

## روشی نو جهت تخمین نفوذپذیری نسبی

## پژوهش نفت

سال بیست و چهارم

شماره ۷۹

صفحه، ۱۷۱-۱۶۶ ۱۳۹۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۷/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۴/۸

داود قربانی\* و علی اکبر رحیمی بهار

پژوهشکده مطالعات مخازن و توسعه میدان، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

## مقدمه

نفوذپذیری نسبی<sup>۱</sup> یکی از ویژگی‌های مهم در ارزیابی مخازن می‌باشد که نمودارهای حاصل از آن جهت پیش‌بینی نرخ تولید و بازیافت از مخازن طی دوران مختلف برداشت (اول، دوم و سوم) به کار می‌رود. همچنین این پارامتر در مطالعات و شبیه‌سازی مخازن اهمیت بالایی دارد [۱]. تعیین نفوذپذیری نسبی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های مغزه انجام می‌گیرد که در برخی موارد از بعد زمان و اقتصادی مقرون به صرفه نیست. با توجه به تشبیه یک محیط متخلخل به محیط رسانا می‌توان ارتباط مؤثری بین دو پارامتر نفوذپذیری نسبی و مقاومت الکتریکی برقرار کرده و نفوذپذیری نسبی را با توجه به داده‌های مقاومت الکتریکی<sup>۲</sup> محاسبه نمود. در این خصوص لی و هرنه [۲]، پژوهشی به منظور اندازه‌گیری نفوذپذیری نسبی با توجه به داده‌های مقاومت الکتریکی حاصل از آزمایش بر روی نمونه‌های مغزه و مقایسه نتایج آن با آزمایشات نفوذپذیری نسبی انجام دادند. در این مطالعه به جای مقاومت الکتریکی نمونه‌های مغزه، از نمودارهای الکتریکی رانده شده در درون چاه برای محاسبه نفوذپذیری نسبی استفاده می‌گردد.

## چکیده

نفوذپذیری نسبی یکی از پارامترهای مهم و مؤثر در مهندسی مخازن می‌باشد که مقدار آن از طریق اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی زمان بر و پر هزینه تعیین می‌شود. با در نظر گرفتن ارتباط میان نفوذپذیری نسبی و مقاومت الکتریکی، می‌توان نفوذپذیری نسبی فازهای مختلف (ترکننده و غیرترکننده) را با توجه به داده‌های نمودارهای مقاومت الکتریکی تخمین زد. این تحقیق به تعیین نفوذپذیری نسبی با استفاده از لاگ‌های مقاومت الکتریکی بر روی یکی از میداین نفتی کشور و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی پرداخته است. با توجه به در دسترس بودن لاگ‌های مقاومت الکتریکی برای چاه‌های نفتی مختلف، این پژوهش می‌تواند نقش مهمی در امکان‌سنجی تعیین نفوذپذیری نسبی از طریق داده‌های لاگ‌های مقاومت الکتریکی ایفا کند که از بعد زمانی، اقتصادی و شبیه‌سازی پویا در مخازن حائز اهمیت می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: نفوذپذیری نسبی، مهندسی مخازن، فاز ترکننده، فاز غیرترکننده، لاگ‌های مقاومت الکتریکی

1. Relative Permeability  
2. Resistivity

ترکننده، صفر است که قابل قبول می‌باشد. رابطه ۵ را می‌توان به صورت رابطه ۶ در نظر گرفت:

$$K_{rw} = S_w^* \frac{I}{l} \quad (6)$$

$S_w^*$ ، اشباع نرمال شده فاز ترکننده<sup>۴</sup> می‌باشد که از رابطه ۷ تعیین می‌گردد:

$$S_w^* = \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \quad (7)$$

#### تعیین نفوذپذیری نسبی فاز غیر ترکننده<sup>۵</sup>

طبق پژوهش‌های لی و هرنه [۴]، نفوذپذیری نسبی فاز غیر ترکننده را می‌توان از رابطه ۸ به دست آورد:

$$K_{rw} = (S_w^*)^{\frac{2+\lambda}{\lambda}} \quad (8)$$

$\lambda$ ، شاخص پراکندگی ابعاد منافذ<sup>۶</sup> می‌باشد که از داده‌های آزمایشات فشار موینگی<sup>۷</sup> تعیین می‌گردد. پس از محاسبه نفوذپذیری نسبی فاز ترکننده توسط رابطه ۶، می‌توان مقدار  $\lambda$  را از رابطه ۸ به دست آورد.

