ضریب سیمان‌شدگی دارد. ترکیب کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی به شدت بر m تاثیرگذار است. این مقدار برای سنگ‌ها و رسوبات، مقادیر مختلفی دارد.

به عنوان مثال برای دولومیت $1/09$ ، برای سنگ آهک شکافدار $1/2$ تا $1/3$ ، برای ماسه‌ی تمیز 2 تا $2/3$ و برای سنگ آهک‌های فشرده $1/8$ تا 3 است. تغییر ضریب سیمان‌شدگی برای رس‌ها نیز به نوع کانی‌های رس بستگی دارد. زیرا توانایی آنها برای عبور جریان الکتریکی متفاوت است. به عنوان مثال برای کائولینیت $1/87$ ^{۳۸}، برای ایلیت $2/11$ ^{۳۹}، اتاپولجایت 40 و مسکویت $2/46$ ^{۴۱}، برای کلسیم مونتموریلونیت $2/70$ ^{۴۲} و برای سدیم مونتموریلونیت $3/28$ ^{۴۳} است. [۳۰]

بر اساس تحلیل‌های پتروفیزیکی، ضریب سیمان‌شدگی را می‌توان به صورت لگاریتم مساحت دهانه، تقسیم بر لگاریتم مساحت منفذ تعریف کرد. این تعریف بیان می‌کند که هرچه شعاع دهانه به شعاع منفذ نزدیک‌تر باشد، مقدار ضریب سیمان‌شدگی به مقدار واحد نزدیک‌تر می‌شود. [۳۱] ضریب سیمان‌شدگی تحت تاثیر سیستم منافذ (بین‌ذره‌ای، بین بلوری، شکاف یا واگ) است و می‌تواند نشانگر نوع تخلخل باشد. [۱۲ و ۳۱] در محیط‌های ریز متخلخل (تخلخل کمتر از ۵ درصد)، مقدار ضریب سیمان‌شدگی افزایش می‌یابد. زیرا ذرات به صورت نزدیک‌تر به هم فشرده می‌شوند و منافذ کوچک‌تر می‌شوند. [۳۰] هرچند این ایده در تحقیقات بعدی با چالش مواجه شد. پیچاپیچی به صورت نسبت طول واقعی یا موثر مسیر جریان به طول متخلخل، به موازات جهت کلی جریان تعریف می‌شود.

پیچاپیچی تاثیر قابل توجهی بر پارامترهای متعدد نظیر تخلخل، تراوایی و فاکتور مقاومت سازند دارد. به همین دلیل، تاثیر آن بر ضریب سیمان‌شدگی قابل توجه است. در سنگ‌هایی که با ویژگی پیچیدگی در مسیر الکترولیته شناخته می‌شوند، جریان در عبور از منافذ با مقاومت بیشتری روبرو می‌شود. [۳۱]

تاثیر فشار روباره بر ضریب سیمان‌شدگی به صورت واضح شناخته شده نیست، اما تغییرات ضریب سیمان‌شدگی، تخلخل و فاکتور مقاومت سازند، بر اثر فشرده‌گی به صورت آزمایشگاهی ثابت شده است.

با افزایش میزان فشرده‌گی، ذرات مسطح می‌شوند، که به نوبه‌ی خود سبب درجات بالاتری از زاویه‌دار شدن، انقباض منافذ، سیمانی شدن، انبساط گرمایی و همچنین مقاومت بالاتر می‌شود. [۳۰] پارامترهای زمین‌شناسی مخزن، مکانیک سنگ و خواص شیمیایی و فیزیکی در سنگ‌ها همگن نیست و با فاصله در جهت‌های عمودی و افقی تغییر می‌کند.

