

# بررسی آزمایشگاهی پارامترهای رابطه آرچی تحت تأثیر فشار موئینگی برای نمونه سنگ مخزن نفتی آسماری

پیمان حسنی احمدزاده، محسن مسیحی\*

تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

پیام نگار: masihi@sharif.edu

## چکیده

مقاومت الکتریکی سنگ سازند به فاکتور/ شاخص مقاومت ویژه سازند بستگی داشته و در تفسیر لاگ چاه‌نگاری، محاسبه تخلخل و آب اشباع سنگ به کار می‌رود. فاکتور مقاومت ویژه یا تخلخل و شاخص مقاومت ویژه با درصد آب اشباع سنگ از طریق رابطه آرچی به پارامترهایی مانند ضریب سیمان شدگی و توان اشباع وابسته می‌شود. این رابطه برای سنگ‌های آب‌دوست و بدون رس، ارائه و در کاربرد برای سنگ‌های کربناته ضعیف است. بررسی عواملی مانند فشار سرپاره، دما، ترشوندگی سنگ و فشار موئینگی می‌تواند در به کارگیری صحیح این رابطه مهم باشد. در اینجا، به بررسی آزمایشگاهی نمونه سنگ کربناته یکی از مخازن نفتی ایران برای بررسی کارایی رابطه آرچی تحت تأثیر فشار موئینگی پرداخته می‌شود. نتایج، نشان‌دهنده کاهش توان اشباع با تغییر ترشوندگی از نفت‌دوست به آب‌دوست است. نتایج این کار می‌تواند در تحلیل چاه آزمایشی و به کارگیری صحیح این رابطه در شرایط سنگ، مفید باشد.

کلمات کلیدی: فاکتور مقاومت ویژه، شاخص مقاومت ویژه، ضریب سیمان شدگی، توان اشباع، فشار موئینگی،

## ترشوندگی

## ۱- مقدمه

اجزای سازنده سنگ مخزن در حالت کلی نارسا می‌باشند مگر اینکه در آنها کانی‌های فلزی یا رس در مجاورت آب سازندی وجود داشته باشد. نفت و گاز نیز به عنوان هیدروکربن قادر به عبور دادن جریان الکتریکی نیستند. بنابراین تنها عامل رسانا در سنگ، آب سازندی با درصد شوری بالا است. [۲] در بررسی عبوردهی جریان الکتریکی در سنگ‌های کربناته، سیال رسانای درون خلل و فرج از قسمت قادر به حرکت و قسمت ساکن تشکیل می‌شود. در این خصوص بهم پیوستگی حفره‌ها نقش تعیین کننده دارد. حتی هنگامی که قطرات هیدروکربن در مسیر حفره‌ها و کانال‌ها ارتباط بین آب سازندی را قطع کند، جریان الکتریکی مجبور به طی مسیرهای با ضریب پیچاپیچی بیشتر و لذا مقاومت ویژه بالاتر می‌شود. لذا کاربرد رابطه آرچی [۳] به سنگ‌های کربناته به دلیل

در تحلیل‌های چاه‌نگاری، بررسی رسانایی الکتریکی محیط متخلخل وابسته به سیال درون حفره حائز اهمیت است. با جریان الکتریکی بین دو نقطه از سنگ سازند دو مقدار فیزیکی (۱) ضریب پیچاپیچی و (۲) تغییرات سطح مقطع، کنترل کننده است [۱]. محیط متخلخل می‌تواند با مجموعه‌ای از لوله‌های موئینه مارپیچ یا موج دار مدل شود. طبیعت موجی این لوله‌ها از طریق ضریب عددی بدون بعد پیچاپیچی توصیف می‌شود. چگونگی حرکت سیال و جریان الکتریکی در لوله‌های موئینه تحت تأثیر عواملی مانند ساختار خلل و فرج (اندازه و شکل کانال‌ها و حفره‌ها، ناهمگونی و ترشوندگی سنگ) و خواص سیال (شوری آب سازند، گرانیروی و چگالی سیالات و درصد اشباع سیالات) می‌باشند.

آرچی (رابطه (۲)) به طور مفصل بررسی شده است [۱۱]. کلر<sup>۲</sup> از اولین محققانی بوده که رابطه بین ترشوندگی و پارامتر  $n$  را بیان کرد و میزان این پارامتر را در نمونه سنگ ماسه‌ای نفت‌دوست بین ۹ تا ۱۲ گزارش نمود [۵]. سوئینی و جنینگز<sup>۳</sup> نسبت پارامترهای  $n$  به  $m$  را برای سنگ‌های نفت‌دوست بزرگتر از ۵ تخمین زد [۵]. همچنین مورگان و پیرسون<sup>۴</sup> مقادیر پارامتر  $n$  را بین ۲ برای سنگ‌های ۱۰۰٪ آبدوست تا ۲۵ برای نمونه سنگ‌های ۱۰۰٪ نفت دوست اعلام نمود [۵]. در این راستا مدل‌های نظری مانند مدل تراوش<sup>۵</sup> توسط محققانی نظیر برورز<sup>۶</sup> و وانگ<sup>۷</sup> برای بررسی رسانایی سنگ معرفی گردید که البته توجهی به تأثیر ترشوندگی بر رسانایی نداشتند [۸]. در این مقاله، به بررسی آزمایشگاهی نمونه سنگ کربناته یکی از مخازن نفتی ایران برای بررسی کارایی رابطه آرچی تحت تأثیر فشار موئینگی (جذب و تخلیه) پرداخته می‌شود. در ابتدا برای نفت‌دوست کردن، نمونه با نفت اشباع شده به مدت ۱۰۰۰ ساعت در دمای مخزن حرارت داده می‌شود. آزمایش‌ها با تزریق آب شروع می‌شود و تغییر در ترشوندگی سنگ با تغییر در نیروی کشش بین سطحی و با کمک مواد فعال در سطح ایجاد می‌شود [۹]. آزمایش‌ها بر روی سنگ رخنمون کربناته مخزن آسماری و در حالت‌های تزریق آب نمک به سنگ اشباع با نفت، تزریق آب نمک به مقادیر مشخص از مواد فعال در سطح تعیین شده و تزریق نفت به سنگ اشباع با آب (آب‌دوست) در شرایط مخزن انجام می‌گیرد. با مشخص کردن تأثیر همزمان تغییرات نیروی کشش بین سطحی بر روی فشار موئینگی و مقاومت ویژه، رفتار سنگ مخزن طی فرایندهای تزریق مواد فعال در سطح در فرایندهای ازدیاد برداشت شناسایی شده و چگونگی تغییرات فشار موئینگی از طریق نمودارهای الکتریکی (مقاومت ویژه) در چاه‌نگاری استنتاج می‌شود [۱۰-۱۲]. همچنین تأثیر این تغییرات بر مقدار پارامتر توان اشباع ( $n$ ) بررسی می‌شود.

