

## مقایسه روش عددی تطابق تاریخچه و روش تحلیلی JBN برای تخمین خواص ویژه سنگ مخزن در آزمایش سیلابزنی در حالت ناپایا

فرهاد تجاری لوانانی، محمد علی سلیمی، شرکت مهندسی پترواومات بارس

احمد علی زاده\*، مصطفی کتبخانه قزوینی، پژوهشکده ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز

چکیده

خواص ویژه سنگ مخزن شامل تراوایی نسبی و فشار موینه، از مهمترین داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی عملکرد مخازن هیدروکربنی محسوب می‌شود. برای تخمین این ویژگی‌ها، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که هر کدام، کاربردها و محدودیت‌های مشخصی دارد. در این مقاله با تکیه بر روش سیلابزنی در حالت ناپایا، خواص ویژه سنگ مخزن با کمک روش عددی تطابق تاریخچه و روش تحلیلی JBN محاسبه و مقایسه می‌شوند. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که علی‌رغم سرعت و سادگی روش تحلیلی، این روش علاوه بر محدودیت‌های خاص خود، به وجود مقادیر اندکی خطا در داده‌های ورودی بسیار حساس بوده و عملاً از تخمین دقیق نمودارهای تراوایی نسبی دوفازی تحت شرایط آزمایشگاهی متداول ناتوان است. در حالی که روش عددی تطابق تاریخچه پایداری بیشتری داشته و نتایج مطمئن تری تولید می‌کند.

واژگان کلیدی: تراوایی نسبی دوفازی، فشار موئینگی، روش تحلیلی JBN، روش عددی تطابق تاریخچه، شبیه‌سازی جریان سیال دوفازی

### مقدمه

مویئینگی از روش ساترئیفیوژ استفاده می‌شود. با توجه به سریع و قابل اعتماد بودن محاسبه خواص ویژه سنگ به روش سیلابزنی ناپایا و قابلیت آن برای تخمین هم‌زمان و دقیق هر دو ویژگی تراوایی نسبی و نیروی مویینه، در این مقاله با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی جدید (الگوریتم ازدحام ذرات [۷])، فرایند لازم برای تخمین خواص ویژه سنگ، به روش عددی تطابق تاریخچه، انجام شده و با روش تحلیلی JBN مقایسه می‌گردد. در نهایت، طی یک آنالیز حساسیت‌سنجی بر روی داده‌های ورودی، کاربردی بودن این دو روش بررسی می‌شود.

برای مدل‌سازی مناسب جریان دوفازی درون سنگ مخزن، پارامترهای تراوایی نسبی و نیروی مویئینگی جزو ضروری‌ترین داده‌های مورد نیاز به شمار می‌روند. در طی سال‌های متمادی محققان، روش‌های مختلفی را برای تخمین این پارامترهای ضروری ارائه داده‌اند که از اصلی‌ترین این روش‌ها می‌توان به روش‌های سیلابزنی مغزه و ساترئیفیوژ اشاره کرد [۱، ۲، ۳]. روش سیلابزنی مغزه، متداول‌ترین روش محاسبه خواص ویژه سنگ، به دو دسته آزمایش‌های حالت پایا و ناپایا تقسیم می‌شود [۴]. علی‌رغم این باور عمومی که آزمایش‌های تزریق مغزه حالت پایا دقیق‌ترین روش شناخته شده فعلی برای تخمین تراوایی نسبی دوفازی است، این آزمایش‌ها علاوه بر صرف هزینه و زمان فراوان، قادر به تعیین نمودارهای فشار موئینگی نیستند. آزمایش‌های سیلابزنی حالت ناپایا به هزینه و زمان کمتری نیاز دارد اما مدل‌سازی ریاضی فرآیند آزمایش، پیچیده‌تر است. روش ساترئیفیوژ نیز از روش‌های سریع (اما نیازمند محاسبات قابل توجه ریاضی) است که معمولاً برای اندازه‌گیری فشار موئینگی به کار می‌رود [۵]. کاربرد این روش برای تخمین تراوایی نسبی با توجه به یکسان نبودن مکانیزم‌های عملکرد تولید سیال، توسط برخی از محققان مورد ابهام واقع شده است [۶]. در مجموع می‌توان گفت که در صنایع نفت و به‌طور عرف برای محاسبه مقادیر تراوایی نسبی از روش سیلابزنی به روش ناپایا و برای به‌دست آوردن مقادیر مربوط به نیروی