به همین دلیل مقدار ضریب سیمان‌شدگی نیز می‌تواند به همین نسبت متغیر باشد. [۲۹] بر اساس مطالعات گایود ضریب سیمان‌شدگی بر طبق

اندازه‌گیری درجه‌ی سیمان‌شدگی و تراکم سنگ محاسبه می‌شود. به طوری که سیمان‌شدگی بیشتر در سنگ باعث افزایش مقدار ضریب سیمان‌شدگی می‌شود. [۶] هنگامی که در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی تخلخل علاوه بر تخلخل بین‌دانه‌ای، تخلخل ثانویه وجود داشته باشد، رسم بهترین خط برازش بر داده‌های آزمایشگاهی برای تعیین مقدار m دشوار می‌شود.

به دلیل اینکه درصد تخلخل ثانویه در محدوده‌ی تخلخل موجود در یک زون ثابت نمی‌باشد. در نتیجه ضریب سیمان‌شدگی منعکس‌کننده‌ی میزان پیچاپیچی صحیح در فضای متخلخل نیست، در واقع مقدار m می‌تواند برای هر نمونه‌ی رسم شده در نمودار، متفاوت باشد و احتمالاً این تفاوت وجود دارد. با مدل‌سازی ریاضی مسیرهای شکسته و حفره‌های مشخص شد که در کنار میزان سیمان‌شدگی، حفره‌ها باعث افزایش توان سیمان‌شدگی شده، در حالی که در موارد شکسته و خرد شده، مقدار m کاهش می‌یابد. [۱۲]

رانسون نشان داد که ضریب سیمان‌شدگی تنها زمانی با هندسه‌ی فضای متخلخل رابطه‌ی مستقیم دارد که رسانایی الکتریکی موجود در سنگ، از آب پر شده در فضای خالی، ناشی شده باشد. هنگامی که رسانایی الکتریکی اضافی علاوه بر رسانایی آب پر شده در منافذ توسط رسانایی الکتریکی مواد جامد (مانند پیریت) و یا رسانایی سطحی به علت جان‌شینی و مبادله‌ی یون‌ها در شیل وجود داشته باشد، توان m تغییر می‌کند و رسانایی باید برای تمام مواد رسانای موجود در سنگ به حساب آید. اگر این رسانایی اضافی پارامترهای مستقل از هم حساب آیند، تاثیر آنها در ضریب a مشهود می‌شود. [۳۴] وقتی دانه‌های موجود در سنگ کمتر کروی شکل و بیشتر پهن و کشیده، زاویه‌دار و یا دارای شکل پیچیده‌ای باشند، مساحت سطح بر واحد حجم و همچنین مقدار m افزایش می‌یابد. [۳۳]

۴-۲- محدوده و دامنه‌ی تغییرات ضریب سیمان‌شدگی

محدوده‌ی وسیعی از ضریب سیمان‌شدگی توسط محققین ارائه شده است که از مقدار ۱ برای سنگ‌های شکسته، تا کمی بیشتر از ۵ برای سنگ‌های به شدت متراکم محاسبه شده است. [۳۳] از لحاظ تئوری، ضریب سیمان‌شدگی می‌تواند بین ۱ تا بی‌نهایت تغییر کند، [۳۴ و ۸] اما در عمل، محدوده‌ی ضریب سیمان‌شدگی بین ۱ تا ۳ می‌باشد.

مقدار $m=1$ برای سازندی با ۱۰۰ درصد تخلخل از نوع شکستگی، هم‌راستا و مطلوب در جهت حرکت جریان که تمام فضای متخلخل با آب پر شده باشد، در نظر گرفته می‌شود.

مقدار $m=1/3$ به صورت تئوری به دست می‌آید و برای دانه‌بندی با شکل کروی به کار می‌رود. مقدار m کمتر از $1/3$ هنگامی که شکستگی و یا خردگی به شکل ناهمسان در فضای خالی و در مسیر جریان باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما مقدار m بزرگ‌تر از $1/3$ برای مسیرهای جریان غیرموثر، شکل دانه‌ای نامنظم، بلورین و ناپیوسته به کار برده می‌شود. [۳۳ و ۳۵] در یک مطالعه‌ی وسیع، با بررسی ۱۸۰۰ نمونه‌ی ماسه‌سنگی، ضریب سیمان‌شدگی