## ۲- طراحی آزمایشات مورد نظر

مشخصات و مراحل آماده‌سازی مغزه‌ها: نمونه سنگ کربناته از

نفت‌دوست بودن اکثر این سنگ‌ها و وجود کانی رس در ساختار و ترکیب آنها با مشکل روبرو بوده، و دارای نتایج غیر واقعی و با خطای بالا است. با توجه به کربناته بودن سنگ اکثر مخازن نفتی ایران، اصلاح رابطه آرچی برای رسیدن به نتایج با دقت از طریق بررسی‌های آزمایشگاهی، و مطالعه عوامل تأثیر گذار بر مقاومت ویژه سنگ ضروری است. رابطه آرچی [۳] به صورت زیر بیان می‌شود:

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

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

که  $F_r$  و  $I$  به ترتیب فاکتور و شاخص مقاومت ویژه سازند  $m$  و  $n$  توان سیمانی و توان اشباع و مقدار پارامتر  $a$  به طور کلی برابر با یک می‌باشد. پارامترهای فشار موئینگی و مقاومت ویژه سنگ در نمونه سنگ‌هایی با ناهمگونی بالا نظیر سنگ‌های کربناته، وابستگی زیادی به هم دارند [۴]. به همین دلیل این تحقیق به بررسی تأثیر فشار موئینگی نمونه سنگ کربناته (نفت‌دوست) از یکی از مخازن نفتی ایران بر روی مقاومت ویژه و مشخص کردن پارامتر  $n$  برای سنگ مخزن مذکور در شرایط دما و فشار مخزن می‌پردازد. تغییر در فشار موئینگی به کمک ایجاد تغییر در ترشوندگی با مواد فعال در سطح می‌باشد. نمودارهای فشار موئینگی و مقاومت ویژه بستگی به تاریخچه اشباع سنگ و میزان پسماند/باقیمانده دارد که خود وابسته به خاصیت ترشوندگی سنگ است [۵].

تأثیر خاصیت ترشوندگی از طریق شبیه‌سازی بوسیله مدل‌های شبکه متخلخل قابل بررسی است [۶] که منجر به ارائه نمودارهای مقاومت ویژه و فشار موئینگی سنگ‌هایی با خاصیت ترشوندگی متفاوت می‌شود. فلاری و لانگرون<sup>۱</sup> فرایند اندازه‌گیری آزمایشگاهی همزمان فشار موئینگی و مقاومت ویژه سنگ را طی فرایندهای جذب و تخلیه بیان نمودند [۴]. در ابتدای آزمایش‌ها نمونه‌های ماسه سنگ به صورت ۱۰۰٪ اشباع با آب (آب‌دوست) لحاظ می‌شوند. همچنین تأثیر خاصیت ترشوندگی در محاسبه درصد اشباع آب در نظر گرفته شده است [۷]. ارتباط بین ترشوندگی و تغییرات پارامتر  $n$  در رابطه

1. Fleury and Longreou

2. Keller  
3. Sweeney and Jennings  
4. Morgan and Pirson  
5. Percolation  
6. Brouers  
7. Wong

جدول ۲- مقادیر اندازه گیری شده با دستگاه اندازه گیری گاما

درصد تقریبی حجم رس	K (%)	Th(ppm)	U (ppm)	
-	۲/۲	۵۵/۵	۴۷/۸	مقدار بیشینه
-	۰	۲/۲	۰	مقدار کمینه
۹/۱٪	۰/۲	۵	۱۸/۶	مقدار در سنگ

پس از این مرحله، مغزه‌ها به مدت یک ساعت در دستگاه اشباع‌کننده<sup>۶</sup> تحت خلاء قرار گرفتند و آب شور تحت فشار ۲۰۰۰ psia به داخل مغزه‌ها تزریق گردید. بعد از اندازه‌گیری مقاومت ویژه درصد اشباع آب ۱۰۰٪ و محاسبه پارامترهای فاکتور مقاومت ویژه (Fr) و ضریب سیمان شدگی (m) برای چهار نمونه مغزه، سه مغزه مجدداً شسته شد و با دستگاه کپری خشک و در فشار ۲۰۰۰ psia نفت به داخل آنها تزریق گردید. برای دستیابی به ترشوندگی نفت‌دوست، مغزه‌ها به مدت ۱۰۰۰ ساعت در دمای ۹۰ درجه سلیسیوس نگهداری شدند تا شرایط مورد نظر مخزن، شبیه‌سازی شود. شدت جریان نفت در این تزریق‌ها برابر با ۰/۰۵ سانتی‌متر مکعب در دقیقه و دمای تزریق، دمای محیط بود.

**مواد مورد استفاده در آزمایش‌ها:** جدول (۳) خواص سیالات مورد استفاده در آزمایش‌ها اندازه‌گیری شده که شرایط محیط را نشان می‌دهد.

جدول ۳- خواص سیالات مورد استفاده در آزمایش‌ها

میزان شوری (ppm)	نمک	گرانروی (cp)	API	چگالی (gr/cc)	
-	-	۶/۷۲	۳۹	۰/۸۳	نفت
۲۰۰۰۰	کلرید سدیم	-	-	۱/۲	آب

رخمون سنگ مخزن آسماری با امکان تهیه مغزه‌های دارای خواص یکسان انتخاب گردید. فشار موئینگی در طی انجام آزمایشات با تغییر نیروی کشش بین سطحی به کمک افزودن مواد فعال در سطح تغییر داده شد [۹]. از نمونه سنگ مورد نظر چهار مغزه تهیه گردید که مشخصات آنها در جدول (۱) آورده شده است. بعد از بریدن و صیقل دادن، مغزه‌ها در دستگاه شستشو<sup>۱</sup> به وسیله تولوئن در دمای ۱۷۰ درجه سلیسیوس و به مدت ۲۴ ساعت شسته شدند و به مدت سه روز در دمای ۱۰۰ درجه سلیسیوس در آن خشک گردیدند. مقدار تخلخل مغزه‌ها به وسیله گاز هلیوم به وسیله دستگاه کیفی<sup>۲</sup> اندازه‌گیری شد که در جدول (۱) خلاصه شده است.

جدول ۱- اندازه و مقدار تخلخل نمونه مغزه‌ها

نمونه	قطر مغزه (mm)	طول مغزه (mm)	حجم محیط متخلخل	تخلخل موثر (%)
C <sub>۲</sub>	۳۷/۱۲	۵۰/۱۸	۸/۷۸	۱۶/۱۷
C <sub>۳</sub>	۳۷/۱۹	۴۹/۶۵	۸/۱۹	۱۵/۹۵
C <sub>۴</sub>	۳۶/۲۹	۴۸/۵۲	۷/۸۶	۱۵/۶۶
C <sub>۵</sub>	۳۶/۸۷	۵۰/۳۸	۷/۶۴	۱۴/۲۰

یکی از موارد مهم در بررسی مقاومت ویژه، میزان کانی رس موجود در سنگ بوده که می‌تواند در چاه‌نگاری به وسیله اشعه گاما<sup>۳</sup> متصاعد شده از کانی پتاسیم در سنگ و با رابطه زیر اندازه‌گیری شود [۱۰]. مقادیر تقریبی این کانی در نمونه سنگ‌ها با دستگاه اندازه‌گیری گاما<sup>۴</sup>، که در اصل برای تطبیق عمق<sup>۵</sup> در فعالیت‌های چاه‌نگاری است، اندازه‌گیری شد.

$$V_{sh} = \frac{GR_{log} - GR_{\text{ماسه}}}{GR_{\text{سنگ رسی}} - GR_{\text{ماسه}}} \quad (۳)$$

1. Dean Stark
2. Kayphi
3. GR(Gama Ray)
4. Natural Gama Ray
5. Depth Matching

6. Saturator

نمک ۲۰ میلی نیوتن بر متر بوده که با افزودن ۰/۲ درصد وزنی SDS به مقدار ۰/۱۶۲ میلی نیوتن بر متر و با افزودن ۰/۰۵ درصد وزنی Triton X ۱۰۰ به ۰/۰۰۵ میلی نیوتن بر متر کاهش یافت. اندازه‌گیری مقادیر کشش سطحی کم به دلیل تشکیل نشدن قطره توسط دستگاه قطره دوار<sup>۳</sup> انجام گردید.

