

# به کارگیری روش LET برای تخمین منحنی‌های فشار موینگی سنگ کربناته یکی از میادین هیدروکربوری ایران

پژوهش نفت

سال بیست و چهارم

شماره ۷۹

صفحه، ۷۲-۸۲ ۱۳۹۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۱۰/۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۳/۵

سید مجید هاشمی\*، غلامرضا بشیری و محمودرضا جزایری  
پژوهشکده ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز، تهران، ایران

یکی از میادین هیدروکربوری جنوب ایران انجام شده، استفاده شده است. با توجه به مقادیر خطای محاسبه شده برای نتایج این روش ( $r^2 < 0/18$ )، این روش ضمن سهولت به کارگیری، از میزان دقت قابل قبولی نیز برخوردار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فشار موینگی، مدل LET<sup>۱</sup>، فرآیند تخلیه، مدل‌سازی رفتار موینگی، روش سانتیفریوژ

## مقدمه

فشار موینگی یکی از مهم‌ترین پارامترهای سنگ مخزن برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی رفتار سیالات چند فاز در محیط‌های متخلخل است. داده‌های فشار موینگی در تعیین ترشوندگی سنگ مخزن، ارتباط ارتفاع اشباع و پراکندگی قطر منافذ سنگ مخازن نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقادیر فشار موینگی به طور مستقیم در آزمایشگاه و به طور غیر مستقیم با به کارگیری توابع و روابط تجربی قابل محاسبه است. معادلات بسیاری برای محاسبه فشار موینگی ارائه شده است که همگی دارای دو پارامتر قابل تنظیم می‌باشند. یکی از این پارامترها بیانگر پراکندگی قطر منافذ بوده و چگونگی انحنای منحنی فشار موینگی را

## چکیده

روش‌های متعددی برای بررسی رفتار موینگی سیالات چند فاز درون محیط متخلخل سنگ مخزن وجود دارد. یکی از این روش‌ها، استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و روش دیگر استفاده از توابع ریاضی است. از ضروری‌ترین ویژگی‌های این توابع، داشتن درجه آزادی کافی برای مدل‌سازی می‌باشد. در این مقاله ابتدا روش تحلیلی که توسط لوملند و ابل تافت ارائه شده بررسی گردیده و نتایج آن برای تخمین منحنی‌های فشار موینگی حاصل از آزمایشات سانتیفریوژ بر روی نمونه‌های متعددی از سنگ کربناته یکی از میادین هیدروکربوری مناطق نفتی جنوب کشور استفاده شده است. سپس به منظور توسعه روش LET، با تغییر در برخی پارامترها، منحنی‌های فشار موینگی مدل‌سازی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش توسعه یافته بدون نیاز به انجام آزمایشات فشار موینگی و صرف هزینه، تنها با استفاده از داده‌های معمول مغزه قادر به پیش‌بینی منحنی‌های فشار موینگی می‌باشد. برای نشان دادن اعتبار روش توسعه یافته، از نتایج آزمایشات متعدد فشار موینگی که با روش سانتیفریوژ در فرآیند تخلیه بر روی نمونه‌های سنگ کربناته

\*مسئول مکاتبات  
آدرس الکترونیکی

Smh2006@gmail.com

1. LET: Lower, Elevation, Top of the Pc Curve

### تابع LET

در تابع LET سه پارامتر به کار رفته را نشان می‌دهد. L نشان‌دهنده قسمت پائینی، T نشان‌دهنده قسمت بالایی و E موقعیت شیب منحنی فشار مؤینگی می‌باشد. لومند و ابل تافت [۸] یک رابطه جدید ریاضی سه پارامتری ساده با قابلیت انعطاف زیاد در دامنه وسیعی از اشباع را پیشنهاد نمودند. این رابطه قادر به پیش‌بینی رفتار مؤینگی سنگ مخزن در مقادیر پایین و بالای اشباع می‌باشد. ساختار اصلی این رابطه ریاضی بر اساس تابع LET به صورت زیر است:

$$F(S_{wn}) = \frac{S_{wn}^L}{S_{wn}^L + E(1 - S_{wn})^T} \quad (1)$$

در این مورد مقدار F (SWN) در اشباع نرمال شده آب ۰٪ برابر صفر و در اشباع نرمال شده آب ۱۰۰٪ برابر ۱ می‌باشد. پارامتر L بر روی مقادیر مربوط به بخش پایینی منحنی و پارامتر T نیز بر روی مقادیر بخش بالایی منحنی تأثیرگذار می‌باشد. پارامتر E موقعیت شیب منحنی را تعیین می‌نماید که همان بلندی و برآمدگی منحنی می‌باشد. مقدار E برابر با یک، نشان‌دهنده خنثی بودن این پارامتر است و موقعیت شیب توسط پارامترهای L و T تعیین می‌گردد. افزایش مقادیر پارامتر E، شیب را به سمت بخش بالایی و کاهش آن شیب را به سمت بخش پایینی منحنی متمایل می‌کند. تجربیات استفاده از تابع LET نشان می‌دهد که مقادیر  $L, E, T \geq 0.1$  بدون محدودیت بالایی، مقادیر مناسبی می‌باشند [۸].

همچنین در این مرجع نشان داده شده که رابطه ارائه شده با انجام برخی تغییرات در پارامترهای به کار رفته و تعاریف اولیه، قابل استفاده در فازهای مختلف یک فرآیند فشار مؤینگی شامل: تخلیه اولیه، آشام اولیه و تخلیه ثانویه می‌باشد. همان‌گونه که قبلاً اشاره گردید در این تحقیق تمرکز بر روی تخلیه اولیه می‌باشد.

### فرآیند تخلیه اولیه

در هنگام ورود اطلاعات فشار مؤینگی به شبیه‌ساز مخزن،

مشخص می‌کند. پارامتر دیگر تعیین کننده سطح زیر منحنی فشار مؤینگی است که همان فشار ورودی یا فشار میانگین می‌باشد.

روابط متعددی برای توصیف فرآیند تخلیه اولیه وجود دارد. از جمله بنشتن و آنلی [۱]، بروکس و کوری [۲]، بوردین [۳]، جینگ و ونیک [۴] و اسکجاولند و همکاران [۵] که رابطه بروکس و کوری [۲] را برای تخمین بخش منفی منحنی فشار مؤینگی توسعه دادند. مسالمة و همکاران [۶ و ۷] بعدها با اضافه نمودن یک جمله متغیر بیشتر به رابطه اسکجاولند توانستند رابطه‌ای مناسب برای تخمین شکل‌های مختلف منحنی از جمله منحنی‌های دونمایی توزیع اندازه منافذ ارائه دهند.