کربنات‌ها بستگی دارد. در مطالعات آنها $a=1$ فرض شده و مقدار دامنه‌ی m بین ۲ تا بیش از $5/5$ به دست آمده است. [۱۷]
 دوبویز و همکاران برای سنگ‌های آهک آلیتی مقدار ضریب سیمان‌شدگی را $1/36$ معرفی کردند. [۳۹] مطالعات دیگر محققان از قبیل نستدر (۱۹۶۸)، ستی (۱۹۷۹)، راسموس (۱۹۸۷)، فوک و مون (۱۹۸۷) در حیطه‌ی رابطه‌ی آرچی، روش‌های تعیین m از داده‌های لاگ را معرفی کردند. [۴۰]
 در جدول ۲ محدوده‌ی ضریب سیمان‌شدگی محاسبه شده توسط محققان مختلف، برای شرایط متفاوت آورده شده است.

برابر با $1/73$ به دست آمد. [۳۶]
 وانگ و همکاران در روی سنگ‌های آمیخته با مواد شیشه‌ای و مذاب کار کردند و نشان دادند که مقدار m برای تخلخل ۲ تا ۲۰ درصد برابر $2/3$ و برای تخلخل ۲۰ تا ۴۰ درصد برابر ۱ می‌باشد. [۳۷]
 حمدا و همکاران مقدار a و m را بر روی ۲۰ نمونه ماسه‌سنگ تمیز و متخلخل تعیین کردند. آنها مقدار a و m را به ترتیب برای چاه اول $1/36$ و $2/03$ و برای چاه دوم $0/95$ و $1/85$ به دست آوردند. [۳۸]
 فوک و مون نشان دادند که مقدار m به نوع تخلخل و رخساره‌ی سنگی در

۲ | محدوده‌ی ضریب سیمان‌شدگی محاسبه شده توسط محققان مختلف، برای شرایط متفاوت [۴۳و۴۲،۴۱]

محقق	دامنه‌ی ضریب سیمان‌شدگی	محدودیت
Archie (۱۹۴۲)	$2 - 1/8$	ماسه‌سنگ متراکم و یکپارچه
	$> 1/3$	بسته‌های ماسه‌سنگ متراکم و تمیز در آزمایشگاه
Williams et al. (۱۹۵۰)	$2/7$	ماسه‌سنگ‌های حوضه‌ی هاوکینز
Wyllie et al. (۱۹۵۰)	$1 - \infty$	از لحاظ تئوری و محاسبات ریاضی
	$3 - 1/3$	در عمل
Winsauer et al. (۱۹۵۲)	$2/15$	اندازه‌گیری در تعداد زیادی ماسه‌سنگ
Waxman et al. (۱۹۷۴)	$1/4$	غیر رسی تصحیح شده
	$1/8 - 2/1$	رسی تصحیح شده
Clavier, Coates and Dumanoir (۱۹۷۷)	$1/89 - 2/13$	m مستقل از شیلی شدن
Ramson (۱۹۸۴)	۱	شکستگی‌های هم‌ردیف و در مسیر جریان سیال (۱۰۰ درصد تخلخل از نوع درزه و شکاف)
	$1/3$	کروی شکل
	$> 1/3$	مسیر جریان نامطلوب و ناکارآ، دانه‌بندی نامنظم، بلورین و منفصل
Harmann and Beaumont (۱۹۹۹)	$< 1/3$	درزه‌دار و شکسته با خصوصیات ناهمسان در مسیر حرکت جریان
	۱	سنگ‌های درزه‌دار
	$1/7 - 1/8$	ماسه‌سنگ‌های شیلی
	۲	سازندهای تمیز با منافذ کوچک و بزرگ
	$2 - 2/5$	تخلخل با حفره‌ها و واگ‌های متصل
مقادیر گزارش شده ضریب سیمان‌شدگی بر اساس روش‌های مختلف	$2/5 - 3$	تخلخل قالبی ناپیوسته
	$1/796 - 1/813$	روش متداول در مغزه‌ی ماسه‌سنگی با تخلخل زیاد آفریقا
	$1/767 - 1/786$	روش CAPE در مغزه‌ی ماسه‌سنگی با تخلخل زیاد آفریقا
	$1/804$	روش متداول در مغزه‌ی کربناته‌ی خاورمیانه
Maute et al. (۱۹۹۲) Note: $a=1$	$1/775$	روش CAPE در مغزه‌ی کربناته‌ی خاورمیانه
	$1/817 - 1/854$	روش متداول در مغزه‌های ماسه‌سنگی تمیز با تخلخل بالا خاورمیانه
Hamada and Al-Awad (۲۰۰۱)	$1/788 - 1/806$	روش CAPE در مغزه‌های ماسه‌سنگی تمیز با تخلخل بالا خاورمیانه
	۲	روش عمومی در ماسه‌سنگ تمیز
	$1/62 - 1/66$	روش متداول در ماسه‌سنگ تمیز
Aldoleimi et al. (۱۹۸۹) Note: $a=1$	$1/56 - 1/65$	روش CAPE در ماسه‌سنگ تمیز
	$1/68 - 2/43$	مخازن کربناته با استفاده از لاگ