جدول ۴- کشش بین سطحی نفت و محلول‌های فاز آبی

در غلظت‌های مختلف

کشش بین سطحی فاز آبی و نفت (mN/m)	غلظت (درصد) وزنی	پایه و ماده فعال در سطح
۲۰/۳۹	۲۰	آب نمک
۰/۱۶۳	۰/۲	SDS
۰/۰۰۵	۰/۰۵	Triton X ۱۰۰

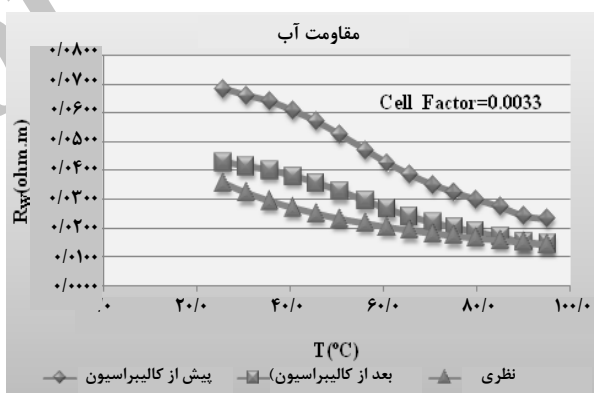
مشخصات سیستم‌های مورد مطالعه در این مقاله در جدول (۵) معرفی شده‌اند.

جدول ۵- سیستم‌های مورد مطالعه

نمونه	ترشوندگی	تخلخل مؤثر (%)	سیال تزریقی	غلظت فعال سطحی (wt%)	IFT (mN/m)
C <sub>۲</sub>	آب- دوست	۱۶/۱۷	نفت	-	۲۰/۳۹
C <sub>۳</sub>	نفت- دوست	۱۵/۶۶	SDS	۰/۲	۰/۱۶۳
C <sub>۴</sub>	نفت- دوست	۱۵/۹۵	۱۰۰ Triton X	۰/۰۵	۰/۰۰۵
C <sub>۵</sub>	نفت- دوست	۱۴/۲۰	آب نمک	-	۲۰/۳۹

در این آزمایش‌ها نفت خام به کار رفت و آب شور به وسیله کلرید سدیم ۰/۹۸٪ تهیه گردید. مقاومت الکتریکی آب نمک به وسیله سلول مقاومت<sup>۱</sup> در دستگاه کپری در دماهای مختلف اندازه‌گیری و با استفاده از رابطه (۴) و مقادیر نظری، مقاومت ویژه آب نمک و اعمال ضریب کالیبراسیون (درجه بندی) دستگاه به دست آمده بکمک نرم افزار موجود با دستگاه (در دمای ۹۰ درجه سلسیوس برابر با ۰/۰۳۳) محاسبه گردید. شکل (۱) نمودارهای مقادیر مقاومت ویژه آب نمک ۲۰۰۰۰ ppm اندازه‌گیری شده بوسیله دستگاه کپری قبل و بعد از کالیبره کردن و مقادیر نظری مقاومت ویژه آب نمک، در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. مقاومت ویژه آب نمک در ۹۰ درجه سلسیوس (دمای آزمایش) بعد از اعمال ضریب کالیبراسیون برابر ۰/۰۱۵۱ اهم متر می‌باشد.

$$R_{Calib} = R_w \times \frac{1}{s} \quad (4)$$



شکل ۱- مقاومت ویژه آب نمک قبل و بعد از اعمال ضریب کالیبراسیون دستگاه

محلول عوامل فعال در سطح به منظور تغییر در نیروی کشش بین سطحی با افزودن وزن معینی از ماده فعال در سطح به آب نمک تهیه گردید. در اینجا از دو نوع ماده فعال در سطح آنیونی SDS و غیر یونی Triton X ۱۰۰ استفاده گردید. اندازه‌گیری نیروی کشش سطحی نفت و آب نمک با دستگاه کشش سطحی<sup>۲</sup> و در شرایط مخزن (فشار ۳۰۰۰ psia و دمای ۹۰ درجه سلسیوس) انجام شد. همان‌طور که در جدول (۴) دیده می‌شود کشش سطحی نفت و آب

3. Spinning Drop

1. RwCell  
2. IFT700

جدول ۶- مقادیر پارامترهای  $F_r$ ,  $m$  و ضریب پیچاییچی

در دمای ۹۰ درجه

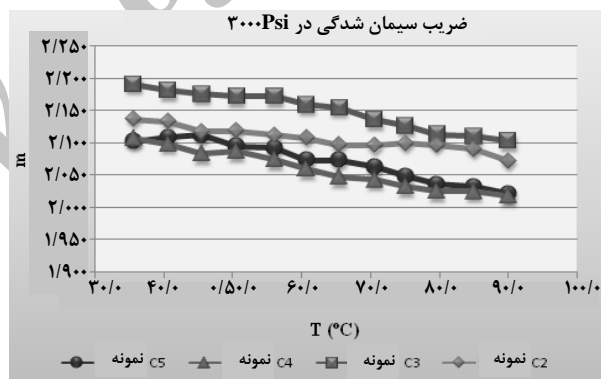
نمونه	$m$	$F_r$	$\tau$
$C_2$	۲/۰۷۲	۳۵/۱۰۲	۶/۳۰۳
$C_3$	۲/۱۰۳	۴۱/۶۷۸	۷/۰۷۳
$C_4$	۲/۰۱۸	۴۱/۷۸۳	۶/۵۷۲
$C_5$	۲/۰۲۲	۴۳/۷۴۰	۶/۷۴۸

## روش انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری شاخص مقاومت ویژه و

**فشار موئینگی:** در ابتدا چهار مغزه یکی با آب و سه تای آنها با نفت اشباع شده و به مدت ۱۰۰۰ ساعت در دمای مخزن، پیرسازی می‌شوند و در شرایط مخزن (فشار  $3000 \text{ Psi}$  و دمای ۹۰ درجه سلسیوس) در دستگاه کپری مورد آزمایش قرار می‌گیرند. این روش تنها در اندازه‌گیری فشار موئینگی و شاخص مقاومت ویژه برای نمونه سنگ‌های اشباع با آب کاربرد دارد. برای نمونه‌های نفت‌دوست آزمایش‌ها با تزریق آب به درون مغزه‌ها آغاز می‌شوند. دو فرایند جذب یعنی ورود فاز ترکننده به سنگ و خروج فاز غیرترکننده از آن و فرایند تخلیه یعنی ورود فاز غیر ترکننده و خروج فاز ترکننده از سنگ در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. فشار موئینگی برای هر چهار مغزه برابر با تفاضل فشار نفت و آب به صورت ( $P_e = P_o - P_w$ ) تعریف و محاسبه می‌شود. مراحل کلی آزمایش نمونه سنگ آب‌دوست، اندازه‌گیری فشار موئینگی و شاخص مقاومت ویژه، به ترتیب عبارتند از:

- ۱) ورود نفت تحت تأثیر اختلاف فشار از صفر تا  $150 \text{ psia}$  به مغزه و خروج آب از آن (فرایند تخلیه اولیه)
  - ۲) ورود آب به مغزه تحت تأثیر اختلاف فشار از  $150 \text{ psia}$  تا  $150 \text{ psia}$  - و خروج نفت از مغزه (فرایند جذب)
  - ۳) خروج مجدد آب و ورود نفت به مغزه تحت تأثیر اختلاف فشار از  $150 \text{ psia}$  تا  $150 \text{ psia}$  (تخلیه ثانویه)
- مراحل کلی آزمایش نمونه مغزه نفت دوست عبارتند از:
- ۱) ورود آب به مغزه‌ها و خروج نفت از آن تحت تأثیر اختلاف فشار از صفر تا  $150 \text{ psia}$  - (تخلیه اولیه)
  - ۲) ورود نفت و خروج آب از مغزه‌ها تحت تأثیر اختلاف فشار از  $150 \text{ psia}$  - تا  $150 \text{ psia}$  (فرایند جذب)