در فرآیند به کارگیری تابع LET، شکل منحنی‌های به دست آمده همانند شکل معمول فشار مؤینگی است، با این تفاوت که برای مقادیر اشباع آب غیر قابل کاهش<sup>۱</sup> همانند اشباع نفت باقی‌مانده<sup>۲</sup>، مقادیر معینی برای فشار مؤینگی به دست می‌آید. برای سنگ مخازن با ترشوندگی دوگانه<sup>۳</sup>، اشباع آب خودبه خودی، جایی که مقدار فشار مؤینگی صفر می‌باشد، به طور طبیعی در آزمایشگاه توسط آزمایشات آشام تعیین می‌گردد. در روش LET این مقدار اشباع به عنوان یک پارامتر شناخته شده به کار می‌رود. این مقدار به همراه مقادیر محدود فشار مؤینگی در نقاط انتهایی موجب توانمندی این روش برای تعیین منحنی‌های هیستریزیس<sup>۴</sup> می‌شود. در روش LET همچنین مقادیر فشار آستانه<sup>۵</sup> برای آزمایشات تخلیه اولیه، به خوبی تعیین شده است.

در این تحقیق با توجه به در دسترس بودن اطلاعات مربوط به تخلیه اولیه، تلاش بر این است که این داده‌ها با استفاده از نتایج حاصل از به کارگیری رابطه ارائه شده در روش LET محاسبه گردد. سپس با توجه به نتایج به دست آمده، در خصوص دقت و کارایی رابطه به تفصیل بحث می‌شود. در انتها به منظور کاربردی نمودن هر چه بیشتر رابطه، پیشنهادهاتی برای تصحیح بر روی نحوه محاسبات ارائه می‌گردد.

1. Irreducible Water Saturation
2. Residual Oil Saturation
3. Mixed-wet
4. Hysteresis
5. Threshold Pressure

منظور تطابق قسمت شیب و کمان تنظیم می شود. پارامتر L تا اندازه ای، از بزرگ شدن پارامتر E تا بی نهایت جلوگیری می کند.

لومند و ابل تافت با اضافه و حذف برخی جملات و انجام تغییرات در مفاهیم ارائه شده در رابطه LET، روابط دیگری برای تعیین حالت های فشار مویینگی از جمله آشام ثانویه و تخلیه ثانویه ارائه دادند. رابطه ۴ بیان گر آشام ثانویه و رابطه ۵ بیان گر تخلیه ثانویه می باشد.

$$P_{cow}^i = \frac{P_{cow}^{si}(1-S_{wn}^{si})^{L_{ow}^{si}}}{(1-S_{wn}^{si})^{L_{ow}^{si}} + E_{ow}^{si}S_{wn}^{T_{ow}^{si}}} + \frac{P_{cow}^{fi}S_{wn}^{L_{ow}^{fi}}}{S_{wn}^{L_{ow}^{fi}} + E_{ow}^{fi}(1-S_{wn}^{fi})^{T_{ow}^{fi}}} \quad (4)$$

$$P_{cow}^d = \frac{(P_{cow}^{fd} - P_{cow}^{td})(1-S_{wn}^{fd})^{L_{ow}^{fd}}}{(1-S_{wn}^{fd})^{L_{ow}^{fd}} + E_{ow}^{fd}S_{wn}^{T_{ow}^{fd}}} + \frac{(P_{cow}^{sd} - P_{cow}^{td})S_{wn}^{L_{ow}^{sd}}}{S_{wn}^{L_{ow}^{sd}} + E_{ow}^{sd}(1-S_{wn}^{sd})^{T_{ow}^{sd}}} + P_{cow}^{td} \quad (5)$$

### آزمایشات

#### آماده سازی نمونه ها و انجام آزمایشات معمول مغزه

سنگ مخزن این میدان کربناته بوده و نمونه ها مربوط به دو لایه مخزنی آسماری و بنگستان می باشد. ابتدا از نمونه سنگ ها، پلاگ هایی تهیه شد. سپس با تزریق حلال شستشو داده شد تا آب و مواد هیدروکربوری موجود در آنها تخلیه شود. پس از خشک کردن نمونه ها در آن در دمای مناسب، ابعاد نمونه اندازه گیری و ثبت گردید و اطلاعات لازم برای محاسبه حجم نمونه و میزان تخلخل و تراوایی نمونه به دست آمد. در مرحله بعد با استفاده از دستگاه های Porosimeter و Permeameter این دو پارامتر در شرایط محیط و فشار جانبی اندازه گیری گردید.

#### اشباع نمونه ها و انجام آزمایشات فشار مویینگی به روش

##### سانتریفیوژ

پس از اندازه گیری تخلخل و تراوایی، نمونه ها با سیال مناسب (آب سازند) در دستگاه اشباع کننده تحت فشار و دمای مناسب، اشباع شده و برای مدت کافی به این حالت رها می شوند. در این مرحله نمونه ها کاملاً اشباع بوده و

ورودی ها به صورت جدولی از مقادیر فشار مویینگی می باشد که مربوط به محدوده ناحیه انتقالی<sup>۱</sup> مخزن است. یک ستون نفت با مقادیر بالای منحنی فشار مویینگی موجب افزایش شدید زمان محاسباتی در فرآیند شبیه سازی می شود. علت این موضوع این است که در شبیه سازی فشارفازی و اشباع نفت به صورت دینامیکی محاسبه می گردد [۹].

به همین دلیل رابطه فشار مویینگی محدود برای تخلیه اولیه تعمیم داده شد تا از پیدا شدن هرگونه نقاط نامعین جلوگیری شود. رابطه LET برای فشار ماکزیم همانند فشار آستانه، مقادیری را به دست می آورد. در رابطه LET، برای یک محیط متخلخل که پراکنندگی قطر منافذ آن از مدل یکتایی پیروی می کند رابطه زیر پیشنهاد می گردد [۸]:

$$P_{cow}^{pp} = (P_{cow}^{fp} - P_{cow}^{tp})F_{cow}^{fp} - P_{cow}^{tp}G_{rise}^{tp}F_{cow}^{tp} + P_{cow}^{tp} \quad (2)$$

جمله نخست تابع LET یعنی جمله  $F_{cow}^{fp}$  بخش اجباری فشار مویینگی می باشد. جمله دوم رابطه بدین منظور اضافه شده است تا بتواند صعود تدریجی منحنی ناشی از فشار آستانه را مدل نماید. این بخش از رابطه می تواند با تغییر پارامتر  $G_{rise}^{tp}$  کنترل شود. این پارامتر همچنین برای تصمیم در مورد حضور یا عدم حضور جمله دونمایی (مدل دوگانه منحنی فشار مویینگی) به کار می رود که در بخش ضمیمه توضیح داده شده است. با حذف و مرتب نمودن جملات با اهداف خاص، نسخه اساسی رابطه LET به صورت زیر خواهد بود [۸]:

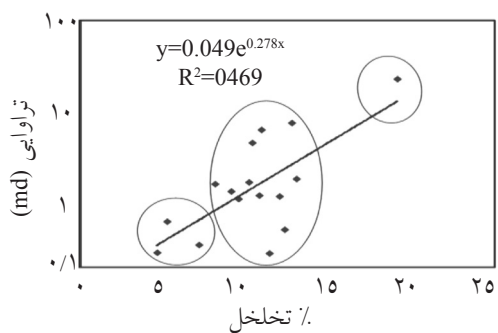
$$P_{cow}^{pp} = \frac{(P_{cow}^{fp} - P_{cow}^{tp})(1-S_{wx})^{L_{ow}^{fp}}}{(1-S_{wx}) + E_{ow}^{fp}S_{wx}^{T_{ow}^{fp}}} + P_{cow}^{tp} \quad (3)$$

اگرچه حالت محدود رابطه به شدت مورد استفاده می باشد، لیکن با اضافه نمودن پارامتر  $G_{rise}^{tp}$  به رابطه فوق می توان آن را به رابطه نامحدود تبدیل نمود. شرح کامل این مطلب در ضمیمه ۱ آمده است.