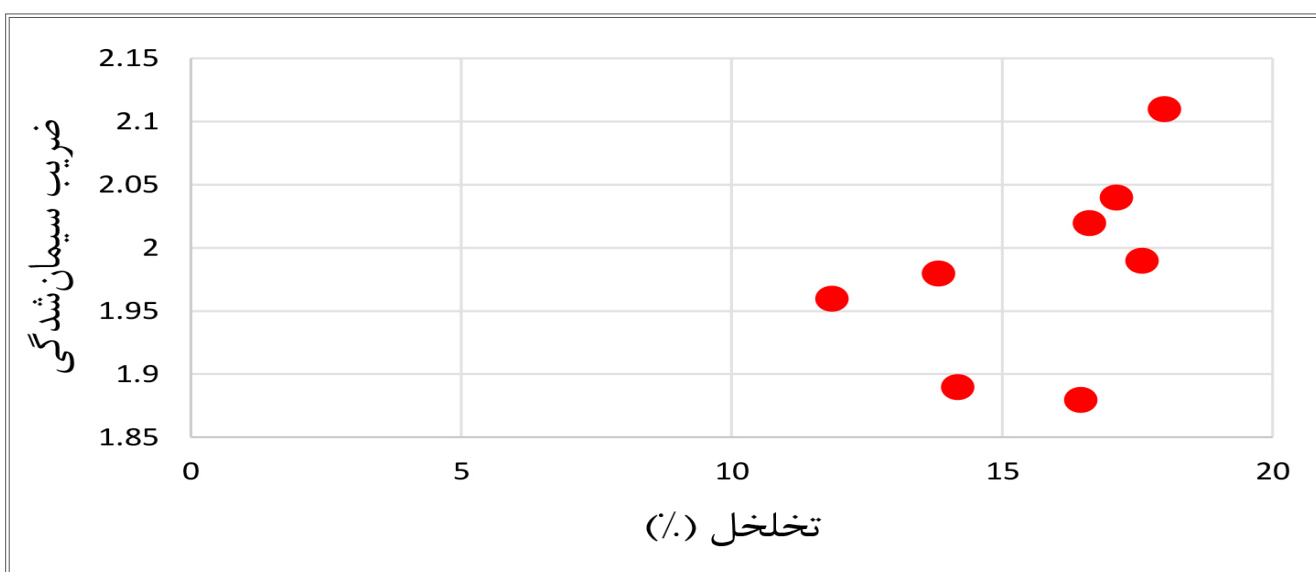
۳- مطالعه‌ی موردی

۱ در نظر گرفته شده بود. همچنین برای نمای اشباع (n) پس از انجام آزمایش شاخص مقاومت سازند (FRI) روی نمونه‌ها مقادیری بین ۱/۳۹-۳/۰۲ به دست آمد. جدول ۳ نتایج آزمایش روی ۸ نمونه مغزه‌ی سازند مورد مطالعه را نشان می‌دهد. شکل ۳ نمودار ضریب سیمان‌شدگی ۸ نمونه مغزه در مقابل تخلخل را نشان می‌دهد.