**۱- روش عددی تطابق تاریخچه برای محاسبه خواص ویژه سنگ**  
روش تطابق تاریخچه در واقع زنجیره‌ای از چندین مرحله آزمون و خطاست که در هر تکرار، مقادیر متغیرهای قابل اندازه‌گیری طی آزمایش سیلابزنی (شامل: اختلاف فشار دو سر مغزه و حجم نفت و آب تولید شده) با مقادیر حاصل از شبیه‌سازی عددی مقایسه می‌شوند. سپس، سعی می‌شود تا با تغییر خواص ویژه سنگ ورودی به شبیه‌سازی، این اختلاف کمینه گردد. هنگامی که نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی به حد کافی به یکدیگر نزدیک باشند، می‌توان خواص وارد شده به شبیه‌سازی را به‌عنوان خواص ویژه سنگ مخزن در نظر گرفت. موفقیت این روش، به در اختیار داشتن دو ابزار قدرتمند بستگی دارد؛

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات (alizadeh.g@gmail.com)

ذرات است؛ به عبارت دیگر،  $P_g(t)$  بهترین مکان در بین تمامی  $P_i(t)$  هاست. معادله ۳ نشان می‌دهد که هر ذره به سوی برآیندی از سرعت فعلی، بهترین موقعیت مکانی آن ذره و بهترین موقعیت مکانی تمامی ذرات حرکت خواهد کرد. برآیند این سه عامل می‌تواند دسته ذرات را به سوی بهترین جواب ممکن هدایت کند. در ابتدای الگوریتم، تمامی ذرات با مکان و سرعت‌های تصادفی در کل فضای جستجو پراکنده شده و سپس، طبق معادلات ۲ و ۳ به سوی جواب بهینه حرکت می‌کنند. موفقیت این روش در حل مسایل مختلف و تحت بازه وسیعی از پیچیدگی‌ها، نشان داده است که این روش علی‌رغم سادگی فراوان، کارایی و دقت مناسبی دارد [۷].

## ۲- روش تحلیلی JBN برای محاسبه خواص ویژه سنگ

متداول‌ترین روش تخمین نمودارهای تراوایی نسبی از طریق آزمایش‌های سیلاب زنی مغزه، روش JBN است که در سال ۱۹۵۹ توسط سه محقق به نام‌های Johnson, Bossler, and Naumann بر اساس مدل جریان سیال باکلی-لورت ارائه شد [۲]. در این روش صریح، از مقادیر تولیدی سیالات و افت فشار به صورت عددی مشتق گرفته شده و نقاط تراوایی نسبی محاسبه می‌شوند. علی‌رغم سادگی و محبوبیت فراوان این روش بین محققان و مهندسان نفت، نتایج نادرستی پس از به کارگیری این روش گزارش شده است [۹، ۱۰]. یکی از مهمترین منابع خطای روش مذکور، مسأله مشتق‌گیری آن است. به طور کلی، مشتق‌گیری از داده‌هایی که حاوی خطا هستند (خطای تصادفی، سیستماتیک و ...)، می‌تواند سبب انتشار خطا شده و اثرات آن را تشدید کند [۱۱]. از دیگر معایب این روش، صرف‌نظر کردن از نیروهای موئینگی است که سبب می‌شود تا در تخمین خواص سنگ‌هایی با فشار موئینگی بالا ناتوان باشد. از طرف دیگر، روش JBN نمودار تراوایی نسبی را تنها برای اشباع سیال متناسب با زمان‌های بعد از وقوع میانشکنی به دست می‌دهد. در روش JBN مقادیر تراوایی نسبی به مقادیر اشباع سیال در سطح مقطع خروجی مغزه نسبت داده می‌شود که از معادله ۴ به دست می‌آید:

$$S_{w,2} = S_{w,av} - f_{o2} Q_w \quad (4)$$

که در آن،  $S_{w,2}$  مقدار اشباع آب در سطح مقطع خروجی مغزه،  $S_{w,av}$  مقدار اشباع آب متوسط در کل مغزه،  $f_{o2}$  کسر جریان جزئی نفت در سطح مقطع خروجی مغزه و  $Q_w$  مقدار حجم کل آب تزریق شده است.  $f_{o2}$  نیز از معادله ۵ تعریف می‌شود:

$$f_{o2} = \frac{q_o}{q_o + q_w} = \frac{1}{1 + \frac{\mu_o / k_{ro}}{\mu_w / k_{rw}}} \quad (5)$$

که  $\mu$  گرانروی،  $k_i$  تراوایی نسبی و  $q$  دبی تولید است. اندیس‌های  $w$  و  $o$

اول، وجود یک شبیه‌ساز سریع و دقیق با قابلیت در نظر گرفتن نیروی موئینه و دوم، یک الگوریتم مناسب بهینه‌یابی برای کمینه کردن مقدار اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی.

برای انجام فرایند تطابق تاریخچه، یک نرم‌افزار کاربردی با نام PE RELPERM [۸] توسعه داده شد. این نرم‌افزار دارای یک شبیه‌ساز دقیق و قابل اعتماد بوده و فرایند تطابق تاریخچه را به صورت خودکار و با استفاده از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) انجام می‌دهد.

روش ازدحام ذرات برای اولین بار توسط محققانی با نام‌های کندی<sup>۲</sup> و ابرهات<sup>۳</sup> در سال ۱۹۹۵ میلادی و برای شبیه‌سازی رفتار اجتماعی موجوداتی مانند دسته پرندگان و یا ماهی‌ها توسعه یافت. مدل‌سازی ریاضی حرکت این موجودات در واقع، منجر به حل یک مسأله بهینه‌سازی خواهد شد. این روش ابتکاری با عدم نیاز به فرضیات ساده‌کننده پیچیده، می‌تواند فضای بسیار بزرگی از جواب‌های محتمل را برای یافتن جواب بهینه جستجو کند. در آغاز این روش، فرض می‌شود که یک جامعه از جواب‌های محتمل مسأله که ذره نامیده می‌شوند، در دسترس باشد (رابطه ۱)

$$S = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \quad (1)$$

که  $S$  نماد نمونه‌ای از جامعه و  $x_i$  جواب‌های مسأله و یا همان ذرات می‌باشند. در معادله ۱، تعداد ذرات برابر با  $N$  فرض شده است. هر ذره  $x_i$  در واقع یک بردار با تعداد اعضای  $n$  و یا همان تعداد متغیرهای قابل تنظیم بهینه‌سازی است. بدین ترتیب، یک مقدار تابع هدف  $f_i(x)$  برای هر  $x_i$  خواهیم داشت. این ذرات طبق تعدادی از روابط ریاضی ساده که برای توصیف مکان و سرعت آن‌ها به کار می‌رود، در گستره‌ی فضای جستجو حرکت می‌کنند. موقعیت هر ذره در مرحله تکرار  $t+1$  از معادله ۲ محاسبه می‌شود:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (2)$$

که  $v_i$  نماد سرعت ذره بوده و از معادله ۳ به دست می‌آید:

$$v_i(t+1) = v_i(t) + c_1 R_1 (p_i(t) - x_i(t)) + c_2 R_2 (p_g(t) - x_i(t)) \quad (3)$$

که در این معادله،  $c_1$  و  $c_2$  به ترتیب پارامترهای ضریب همگرایی جملات شناختی و اجتماعی نامیده می‌شوند و مقدار آن‌ها معمولاً برابر با ۲ می‌باشد.  $R_1$  و  $R_2$  اعداد تصادفی در بازه بین [۰، ۱] است.  $P_i(t)$  بهترین موقعیت ذره  $x_i$  از ابتدای جستجو تا به حال می‌باشد؛ به بیان دیگر، یک ذره معین در طول الگوریتم از مکان‌های متعددی می‌گذرد که هر یک از آن‌ها دارای یک مقدار تابع هدف می‌باشد. بهترین موقعیت ذره، مکانی است که تابع هدف متناظر آن، کمترین مقدار تابع هدف در بین تمامی مکان‌های همان ذره باشد.  $P_g(t)$  بهترین موقعیت مکانی در بین تمامی



۴- تخمین خواص ویژه سنگ و مقایسه نتایج

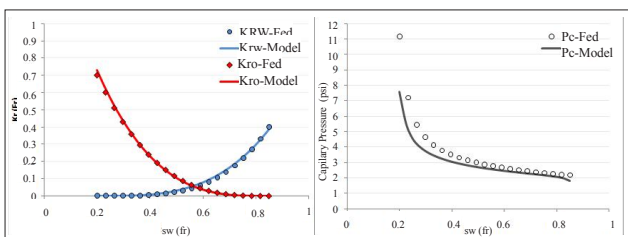
در ابتدا با روش عددی، تطابق تاریخچه و با مجهول در نظر گرفتن خواص ویژه سنگ، فرایند تطابق تاریخچه‌ی داده‌های آزمایشگاهی انجام شد. نتایج به دست آمده از این روش در شکل ۱- آورده شده است. در مرحله بعد، روش تحلیلی JBN برای محاسبه مقادیر تراوایی نسبی استفاده شد (این روش، مقدار نیروی موینه را صفر در نظر می‌گیرد). شکل ۲- نتایج این روش را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل ۲- مشخص است، روش تحلیلی JBN قادر است مقادیر خواص ویژه سنگ را تنها در نقاط اشباع سیال مرتبط با زمان بعد از میان شکنی تخمین بزند.

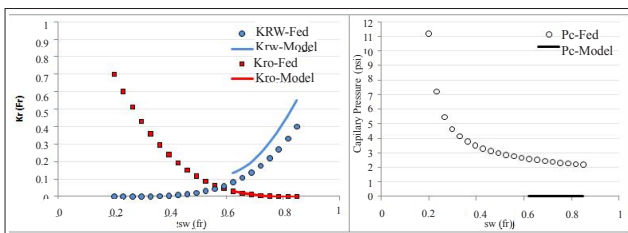
۵- آنالیز حساسیت سنجی مقدار خطای اندازه‌گیری آزمایشگاهی بر نتایج

وجود عدم قطعیت در داده‌های آزمایشگاهی تقریباً اجتناب‌ناپذیر است. بخشی از این عدم قطعیت ناشی از خطاهای سیستماتیکی است که معمولاً به علت طراحی نامناسب آزمایش و یا کالیبراسیون غیر دقیق دستگاه‌های اندازه‌گیری بوده و بخش دیگری از آن، به خطاهای اندازه‌گیری بر می‌گردد. به هر حال، وجود این خطاها در ورودی‌های هر مدل ریاضی (اعم از تحلیلی، نیمه تحلیلی و یا عددی)، سبب می‌شود تا نتایج آن مدل نیز دارای سطوحی از عدم قطعیت باشد. پایداری و استحکام یک مدل ریاضی گاه به اندازه‌ای ضعیف است که وجود اندکی خطا در ورودی‌های آن، سبب انتشار و تشدید خطا شده و نتایج نهایی مدل را غیر قابل اعتماد می‌سازد.

در این بخش، پایداری و استحکام دو روش ذکر شده نسبت به عدم قطعیت‌های موجود در داده‌های آزمایشگاهی بررسی می‌شود. بدین



شکل ۱ | مقایسه نمودارهای خواص ویژه سنگ حاصل از روش عددی با مقادیر اصلی



شکل ۲ | مقایسه نمودارهای خواص ویژه سنگ حاصل از روش تحلیلی JBN با مقادیر اصلی

نیز به ترتیب نماد فاز نفت و آب می‌باشد. مقدار تراوایی نسبی نفت و آب از معادلات ۶ تا ۸ محاسبه می‌شود:

$$k_{ro} = \frac{f_{o2}}{d \left( \frac{1}{Q_w I_r} \right) / d \left( \frac{1}{Q_w} \right)} \quad (6)$$

$$k_{rw} = \frac{f_{w2} \mu_w k_{ro}}{f_{o2} \mu_o} \quad (7)$$

$$I_r = \frac{\text{injectivity}}{\text{initial injectivity}} = \frac{(q_{w,inj} / \Delta P)}{(q_{w,inj} / \Delta P) \text{ at start of injection}} \quad (8)$$

که  $q_{w,inj}$  دبی تزریق آب و  $\Delta P$  اختلاف فشار دو سر مغزه است.

۳- شرح آزمایش

در این مقاله، به منظور ارتقای قابلیت اعتبارسنجی روش‌های ارایه شده، آزمایش سیلاب‌زنی مغزه توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز ECLIPSE انجام شد. بدین منظور، مدل آزمایش، تهیه (جدول ۱) و مقادیر معینی به خواص ویژه سنگ تخصیص داده شد (جدول ۲). نهایتاً نرم‌افزار برای مدت ۳۰ ساعت اجرا شده و خروجی آن به عنوان داده‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته شد.

پارامتر	طول مغزه (cm)	قطر مغزه (cm)	تراوایی مطلق (md)	تخلخل اولیه (%)	اشباع باقیمانده نفت (%)	نرخ تزریق (cc/min)	گرانروی نفت (cp)	گرانروی آب (cp)	مقدار
	۵	۳/۸۱	۵	۲۰	۲۰	۱	۰/۸	۰/۱	

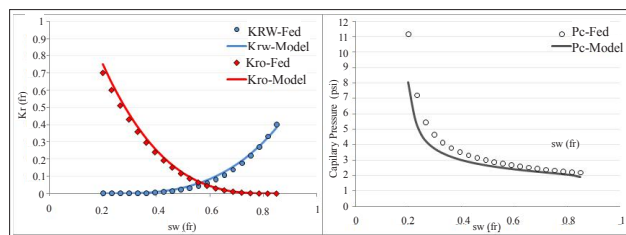
اشباع آب (کسر)	تراوایی نسبی آب (Krw)	تراوایی نسبی نفت (Kro)	فشار موینه (psi)
۰/۲	۰	۰/۷	۱۱/۱۸
۰/۲۶۵	۰/۰۰۳	۰/۵۱	۵/۴۹۵
۰/۳۳	۰/۰۰۱	۰/۳۵۸	۴/۱۳۷
۰/۳۹۵	۰/۰۰۵	۰/۲۴۰	۳/۵۱۸
۰/۴۶	۰/۰۱۳	۰/۱۵۱	۳/۱۳۵
۰/۵۲۵	۰/۰۳۱	۰/۰۸۸	۲/۸۶۸
۰/۵۹۰	۰/۰۶۰	۰/۰۴۵	۲/۶۶۶
۰/۶۵۵	۰/۱۰۷	۰/۰۱۹	۲/۵۰۶
۰/۷۲۰	۰/۱۷۵	۰/۰۰۶	۲/۳۷۶
۰/۷۸۵	۰/۲۷۱	۰/۰۰۱	۲/۲۶۷
۰/۸۵۰	۰/۴۰۰	۰/۰	۲/۱۸۴

نفت و آب تولید شده نیز بدون تغییر باقی ماندند. نتایج به دست آمده مربوط به این بررسی در شکل های ۳ و ۴ آورده شده است. همانطور که در این دو شکل دیده می شود، وجود خطای اندازه گیری در داده های آزمایشگاهی، تأثیر بسیار ناچیزی بر روی نتایج به دست آمده از روش عددی داشته اما همین خطای اندک، نتایج روش تحلیلی JBN را تا حد زیادی (خصوصاً برای فاز آب) به چالش کشیده است.

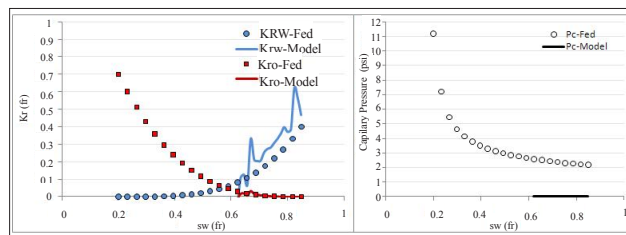
### نتیجه گیری

■ در این مطالعه، روش تحلیلی JBN و روش عددی تطابق تاریخیچه برای تخمین مقادیر خواص ویژه سنگ (تراوایی نسبی و فشار موینه) تحت آزمایش سیلاب زنی در حالت ناپایا بررسی و مقایسه شدند. روش عددی تطابق تاریخیچه می تواند همزمان مقادیر تراوایی نسبی و فشار موینه را تخمین زند، در حالی که روش تحلیلی، تنها مقادیر تراوایی نسبی را به دست می دهد.

■ بررسی ها نشان دادند که پایداری و استحکام روش تطابق تاریخیچه بیشتر از روش تحلیلی JBN می باشد. بنابراین، با توجه به وجود عدم قطعیت در داده های آزمایشگاهی، بهتر است که یا نتایج روش تحلیلی JBN را با احتیاط به کار برد و یا از روش تطابق تاریخیچه استفاده کرد. ■



شکل ۳ | مقایسه نمودارهای خواص ویژه سنگ حاصل از روش عددی با مقادیر اصلی دارای خطای حداکثر ۲ درصد



شکل ۴ | مقایسه نمودارهای خواص ویژه سنگ حاصل از روش تحلیلی JBN با مقادیر اصلی دارای خطای حداکثر ۲ درصد

منظور، برای داده های اختلاف فشار دو سر مغزه در هر نقطه زمانی، اغتشاش اندکی (حداکثر به میزان ۲٪ مقادیر حقیقی) اعمال شد. مقادیر

### پانویس ها

1. Particle Swarm Optimization
2. Kennedy
3. Eberhart
4. Population
5. Particle
6. Tuning variable
7. Search-space
8. Cognitive parameter
9. Social parameter
10. Buckley-Leverett

### منابع

- [1] Sylte A., Ebeltoft, E., and Petersen E.B., Simultaneous Determination of Relative Permeability and Capillary Pressure Using Data from Several Experiments, reviewed Proceedings of the International Symposium of the SCA, Abu Dhabi, UAE, October 2004.
- [2] Johnson E.F., Bossler, D.P., Naumann, V.O., Calculation of relative permeability from displacement experiments. Trans., AIME, 1959, 216, pp 370-372.
- [3] Al-Omar, O.A., Capillary pressure and relative permeability in centrifuge experiments using the spinning disk geometry. PhD thesis, Colorado School of Mines, 2001, Golden, CO., 66-82.
- [4] Kikuchi, M.M., Branco, C.C.M., Bonet, E.J., Zaroni, E.M., Paiva, C.M. Water Oil Relative Permeability Comparative Study: steady Versus Unsteady State", International Symposium of the Society of Core Analysts, 2005, Toronto, Canada, SCA2005-77.
- [5] Honarpour, M., Koederitz, L., and Harvey A.H., Relative Permeability of Petroleum Reservoirs, Florida, CRC Press Inc., 1986, 5-30
- [6] Singh, M., Mani, V., Honarpour, M.M., Mohanty, K.K., Comparison of viscous and gravity dominated gas-oil relative permeabilities, Journal of Petroleum Science and Engineering, 2001, volm. 30, pp 67-81.
- [7] Parsopoulos, K.E., Vrahatis, M.N., Particle Swarm Optimization and Intelligence: Advances and Applications, New York, Information science reference, Hershey, 2010, 56-85
- [8] PE RELPERM User Manual, version 2013, www.petroemertat.com
- [9] Huppler, J.d.: Numerical Investigation of the Effects of Core Heterogeneities on Water-flood Relative Permeabilities, SPEJ, Dec. 1970, pp 381-392
- [10] Tao, T.M., and Watson, A.T.: Accuracy of JBN Estimates of Relative Permeability, Part 1: Error Analysis, SPEJ, April 1984, pp 209-214
- [11] Conte, S.D and de Boor, C.: Elementary Numerical Analysis, McGraw-Hill, New York, 1980