طبق مدل بروکس- کری [۵] و مطالعات لی و هرنه، نفوذپذیری نسبی فاز غیر ترکننده با توجه به اندازه‌گیری شاخص مقاومت الکتریکی در آزمایشگاه، توسط رابطه ۹ قابل محاسبه است:

$$K_{rmw} = (1 - S_w^*)^2 [1 - (S_w^*)^{\frac{2+\lambda}{\lambda}}] \quad (9)$$

$K_{rmw}$ : نفوذ پذیری نسبی فاز غیر ترکننده

#### روش تحقیق

جهت انجام پژوهش، یکی از میداین نفتی جنوبی کشور انتخاب شد. میدان مورد نظر در منطقه جنوب غربی ایران در حوضه زاگرس قرار گرفته و دارای زون مخزنی با لیتولوژی آهکی می‌باشد. میزان تخلخل موثر در زون مخزنی، متوسط (بیشتر از ۱۰٪) تا خوب برآورد شده است. سه نمونه مغزه در مقیاس پلاگ با یک نوع تیپ سنگی از زون مخزنی میدان مورد نظر انتخاب شد و نفوذپذیری نسبی آن در شرایط دو فازی و غیر پایدار تعیین گردید.

#### تعیین نفوذپذیری نسبی فاز ترکننده

هدایت الکتریکی<sup>۱</sup> در یک محیط متخلخل با اشباع ۱۰۰٪ از فاز ترکننده<sup>۲</sup> و هدایت الکتریکی اشباع فاز ترکننده مفروض به ترتیب معادل با روابط ۱ و ۲ می‌باشد:

$$CT_o = \frac{I}{R_o} \quad (1)$$

$$CT_t = \frac{I}{R_t} \quad (2)$$

با توجه به رابطه آرچی [۳] و شباهت جریان سیال در محیط متخلخل و جریان الکتریسیته در محیط رسانا، می‌توان با بررسی ارتباط دو پارامتر نفوذپذیری نسبی و شاخص مقاومت الکتریکی، روابط زیر را ارائه کرد:

$$I = \frac{R_t}{R_o} \quad (3)$$

$$K_{rw} = \frac{R_o}{R_t} = \frac{I}{I} \quad (4)$$

$I$ ، شاخص مقاومت الکتریکی و  $K_{rw}$  نفوذ پذیری نسبی فاز ترکننده می‌باشد. در اشباع ۱۰۰٪ فاز ترکننده، مقدار شاخص مقاومت الکتریکی معادل ۱ می‌باشد. بنابراین مقدار محاسبه شده نفوذپذیری نسبی از رابطه ۴ معادل با ۱ می‌باشد که مقداری قابل قبول است. همان‌طور که می‌دانیم در اشباع غیر قابل کاهش فاز ترکننده<sup>۳</sup>، مقدار نفوذپذیری نسبی برابر صفر می‌باشد که با رابطه ۴ تطابق ندارد. طبق این رابطه همواره مقدار نفوذپذیری بزرگ‌تر از صفر می‌باشد. دلیل آن را می‌توان این‌گونه بیان کرد که نفوذپذیری به ابعاد، پراکندگی و ارتباط منافذ بستگی دارد، در حالی که مقاومت، میانگین اندازه حجمی منافذ در یک محیط متخلخل را مد نظر قرار می‌دهد و این موضوع چرایی عدم تعیین نفوذپذیری توسط لاگ‌های مقاومت را بیان می‌کند. برای حل این مشکل با در نظر گرفتن یک ضریب تصحیح، می‌توان رابطه ۴ را به شکل رابطه زیر اصلاح نمود:

$$K_{rw} = \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \frac{I}{I} \quad (5)$$