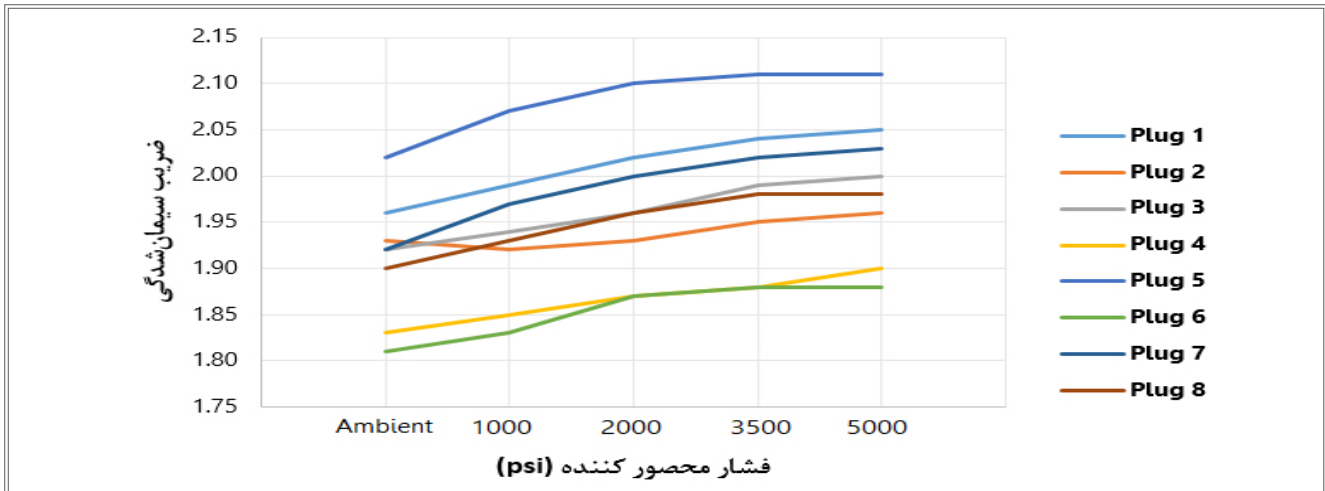
در این بررسی ضرایب m و n و a سازند کرناته‌ای در یکی از میداین جنوب ایران مورد مطالعه قرار گرفت. میزان تغییرات ضریب سیمان‌شدگی (m) در این سازند پس از انجام آزمایش ضریب مقاوم سازند (FRF) بین ۱/۸۸-۲/۱۲ به دست آمد و میزان ضریب پیچاپیچی (a) طی آزمایش نمونه‌های مختلف عدد

شماره‌ی نمونه | نتایج آزمایش روی ۸ نمونه مغزه‌ی سازند مورد مطالعه

شماره‌ی نمونه	عمق (متر)	تخلخل (درصد)	ضریب سیمان‌شدگی (m) در $a = 1$	نمای اشباع (n)	تراوایی (میلی داریسی)
۱	۲۸۸۴/۸	۱۱/۸۵	۱/۹۶	۱/۹۳	۱/۵۴
۲	۲۹۰۳/۱	۱۷/۵۸	۱/۹۹	۲/۰۴	۲/۳۹
۳	۲۹۰۷/۴۱	۱۴/۱۷	۱/۸۹	۳/۰۲	۰/۹۱
۴	۲۹۱۶/۸۷	۱۷/۹۹	۲/۱۱	۲/۳۶	۲/۰۶
۵	۲۹۱۸/۱۲	۱۶/۳۵	۱/۸۸	۱/۳۹	۰/۴۱
۶	۲۹۲۲/۱۳	۱۳/۸۲	۱/۹۸	۲/۲۳	۱/۲۷
۷	۲۹۳۶/۱۵	۱۷/۱۱	۲/۰۴	۲/۹۰	۶/۷۰
۸	۲۹۳۹/۱	۱۶/۶۱	۲/۰۲	۲/۳۸	۰/۹۲