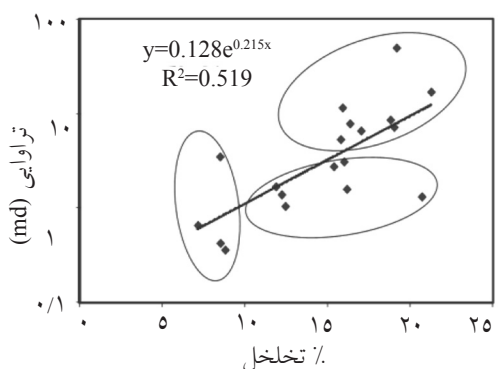
طی استفاده عملی مشاهده شده که ماکزیم فشار مویینگی ( $P_{cow}^{fp}$ ) و فشار آستانه  $P_{cow}^{tp}$  می توانند ثابت باشند. پارامتر E به گونه ای تنظیم شده تا مطابقت قابل قبولی برای تفسیر داده های فشار مویینگی به دست آید، داده های تحلیلی هاسلر و برونر از این جمله اند [۱۰]. پس پارامتر T به

1. Transition Zone

2. CPU Time



شکل ۲- منحنی تراوایی بر حسب تخلخل برای نمونه‌های مخزن آسماری



شکل ۳- منحنی تراوایی بر حسب تخلخل برای نمونه‌های مخزن بنگستان

در مطالعات زمین‌شناسی به منظور سهولت در مدل‌سازی مخزن، سنگ‌های مختلف بر اساس ویژگی‌های جنس، بافت، دانه‌بندی، نوع رسوب‌گذاری و نوع تخلخل گروه‌بندی می‌شوند. یکی از روش‌های سریع و تخمینی در زمینه گروه‌بندی سنگ‌ها در مهندسی مخزن، استفاده از داده‌های تغییرات تخلخل بر حسب تراوایی می‌باشد. همان‌گونه که در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، این کار برای داده‌های مربوط به نمونه سنگ‌های آسماری و بنگستان انجام شده که بر اساس آن برای هر یک، سه گروه سنگی تعیین شده است. بر اساس بررسی‌های زمین‌شناسی، جنس این نمونه‌های مغزه از کربناته با دانه‌بندی متوسط و ریز می‌باشد. گروه‌های سنگی و دامنه تغییرات تخلخل و تراوایی آنها در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

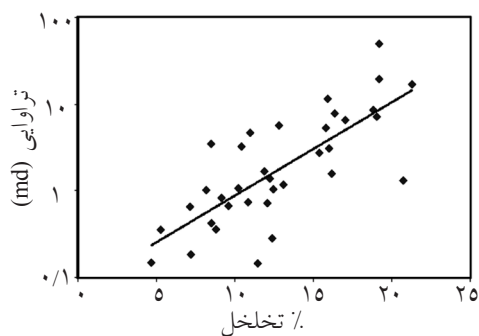
نتایج آزمایشات تعیین فشار مویینگی به روش سانتریفیوژ آزمایش تعیین فشار مویینگی در حالت تخلیه بر روی تمامی نمونه‌ها توسط دستگاه سانتریفیوژ انجام شد که نتایج به دست آمده برای نمونه سنگ‌های دولومیت و آهکی به طور جداگانه در شکل‌های ۴ و ۵ رسم شده است.

برای انجام آزمایشات فشار مویینگی به روش سانتریفیوژ درون محفظه نگهدار دستگاه سانتریفیوژ که حاوی نفت مخزن می‌باشد، قرار می‌گیرند. دستگاه سانتریفیوژ مورد استفاده در این تحقیق از نوع Beckman می‌باشد. به منظور اعمال اختلاف فشار بین آب و نفت، سانتریفیوژ با ۱۲ سرعت دورانی مختلف (۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ... تا ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه) دوران نمود. به دلیل اختلاف فشار ایجاد شده (۰/۳۹، ۱/۵۴، ۶/۱۷، ... تا ۲۲۲ psi)، نفت به داخل نمونه نفوذ کرده و آب را جابه‌جا می‌نماید (تخلیه اولیه). در هر مرحله پس از ثابت ماندن میزان خروج آب از نمونه، مقدار آن ثبت و درصد اشباع سیالات در آن مرحله محاسبه می‌گردد. این عمل تا رسیدن به میزان اشباع آب غیر قابل کاهش ( $S_{wi}$ ) ادامه می‌یابد.

### نتایج حاصل از آزمایشات

#### نتایج آزمایشات معمول مغزه

نتایج حاصل از آزمایشات به صورت منحنی تراوایی بر حسب تخلخل نمونه‌ها در شکل ۱ رسم شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود دامنه تغییرات تخلخل و تراوایی در نمونه‌ها نسبتاً گسترده است ( $0.185 \leq k \leq 19.303$  و  $5.29 \leq \phi \leq 21.25$ ). این دامنه تغییرات مربوط به سنگ مخازن کربناته بوده و نشان دهنده ناهمگونی بافت این گونه از سنگ‌ها می‌باشد. به منظور سادگی کار مدل‌سازی، داده‌های مربوط به دو مخزن آسماری و بنگستان از میدان فوق به ترتیب به طور جداگانه محاسبه گردید که نتایج آن در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.



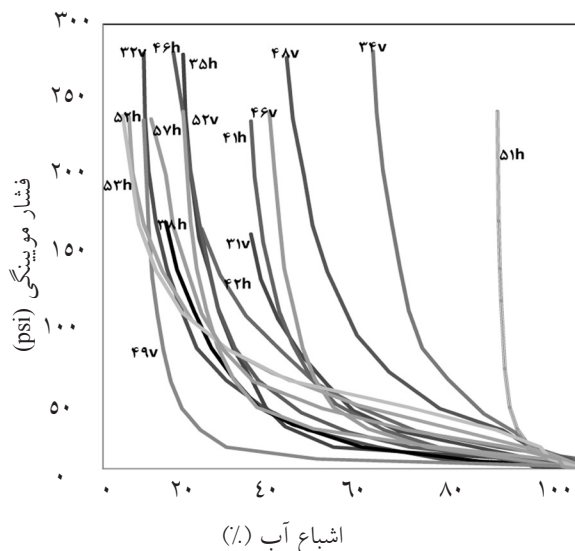
شکل ۱- منحنی تغییرات تراوایی بر حسب تخلخل