اندازه‌گیری فاکتور مقاومت ویژه و ضریب سیمان شدگی: برای اندازه‌گیری این پارامترها مغزه‌ها را  $100\%$  با آب اشباع می‌نماییم [۲]. در حالت کلی پارامتر  $m$  متناسب با ساختار محیط متخلخل و در حد  $1/5$  تا  $3/5$  بوده و تابع نوع ترشوندگی سنگ و فشار موئینگی نیست. در روش آزمایشگاهی با داشتن مقدار تخلخل مغزه و مقدار فاکتور مقاومت ویژه (محاسبه شده از طریق اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی مغزه  $100\%$  اشباع با آب نمک و مقاومت الکتریکی آب نمک موجود در سنگ)، مقدار پارامتر  $m$  قابل دستیابی می‌باشد. در دستگاه کپری مقادیر مقاومت ویژه از طریق چهار سنسور (دو سنسور برای انتقال جریان و دو سنسور برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی) اندازه‌گیری می‌شود. مقاومت ویژه آب و سنگ با ضرب مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده در ضریب  $\pi D^2 / 4l$  متناسب با سطح مقطع مغزه و فاصله بین دو سنسور به دست می‌آید. شکل (۲) مقادیر پارامتر  $m$  برای چهار مغزه مورد آزمایش در دماهای مختلف را نشان داده که بیانگر مقادیر نسبتاً مشابه است. همانگونه که دیده می‌شود با افزایش دما مقدار  $m$  کاهش می‌یابد.

شکل ۲- مقادیر پارامتر  $m$  تحت تأثیر دما در فشار  $3000 \text{ Psi}$ 

مقادیر پارامترهای  $F_r$ ,  $m$  و ضریب پیچاییچی اندازه‌گیری شده برای مغزه‌ها در دمای ۹۰ درجه سلسیوس در جدول (۵) نشان داده شده است. مقدار ضریب پیچاییچی برای نمونه سنگ در دستگاه کپری با محاسبه پارامترهای رابطه آرچی بکمک رابطه  $\tau = \phi R_o / R$  محاسبه می‌گردد [۲]. پارامترهای  $m$  و ضریب پیچاییچی برای چهار مغزه از جدول دارای مقادیری نسبتاً یکسان می‌باشند که می‌تواند نشان دهنده تشابه ساختار مسیرهای عبوری جریان در محیط متخلخل نمونه‌ها باشد.

نمودار فشار موئینگی برحسب درصد آب اشباع درون مغزه در محاسبات مخزن و شبیه‌سازی کاربرد دارد. دستگاه کپری این نمودار را با اعمال اختلاف فشار<sup>۵</sup> مشخص از طریق پمپ نفت به صورت فشار مثبت یا منفی در چندین مرحله اعمال و درصد آب اشباع درون مغزه را در هر مرحله اندازه‌گیری می‌کند و از این طریق قادر به رسم نمودار فشار موئینگی برحسب درصد آب اشباع می‌باشد. این نمودار در دستگاه کپری هم برای فرایند جذب از طریق اعمال فشار موئینگی منفی و هم برای فرایند جذب از طریق اعمال فشار موئینگی مثبت از سمت پمپ نفت محاسبه می‌گردد.

**اندازه‌گیری مقاومت ویژه:** اندازه‌گیری مقاومت ویژه در دو قسمت مجزا در دستگاه، یکی برای آب سازندی و دوم برای مغزه اشباع از آب (با آب و نفت) در نگه‌دارنده مغزه از طریق چهار سنسور اندازه‌گیری می‌شود. از این چهار سنسور، دو سنسور بیرونی<sup>۶</sup> برای ایجاد جریان و دو سنسور داخلی<sup>۷</sup> برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به کار می‌روند. با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی E مقاومت الکتریکی نمونه از  $R_w = \frac{E.A}{I_w.L}$  محاسبه می‌گردد. برای کالیبره کردن دستگاه ابتدا مخزن آب با نمونه آب شور، با شوری مشخص پر شده و مقاومت ویژه برای آن در دمای مشخص اندازه‌گیری و ضریب کالیبراسیون برای دستگاه تعیین و با ضریب این مقدار در مقادیر اندازه‌گیری شده نتایج واقعی به دست می‌آید.

### ۳- نتایج، بررسی و تحلیل داده‌ها

**اثر پسماند فاز بر شاخص مقاومت ویژه:** شکل (۳) الف- اثر پسماند را بر نمودار شاخص مقاومت ویژه در نمونه آب دوست C<sub>۲</sub> طی فرایندهای تخلیه اولیه، جذب و تخلیه ثانویه در دما و فشار مخزن نشان می‌دهد. شیب نمودار شاخص مقاومت ویژه برای فرایند تخلیه اولیه نسبت به فرایندهای جذب و تخلیه ثانویه بیشتر در حالیکه برای دو فرایند جذب و تخلیه نزدیک به هم می‌باشد. با توجه به آب دوست بودن نمونه مسیرهای متخلخل ریز در فرایند جذب و تخلیه ثانویه همواره اشباع از آب باقی مانده و مسیر را برای عبور جریان الکتریکی باز نگه می‌دارند. شکل (۳) ب) نشان‌دهنده اثر پسماند بر شاخص مقاومت ویژه برای نمونه سنگ نفت دوست C<sub>۵</sub>

(۳) ورود مجدد آب و خروج نفت از مغزه‌ها تحت تأثیر اختلاف فشار از ۱۵۰ psia تا ۱۵۰ psia - (تخلیه ثانویه).

یکی از مسائل مهم و قابل ذکر در این مرحله مسئله تکرار پذیری آزمایش‌ها می‌باشد. برای کنترل صحت و دقت تست‌ها و بررسی مسئله تکرار پذیری آزمایش‌ها معمولاً آزمایش‌هایی به صورت موازی انجام می‌شود. در این کار به دلیل محدود بودن دسترسی به نمونه سنگ و در دسترس بودن تنها چهار مغزه از نمونه، همچنین زمان بر بودن تست‌ها امکان تکرار آزمایش‌ها وجود نداشت و سعی شده با رعایت هر چه بیشتر اصول آزمایش و دقت دستگاه‌ها این مشکل تا حدی جبران شود.

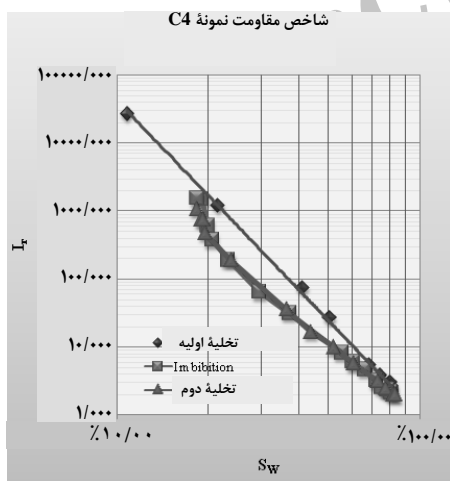
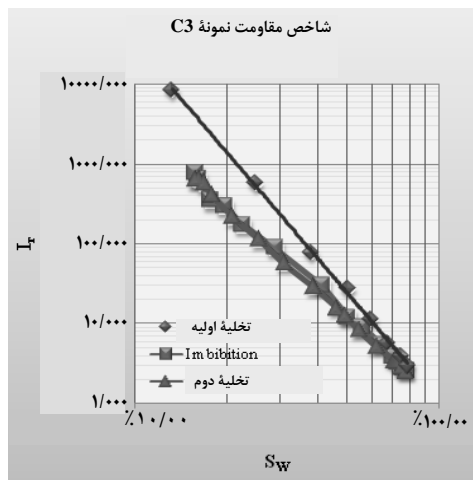
**دستگاه کپری:** این دستگاه برای اندازه‌گیری فشار موئینگی در فرایندهای جذب و تخلیه، فاکتور مقاومت ویژه الکتریکی  $F_r$ ، فاکتور سیمانی شدگی  $m$ ، شاخص مقاومت ویژه  $I_r$  و توان اشباع  $n$  به کار می‌رود. برای شروع، نمونه سنگ در نگه‌دارنده مغزه<sup>۱</sup> دستگاه تحت فشار سرباره و شرایط مخزن قرار داده می‌شود. دمای مغزه نیز به وسیله آون کنترل می‌شود. درصد آب در مغزه از حالت ۱۰۰٪ تا مقدار آب باقیمانده از طریق فشار اعمال شده توسط پمپ نفت کاهش یافته و مقدار آب خارج شده از مغزه در هر مرحله افزایش فشار پمپ نفت<sup>۲</sup> به وسیله پمپ آب جمع‌آوری شده و درصد آب موجود در مغزه به کمک تغییر حجم ایجاد شده در پمپ آب محاسبه می‌گردد. هر دو پمپ از طریق سرامیک‌های نیمه‌تراوا<sup>۳</sup> به نگه‌دارنده مغزه متصل می‌باشند که این سرامیک‌ها تعیین‌کننده پایان مراحل مختلف آزمایش‌ها می‌باشند. مقاومت ویژه الکتریکی آب شور  $R_w$  استفاده شده برای اشباع کردن مغزه به کمک سلول مخصوص<sup>۴</sup> در دما و فشار مخزن اندازه‌گیری می‌گردد. اندازه‌گیری مقاومت ویژه مغزه کاملاً اشباع با آب برای محاسبه  $F_r$  و  $m$  و مقاومت ویژه مغزه در اشباع‌های کمتر تا میزان آب باقیمانده برای اندازه‌گیری  $I_r$  و  $n$  به کار می‌رود. همچنین با محاسبه درصد اشباع آب در اختلاف فشارهای مختلف، نمودار فشار موئینگی بر حسب درصد آب اشباع رسم می‌گردد.

**اندازه‌گیری فشار موئینگی:** حضور دو فاز غیر قابل امتزاج در داخل فضای متخلخل باعث به وجود آمدن نیروی موئینگی می‌شود.

1. Core Holder
2. Delta - Pressure
3. Semi - Permeable
4. Resistivity Cell

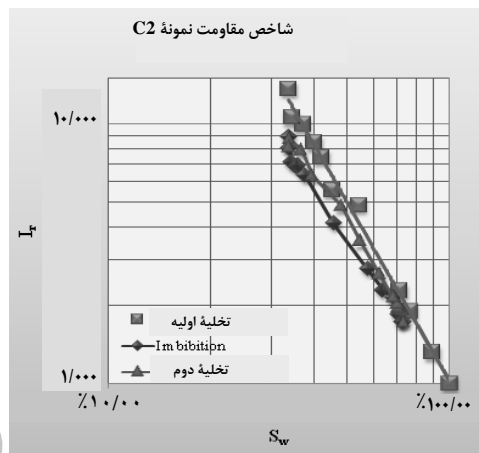
5. Delta-Pressure
6. Drive
7. Sence

می‌شود، با وجود تزریق این ماده شاخص مقاومت ویژه در تزریق اولیه آب با تزریق نفت و تزریق ثانویه آب همچنان اختلاف زیادی دارد. اما مقادیر شاخص مقاومت ویژه در فرایند تزریق نفت و تزریق ثانویه آب برابر شده که می‌تواند به علت کاهش نیروی کشش بین سطحی بین دو سیال باشد. همچنین شکل (۴-ب) اثر پسماند بر شاخص مقاومت ویژه برای نمونه سنگ نفت دوست C<sub>۴</sub> و در حضور مقدار مشخص محلول ماده فعال در سطح TritonX ۱۰۰ در آب نمک را نشان می‌دهد. در اینجا تنها بین حالت اولیه تزریق و دو حالت بعد اختلاف به چشم می‌خورد. در این حالت نیز شیب نمودارهای شاخص مقاومت ویژه در حالت‌های مختلف نسبت به نمونه C<sub>۵</sub> کاهش پیدا می‌کند.

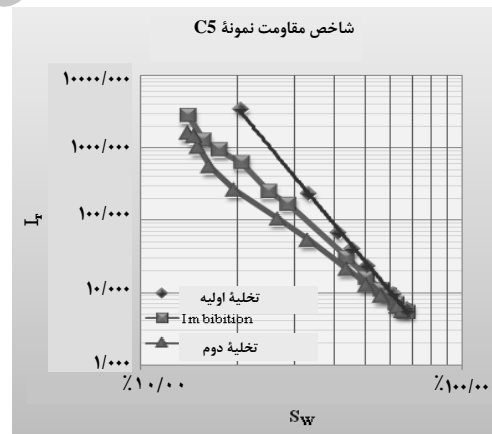


شکل ۴- اثر پسماند بر شاخص مقاومت ویژه برای نمونه نفت دوست در شرایط مخزن برای: (الف) C<sub>۳</sub> و تزریق SDS و (ب) C<sub>۴</sub> و تزریق TritonX100

می‌باشد. در این نمونه فرایند آزمایش بوسیله نفت و آب نمک ppm ۲۰۰۰۰۰، بدون اضافه کردن مواد فعال در سطح و در شرایط مخزن انجام گرفته است. همان‌گونه که از شکل دیده می‌شود، مقدار پسماند برای نمونه نفت دوست در مقایسه با نمونه آب دوست بیشتر است. شیب نمودار شاخص مقاومت ویژه برای فرایند تزریق آب (جذب) بیشتر از شیب نمودار در فرایند تزریق نفت یا تزریق مجدد آب می‌باشد. این اختلاف به دلیل به وجود آمدن مسیرهای پیوسته رسا در نمونه در پایان فرایند تخلیه اولیه است.



(الف)



(ب)

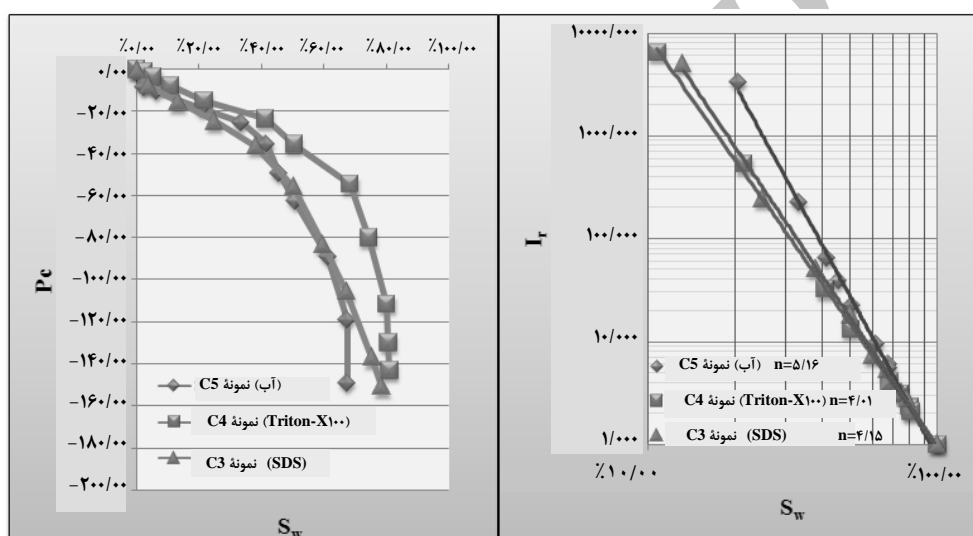
شکل ۳- تأثیر پسماند بر شاخص مقاومت ویژه در شرایط مخزن برای: (الف) نمونه آب دوست C<sub>۲</sub> (ب) نمونه نفت دوست C<sub>۵</sub>

شکل (۴-الف) اثر پسماند بر شاخص مقاومت ویژه برای نمونه سنگ نفت دوست C<sub>۳</sub> و در حضور مقدار مشخص محلول ماده فعال در سطح SDS در آب نمک را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده

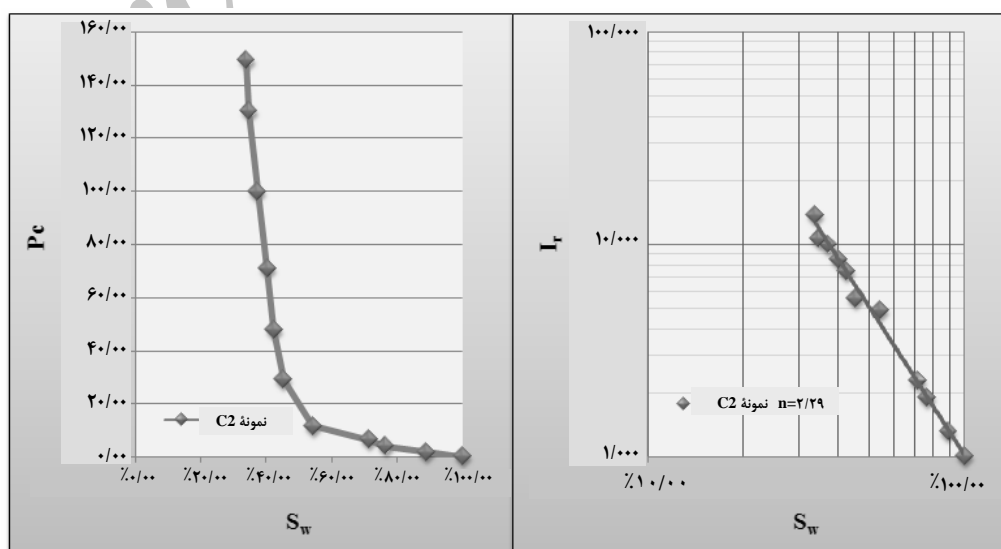
عبور جریان الکتریکی می‌باشد.

شکل (۷) نمودار فشار موئینگی و شاخص مقاومت ویژه را در فرایند تخلیه اولیه برای نمونه سنگ آبدوست C<sub>۲</sub> نشان می‌دهد. در اینجا تخلیه اولیه برابر با ورود نفت و خروج آب از سنگ می‌باشد. شاخص مقاومت ویژه برای این نمونه بسیار کمتر از نمونه‌های نفت‌دوست و برابر با ۲/۲۹ است. این به علت باقیماندن آب در حفره‌های ریز و ایجاد مسیرهای پیوسته رسانا برای عبور جریان الکتریکی می‌باشد.

پارامترهای  $n$  و  $I_r$  و  $P_c$  طی فرایند تخلیه اولیه: شکل (۶) نمودارهای فشار موئینگی و شاخص مقاومت ویژه برای سه نمونه مغزه نفت‌دوست در فرایند تخلیه اولیه را نشان می‌دهند. با کاهش کشش بین سطحی و کم شدن میزان نفت باقیمانده شیب خط شاخص مقاومت ویژه ( $n$ ) نیز کاهش پیدا می‌کند (۵/۱۶) برای نمونه مغزه C<sub>۵</sub> که آب به آن تزریق شده و ۴/۰۱ و ۴/۱۵ به ترتیب برای نمونه‌های C<sub>۴</sub> و C<sub>۳</sub> که همراه با آب تزریقی از مواد فعال در سطح ۱۰۰ TritonX و SDS استفاده شد). این می‌تواند ناشی از بین رفتن نیروی کشش بین سطحی بین آب و نفت و کمک برای



شکل ۵- نمودار فشار موئینگی و شاخص مقاومت ویژه در فرایند تخلیه اولیه برای نمونه سنگ نفت‌دوست

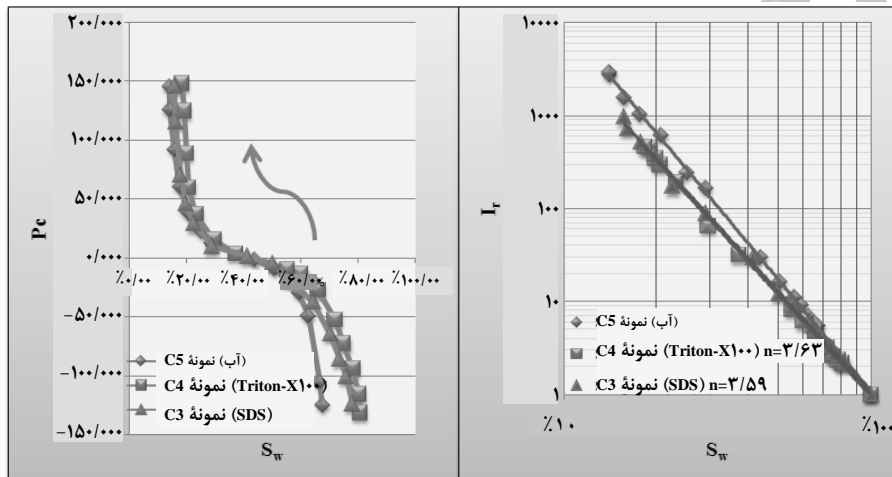


شکل ۶- نمودار فشار موئینگی و شاخص مقاومت ویژه در فرایند تخلیه اولیه برای نمونه سنگ آبدوست

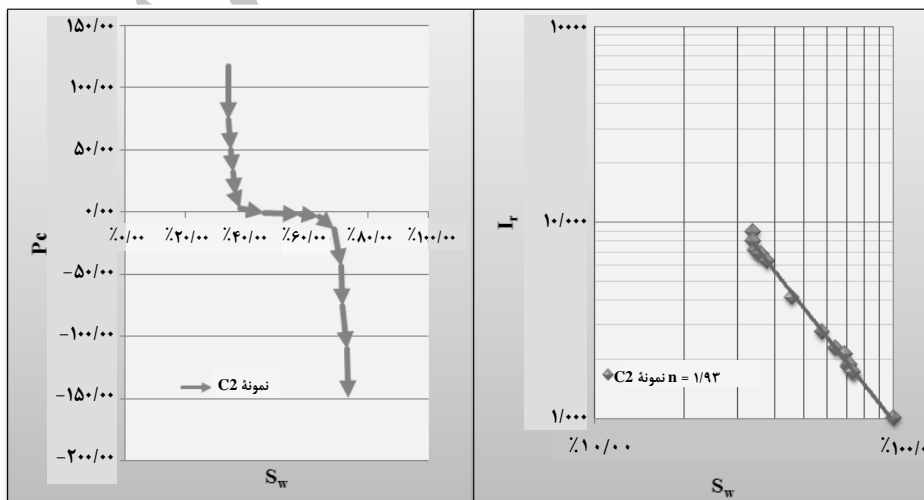


برای نمونه  $C_5$  نسبت به نمونه‌های  $C_3$  و  $C_4$  بیشتر است. شیب نمودار شاخص مقاومت ویژه بر حسب آب اشباع برای نمونه‌های  $C_4$  و  $C_3$  از نمونه  $C_5$  کاملاً نفت‌دوست کمتر است. مقدار پارامتر  $n$  برای نمونه  $C_5$  برابر  $3/98$  و برای دو نمونه  $C_3$  و  $C_4$  به ترتیب برابر با  $3/63$  و  $3/59$  است که میزان کاهش  $n$  متناسب با کاهش خاصیت ترشوندگی از نفت‌دوست به آب‌دوست است. شکل (۹) نمودار فشار موئینگی و شاخص مقاومت ویژه را طی فرایند جذب برای نمونه سنگ آب‌دوست نشان می‌دهند. مقدار پارامتر  $n$  به دست آمده برای این نمونه نسبت به سه نمونه نفت‌دوست بسیار کمتر و برابر با  $1/93$  است.

پارامترهای  $n$  و  $I_r$  و  $P_c$  طی فرایند جذب: شکل (۸) نمودار فشار موئینگی و شاخص مقاومت ویژه طی فرایند جذب برای نمونه‌های نفت‌دوست را نشان می‌دهد. فرایند جذب از دو قسمت خودبخودی از فشار  $150 \text{ psia}$  تا صفر و اجباری از فشار صفر تا  $150 \text{ psia}$  می‌باشد. بعد از فرایند تخلیه اولیه اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین میزان نفت باقیمانده در سه نمونه سنگ نفت‌دوست مشاهده می‌شود. در این قسمت تا رسیدن به فشار صفر و پایان فرایند جذب خودبخودی مقادیر شاخص مقاومت ویژه برای دو نمونه سنگ حاوی مواد فعال در سطح کمتر از مقدار آن در نمونه کاملاً نفت‌دوست می‌باشد. در قسمت جذب اجباری نیز مقدار شاخص مقاومت ویژه



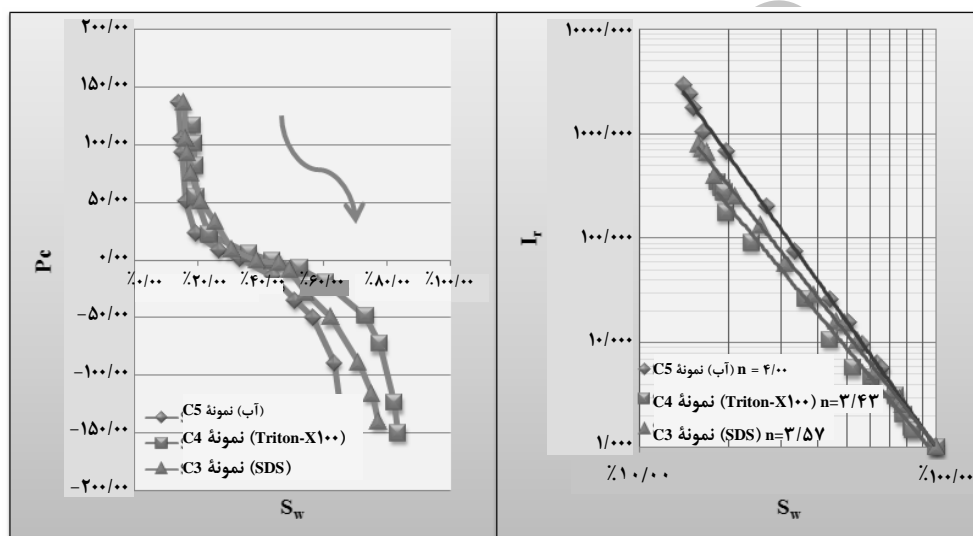
شکل ۷- نمودار فشار موئینگی و شاخص مقاومت ویژه در فرایند جذب برای نمونه سنگ نفت‌دوست



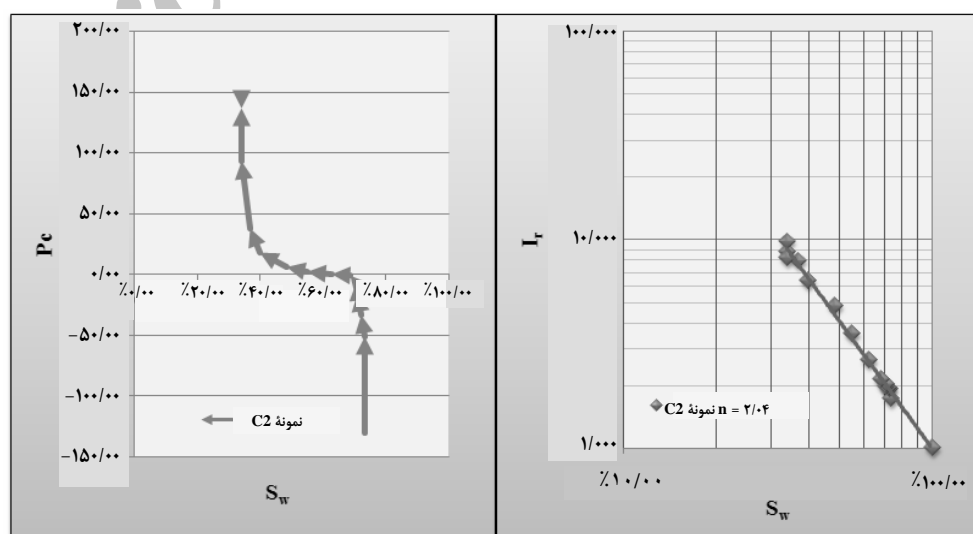
شکل ۸- نمودار فشار موئینگی و شاخص مقاومت ویژه در فرایند جذب برای نمونه سنگ آب‌دوست

۳/۴۳ و ۳/۵۷ است. شکل (۱۱) نیز نمودار فشار موئینگی و شاخص مقاومت ویژه در نمونه مغزه آب دوست می باشد که مقدار  $n$  از شیب خط شاخص مقاومت ویژه برابر با ۲/۰۴ به دست آمده است. از نمودار فشار موئینگی، شاخص مقاومت ویژه و با توجه به ترشوندگی سنگ و فرایند مورد آزمایش (تخلیه اولیه، جذب یا تخلیه ثانویه) مقدار پارامتر  $n$  برای نمونه سنگ ها دسته بندی و در جدول (۷) خلاصه شده است.

پارامترهای  $n$  و  $I_r$  و  $P_c$  طی فرایند تخلیه ثانویه: شکل (۱۰) نمودار فشار موئینگی و شاخص مقاومت ویژه در فرایند تخلیه ثانویه را برای نمونه سنگ نفت دوست نشان می دهد. فرایند تخلیه ثانویه شامل دو بخش تخلیه خودبخودی از فشار ۱۵۰ psia تا صفر و تخلیه اجباری از فشار صفر تا ۱۵۰ psia - است. در فرایند تخلیه ثانویه نیز مقدار شیب نمودارهای شاخص مقاومت ویژه برای نمونه C<sub>۵</sub> نفت-دوست نسبت به دو نمونه C<sub>۴</sub> و C<sub>۳</sub> بیشتر است. مقدار پارامتر  $n$  برای نمونه C<sub>۵</sub> برابر با ۴/۰۰ و برای نمونه های C<sub>۴</sub> و C<sub>۳</sub> به ترتیب برابر با



شکل ۹- نمودار فشار موئینگی و شاخص مقاومت ویژه در فرایند تخلیه ثانویه برای نمونه سنگ نفت دوست



شکل ۱۰- نمودار فشار موئینگی و شاخص مقاومت ویژه در فرایند تخلیه ثانویه برای نمونه سنگ آب دوست

جدول ۷- مقادیر پارامتر  $m$  محاسبه شده در فرایندهای

## مختلف در شرایط مخزن

	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
تخلیه اولیه	۲/۲۹	۴/۱۵	۴/۰۱	۵/۱۶
آشام	۱/۹۳	۳/۵۹	۳/۶۳	۳/۹۸
تخلیه ثانویه	۲/۰۴	۳/۵۷	۳/۴۳	۴/۰۰

۵- با توجه به نمودارهای فشار موئینگی در فرایندهای جذب و تخلیه، مواد فعال در سطح بیشتر با از بین بردن نیروی کشش سطحی در فرایند تزریق تأثیرگذار می‌باشند تا تغییر خاصیت ترشوندگی.

۶- مدل کردن جریان سیال در مغزه‌های کربناته، تصویری بهتر از جریان هیدرولیک در این مغزه‌ها و در نتیجه جریان الکتریکی در آنها ارائه می‌دهد. همچنین به تصویر در آوردن چگونگی جریان در حفره‌ها و پیچ و خم‌های محیط متخلخل به ما در ردیابی جریان الکتریکی در سنگ کربناته کمک می‌کند.

۷- تأثیرات فشار سرپاره، دما، میزان رس موجود در سنگ و نوع آن برای سنگ‌های کربناته بیشتر بر روی پارامتر  $m$  مورد بررسی قرار گرفته است ولی برای پارامتر  $n$  همچنان نیاز به انجام بررسی دیگر است.

۸- اندازه‌گیری مقاومت ویژه سنگ‌ها در این آزمایش‌ها برای طول‌های مشخص و ثابت از مغزه صورت گرفته است. اندازه‌گیری این پارامتر برای برش‌هایی با طول‌های متفاوت بیان‌کننده چگونگی تغییر مقاومت ویژه در سنگ متناسب با طول بازه در فشارها یا دماهای مختلف خواهد بود.

تأثیرپذیری پارامتر توان اشباع به تغییرات خاصیت ترشوندگی (منابع [۱۳]، [۷]، [۶]، [۵] و [۴]) از جدول (۷) قابل مشاهده می‌باشد. به طور مثال، برای نمونه سنگ آب‌دوست مقدار پارامتر  $n$  در حدود ۲ و برای نمونه نفت‌دوست این پارامتر تا مقدار ۵ نیز به دست آمد. به دلیل تأثیرپذیری پارامتر توان اشباع از عوامل متعدد نظیر خواص ذاتی سنگ مخزن، میزان تخلخل، فشار سرپاره، دما، میزان رس، مقایسه کمی مقادیر به دست آمده با نمونه‌های مشابه مشکل به نظر می‌رسد.

## ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۱- در فرایندهای تزریق سیال درون سنگ، متناسب با سیال موجود درون سنگ و سیالی که به آن تزریق می‌شود مقداری پسماند در نمودارهای مقاومت ویژه الکتریکی، مانند نمودارهای فشار موئینگی، مشاهده می‌شود که بستگی به ترشوندگی سنگ دارد.
- ۲- مقدار پسماند بین فرایندهای جذب و تخلیه برای نمونه سنگ‌های نفت‌دوست نسبت به نمونه‌های آب‌دوست محسوس‌تر است.
- ۳- مقدار پارامتر  $n$  در سنگ با توجه به خاصیت ترشوندگی و نوع فرایند مورد مطالعه متغیر است و نمی‌توان برای آن مقادیر ثابت را در نظر گرفت. مقدار این پارامتر برای سنگ‌های نفت‌دوست بالاتر از نمونه آب‌دوست می‌باشد.
- ۴- در طول فرایند تزریق آب در سنگ‌های نفت‌دوست مقدار پارامتر توان اشباع،  $m$  بالاتر از مقدار آن در فرایند تزریق نفت است. و لذا شاخص مقاومت در فرایند تزریق نفت نسبت به خط راست انحنا دارد.

## ۵- فهرست علائم

$\alpha$	ثابت آرچی
A	سطح مقطع نمونه
E	ولتاژ
$F_R$	فاکتور مقاومت ویژه
$I_R$	شاخص مقاومت ویژه
L	طول نمونه
m	ضریب سیمان شدگی
n	نمای اشباع
$R_W$	مقاومت ویژه آب
$R_O$	مقاومت ویژه سنگ اشباع با آب
$R_t$	مقاومت ویژه سنگ اشباع با آب و نفت
$V_{sh}$	حجم رس
$\phi$	تخلخل
$\tau$	ضریب پیچ‌پیچی

- [6] H. N. Man and X. D. Jing, "Network Modeling of Wettability and pore Geometry Effects on Electrical Resistivity and Capillary Pressure", Journal of Petroleum Science and Engineering, 255–267(1999).
- [7] H. N. Man, X. D. Jing, "Network Modeling of Mixed-Wettability on Electrical Resistivity, Capillary Pressure and Wettability Indices", Journal of Petroleum Science and Engineering, 101– 122 (2002).
- [8] B. Montaron, "Fractals, Percolation Theory and the Stability of Archie's 'm' Exponent", PWLA Topical Conference on Low Resistivity Pay in Carbonates, Abu-Dhabi, U.A.E (2005).
- [9] Ali Zangnevar, "Selecting a Surfactant for Wettability Alteration In Iranian Carbonate Reservoirs", M.Sc. Thesis, Sharif University of Technology (2009).
- [10] O. Serra, "Fundamentals of Well-Log Interpretation" Elsevier Scientific Pub., Third Edition, Amesterdam, p 423, (1988).
- [11] J. W. Amix, D. M. Bass and R. L. Whiting, "Petroleum Reservoir Engineering: Physical Properties", McGraw-Hill, UK, p 600, (1988).
- [12] The Technical Review, "Archie II: Electrical Conduction in Hydrocarbon-Bearing Rock", Rock Physics, vol (3) no(4) 12-16 (1987).
- [13] W. G. Andarson, "Wettability Literature Survey-art 3: The Effects of Wettability on the Electrical Properties of Porous Media", Paper SPE 13934 (1986).

مقدار پرتوزایی سنگ سازند  $GR_{log}$

راديو اکتیویتهی رس  $GR_{shale}$

پرتوزایی سنگ بدون رس  $GR_{sand}$

### مراجع

- [1] T. Shamsi Ara "In-Depth Investigation of the Validity of the Archie Equation in Carbonate Rocks", M.Sc. Thesis, Dalhousie University (2002).
- [2] Djebbar Tiab and Erle C. Donaldson: "Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties", Second Edition, Elsevier Scientific Pub., UK, p 752, (2004).
- [3] B. D. Dos, "Fundamentals of Geotechnical Engineering", Cengage Learning, USA, p 450, (2000).
- [4] A. K. Moss, X. D. Jing and J. S. Archer, "Laboratory Investigation of Wettability and Hysteresis Effects on Resistivity Index and Capillary Pressure Characteristics", Journal of Petroleum Science and Engineering, 231–242 (1999).
- [5] B. Montaron, "A Quantitative Model for the Effect of Wettability on the Conductivity of Porous Rocks", Paper SPE 105041 (2007).

Archive of SID