شکل ۳ | نمودار ضریب سیمان‌شدگی ۸ نمونه مغزه در مقابل تخلخل



شکل ۴ | میزان تغییرات ضریب سیمان‌شدگی ۸ نمونه مغزه در فشارهای محصورکننده مختلف

جدول ۴ | مقادیر ضریب سیمان‌شدگی با استفاده تخلخل ۸ نمونه مغزه‌ی انتخابی از روابط تجربی ساها، اسدالهی و فوک و مان

شماره‌ی نمونه	تخلخل (درصد)	m حاصل از مغزه	m حاصل از رابطه‌ی ساها	m حاصل از رابطه‌ی اسدالهی	m حاصل از رابطه‌ی فوک و مان
۱	۱۳/۷۵	۱/۹۶۱	۴/۴۴۳	۶/۶	۲/۳۳
۲	۱۷/۵۸	۱/۹۹۷	۴/۹۴	۷/۶۹	۲/۶۵۷
۳	۱۴/۵۷	۱/۸۹۹	۴/۵۵۵	۶/۸۹	۲/۶۴۸
۴	۱۷/۹۹	۲/۱۱۶	۴/۹۹	۷/۸	۲/۶۹۱
۵	۱۶/۳۵	۱/۸۸۱	۴/۷۸	۷/۳۵	۲/۸۰۱
۶	۱۵/۱۷	۱/۹۸۳	۴/۶۳	۷/۰۴	۲/۴۵۷
۷	۱۷/۱۱	۲/۰۴۸	۴/۸۸	۷/۵۳	۲/۶۱۸
۸	۱۶/۶۱	۲/۰۲۸	۴/۸۲	۷/۴	۲/۸۲۳

۱-۳- محاسبه‌ی ضریب سیمان‌شدگی با استفاده از تعدادی از روابط تجربی

۱- رابطه‌ی ساها و همکاران برای سنگ‌های کربناته (۱۹۹۳)

$$m = 1.432 \times \phi^{0.432}$$

۲- رابطه‌ی اسدالهی و همکاران (۲۰۰۸)

$$m = \frac{1}{0.36 - 0.08 \ln \phi}$$

۳- رابطه‌ی فوک و مان برای سنگ‌های کربناته با در نظر گرفتن میزان تراوایی آنها (۱۹۸۷)

$$m = 1.2 + 0.1286 \phi \quad k \leq 0.1md$$

$$m = 1.4 + 0.0857 \phi \quad 0.1 < k \leq 1md$$

$$m = 1.2 + 0.0829 \phi \quad 1 < k \leq 100md$$

$$m = 1.22 + 0.034 \phi \quad k > 100md$$

با محاسبه‌ی مقادیر ضریب سیمان‌شدگی با استفاده تخلخل ۸ نمونه مغزه‌ی انتخابی از روابط تجربی ساها، اسدالهی و فوک و مان، نتایج جدول ۴ حاصل شد.

نحوه‌ی قرارگیری نقاط ۸ نمونه‌ی مغزه نسبت به هم بیانگر غیرخطی بودن روند تغییرات ضریب سیمان‌شدگی در مقابل تخلخل در این سازند کربناته است که به دلیل پیچیدگی ویژگی‌های این نوع سنگ‌های مخزن می‌باشد. در طی آزمایشات برای به دست آوردن ضریب مقاومت سازند که پارامتر موردنیاز برای محاسبه‌ی ضریب سیمان‌شدگی است، مغزه‌های تحت پنج فشار مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند. ابتدا آزمایش تحت فشار محیطی (Ambient) انجام شد و سپس مرحله به مرحله فشار محصورکننده‌ی بیشتری به پلاگ‌ها اعمال شد و در نهایت مقدار ضریب سیمان‌شدگی برای فشارهای مختلف به دست آمد. شکل ۴ میزان تغییرات ضریب سیمان‌شدگی ۸ نمونه مغزه‌ی مورد مطالعه را در فشارهای محصورکننده‌ی مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که در روند تغییرات ضریب سیمان‌شدگی پلاگ شماره ۱ دیده می‌شود، با افزایش فشار، روند ضریب سیمان‌شدگی همیشه افزایشی خواهد بود و فشار، نقش متفاوتی بر میزان این ضریب می‌تواند داشته باشد.