جدول ۱- گروه‌های تعیین شده برای نمونه سنگ‌های مخزن آسماری

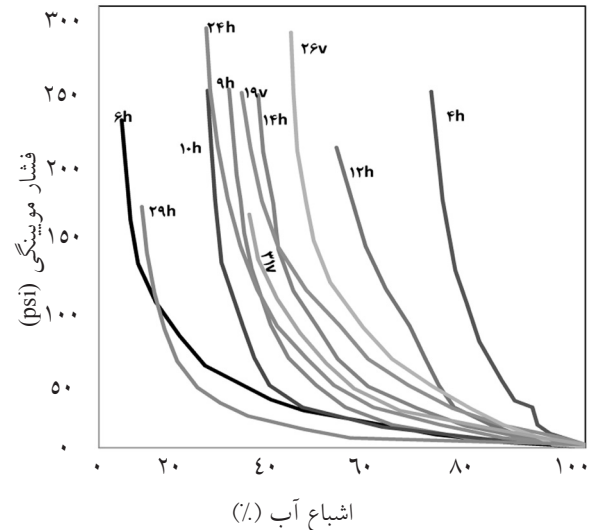
ردیف	گروه سنگی	تخلخل (%)	تراوایی (md)
۱	RT-I	$\phi \leq 7$	$k \leq 0.5$
۲	RT-II	$8 \leq \phi \leq 12$	$0.1 \leq K \leq 9$
۳	RT-III	$\phi \geq 13$	$K \geq 10$

جدول ۲- گروه‌های تعیین شده برای نمونه سنگ‌های مخزن بنگستان

ردیف	گروه سنگی	تخلخل (%)	تراوایی (md)
۱	RT-I	$\phi \leq 10$	$k \leq 5$
۲	RT-II	$10 \leq \phi \leq 20$	$1 \leq k \leq 5$
۳	RT-III	$\phi \geq 10$	$k \geq 5$



شکل ۵- منحنی‌های فشار موینگی نمونه‌های مخزن بنگستان



شکل ۶- منحنی‌های فشار موینگی نمونه‌های مخزن آسماری

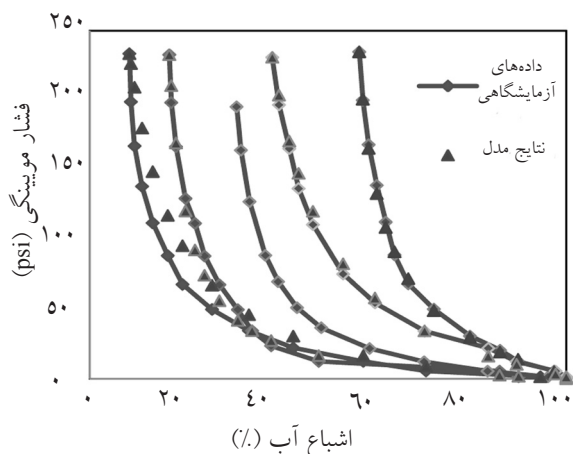
اعداد شماره آزمایشات می‌باشد.

پیشنهادی لوملند و ابل تافت [۸] شبیه‌سازی گردید. به همین منظور پارامترهای تطابق برای هر منحنی جداگانه تغییر داده شد تا بتوان بهترین تطابق را به دست آورد. نتایج حاصل در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، در صورت استفاده از مقادیر مناسب برای پارامترهای تطابق می‌توان به نتایج قابل قبولی دست یافت.

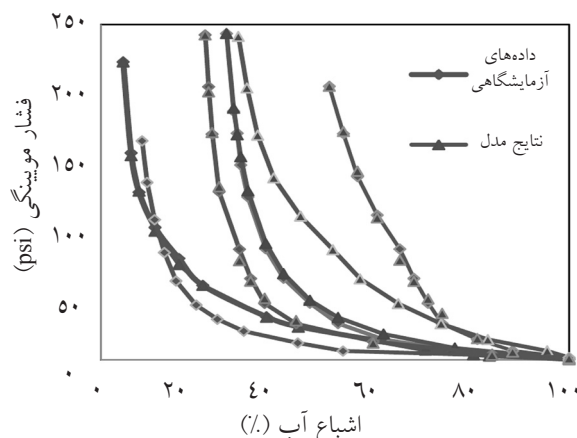
با توجه به ویژگی‌های سنگ این دو مخزن، شکل، تقعر، فشار آستانه و درصد اشباع آب باقی‌مانده در منحنی‌های فشار موینگی با یکدیگر متفاوت می‌باشد.

داده‌های مربوط به فشار موینگی حاصل از آزمایشات بر اساس گروه‌های مختلف سنگی دسته‌بندی و برای هر گروه مدل‌سازی انجام شده است.

مدل‌سازی داده‌های حاصل از آزمایشات با استفاده از رابطه LET داده‌های حاصل از آزمایشات سانتی‌فیوژ با استفاده از مدل



شکل ۷- مقایسه نتایج آزمایشات با نتایج مدل در نمونه‌های بنگستان



شکل ۶- مقایسه نتایج آزمایشات با نتایج مدل در نمونه‌های آسماری

آب غیر قابل کاهش و نسبت تراوایی به تخلخل رسم گردید. نتایج نشان داد که تغییرات پارامترهای تطابق نسبت به تراوایی سنگ دارای رابطه خطی با دقت قابل قبولی می‌باشد. در شکل‌های ۸ و ۹ نتایج این بررسی رسم شده است. لازم به ذکر است که برخی از گروه‌ها مانند گروه‌های (I) و (II) از مخزن آسماری، دارای تعداد محدودی نمونه می‌باشند. لذا رابطه و مقدار تعیین شده پارامترها در این گروه‌ها تخمینی است. در جدول ۵ روابط به دست آمده بین تراوایی و پارامترهای تطابق برای گونه‌های مختلف ارائه شده است. با استفاده از این پارامترها و جایگزینی در مدل LET، مقادیر منحنی‌های فشار مویینگی نمونه‌های فوق به دست آمد.

نتایج نشان می‌دهد که مقادیر ضریب جذر متوسط مربع<sup>۱</sup> برای منحنی‌های به دست آمده بسیار مناسب است. در جدول‌های ۳ و ۴ به ترتیب مقادیر پارامترهای تطابق رابطه LET به دست آمده از روش مدل‌سازی برای منحنی‌های فشار مویینگی حاصل از انجام آزمایشات برای نمونه‌های مخزن آسماری و بنگستان ارائه شده است. داده‌های مربوط به نمونه‌های دارای شکاف یا تخلخل حفره‌ای، نمی‌توانند نماینده خواص گروه‌های سنگی تعیین شده باشند. لذا این داده‌ها حذف شد و پس از دسته‌بندی بر حسب گروه‌های سنگی تعیین شده به منظور یافتن ارتباط پارامترهای تطابق با خواص سنگ، منحنی تغییرات این پارامترها نسبت به داده‌های مختلف از جمله تراوایی، تخلخل، درصد اشباع

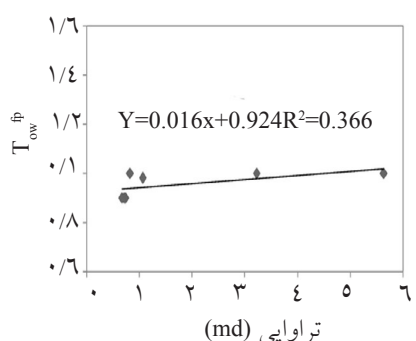
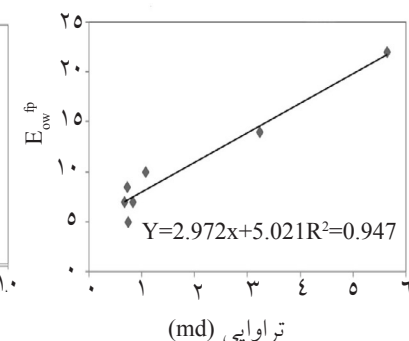
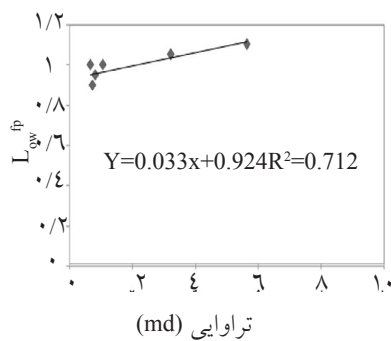
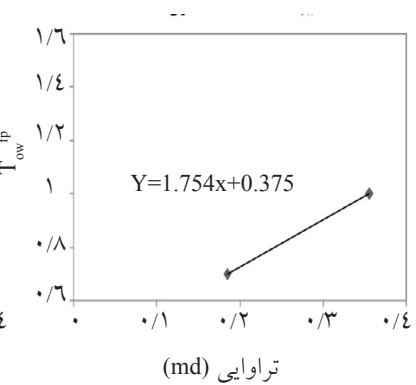
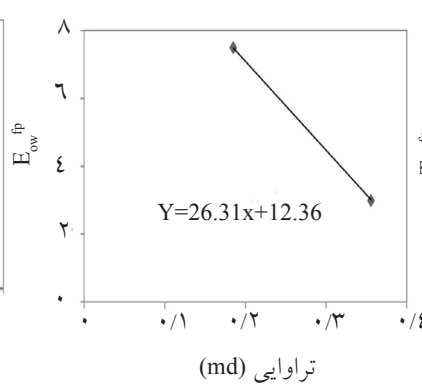
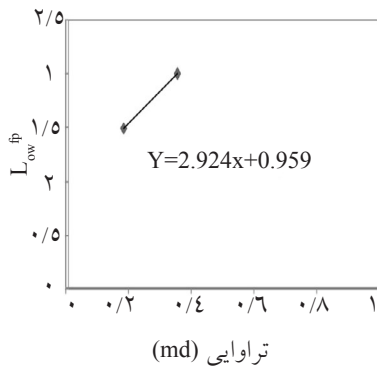
جدول ۳- پارامترهای تطابق حاصل از مدل‌سازی منحنی‌های فشار مویینگی نمونه‌های مخزن آسماری

$L_{ow}^{fp}$	$E_{ow}^{fp}$	$T_{ow}^{fp}$	$P_{cow}^{fp}$	تخلخل (%)	تراوایی (md)	شماره نمونه	#RT
۱/۵	۷/۵۰	۰/۷۰	۰/۳۰	۷/۲۱	۰/۱۸۵	۲	I
۲/۰۰	۳/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۵/۲۹	۰/۳۵۶	۵	
۰/۹۵	۷/۰۰	۰/۲۵	۰/۴۲	۹/۱۵	۰/۸۲۹	۱	II
۱/۰۵	۱۴/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۰	۱۰/۴۲	۳/۲۳۰	۳	
۱/۱	۲۲/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱۲/۸	۵/۶۴۱	۴	
۱	۱۰/۰۰	۰/۹۸	۱/۳۰	۱۰/۲۲	۱/۰۷۰	۶	
۰/۹۰	۵/۰۰	۰/۹۰	۱/۰۰	۱۰/۴۸	۰/۷۳۹	۷	
۰/۹	۸/۵۰	۰/۹۰	۰/۸۰	۱۲/۰۶	۰/۷۲۱	۸	
۱	۷	۰/۹۰	۰/۴۱	۹/۵۹	۰/۶۷۰	۹	III
۱/۶۰	۱۹/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱۹/۱۶	۱۹/۳۰۳	۱۰	

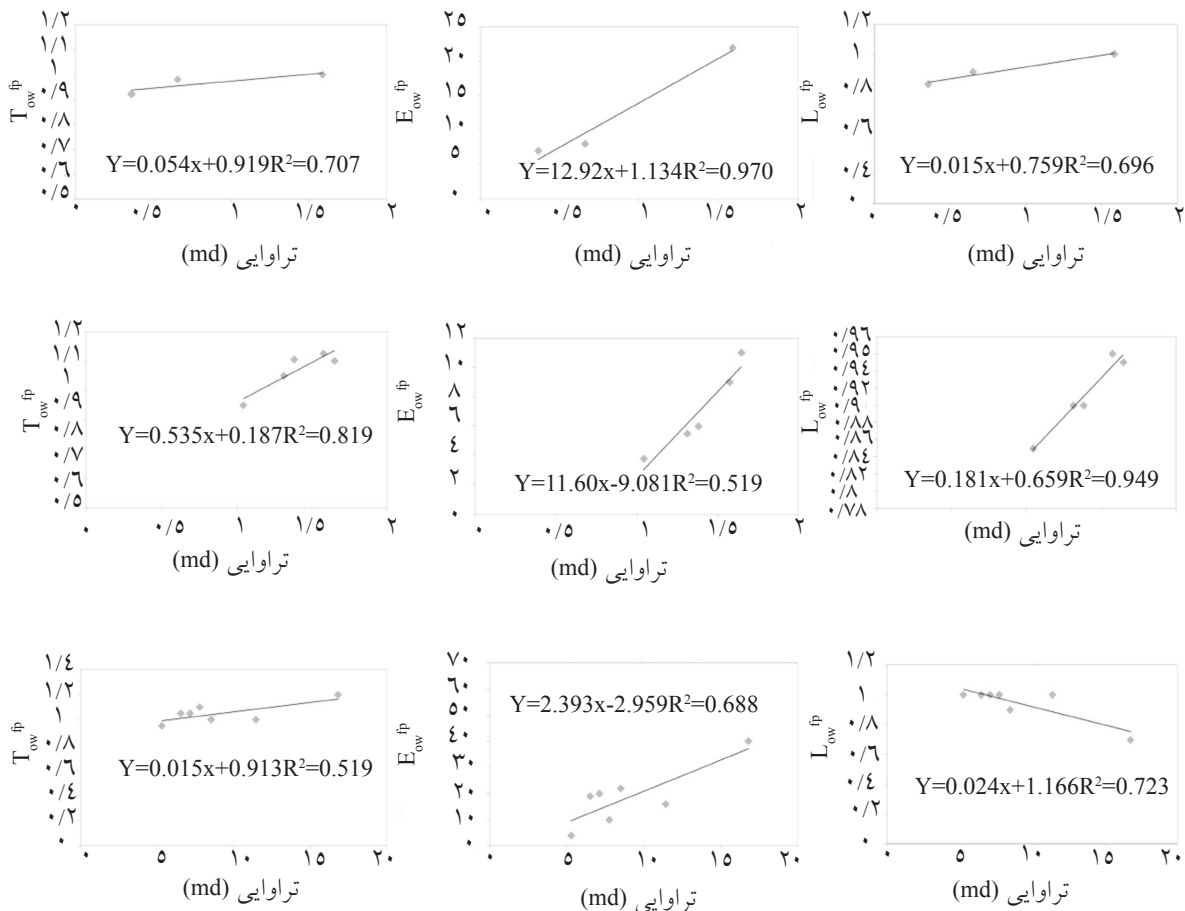
1. Root Mean Square (RMS)

جدول ۴- پارامترهای تطابق حاصل از مدل‌سازی منحنی‌های فشار مویینگی نمونه‌های مخزن بنگستان

#RT	شماره نمونه	تراوایی (md)	تخلخل (%)	$P_{cow}^{fp}$	$T_{ow}^{fp}$	$E_{ow}^{fp}$	$L_{ow}^{fp}$
I	۱۳	۰/۳۶	۸/۸۰	۱/۶۷	۰/۹۲	۷	۰/۸
	۱۴	۱/۵۸۵	۹/۰۲	۰/۴۱	۱/۰۰	۲۲	۱
	۲۰	۰/۶۵۵	۷/۱۵	۰/۴۰	۰/۹۸	۸	۰/۸۸
II	۱۱	۱/۳۱۲	۲۰/۶۹	۱/۵۸	۰/۹	۵/۵	۰/۹
	۱۲	۱/۶۴۷	۱۱/۸۷	۰/۴۱	۱/۰۳	۱۱	۱/۱
	۲۱	۱/۳۸۰	۱۲/۲۲	۱/۶۴	۱/۰۱	۶	۰/۹
	۲۴	۲/۷۳۲	۱۵/۳۶	۰/۵۰	۰/۷	۴/۹	۰/۸
	۲۶	۱/۰۴۲	۱۲/۴۴	۰/۴۱	۰/۷	۳/۸	۰/۸۵
III	۲۷	۱/۵۷۴	۱۶/۱۵	۰/۰۰	۱/۰۳	۱۱	۱
	۱۵	۷/۷۵۶	۱۶/۳۴	۱/۰۰	۱/۱	۱۰	۱
	۱۶	۵/۲۸۰	۱۵/۷۸	۶/۰۰	۰/۹۵	۴	۱
	۱۷	۱۱/۴۳۲	۱۵/۸۹	۰/۴۰	۱	۱۶	۱
	۱۸	۷/۱۱۶	۱۹/۰۱	۰/۴۲	۱/۰۵	۲۰	۰/۹۵
	۱۹	۶/۵۱۲	۱۷/۰۱	۰/۴۱	۱/۰۵	۱۹	۱
	۲۲	۴۹/۱۰۰	۱۹/۱۶	۱/۶۳	۱/۱	۶۰	۱
	۲۳	۱۶/۷۹۱	۲۱/۲۵	۰/۴۲	۱/۲	۴۰	۰/۷
	۲۵	۸/۴۹۷	۱۸/۷۹	۱/۶۷	۱	۲۲	۰/۹



شکل ۸- منحنی تغییرات  $L_{ow}^{fp}$ ،  $E_{ow}^{fp}$  و  $T_{ow}^{fp}$  نسبت به تراوایی برای نمونه سنگ‌های آسماری



شکل ۹- منحنی تغییرات  $T_{ow}^{fp}$ ،  $E_{ow}^{fp}$ ،  $L_{ow}^{fp}$  نسبت به تراوایی برای نمونه سنگ‌های بتگستان

جدول ۵- روابط به دست آمده بین تراوایی و پارامترهای تطابق برای گونه‌های مختلف سنگ

نمونه سنگ‌های مخزن آسماری					
ملاحظات	$T_{ow}^{fp}$	$E_{ow}^{fp}$	$L_{ow}^{fp}$	گروه سنگی	ردیف
	$T_{ow}^{fp} = 1/754K + 0/375$	$E_{ow}^{fp} = -26/31K + 12/36$	$L_{ow}^{fp} = 924/2 K + 959/0$	RT-I	۱
دو نمونه	$T_{ow}^{fp} = 0/016K + 0/0924$	$E_{ow}^{fp} = 5/021K + 2/972$	$L_{ow}^{fp} = 0/33/0 K + 924/0$	RT-II	۲
یک نمونه	۱	۱۹	۱/۶	RT-III	۳
نمونه سنگ‌های مخزن بتگستان					
ملاحظات	$T_{ow}^{fp}$	$E_{ow}^{fp}$	$L_{ow}^{fp}$	گروه سنگی	ردیف
	$T_{ow}^{fp} = 0/054 K + 0/919$	$E_{ow}^{fp} = 12/92K + 1/134$	$L_{ow}^{fp} = 0/155K + 0/759$	RT-I	۱
	$T_{ow}^{fp} = 0/015 K + 0/913$	$E_{ow}^{fp} = 11/60K - 9/081$	$L_{ow}^{fp} = 0/181K + 0/659$	RT-II	۲
	$T_{ow}^{fp} = 0/535 K + 0/187$	$E_{ow}^{fp} = 393/2K - 2/959$	$L_{ow}^{fp} = 0/24/1 K + 1/166$	RT-III	۳

داده‌های تراوایی و روابط به دست آمده، پارامترهای تطابق برای نمونه‌های حذف شده از لیست داده‌ها، تعیین شد (جدول ۶). با استفاده از این پارامترها و جایگزینی در مدل LET، مقادیر منحنی‌های فشار موئینگی نمونه‌های فوق به دست آمد.

به منظور تحقیق در خصوص درستی روابط به دست آمده بین تراوایی و پارامترهای تطابق و نیز دقت مدل LET برای مدل‌سازی منحنی‌های فشار موئینگی، ابتدا با حذف برخی نمونه‌ها از میان نمونه‌های موجود، رابطه بین تراوایی و پارامترهای تطابق محاسبه گردید. سپس با استفاده از

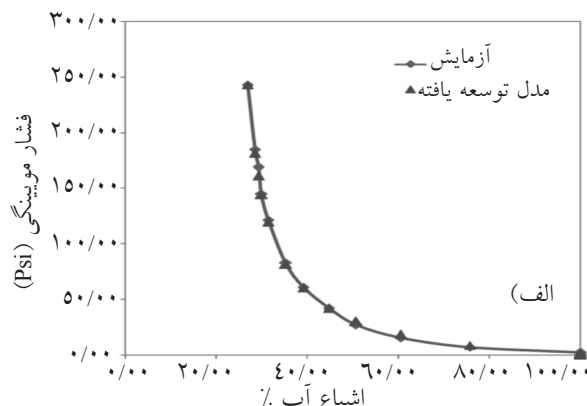
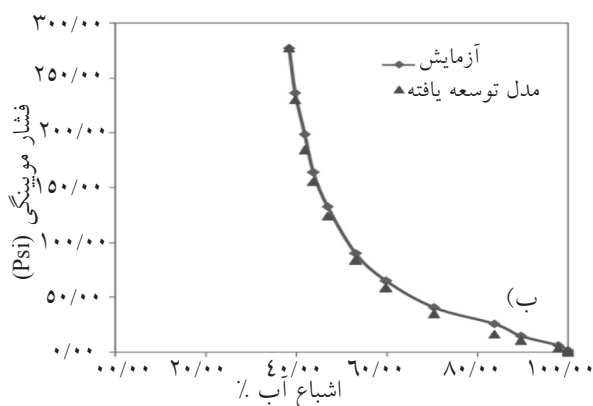


جدول ۶- مقایسه پارامترهای تطابق محاسبه شده از روابط با تراوایی و مقادیر واقعی

RMS		$T_{ow}^{fp}$		$E_{ow}^{fp}$		$L_{ow}^{fp}$		تراوایی (md)	#RT	سازند	نمونه
مدل توسعه یافته	مدل LET	مدل توسعه یافته	واقعی	مدل توسعه یافته	واقعی	مدل توسعه یافته	واقعی				
۰/۲۸۵	۰/۵۹۳۴	۰/۹۷۵۷	۱	۱۴/۶۲	۱۴	۱/۰۳۰۶	۱/۰۵	۳/۲۳	II	آسماری	۱
۰/۲۰۶	۰/۶۶۳	۰/۹۳۳۷	۱/۰۱	۶/۹۲۷	۶	۰/۹۰۸۸	۰/۹	۱/۳۸	II	بنگستان	۲

محاسبه پارامترها به مقادیر واقعی آنها بسیار نزدیک است نشان دهنده دقت روابط می باشد. نتایج حاصل از مدل سازی منحنی های فشار موینگی با پارامترهای محاسبه شده نیز نشان می دهد منحنی های حاصل خطای ناچیزی دارد. در جدول فوق همچنین میزان خطای (RMS) دو روش LET و روش توسعه یافته با یکدیگر مقایسه شده است.

با مقایسه منحنی های به دست آمده و منحنی های حاصل از آزمایشات، دقت روش پیشنهادی تعیین گردید (شکل ۱۰). در جدول های ۷ و ۸ مقادیر فشار موینگی محاسبه شده با مقادیر حاصل از آزمایش مقایسه و درصد خطای مدل توسعه یافته ارائه شده است. همان گونه که مقادیر محاسبه شده در جدول ۶ نشان می دهد نتایج حاصل از



شکل ۱۰- منحنی تغییرات  $T_{ow}^{fp}$  و  $E_{ow}^{fp}$ ،  $L_{ow}^{fp}$  برای نمونه سنگ های بنگستان

جدول ۷- مقایسه نتایج فشار موینگی حاصل از مدل توسعه یافته و به دست آمده از آزمایش به همراه مقدار خطای محاسبه شده برای یک نمونه مخزن آسماری

اشباع آب (%)	فشار موینگی آزمایش (Psi)	فشار موینگی مدل توسعه یافته (Psi)
۱۰۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۰۰/۰۰	۱/۶۹	۰/۹۰
۷۵/۶۱	۶/۷۵	۸/۵۸
۶۰/۳۷	۱۵/۲۰	۱۸/۴۰
۵۰/۶۷	۲۷/۰۲	۲۹/۹۲
۴۴/۶۵	۴۲/۲۱	۴۱/۸۶
۳۹/۰۲	۶۰/۷۹	۶۰/۴۰
۳۵/۲۱	۸۲/۷۴	۸۱/۶۰
۳۱/۴۰	۱۲۱/۳۳	۱۱۹/۳۷
۲۹/۸۸	۱۴۵/۲۳	۱۴۴/۴۴
۲۹/۱۲	۱۶۸/۸۶	۱۶۳/۹۵
۲۸/۳۵	۱۸۵/۲۲	۱۸۱/۴۱
۲۶/۸۳	۲۴۳/۱۱۵	۲۴۳/۱۵
$r^2 = 0.171$		

جدول ۸- مقایسه نتایج فشار مویینگی حاصل از مدل توسعه یافته و به دست آمده از آزمایش به همراه مقدار خطای محاسبه شده برای یک نمونه از مخزن بنگستان

فشار مویینگی مدل توسعه یافته (psi)	فشار مویینگی آزمایش (psi)	اشباع آب (%)
۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
۱/۶۴	۱/۶۴	۱۰۰/۰۰
۵/۶۴	۶/۵۶	۹۷/۷۷
۱۲/۷۱	۱۴/۷۶	۸۹/۶۰
۱۹/۶۴	۲۶/۲۳	۸۳/۶۶
۳۶/۹۲	۴۰/۹۹	۷۰/۲۸
۶۰/۶۱	۶۵/۳۴	۵۹/۸۸
۸۳/۷۱	۹۰/۲۲	۵۳/۱۹
۱۲۶/۰۳	۱۳۲/۸۱	۴۶/۸۷
۱۵۸/۳۲	۱۶۳/۹۷	۴۳/۸۶
۱۸۸/۰۶	۱۹۸/۴۰	۴۱/۹۰
۲۲۹/۸۳	۲۳۴/۱۱	۳۹/۷۴
۲۷۷/۱۰	۲۷۷/۱۰	۳۸/۳۴
$r^2 = 0/115$		

### نتیجه‌گیری

امکان از داده‌های غیر معتبر و پراکنده در مدل‌سازی استفاده نشود.

- مقادیر فشار مویینگی برای نقاط انتهایی منحنی‌ها باید محدود و معین باشد. مقادیر نامحدود موجب بروز خطا در مدل‌سازی می‌شود.

- هر پارامتر تطابق نقش ویژه‌ای در مدل‌سازی داشته و تأثیر خاصی در تغییر شکل منحنی‌ها دارد. ضمن انجام فرآیند تطابق، باید دقت شود تغییر پارامترها در جایگاه ویژه خود به کار رود.

- به منظور مدل‌سازی منحنی‌های فشار مویینگی، منحنی تغییرات پارامترهای تطابق در مقابل داده‌های اساسی سنگ مخزن از جمله تراوایی و تخلخل رسم گردید و رابطه‌ای منطقی بین این مقادیر به دست آمد. با دانستن رابطه و مقادیر تخلخل یا تراوایی، می‌توان منحنی فشار مویینگی مربوط به آن نمونه را تعیین نمود.

### ضمیمه ۱- فشار مویینگی آب/نفت در حالت تخلیه اولیه

ساختار کلی رابطه LET برای فشار مویینگی در حالت تخلیه اولیه عبارتست از:

- رابطه (LET)، به دلیل استفاده از سه پارامتر برای تطابق و مدل‌سازی داده‌ها برای تخمین منحنی‌های فشار مویینگی، دارای انعطاف پذیری قابل توجهی می‌باشد.

- نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌های آزمایشگاهی با رابطه LET نشان می‌دهد که این رابطه با برخی ملاحظات می‌تواند رابطه توسعه یافته مناسبی برای تخمین منحنی‌های فشار مویینگی برای سنگ‌های کربناته باشد. این ملاحظات عبارتند از:

- به دلیل وجود ناهمگونی‌های بسیار در سنگ‌های فوق، پیش از مدل‌سازی داده‌ها ابتدا باید نمونه‌های سنگ‌ها به مخازن، گروه‌ها و در صورت نیاز، زیرگروه‌های مختلف تقسیم گردد و سپس مدل‌سازی برای هر گروه به طور جداگانه انجام پذیرد.

- برای هر مخزن و گروه سنگی مقادیر پارامترهای تطابق متفاوت بوده و مقدار واحدی که بتواند همه گونه‌های سنگ را مدل نماید، وجود ندارد. برای رفع این نقیصه نیاز به تعداد بیشتری نمونه و انجام آزمایش بر روی آنها می‌باشد.

- برای دقت هر چه بیشتر لازم است داده‌های مربوط به نمونه‌های دارای شکاف و حفره حذف گردد و تا حد

$h$ : نمونه افقی

$L_{xy}^z$ : پارامتر تجربی برای فاز  $x$  و فاز  $y$  و دیگر اطلاعات  $z$

$P_{cow}^z$ : فشار موینگی نفت-آب برای  $z$ = تخلیه اولیه (p)،

آشام ثانویه (i) و تخلیه ثانویه (d)

$P_{cow}^{fz}$ : بیشترین یا کمترین مقدار فشار موینگی در حالت

اجباری (f) برای  $z=p, I, d$

$P_{cow}^z$ : بیشترین یا کمترین فشار موینگی در حالت

خودبه‌خودی (s) برای  $z=p, I, d$

$P_{cow}^{tz}$ : مقدار فشار آستانه برای  $z=p, I, d$

$S_{orw}$ : اشباع نفت باقی‌مانده پس از تزریق آب

$S_{osd}$ : اشباع نفت خودبخودی در فرآیند تخلیه ثانویه

$S_{wi}$ : اشباع آب غیرقابل کاهش

$S_{wn}$ : اشباع آب، نرمال شده برد کوتاه

$S_{wst}$ : اشباع آب خودبه‌خودی در فرآیند آشام ثانویه

$S_{wx}$ : اشباع آب، نرمال شده برد بلند

$T_{xy}^z$ : پارامتر تجربی برای فاز  $x$  و فاز  $y$  و دیگر اطلاعات  $z$

$V$ : نمونه عمودی

$$P_{cow}^p = (P_{cow}^{fp} - G_{bim}^{bp} (P_{cow}^{bp} - P_{cow}^{tp}) - P_{cow}^{tp}) F_{cow}^{fp} + (P_{cow}^{bp} -$$

$$P_{cow}^{tp}) G_{bim}^{bp} F_{cow}^{bp} - P_{cow}^{tp} G_{rise}^{tp} + P_{cow}^{tp} \quad (الف-۱)$$

تابع LET برای جمله اجباری به صورت زیر خواهد بود:

$$F_{cow}^{fp} = \frac{(1 - S_{wx})^{L_{ow}^{fp}}}{G_{fin}^{fp} (1 - S_{wx})^{L_{ow}^{fp}} + E_{ow}^{fp} S_{wx}^{T_{ow}^{fp}}} \quad (الف-۲)$$

تابع زیر تابع LET برای جمله دونمایی (یا شاخه) می‌باشد:

$$F_{cow}^{bp} = \frac{(1 - S_{wx})^{L_{ow}^{bp}}}{(1 - S_{wx})^{L_{ow}^{bp}} + E_{ow}^{bp} S_{wx}^{T_{ow}^{bp}}} \quad (الف-۳)$$

تابه LET برای قسمت صعودی فشار آستانه به شرح زیر

$$F_{cow}^{bp} = \frac{(S_{wx})^{L_{ow}^{bp}}}{(S_{wx})^{L_{ow}^{bp}} + E_{ow}^{bp} S_{wx}^{T_{ow}^{bp}}} \quad (الف-۴)$$

سپس فرم ساده شده به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$P_{cow}^p = \frac{A_{ow}^{fp} * (1 - S_{wx})}{S_{wx}^{T_{ow}^{fp}}} + P_{cow}^{tp} \quad (الف-۵)$$

### علائم و نشانه‌ها

$E_{xy}^z$ : پارامتر تجربی برای فاز  $x$  و فاز  $y$  و دیگر اطلاعات  $z$

$F_{cow}^{xy}$ : تابع فشار موینگی نفت-آب برای  $x=f, s, t$  و  $z=p, I, d$

$G_{xy}^z$ : اطلاعات  $z$  برای ویژگی  $xy$

### منابع

- [1]. Bentsen R. G. and Anlie J., "Using parameter estimation techniques to convert centrifuge data into a capillary pressure curve", Trans., AIME, 56, 1977.
- [2]. Brooks R. H. and Corey A. T., "Hydraulic properties of porous media", Hydraulic, pp. No. 3, Colorado State U., 1964.
- [3]. Burdine N. T., "Relative permeability calculations from pore size distribution", Trans., AIME, 198, pp. 71-78, 1953.
- [4]. Jing X. D., and Wunnik J. N. M. van, A capillary pressure function for interpretation of core-scale displacement experiments, SCA 9807.
- [5]. Skjæveland S. M., Siqueland L. M., Kjosavik A., Hammervold Thomas W. L. and Virnovsky G. A., "Capillary pressure correlation for mixed-wet reservoirs", SPE 60900 / SPE 39497 India oil and Gas Conference and Exhibition, New Dehli, India, 17-19 Feb, 1998 / SPE 60900 SPE Reservoir Eval. & Eng. 3 (1), Feb 2000.
- [6]. Masalmeh S. K., Abu Shiekah I. and Jing X. D., "Improved characterization and modeling of capillary transition zones in carbonate reservoirs", SPE Reservoir Evaluation & Engineering, Vol. 10 (2): 191-204 April, SPE paper 109094, 2007.
- [7]. Masalmeh S. K., and Jing X. D., Capillary pressure characteristics of carbonate reservoirs: relationship between drainage and imbibition curves, SCA 2006-16.
- [8]. Lomeland F., Ebeltoft E. and Hammervold Thomas W., A new versatile capillary pressure correlation, SCA 2008-08.
- [9] Aziz K., and Settari A., Petroleum Reservoir Simulation, Applied Science Publishers, 1983, p30.
- [10]. Hassler G. L. and Brunner, E., Measurement of capillary pressure in small core samples, Trans, AIME, Vol. 160, 114, 1945.