$S_w$ : اشباع فاز ترکننده

$S_{wi}$ : اشباع غیر قابل کاهش فاز ترکننده

طبق رابطه ۵، نفوذپذیری نسبی فاز ترکننده در اشباع ۱۰۰٪ فاز ترکننده معادل با ۱ و در اشباع غیر قابل کاهش فاز

1. Conductivity

2. Wetting Phase

3. Wetting Phase Saturation

4. Normalized Wetting Phase Saturation

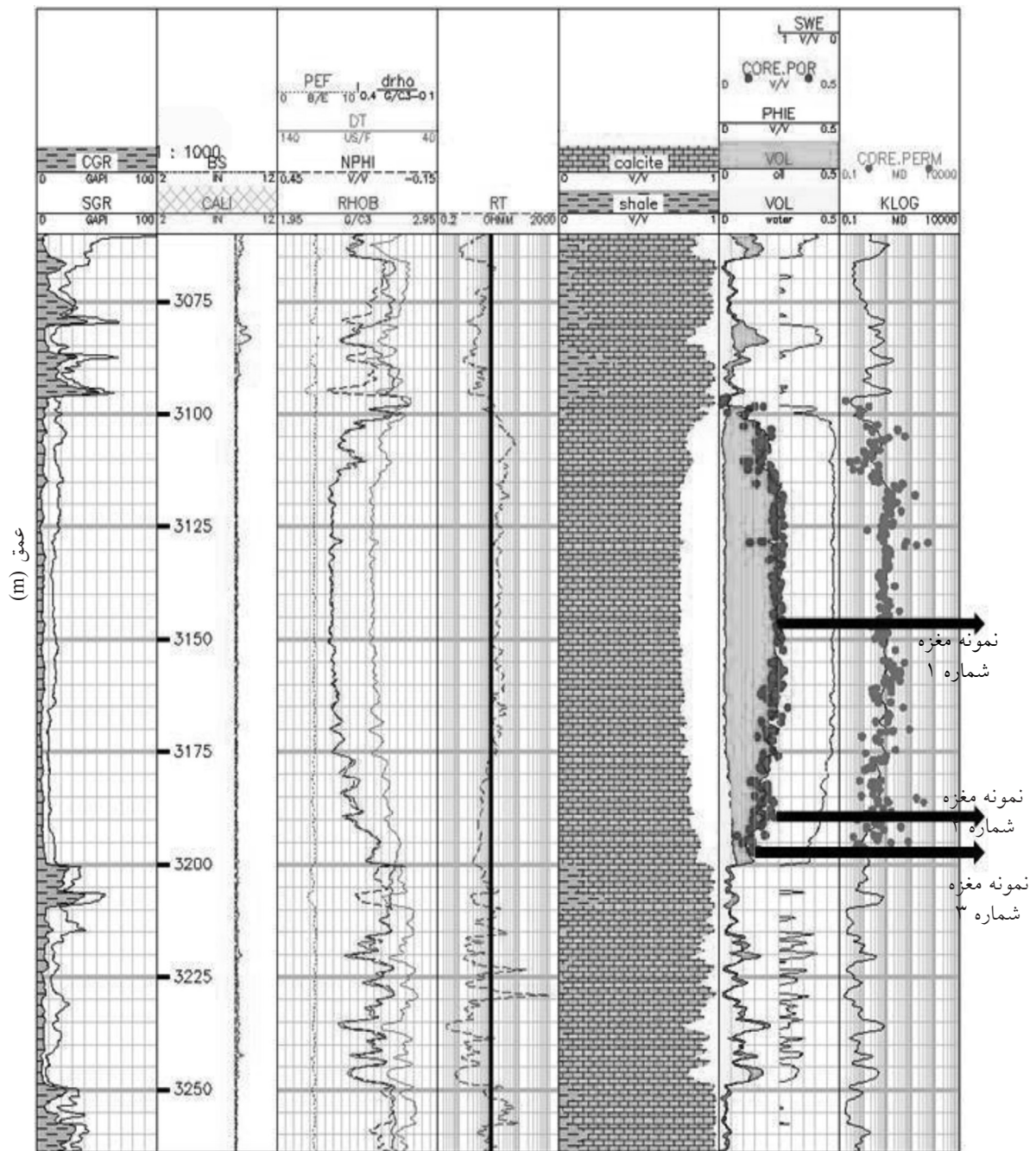
5. Non-Wetting Phase

6. Pore Size Distribution Index

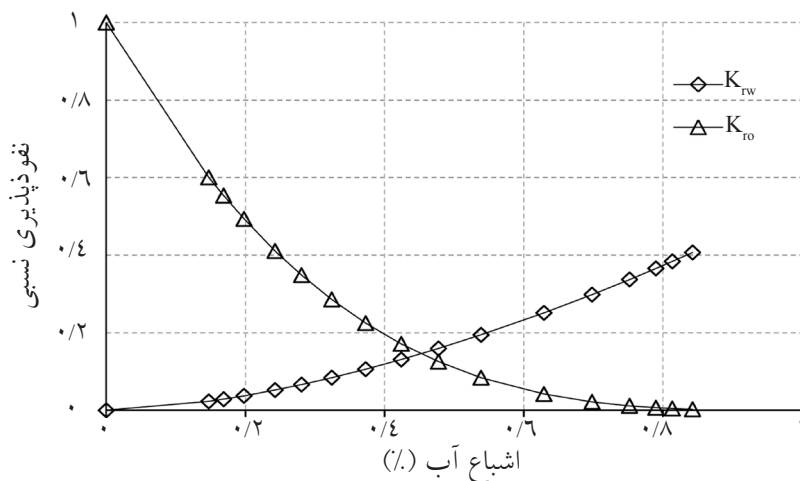
7. Capillary Pressure

آزمایشگاهی با رابطه بروکس - کری، نتایج طبق این رابطه مدل شد. در شکل‌های ۲ تا ۴ نمودارهای مربوط به نفوذپذیری نسبی مدل حاصل از رابطه بروکس-کری به ترتیب برای ۳ نمونه مغزه مختلف ارائه شده است. در بخش دوم کار، با استفاده از داده‌های مقاومت الکتریکی حاصل از لاگ، نفوذپذیری نسبی محاسبه گردید.

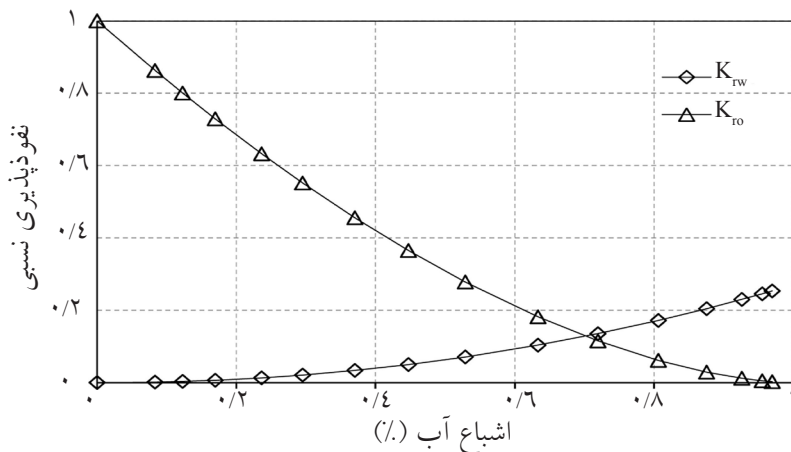
شکل ۱، موقعیت نمونه‌های انتخاب شده در زون مخزنی را نشان می‌دهد. نفوذپذیری و تخلخل تعیین شده در آزمایشگاه و توسط لاگ‌ها برای نمونه‌های مورد نظر قابل مشاهده می‌باشد. در این آزمایشات فاز ترکننده، آب و فاز غیرترکننده نفت در نظر گرفته شد. سپس از طریق تجزیه و تحلیل نتایج اولیه بهترین مدل سازگار با شرایط موجود لحاظ گردید. در نهایت با توجه به همبستگی خوب نتایج



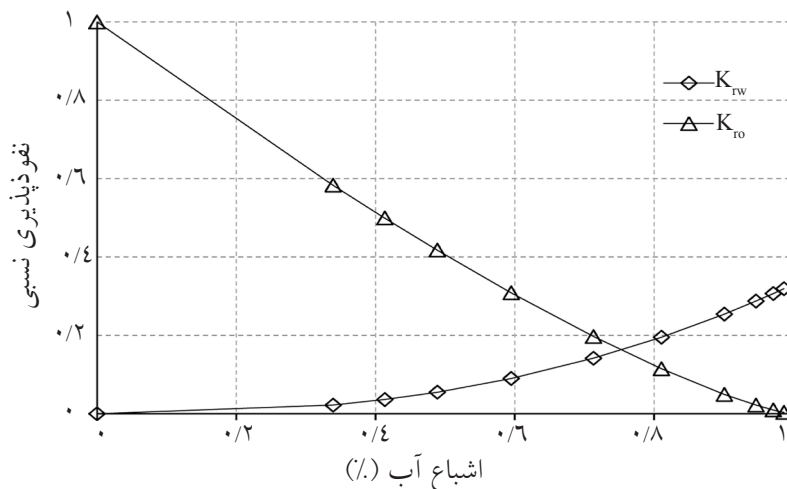
شکل ۱- موقعیت نمونه مغزه‌های انتخاب شده در ناحیه مخزنی



شکل ۲- نمودار نفوذپذیری نسبی حاصل از رابطه بروکس - کری برای نمونه مغزه شماره ۱



شکل ۳- نمودار نفوذ پذیری نسبی حاصل از رابطه بروکس - کری برای نمونه مغزه شماره ۲



شکل ۴- نمودار نفوذ پذیری حاصل از رابطه بروکس - کری برای نمونه مغزه شماره ۳

نفوذپذیری نسبی، داده‌های حاصل از لاگ‌های مقاومت الکتریکی جانبی با عمق نفوذ بیش از ۱۲ فوت، جایگزین داده‌های مقاومت الکتریکی آزمایشگاهی شد.

لی و هرنه از نتایج آزمایشگاهی مقاومت الکتریکی در پژوهش خود استفاده کردند ولی با توجه به تفاوت و محدودیت‌های شرایط آزمایشگاهی با شرایط مخزن و با توجه به همخوانی بهتر داده‌های لاگ‌های مقاومت الکتریکی<sup>۱</sup> با شرایط مخزن، در این پژوهش برای تعیین

1. Resistivity Logs  
2. Latter Log Resistivity

### نتایج و بحث

در مرحله آخر نتایج به دست آمده از دو روش آزمایشگاهی و داده‌های لاگ با هم مقایسه شدند که نتایج آن در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود همبستگی خوب و قابل قبولی بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های لاگ وجود دارد. با توجه به شکل ۵ موارد ذیل قابل بحث می‌باشد:

#### نفوذپذیری نسبی فاز ترکنده (آب) در نقطه انتهایی

این پارامتر به صورت مشخصه‌ای از ترشوندگی سیستم سنگ - سیال در نظر گرفته می‌شود. اختلاف نتایج در این نقطه نشان از تفاوت شرایط آزمایشگاهی و مخزنی دارد. در واقع نفوذپذیری نسبی آب به دست آمده در نقطه انتهایی در آزمایشگاه از مقدار واقعی کمتر است. این اختلاف به علت وجود مشکلاتی مانند فشار موینگی و تغییر در خواص ترشوندگی می‌باشد که در شرایط آزمایشگاهی به صورت کامل قابل کنترل نیست، یا می‌تواند به دلیل عدم پیشرفت سیلاب‌زنی به واسطه شرایط آزمایشگاهی روی دهد. همان‌گونه که در شکل نیز پیداست، نفوذپذیری نسبی آب در نقطه انتهایی در صورت استفاده از داده‌های لاگ بیشتر از حالت آزمایشگاهی تعیین گردیده که دلیل آن می‌تواند ناشی از نزدیکی و همخوانی بیشتر داده‌های لاگ با شرایط مخزن باشد.

داده‌های مقاومت الکتریکی مورد تصحیحات محیطی معمول در ارزیابی‌های پتروفیزیکی<sup>۲</sup> اعم از اثرات گل و دیواره چاه قرار گرفت که خروجی آن لاگ مقاومتی مطابق با شکل ۱ می‌باشد. لازم به ذکر است که در حفاری چاه مورد نظر از گل پایه آبی<sup>۳</sup> استفاده شده است. روابط ارائه شده توسط لی و هرنه با انجام تغییراتی برای محاسبه نفوذپذیری نسبی فاز ترکنده و نا ترکنده استفاده شدند. برای محاسبه نفوذپذیری نسبی فاز ترکنده از رابطه ۶ استفاده گردید که در این رابطه ضریب I به صورت زیر محاسبه شد:

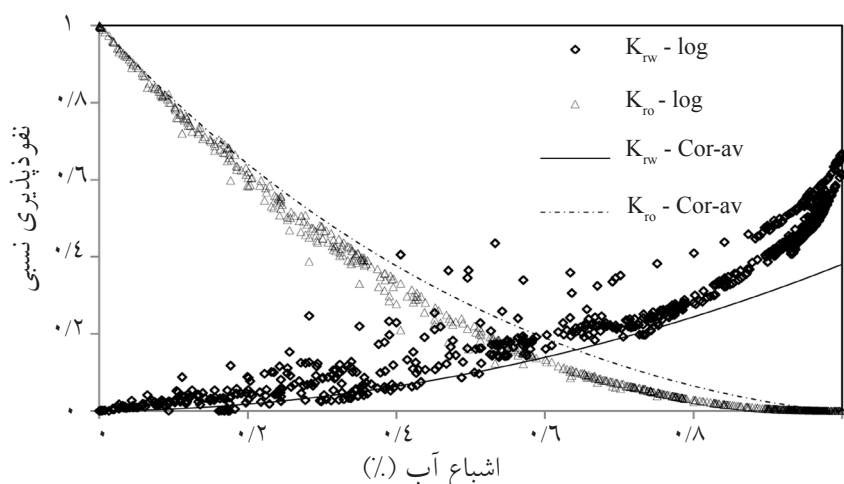
$$I = \frac{R_t^*}{R_{min}} \quad (10)$$

که در آن:  $R_{min}$  حداقل مقاومت الکتریکی در زون مخزنی و  $R_t^*$  مقاومت الکتریکی نرمال شده در اشباع فاز ترکنده است، مقاومت نرمال شده  $R_t^*$  با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه شده است:

$$\log(R_t^*) = \frac{\log(R_t) - \log(R_{min})}{\log(R_{max}) - \log(R_{min})} \quad (11)$$

که در آن:  $R_{max}$  مقاومت الکتریکی در اشباع غیر قابل کاهش فاز ترکنده و  $R_t^*$  و  $R_{min}$  هم که قبلاً در بالا معرفی شده‌اند. برای محاسبه نفوذپذیری نسبی فاز غیرترکنده نیز از رابطه ۱۲ استفاده شد:

$$K_{rnrw} = (1 - S_w^*)^2 [1 - (K_{rw})] \quad (12)$$



شکل ۵- نتایج تعیین نفوذپذیری نسبی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و لاگ‌های مقاومت الکتریکی



زمان‌بر و پر هزینه است و با توجه به در دسترس بودن لاگ‌های مقاومت الکتریکی، این پژوهش می‌تواند گام موثری در جهت امکان‌سنجی تعیین نفوذ پذیری نسبی از طریق داده‌های لاگ‌های مقاومت الکتریکی بردارد.

### علائم و نشانه‌ها

$CT_o$ : هدایت الکتریکی در اشباع آب ۱۰۰٪ (moh/m)

$CT_i$ : هدایت الکتریکی در اشباع آب مفروض (moh/m)

$R_o$ : مقاومت الکتریکی در اشباع آب ۱۰۰٪ (ohmm)

$R_i$ : مقاومت الکتریکی در اشباع آب مفروض (ohmm)

$I$ : شاخص مقاومت الکتریکی

$K_{rw}$ : نفوذ پذیری نسبی فاز ترکننده

$S_w$ : اشباع فاز ترکننده (v/v)

$S_{wi}$ : اشباع غیر قابل کاهش فاز ترکننده (v/v)

$S_w^*$ : اشباع نرمال شده فاز ترکننده

$\lambda$ : شاخص پراکنندگی ابعاد منافذ

$K_{rmw}$ : نفوذ پذیری نسبی فاز نا ترکننده

$R_i^*$ : مقاومت الکتریکی نرمال شده در اشباع فاز ترکننده مفروض

$R_{max}$ : مقاومت الکتریکی در اشباع غیر قابل کاهش فاز ترکننده (ohmm)

$I_{max}$ : شاخص مقاومت الکتریکی در اشباع غیر قابل کاهش فاز ترکننده

$K_{rw}$ : نفوذ پذیری نسبی آب (فاز ترکننده)

$K_{ro}$ : نفوذ پذیری نسبی نفت (فاز غیر ترکننده)

تقاطع نمودار نفوذ پذیری نسبی فاز ترکننده (آب) و فاز غیر ترکننده (نفت)

این نقطه نشان‌دهنده درجه اشباع درجای آب می‌باشد که در آن نفوذ پذیری نسبی آب و نفت با هم برابرند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد در اشباع درجای حدود ۶۵٪ آب، نفوذ پذیری نسبی آب و نفت با هم برابر است، در حالی که در صورت استفاده از داده‌های لاگ این مقدار به ۵۵٪ کاهش می‌یابد. می‌توان گفت این مقادیر همخوانی نسبتاً خوبی با هم دارند و اختلاف ۱۰٪ به تغییر در خواص ترشوندگی، وجود فشار موینگی در شرایط آزمایشگاهی و تفاوت آن با شرایط مخزن مربوط می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

با توجه به پژوهش انجام شده و مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی نتایج زیر به دست آمد:

- طبق مدل مفروض در این تحقیق، جریان سیال در یک محیط متخلخل به جریان الکتریکی در یک محیط رسانا تشبیه شد و با ساده‌سازی داده‌ها، نفوذ پذیری نسبی دو فاز ترکننده و غیر ترکننده با توجه به داده‌های لاگ‌های مقاومت الکتریکی تعیین شد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید.
- مقایسه نتایج حاصل از لاگ و آزمایشگاه نشان می‌دهد که نتایج، همبستگی و همخوانی خوبی با یکدیگر دارند؛ هر چند جهت تکمیل کار، مطالعات بیشتر در تحقیقات آتی ضروری است.
- اندازه‌گیری نفوذ پذیری نسبی به روش آزمایشگاهی

### مراجع

- [1]. Craig F. F, Jr.: *The reservoir engineering aspects of waterflooding*, Monograph series, SPE, Richardson, TX, 1993.
- [2]. Li K., and Horne R. N. *Inferring relative permeability from resistivity*, Stanford University, California, 2005.
- [3]. Archie G. E., *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*, AIME Petroleum Tech. 1942.
- [4]. Li K., and Horne R. N., *Experimental verification of methods to calculate relative permeability using capillary pressure data*, SPE 76757, Proceedings of the 2002 SPE Western Region Meeting/AAPG Pacific Section Joint Meeting held in Anchorage, Alaska, 2002.
- [5]. Brooks R. H., and Corey A. T., "Hydraulic properties of porous media" Colorado State University, Hydro Paper No. 5, 1964.