۳. زمانی که R_h کم است، تغییرات آن تاثیر زیادی روی آب اشباع‌شدگی و در نهایت، حجم ذخیره دارد. اما زمانی که R_h زیاد باشد، تغییرات R_w تاثیر زیادی روی آن ندارد.

۴. قانون آرچی تنها برای ماسه‌سنگ‌های تمیز، قابل استفاده است و ماسه‌سنگ‌های غیرتمیز یا شیلی و سازندهای حفره‌ای، مانند کربنات‌ها ممکن است از قانون آرچی پیروی نکنند، بنابراین باید اصلاحاتی در رابطه‌ی آرچی انجام شود و مدل کامل‌تری برای تخمین میزان اشباع‌شدگی از آب در مخازن کربناته ارائه شود که قادر باشد با توجه به خصوصیات سنگ‌های کربناته رابطه‌ی بین تغییرات آب اشباع‌شدگی و پارامترهای مخزنی را به خوبی بیان کند و تخمین قابل‌قبولی از آب اشباع‌شدگی مخزن حاصل شود.

۵. چون سنگ‌های کربناته برخلاف ماسه‌سنگ‌ها، تنوع زیاد لیتولوژیکی از نظر نوع بافت و شکل منافذ دارند و چون ضرایب آرچی نیز تحت تاثیر عوامل لیتولوژیکی به ویژه نوع منافذ هستند، در نتیجه باید ضرایب آرچی برای انواع گونه‌های سنگی در یک مخزن کربناته محاسبه شوند.

۶. ثابت در نظر گرفتن مقادیر ضرایب آرچی، با توجه به وابسته بودن این ضرایب به عوامل متعدد در سنگ‌ها، صحیح نبوده و باعث بروز خطا در نتایج ارزیابی از جمله آب اشباع‌شدگی می‌شود.

۷. ضریب سیمان‌شدگی محاسبه شده با استفاده از روابط مرسوم، صرفاً برای همان سازند و مخزنی صادق است که از داده‌های آن برای توسعه و ارائه‌ی این روابط استفاده شده است و قابل انتقال به موقعیت و شرایط دیگر نیست.

۸. مشخص کردن عدم قطعیت‌های موجود با استفاده از آنالیزهای عدم قطعیت در محاسبه‌ی آب اشباع‌شدگی، امکان ارزیابی دقیق‌تر مخزن را فراهم می‌کند.

۹. به دلیل متفاوت بودن تاثیر دیاژنز روی سنگ‌های کربناته نسبت به ماسه‌سنگ‌ها مقدار ضریب سیمان‌شدگی به‌دست آمده در این دو گروه سنگ‌شناسی متفاوت خواهد بود و همچنین به دلیل تاثیر زیاد دیاژنز در کربنات‌ها مقدار m در آنها بیشتر از ماسه‌سنگ‌ها است. ■

با مقایسه‌ی نتایج حاصل از روابط تجربی و نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌ی مغزه مشاهده می‌شود که نتایج روابط ساها و اسدالهی با نتایج مغزه اختلاف زیادی دارند ولی رابطه‌ی فوک و مان مقادیر نزدیک‌تری به نتایج مغزه را داده است. با این وجود باز هم همین تغییرات کوچک m در برآورد میزان اشباع تغییرات زیادی را ایجاد می‌کند. در سال ۲۰۰۲، راگلند اعلام کرد که در حالت کلی ضریب سیمان‌شدگی محاسبه شده با استفاده از روابط مرسوم، صرفاً برای همان سازند و مخزنی صادق است که از داده‌های آن برای توسعه و ارائه‌ی این روابط استفاده شده است و قابل انتقال به موقعیت و شرایط دیگر نیست، متأسفانه به دلایل مختلفی، در مطالعات و تخمین مخازن ایران این نکته مدنظر قرار نگرفته است و به علت عدم استفاده از مقادیر مناسب و متناسب این ضرایب در محاسبات اشباع، بعضاً شاهد وجود خطاهای چشمگیری در نتایج به دست آمده هستیم. [۱۹]

نتیجه‌گیری

مطالعه‌ی موردی انجام شده بر روی سازند سروک نشان می‌دهد مقادیر ضریب سیمان‌شدگی و نمای اشباع به دست آمده از روابط تجربی اختلاف نسبتاً زیادی با مقادیر به دست آمده از آزمایشات FRF و FRI دارند و نمی‌توان با این مقادیر با دقت مناسبی به محاسبه‌ی اشباع آب سازند پرداخت. در نتیجه باید با استفاده از روش‌های هوشمند نظیر شبکه‌های عصبی و با به‌کارگیری داده‌های آنالیز مغزه‌ی چاه‌های دارای مغزه، روابط تجربی جدیدی برای چاه‌های فاقد نمونه‌ی مغزه در سازند سروک تعریف کرد.

از مهم‌ترین نتایجی که با مطالعه‌ی پژوهش‌های پیشین به دست آمد نیز می‌توان به این موارد اشاره کرد:

۱. حجم نفت درجا بیشتر از مقاومت آب سازند و خواص الکتریکی به حجم شیل و تخلخل وابسته است. وجود شیل باعث می‌شود، مقاومت سازند کمتر شود و در نتیجه آب اشباع‌شدگی بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده شود.
۲. با افزایش مقدار ضرایب آرچی و مقاومت آب سازند، آب اشباع‌شدگی بیشتر خواهد شد.

پانویس‌ها

1. Oil Initially In Place	12. Waxman-Smits	23. Resistivity Index	33. Fuzzy Ranking
2. Water Saturation	13. Indonesia	24. Isolated Vuggy Porosity	34. Particle Swarm Optimization
3. Retort	14. Juhasz	25. Electromagnetic Propagation Tool	35. Heterogeneous Carbonate Reservoir
4. Core	15. Simandoux	26. Flash Zone Saturation	36. Scurry County
5. Dean Stark	16. Cementation Factor	27. Invasion Zone	37. Perforation
6. Water Base Mud	17. Tortuosity	28. Intergranular Porosity	38. Kaolinite
7. Mud Filtrate	18. Saturation Exponent	29. Moldic Porosity	39. Illite
8. Water Flooding	19. Pore Distribution	30. Artificial Neural Network	40. Attapuligite
9. Petrophysical Logs	20. Empirical Equation	31. Support Vector Machine	41. Muscovite
10. Archie Equation	21. Oil Base Mud	32. Multivariate Linear Regression	42. Calcite Montmorillonite
11. Dual Water	22. Formation Resistivity Factor		43. Sodium Montmorillonite

منابع

[3]. Archie G.E., 1942, "The electrical resistivity log as aid in determining some reservoir characteristics", Transactions of the AIME, Vol. 146, No. 1, pp 54-62.

■ ادامه منابع در (دبیرخانه) موجود است.

[۱]. محمدرضا رضایی، طاهره حسینی‌نیا. ۱۳۸۰. بررسی حساسیت عوامل مختلف پتروفیزیکی بر محاسبه‌ی آب اشباع‌شدگی. وزارت علوم، تحقیقات و فناوری دانشگاه تهران، دانشکده‌ی علوم.

[۲]. طارق احمد، ترجمه سسلای، رحیم ۱۳۸۷. جلد اول. مهندسی مخازن هیدروکربوری. انتشارات و روابط عمومی شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب.