

## نمذجة وتحليل المؤشرات التابعة للتشبع في حقل

### العزبة الجنوبي الشرقي

طالب الدكتوراه: م. حجاب ابراهيم

كلية الهندسة الكيميائية والبتروولية - جامعة البعث

&إشراف الدكتور: عودي صالحه + د.م. غادة الخضور

#### الخلاصة:

في النمذجة الديناميكية لحقل العزبة الجنوبي الشرقي احتجنا لنماذج مؤشرات التشبع والتي هي نماذج النفوذية النسبية ونماذج الضغط الشعري بالإضافة إلى معرفة خاصية التبلل للصخر لتشكلية الرطبة، لذلك تم الاعتماد على الاختبارات الخاصة المنفذة على العينة اللبية المأخوذة من تشكيلية الرطبة في البئر ISB130. اختبار الضغط الشعري للعينات اللبية تم وفق طريقة الطرد المركزي، تم بناء نموذج الضغط الشعري باستخدام برنامج SCAL، حيث تم أخذ متوسط هذه المعطيات لكي يتم اعتبارها ممثلاً لمعطيات الضغط الشعري لخزان الرطبة وبناءً عليها تم بناء نموذج الضغط الشعري لخزان الرطبة بطريقتي النموذج الأسي ونموذج القوة. اختبار النفوذية النسبية للعينات اللبية تم وفق طريقة الطرد المركزي، تم بناء نموذج النفوذية النسبية باستخدام برنامج SCAL، حيث تم أخذ متوسط هذه المعطيات لكي يتم اعتبارها ممثلاً لمعطيات النفوذية النسبية لخزان الرطبة وبناءً عليها تم بناء نموذج النفوذية النسبية لخزان الرطبة بطريقة كوري. اختبار التبلل للعينات اللبية المأخوذة من تشكيلية الرطبة تم وفق طريقة أموت-هارفي، تبين من خلاله أن صخر خزان الرطبة يتراوح من حيادي إلى مبلل بالماء.

الكلمات المفتاحية: الضغط الشعري، النفوذية النسبية، التبلل، التشبع بالنفط، التشبع بالماء، النفط المتبقي، اختبار التشريب، اختبار التفريغ.

## **Modeling and Analyzing of Saturation Functions in ISB–SE Field**

### **Summary:**

Saturation functions models are required for dynamic modeling in ISB-SE Field, which are capillary pressure model and relative permeability model, besides the wettability of Rutba formation; these data are acquired based on special core tests of a core from the well ISB130.

Capillary pressure test by centrifugal method was applied on some plugs from the core, the resulted data were averaged and used to build capillary pressure model by SCAL software using Exponential Model and Power Model.

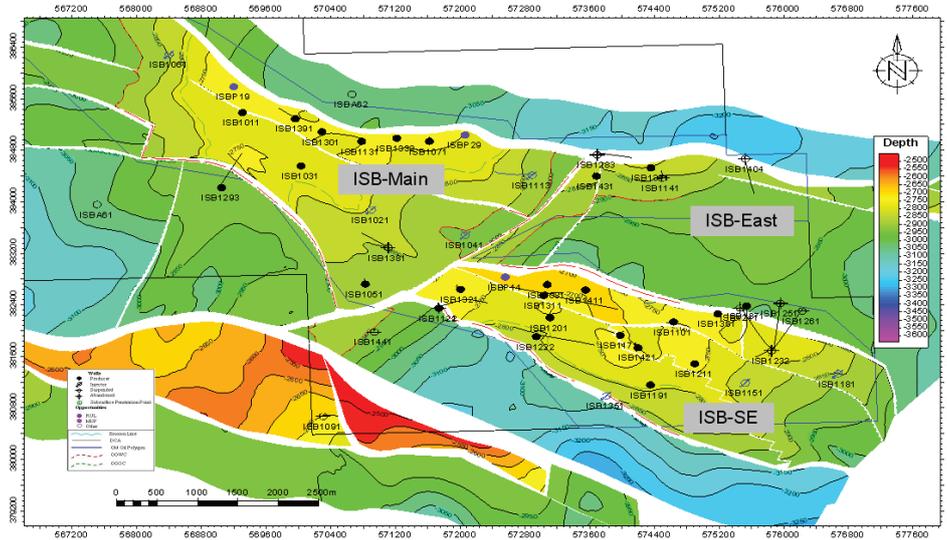
Relative permeability test by centrifugal method was applied on some plugs from the core, the resulted data were averaged and used to build Relative permeability model by SCAL software using Corey Model.

Wettability test by Amott-Harvey method was applied on some plugs from the core; this test shows that the Rutba formation is from neutral to water wet.

Keywords: Capillary Pressure, Relative permeability, Wettability, Oil Saturation, Water Saturation, Residual Oil, Imbibition test, Drainage Test.

### مقدمة:

حقل العزبة الجنوبي الشرقي (ISB-SE) يقع في منطقة منخفض الفرات ويتبع لشركة الفرات للنفط، يقع شمال دير الزور على بعد 35 KM شمال غرب حقل العمر. التركيب عبارة عن بنية جيولوجية متطاولة مضروبة بفوالق ذات رميات كبيرة جعلته مفصلاً عن حقل العزبة الرئيسي (ISB-Main) وحقل العزبة الشرقي (ISB-East) الموجودان في منطقة العزبة، الشكل (1) يظهر الخارطة التركيبية في منطقة العزبة. التشكيلة التي يتم الإنتاج منها في الحقل هي تشكيلة الرطبة.



الشكل (1) الخارطة التركيبية في منطقة العزبة

### هدف البحث:

الهدف الأساسي من البحث هو الحصول على نماذج النفوذية النسبية ونماذج الضغط الشعري بالإضافة إلى معرفة خاصية التبلل لتشكيلة الرطبة لكي نستعين بهذه النماذج في النمذجة الديناميكية للحقل، لذلك تمت دراسة الاختبارات الخاصة التي تم تنفيذها على

العينة اللبية لتشكيلة الرطبة المأخوذة من البئر ISB130، وتم بناء هذه النماذج باستخدام برنامج SCAL.

### 1- اختبار الضغط الشعري (Capillary Pressure Test):

❖ إن الضغط الشعري في المنظومة (غاز/هواء) - نفط) يعطى بالعلاقة:

$$P_c = (\rho_o - \rho_g) g h = \frac{2 \sigma_{og} \cos \phi}{r} \quad (1)$$

$\sigma_{og}$ : التوتر السطحي بين النفط والغاز (الهواء) (Dynes/cm).

$r$ : نصف قطر الأنبوبة الشعرية (cm)،  $h$ : ارتفاع النفط في الأنبوبة الشعرية (cm)

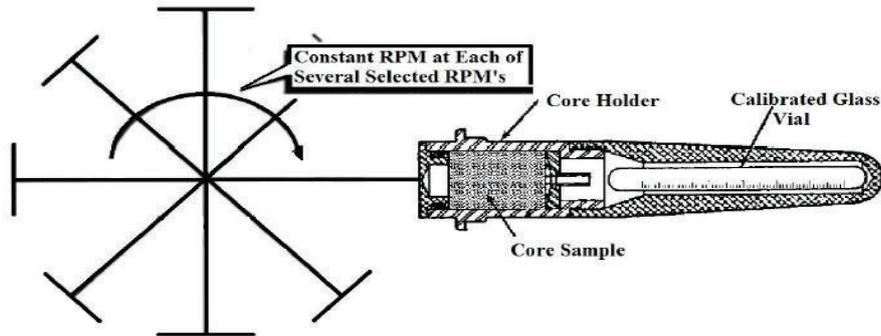
$\rho_o$  ،  $\rho_g$ : كثافة النفط وكثافة الغاز (الهواء) ( $\text{g/cm}^3$ )

$g$ : تسارع الجاذبية الأرضية،  $\phi$ : زاوية التماس (Contact Angle)

و بنفس الطريقة نجد أن الضغط الشعري في المنظومة (ماء - نفط) يعطى بالعلاقة:

$$P_c = (\rho_w - \rho_o) g h = \frac{2 \sigma_{ow} \cos \phi}{r} \quad (2)$$

يوجد عدة طرق لاختبار الضغط الشعري مخبرياً، لكننا سنكتفي بشرح الطريقة الأكثر استخداماً والتي استخدمت لاختبار العينات اللبية المتعلقة بالدراسة، هذه الطريقة هي طريقة الطرد المركزي (Centrifugal Method) الموضحة في الشكل (2).



الشكل (2) طريقة الطرد المركزي

تكون العينة مشبعة بمائع ويتم وضعها في حاضن العينة (Core Holder) المملوء بمائع آخر، القوى الشعرية (الضغط الشعري) هي التي تجعل المائع الموجود في العينة متمسكاً بالمسامات الموجودة في العينة وتمنعها من الخروج إلى الوسط المملوء بالمائع الآخر، وبالتالي إذا قمنا بتطبيق ضغط على هذه العينة يقود إلى إخراج المائع من العينة يكون هذا الضغط مساوياً للضغط الشعري. يتم تطبيق ضغط الحقن الذي يعبر عن الضغط الشعري من خلال قوة الطرد المركزي، حيث يبدأ الدوران بسرعة منخفضة ثم تزداد سرعة الدوران تدريجياً (Rotation Speed) وعند كل سرعة يتم تسجيل كمية المائع التراكمية المزاحة من العينة. يتم حساب التشبع الوسطي بالمائع المزاح عند كل سرعة من العلاقة:

$$\bar{S}_D = \frac{V_{iD} - V_D}{V_P} = S_{iD} - \frac{V_D}{V_P} \quad (3)$$

$\bar{S}_D$ : التشبع الوسطي بالمائع المزاح (Displaced Mean Saturation).

$V_{iD}$ : الحجم الأولي للمائع المزاح في العينة (Initial Displaced Volume).

$V_D$ : حجم المائع المزاح التراكمي (Displaced Volume).

$V_P$ : حجم الفراغ المسامي للعينة (Pore Volume).

$S_{iD}$ : التشبع الأولي بالمائع المزاح.

ويتم حساب التشبع الوسطي للمائع المحقون (المزيج) عند كل سرعة من العلاقة:

$$\bar{S}_I = 1 - (S_{iD} - \frac{V_D}{V_P}) = S_{iI} + \frac{V_D}{V_P} \quad (4)$$

$S_{iI}$ : التشبع الأولي بالمائع المحقون (المزيج) (Initial Injected Volume).

عند الدوران يكون ضغط الحقن (الضغط الشعري) المطبق على مدخل العينة ناتجاً عن التسارع الدائري  $a_c$  (Centripetal Acceleration) المتشكل نتيجة سرعة الدوران، وكلما زادت هذه السرعة يزداد التسارع الدائري وبالتالي يزداد ضغط الحقن (الضغط الشعري). أي يمكن القول أنه قد تم الاستعاضة عن تسارع الجاذبية الأرضية في علاقة

الضغط الشعري بالتسارع الدائري الناتج عن سرعة الدوران، وبالتالي فإن ضغط الحقن (الضغط الشعري) عند مدخل العينة عند كل سرعة يعطى بالعلاقة:

$$P_{ci} = \Delta\rho a_c L \quad (5)$$

إن  $a_c = \frac{v^2}{r}$  و  $v = 2\pi r (N / 60)$  ، بتعويض ذلك في العلاقة (5) مع اعتبار أن

$$r = R_e - \frac{L}{2}$$

العلاقة:

$$P_{ci} = \Delta\rho [(2\pi(N / 60))^2 (R_e - \frac{L}{2})L] \quad (6)$$

$P_{ci}$ : ضغط الحقن (الضغط الشعري) عند مدخل (Inlet) العينة (Pa).

$a_c$ : التسارع الدائري (Centripetal Acceleration) ( $m/s^2$ ).

$L$ : طول العينة (m).

$v$ : السرعة المماسية (الخطية) (Tangential Velocity) (m/s).

$R_e$ : نصف قطر الدوران (m).

$N$ : سرعة الدوران (Rotation Speed) (rpm).

$\Delta\rho$ : فرق كثافة المائع ( $kg/m^3$ ).

الضغط الشعري  $P_{ci}$  في العلاقة (6) مأخوذ عند مدخل العينة، لكن التشبع بالمائع المزاح في العلاقة (3) يعبر عن التشبع الوسطي للمائع المزاح في العينة، وبالتالي لكي نحصل على علاقة بين الضغط الشعري عند مدخل العينة والتشبع بالمائع المزاح يجب أن يكون التشبع بالمائع المزاح محسوباً عند مدخل العينة أيضاً. يتم حساب التشبع بالمائع المزاح عند مدخل العينة عند كل سرعة  $S_{D(P_{ci})}$  اعتماداً على علاقة (Hassler-Brunner) والتي تعطى بالشكل:

$$S_{D(P_{ci})} = \frac{d(\bar{S}_D P_{ci})}{d(P_{ci})} \quad (7)$$

و يتم حساب التشبع بالمائع المحقون عند مدخل العينة عند كل سرعة  $S_{I(P_{ci})}$  من العلاقة:

$$S_{I(P_{ci})} = 1 - S_{D(P_{ci})} = 1 - \frac{d(\bar{S}_D P_{ci})}{d(P_{ci})} = \frac{d(\bar{S}_I P_{ci})}{d(P_{ci})} \quad (8)$$

أثناء إجراء اختبار الضغط الشعري للمنظومة (ماء - نפט) على العينة اللبية بهذه الطريقة نميز دورتين (Cycle) رئيسيتين هما:

\* دورة التفريغ (Drainage Cycle): في هذه الدورة تكون العينة مشبعة بشكل شبه كامل بالماء ويتم وضعها في حاضن العينة (Core Holder) المملوء بالنفت، يتم تطبيق ضغط الحقن الذي يعبر عن الضغط الشعري من خلال قوة الطرد المركزي، حيث يبدأ الدوران بسرعة منخفضة ثم تزداد سرعة الدوران (Rotation Speed) بالتدريج وعند كل سرعة يتم تسجيل كمية الماء (المزاح) التراكمية الخارجة من العينة.

يتم حساب التشبع الوسطي بالماء (المزاح) (Mean Water Saturation) في العينة عند كل سرعة اعتماداً على العلاقة (3)، أي من العلاقة:

$$\bar{S}_{Dw} = S_{iDw} - \frac{V_{Dw}}{V_P} \quad (9)$$

$\bar{S}_{Dw}$ : التشبع الوسطي بالماء (المزاح) (Mean Displaced Water Saturation).

$S_{iDw}$ : درجة تشبع الماء (المزاح) الأولية.

$V_{Dw}$ : حجم الماء (المزاح) التراكمي الخارج من العينة.

و يتم حساب الضغط الشعري عند مدخل العينة عند كل سرعة اعتماداً على العلاقة (6) أي من العلاقة:

$$P_{ci} = (\rho_w - \rho_o) [(2\pi(N / 60))^2 (R_e - \frac{L}{2})L] \quad (10)$$

و يتم حساب التشبع بالماء (المزاح) عند مدخل العينة عند كل سرعة اعتماداً على العلاقة (7)، أي من العلاقة:

$$S_{Dw(P_{ci})} = \frac{d(\bar{S}_{Dw} P_{ci})}{d(P_{ci})} \quad (11)$$

يتم إجراء هذه العمليات الحسابية من خلال برامج حاسوبية (LabCON) والتي يدخل إليها معطيات الضغط الشعري وكمية الماء (المزاح) التراكمية الخارجة من العينة عند كل سرعة بالإضافة إلى كافة المعطيات الضرورية في العمليات الحسابية لتقوم هذه البرامج برسم منحنى الضغط الشعري خلال دورة التفريغ.

\* دورة التشريب (Imbibition Cycle): في هذه الدورة تكون العينة مشبعة بشكل شبه كامل بالنفط ويتم وضعها في حاضن العينة (Core Holder) المملوء بالماء، يتم تطبيق ضغط الحقن الذي يعبر عن الضغط الشعري من خلال قوة الطرد المركزي، حيث يبدأ الدوران بسرعة منخفضة ثم تزداد سرعة الدوران (Rotation Speed) بالتدريج وعند كل سرعة يتم تسجيل كمية النفط (المزاح) التراكمية الخارجة من العينة.

يتم حساب التشبع الوسطي بالماء (المحقون) في العينة عند كل سرعة اعتماداً على العلاقة (4)، أي من العلاقة:

$$\bar{S}_{Iw} = S_{Iw} + \frac{V_{Do}}{V_P} \quad (12)$$

$\bar{S}_{Iw}$ : التشبع الوسطي بالماء (المحقون) في العينة.

$V_{Do}$ : حجم النفط (المزاح) التراكمي الخارج من العينة.

$S_{Iw}$ : التشبع الأولي للماء (المحقون) في العينة.

و يتم حساب الضغط الشعري عند مدخل العينة عند كل سرعة اعتماداً على العلاقة (6)، أي من العلاقة:

$$P_{ci} = -(\rho_w - \rho_o) [(2\pi(N / 60))^2 (R_e - \frac{L}{2})L] \quad (13)$$

ويتم حساب التشبع بالماء (المحقون) عند مدخل العينة عند كل سرعة اعتماداً على العلاقة (8)، أي من العلاقة:

$$S_{Iw(P_{ci})} = \frac{d(\bar{S}_{Iw} P_{ci})}{d(P_{ci})} \quad (14)$$

يتم إجراء هذه العمليات الحسابية من خلال برامج حاسوبية (LabCON) والتي يدخل إليها معطيات الضغط الشعري وكمية النفط(المزاح) التراكمية الخارجة من العينة عند كل سرعة بالإضافة إلى كافة المعطيات الضرورية في العمليات الحسابية لتقوم هذه البرامج برسم منحنى الضغط الشعري خلال دورة التشريب.

❖ تم تنفيذ اختبار الضغط الشعري على ستة عينات سدادية من العينة اللبية ISB130 في مختبر (CoreLab)، جرت على هذه العينات اختبارات تقليدية لمعرفة خصائصها قبل تنفيذ اختبارات الضغط الشعري عليها. تضمن اختبار الضغط الشعري على كل عينة سدادية ثلاثة اختبارات هي اختبار التفريغ الأول(Drainage1) تم تنفيذه على العينة قبل إزاحة نפט الخزان منها(Before Aging)، واختبار التشريب (Imbibition) تم تنفيذه بعد إزاحة نפט الخزان (After Aging)، واختبار التفريغ الثاني (Drainage2) تم تنفيذه بعد إزاحة نפט الخزان من العينة (After Aging). نتيجة الحجم الكبير لنتائج الاختبارات سنكتفي أثناء البحث بعرض نتائج الاختبارات للعينة اللبية (3B):

\* أثناء اختبار التفريغ(الأول)، يكون حجم النتائج الأولية التفصيلية التي توضح كمية الماء التراكمي المزاح عند كل سرعة دوران كبير جداً، لذلك سنكتفي في بحثنا بإظهار الجدول(1) الذي يوضح جزء من النتائج الأولية التفصيلية عند آخر كمية تراكمية من الماء المزاح خرجت من العينة عند سرعة دوران ثابتة.

#### CENTRIFUGE OIL-BRINE CAPILLARY PRESSURE RAW DATA

Well : ISBA-130  
Sample : 3B  
Cycle : 1st Drainage (Oil displacing Brine)

نمذجة وتحليل المؤشرات التابعة للتشبع في حقل العزبة الجنوبي الشرقي

Time (sec)	Time (min)	RPM	Brine Out (cc)
1.0	0.02	893	0
86401.	1440	1168	0
0.9	0.02	1219	0
28557.6	475.96	1847	1.02
1.0	0.02	1890	1.02
86401.5	1440	2866	2.78
2	0.03	2864	2.78
57010.3	950.17	4144	3.72
0.7	0.01	4131	3.72
24562.8	409.4	6155	4.23
1.1	0.02	6152	4.23
86401.4	1440.0	7991	4.62

الجدول (1) جزء من النتائج الأولية لدورة التفريغ (الأول)

\* أثناء اختبار التشريب، يكون حجم النتائج الأولية التفصيلية التي توضح كمية النفط التراكمي المزاح عند كل سرعة دوران كبير جداً، لذلك سنكتفي في بحثنا بإظهار الجدول (2) الذي يوضح جزء من النتائج الأولية التفصيلية عند آخر كمية تراكمية من النفط المزاح خرجت من العينة عند سرعة دوران ثابتة.

**CENTRIFUGE OIL-BRINE CAPILLARY PRESSURE RAW DATA**

Well : ISBA-130  
Sample : 3B  
Cycle : Imbibition (Brine displacing Oil)

Time (sec)	Time (min)	RPM	Oil Out (cc)
87.1	1.45	565	0.00
716.2	11.9	559	0.00
1.9	0.03	665	0.00
8384.1	139.74	797	0.00
1.7	0.03	918	0.00
172801.6	2880.03	1257	<b>0.79</b>
0.8	0.01	1379	0.81
3395.7	56.6	1786	1.03
14	0.24	3173	1.43
1692.2	28.2	4549	2.27
13.1	0.22	5510	3.01
86401.3	1440.0	5545	<b>3.23</b>

الجدول (2) جزء من النتائج الأولية لدورة التشريب

أثناء اختبار التفريغ (الثاني)، يكون حجم النتائج الأولية التفصيلية التي توضح كمية الماء التراكمي المزاح عند كل سرعة دوران كبير جداً، لذلك سنكتفي في بحثنا بإظهار الجدول (3) الذي يوضح النتائج الأولية التفصيلية عند آخر كمية تراكمية من الماء المزاح خرجت من العينة عند سرعة دوران ثابتة.

### CENTRIFUGE OIL-BRINE CAPILLARY PRESSURE RAW DATA

Well : ISBA-130  
Sample : 3B  
Cycle : 2nd Drainage (Oil displacing Brine)

Time (sec)	Time (min)	RPM	Brine Out (cc)
1.5	0.03	1368	0.00
307.6	5.13	1815	0.07
19.9	0.33	2566	1.06
7570.5	126.2	2562	1.59
85	1.42	4057	2.18
86401.5	1440.0	4057	<u>2.76</u>
1.5	0.03	4193	2.78
86401	1440.0	5742	<u>3.19</u>
1	0.02	5798	3.21
86401.8	1440.0	7974	<u>3.34</u>

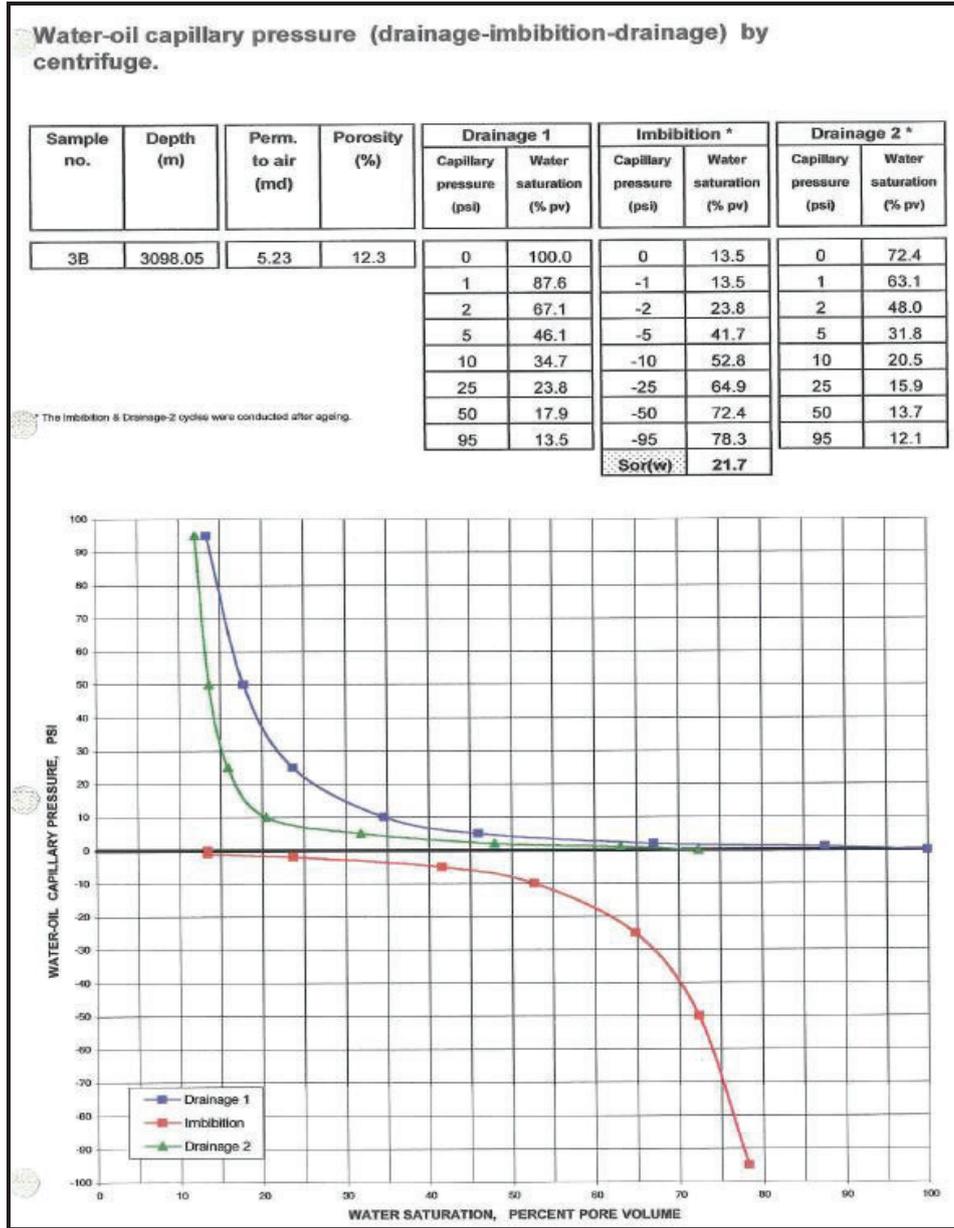
الجدول (3) جزء من النتائج الأولية لدورة التفريغ (الثاني)

\* بالإضافة إلى المعطيات السابقة نحتاج أيضاً إلى المعطيات المتعلقة بخصائص العينة والسوائل المستخدمة في الاختبارات بالإضافة إلى نصف قطر الدوران، هذه المعطيات ملخصة في الجدول (4).

Sample Number	Pore Volume (cc)	Sample Length (cm)	Radius of Rotation (cm)	Oil Density (g/cc)	Water Density (g/cc)
3B	6.091	4.140	9.130 (Drainage) 16.63 (Imbibition)	0.768	1.073

الجدول (4) خصائص العينة والسوائل المستخدمة في الاختبارات

يتم إدخال كافة المعطيات المذكورة سابقاً إلى برنامج (LabCON) الذي يقوم بدوره اعتماداً على المبادئ الرياضية المشروحة سابقاً بالحصول على معطيات الضغط الشعري الموضحة في الشكل (3).



الشكل (3) معطيات الضغط الشعري للمنظومة (نفط-ماء) في العينة (3B)

❖ بهدف زيادة دقة نتائج النمذجة الديناميكية وإمكانية إدخال تغييرات عليها عند الحاجة وتجهيزها وفق صيغة تتناسب مع برامج النمذجة الديناميكية، نقوم ببناء نماذج رياضية لهذه المعطيات مستخدمين برنامج يسمى SCAL، توجد عدة طرق لبناء نموذج الضغط الشعري للمنظومة (نפט-ماء) لكننا سنكتفي بذكر النموذجين الأبسط والأكثر شيوعاً:

• النموذج الأسّي (Exponential Model):

يتم بناء نموذج الضغط الشعري للمنظومة (نפט-ماء) وفق هذا النموذج اعتماداً على المعطيات المخبرية وفق العلاقة:

$$P_{cow} = ce^{m.S_w} \quad (15)$$

$P_{cow}$ : الضغط الشعري في المنظومة (نפט-ماء)،  $S_w$ : التشبع بالماء.

$c, m$ : متغيرات رياضية (غير ثابتة) يتم اختيارها بحيث تجعل منحنى الضغط الشعري الناتج عن العلاقة (15) أقرب ما يمكن إلى منحنى الضغط الشعري الناتج مخبرياً.

• نموذج القوة (Power Model):

يتم بناء نموذج الضغط الشعري للمنظومة (نפט-ماء) وفق هذا النموذج اعتماداً على المعطيات المخبرية وفق العلاقة:

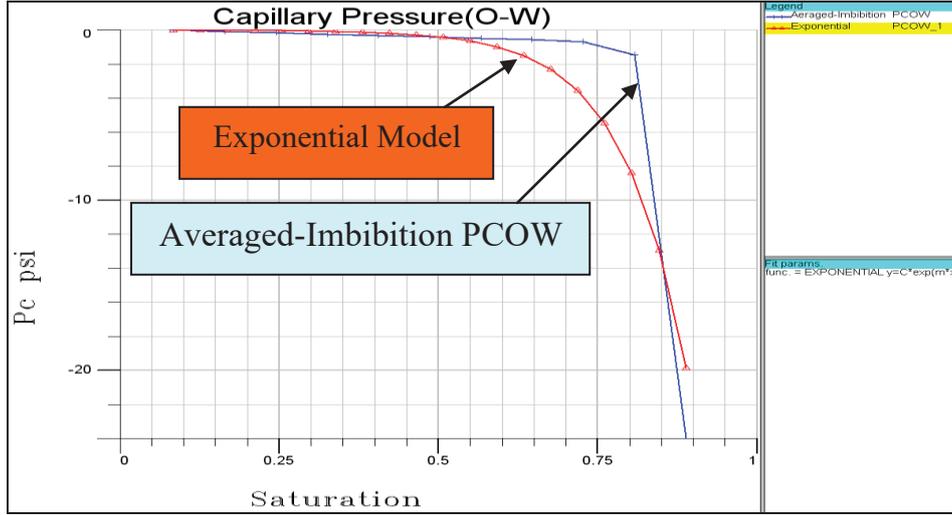
$$P_{cow} = C.(S_w)^B \quad (16)$$

$P_{cow}$ : الضغط الشعري في المنظومة (نפט-ماء)،  $S_w$ : التشبع بالماء

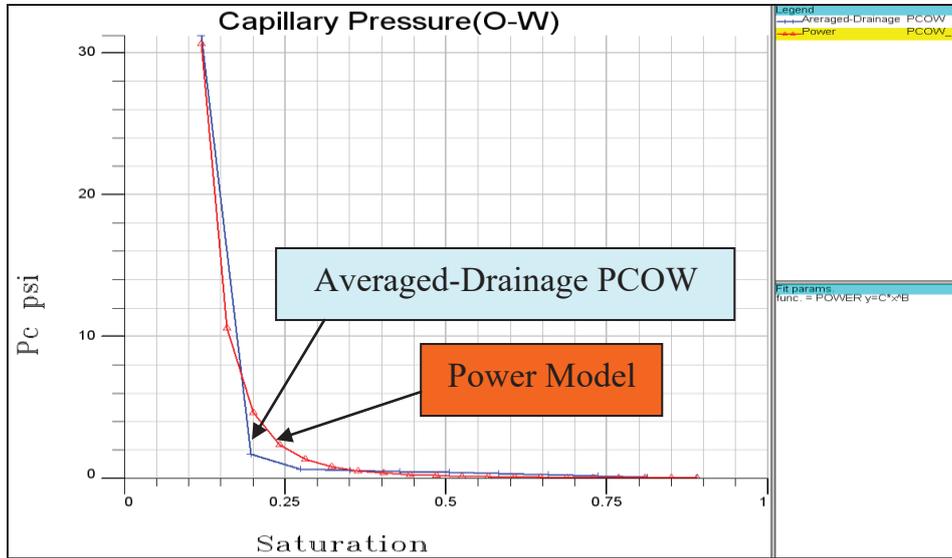
$C, B$ : متغيرات رياضية (غير ثابتة) يتم اختيارها بحيث تجعل منحنى الضغط الشعري الناتج عن العلاقة (16) أقرب ما يمكن إلى منحنى الضغط الشعري والناتج مخبرياً.

قمنا بإدخال معطيات الضغط الشعري لجميع العينات السدادية المتوفرة إلى برنامج SCAL، وقمنا بأخذ متوسط هذه المعطيات للحصول على منحنى الضغط الشعري الوسطي لاختبار التشريب (Averaged-Imbibition PCOW) وبناءً عليه قمنا ببناء نموذج الضغط الشعري للمنظومة (نפט-ماء) مستخدمين النموذج الأسّي فكانت النتيجة في الشكل (4)، وقمنا بأخذ متوسط هذه المعطيات للحصول على منحنى الضغط الشعري

الوسطي لاختبار التفريغ (Averaged-Drainage PCOW) وبناءً عليه تم بناء نموذج الضغط الشعري للمنظومة (نفط-ماء) مستخدمين نموذج القوة فكانت النتيجة في الشكل(5).



الشكل(4) نموذج الضغط الشعري لاختبار التشريب للمنظومة(نفط-ماء)



الشكل(5) نموذج الضغط الشعري لاختبار التفريغ للمنظومة(نفط-ماء)

## 2- اختبار النفوذية النسبية (Relative Permeability Test):

❖ يوجد عدة طرق لاختبار النفوذية النسبية، لكننا سنكتفي بشرح طريقة الطرد المركزي (Centrifugal Method) التي استخدمت لاختبار العينات اللبية المتعلقة بالدراسة، تكون العينة مشبعة بمائع ويتم حقن مائع آخر عن طريق قوة الطرد المركزي الناتج عن الدوران، وبالتالي يتم إزاحة المائع الموجود في العينة، إن سرعة المائع المزاح عند مخرج العينة بوجود مائع آخر في العينة تعطى من قانون دارسي:

$$\left(\frac{dv_D}{dp}\right) = \left(\frac{K K_{rD}}{\mu_D L}\right) \quad (17)$$

$K_{rD}$  ،  $\mu_D$ : اللزوجة والنفوذية النسبية للمائع المزاح.

$L$  ،  $K$ : النفوذية المطلقة وطول العينة.

$dp$  ،  $dv_D$ : تغير سرعة المائع المزاح وتغير الضغط بين مدخل ومخرج العينة.

إن تغير الضغط بين مدخل ومخرج العينة  $dp$  يعبر عن تغير الضغط الشعري  $dp_c$  ، وبالتالي يمكن أن نعبر عن النفوذية النسبية للمائع المزاح بالشكل:

$$K_{rD} = \left(\frac{\mu_D L}{K}\right) \left(\frac{dv_D}{dp_c}\right) \quad (18)$$

أثناء إجراء اختبار النفوذية النسبية تكون سرعة الدوران ثابتة وبالتالي فإن الضغط

الشعري ثابت، وبالإستعانة بالعلاقة (5) والأخذ بعين الاعتبار أن:  $dv_D = \frac{1}{A} \frac{dQ_D}{dt}$

تصبح العلاقة (18) على الشكل:

$$K_{rD} = \left(\frac{\mu_D}{K \Delta\rho a_c A}\right) \left(\frac{dQ_D}{dt}\right) \quad (19)$$

$Q_D$ : حجم المائع المزاح الخارج من العينة.  $A$ : مساحة مقطع العينة.

$\Delta\rho$ : فرق الكثافة بين المائعين.

بضرب بسط ومقام العلاقة (19) بحجم الفراغ المسامي  $V_p$  مع الأخذ بعين الاعتبار أن

$V_p = A \phi L$  نحصل على علاقة (Hagoort) المعتمدة في اختبار النفوذية النسبية:

$$K_{rD} = \left(\frac{\mu_D \phi L}{K \Delta\rho a_c}\right) \left(\frac{dQ_{pD}}{dt}\right) \quad (20)$$

حيث أن  $Q_{pD}$  هي نسبة حجم المائع المزاح والخارج من العينة إلى حجم الفراغ المسامي للعينة:  $Q_{pD} = \frac{Q_D}{V_p}$ . بتعويض  $a_c$  تصبح علاقة (Hagoort) على الشكل:

$$K_{rD} = \left( \frac{\mu_D \phi L}{K \Delta \rho [(2\pi(N / 60))^2 (R_e - \frac{L}{2})]} \right) \left( \frac{dQ_{pD}}{dt} \right) \quad (21)$$

$K_{rD}$ : النفوذية النسبية للمائع المزاح عند مخرج العينة عند الزمن  $t$ .  
 $Q_{pD}$ : نسبة حجم المائع المزاح الخارج من العينة إلى حجم الفراغ المسامي عند  $t$ .  
 $K$ : النفوذية المطلقة للعينة ( $m^2$ )، ( $md = 9.86923266716 * 10^{-16} m^2$ ).  
 $\mu_D$ : لزوجة المائع المزاح ( $Pa.s$ )، ( $mPa.s (cp) = 10^{-3} Pa.s$ )،  $t$ : الزمن (sec).  
 $\Delta \rho$ : فرق الكثافة بين المائعين ( $Kg / m^3$ )،  $R_e$ : نصف قطر الدوران (m).  
 $L$ : طول العينة (m)،  $N$ : سرعة الدوران (Rotation Speed) (rpm).

و بالتالي نسبة التشبع بالمائع المزاح  $(S_D)_t$  عند مخرج العينة وعند الزمن  $t$  هي:

$$(S_D)_t = S_{iD} - Q_{pD} + t \left( \frac{dQ_{pD}}{dt} \right) \quad (22)$$

$S_{iD}$ : نسبة التشبع الأولية بالمائع المزاح.

وبالتالي نسبة التشبع بالمائع المحقون عند مخرج العينة وعند الزمن  $t$  هي:

$$(S_I)_t = 1 - (S_D)_t = S_{iI} + (Q_{pD})_t - t \left( \frac{dQ_{pD}}{dt} \right) \quad (23)$$

$(S_I)_t$ : نسبة التشبع بالمائع المحقون عند مخرج العينة وعند الزمن  $t$ .  
 $S_{iI}$ : نسبة التشبع الأولية بالمائع المحقون.

أثناء إجراء اختبار النفوذية النسبية للمنظومة (ماء - نפט) على العينة اللبية بهذه الطريقة نميز دورتين (Cycle) رئيسيتين هما:

\* دورة التشريب (Imbibition Cycle): في هذه الدورة تكون العينة مشبعة بشكل شبه كامل بالنفط ويتم وضعها في حاضن العينة (Core Holder) المملوء بالماء، يبدأ الدوران بسرعة دوران منخفضة ثم يتم تثبيت الدوران عند سرعة دوران ثابتة  $N$  و يتم تسجيل كمية النفط التراكمية الخارجة من العينة مع الزمن عند تلك السرعة. يتم حساب نسبة حجم النفط المزاح والخارج من العينة  $(Q_{pDo})_t$  إلى حجم الفراغ المسامي  $V_p$  عند كل زمن من العلاقة:

$$(Q_{pDo})_t = \frac{(Q_{Do})_t}{V_p} \quad (24)$$

ثم يتم إدخال معطيات  $Q_{pDo}$  مع الزمن المقابل لها بالإضافة إلى كافة المعطيات الضرورية في العمليات الحسابية إلى برامج حاسوبية (LabCON) لتقوم هذه البرامج برسم منحنى النفوذ النسبية للنفط اعتماداً على العلاقتين (21) و (23).

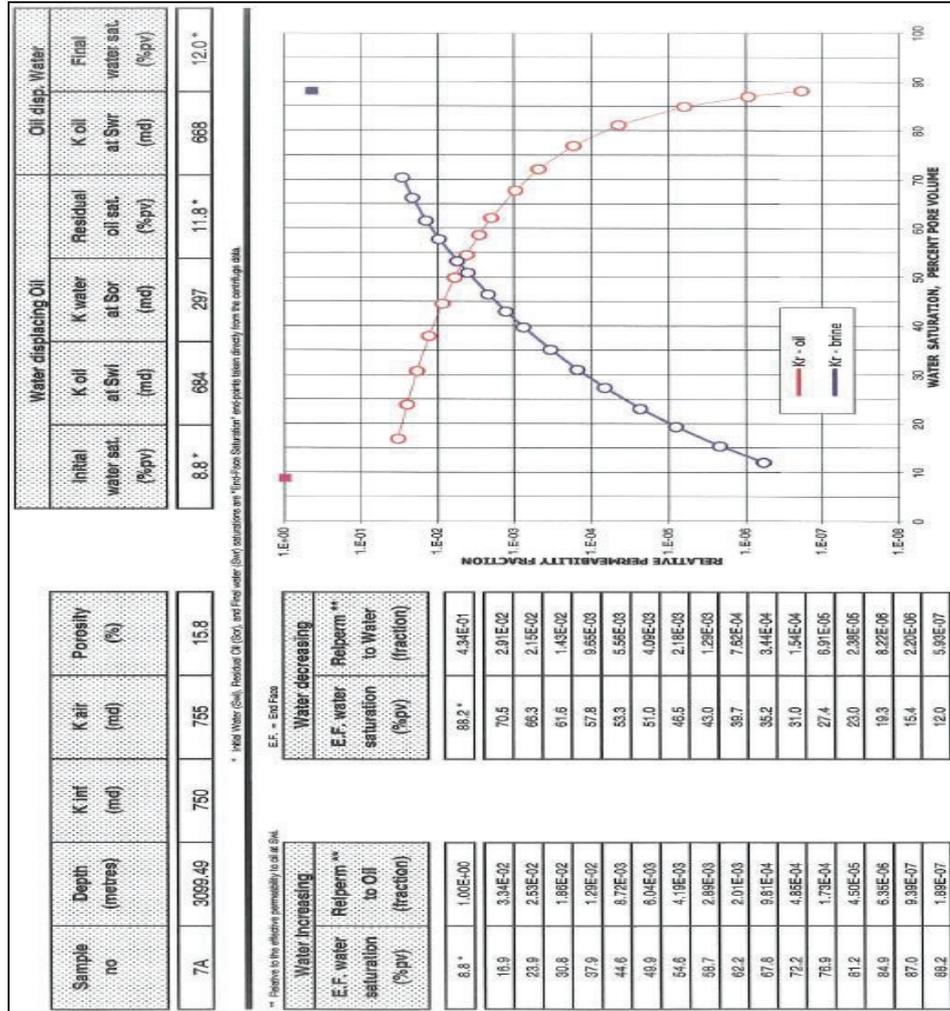
\* دورة التفريغ (Drainage Cycle): في هذه الدورة تكون العينة مشبعة بشكل شبه كامل بالماء ويتم وضعها في حاضن العينة (Core Holder) المملوء بالنفط، يبدأ الدوران بسرعة دوران منخفضة ثم يتم تثبيت الدوران عند سرعة دوران ثابتة  $N$  و يتم تسجيل كمية الماء التراكمية الخارجة من العينة مع الزمن عند تلك السرعة. يتم حساب نسبة حجم الماء المزاح والخارج من العينة  $(Q_{pDw})_t$  إلى حجم الفراغ المسامي  $V_p$  عند كل زمن من العلاقة:

$$(Q_{pDw})_t = \frac{(Q_{Dw})_t}{V_p} \quad (25)$$

ثم يتم إدخال معطيات  $Q_{pDw}$  مع الزمن المقابل لها بالإضافة إلى كافة المعطيات الضرورية في العمليات الحسابية إلى برامج حاسوبية (LabCON) لتقوم هذه البرامج برسم منحنى النفوذ النسبية للماء اعتماداً على العلاقتين (21) و (22).

❖ تم تنفيذ اختبار النفوذ النسبية على ستة عينات سدادية من العينة اللبية ISB130 في مختبر (CoreLab)، جرت على هذه العينات اختبارات تقليدية لمعرفة خصائصها

قبل تنفيذ اختبارات النفوذية النسبية عليها، تضمن اختبار النفوذية النسبية اختبارين رئيسيين على كل عينة، اختبار التشريب ((Imbibition(Water Increasing))، واختبار التفريغ ((Drainage(Water Decreasing)). آلية العمل تشبه إلى حد كبير آلية العمل في اختبار الضغط الشعري لذلك سنكتفي الآن فقط بعرض نتائج الاختبار للعينة السدادية (7A) والموضحة في الشكل(6).



الشكل(6) نتائج اختبار النفوذية النسبية(ماء- نפט) للعينة السدادية (7A)

❖ بهدف زيادة دقة نتائج النمذجة الديناميكية وإمكانية إدخال تغييرات عليها عند الحاجة وتجهيزها وفق صيغة تتناسب مع برامج النمذجة الديناميكية، نقوم ببناء نماذج رياضية

لهذه المعطيات مستخدمين برنامج يسمى SCAL، يتم عادةً بناء نموذج النفوذ النسبية للمنظومة (نفط-ماء) اعتماداً على المعطيات المخبرية وعلى نموذج كوري (Corey Model) وفق العلاقتين:

$$k_{row} = \left( \frac{1 - S_w - S_{or}}{1 - S_{wco} - S_{or}} \right)^{N_o} \quad (26)$$

$$k_{rwo} = k_{rwend} \left( \frac{S_w - S_{wco}}{1 - S_{wco} - S_{or}} \right)^{N_w} \quad (27)$$

$k_{row}$ : النفوذ النسبية للنفط،  $k_{rwo}$ : النفوذ النسبية للماء.

$S_{wco}$ : التشبع بالمياه الأولية (المياه المترابطة).

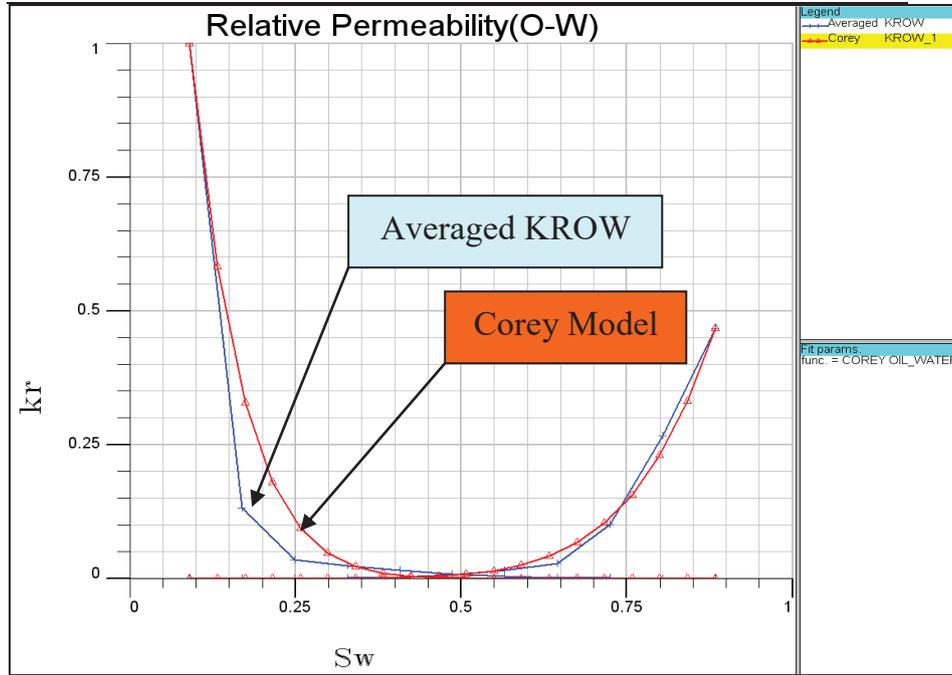
$S_{or}$ : التشبع بالنفط المتبقي.

$k_{rwend}$ : أعلى قيمة للنفوذ النسبية للماء (تكون عندها نسبة التشبع بالماء  $(1 - S_{or})$ ).

$N_o$ : أس كوري (Corey exponent) للنفط، هذا الأس ليس له قيمة ثابتة ويتم اختيار قيمته بحيث يكون منحنى النفوذ النسبية للنفط والناتج عن العلاقة (26) أقرب ما يمكن إلى منحنى النفوذ النسبية للنفط والناتج عن المعطيات المخبرية.

$N_w$ : أس كوري (Corey exponent) للماء، هذا الأس ليس له قيمة ثابتة ويتم اختيار قيمته بحيث يكون منحنى النفوذ النسبية للماء والناتج عن العلاقة (27) أقرب ما يمكن إلى منحنى النفوذ النسبية للماء والناتج عن المعطيات المخبرية.

قمنا بإدخال معطيات النفوذ النسبية لجميع العينات السدادية المتوفرة لدينا إلى برنامج SCAL، قمنا بأخذ القيم الوسطية لهذه المعطيات للحصول على منحنى النفوذ النسبية الوسطي (Averaged KROW) وبناءً عليه قمنا ببناء نموذج النفوذ النسبية للمنظومة (نفط-ماء) مستخدمين نموذج كوري، فكانت النتيجة موضحة في الشكل (7).



الشكل (7) نموذج النفوذية النسبية للمنظومة (نفط-ماء)

### 3- اختبار التبلل (Wettability Test):

يوجد عدة طرق لاختبار تبلل العينات اللبية، هذه الطرق تعتمد بشكل رئيسي على قياسات التشرب أو قياسات الضغط الشعري بطريقة الطرد المركزي، سنكتفي هنا بشرح الطريقة المستخدمة في الدراسة والتي هي اختبار تشرب أموت-هارفي:

#### ❖ اختبار تشرب أموت-هارفي (Amott-Harvey Imbibition):

تعتمد على المقارنة بين مؤشر التشرب للماء (Water Imbibition Indicator) و مؤشر التشرب للنفط (Oil Imbibition Indicator) للعينة اللبية الواحدة. مؤشر التشرب للماء يعبر عن نسبة حجم الماء الذي تنتشره بشكل طبيعي (Spontaneously) العينة المشبعة بالنفط ( $S_o = 1 - S_{wc}$ ) إلى حجم الماء في العينة عندما تكون العينة مشبعة بالماء ( $S_w = 1 - S_{or}$ ) ويعطى بالعلاقة:

$$I_W = \frac{V_{Wsp}}{V_{Wt}} \quad (28)$$

$I_W$ : مؤشر التشرب للماء (Water Imbibition Indicator).

$V_{Wsp}$ : حجم الماء الذي تتشربه بشكل طبيعي العينة المشبعة بالنفط ( $S_o = 1 - S_{wc}$ ).

$V_{Wt}$ : حجم الماء في العينة عندما تكون العينة مشبعة بالماء ( $S_w = 1 - S_{or}$ ).

مؤشر التشرب للنفط يعبر عن نسبة حجم النفط الذي تتشربه بشكل طبيعي مؤشراً (Spontaneously) العينة المشبعة بالماء ( $S_w = 1 - S_{or}$ ) إلى حجم النفط في العينة عندما تكون العينة مشبعة بالنفط ( $S_o = 1 - S_{wc}$ ) ويعطى بالعلاقة:

$$I_O = \frac{V_{Osp}}{V_{Ot}} \quad (29)$$

$I_O$ : مؤشر التشرب للنفط (Oil Imbibition Indicator).

$V_{Osp}$ : حجم النفط الذي تتشربه بشكل طبيعي العينة المشبعة بالماء ( $S_w = 1 - S_{or}$ ).

$V_{Ot}$ : حجم النفط في العينة عندما تكون العينة مشبعة بالنفط ( $S_o = 1 - S_{wc}$ ).

مؤشر أموت-هارفي (Amott-Harvey Index) يعبر عن الفرق بين مؤشري التشرب للماء والنفط ويعطى بالعلاقة:

$$I_{AH} = I_W - I_O \quad (30)$$

تتراوح قيم هذا المؤشر بين (+1) ويكون عندها الصخر مبلل بشكل كامل بالماء (Strongly Water Wet) وبين (-1) ويكون عندها الصخر مبلل بشكل كامل بالنفط (Strongly Oil Wet)، وعندما تكون قيم هذا المؤشر واقعة في المجال (+1, -1) يكون الصخر مبلل بالماء والنفط (Mixed Wet) وهنا يمكن أن نعتبر أنه عندما يكون المؤشر موجباً يكون الصخر أكثر تبللاً بالماء وعندما يكون المؤشر سالباً يكون الصخر أكثر تبللاً بالنفط وعندما يكون المؤشر مساوياً (0) يكون الصخر مبلل بكل من الماء والنفط بشكل متساوي.

يمكن تلخيص خطوات تنفيذ اختبار التبلل للعينة اللبية بهذه الطريقة (الشكل (8)):

✘ حساب التشرب الطبيعي للماء (Water Spontaneously Imbibition) كما هو

موضح في الشكل (8-A) وذلك وفق الخطوات التالية:

- يتم إشباع العينة بالنفط حتى الوصول إلى نسبة التشبع  $(S_o = 1 - S_{wc})$ .
- يتم غمر تلك العينة في أنبوب معايرة (Calibrated Collection Tube) مملوء بالماء، لكي نسمح للعينة بتشرب الماء بشكل طبيعي.
- نراقب كمية الماء التي تنتشرها العينة (تساوي كمية النفط المزاح من العينة نتيجة التشرب الطبيعي للماء) حتى نجد أن عملية التشرب قد توقفت بالكامل، عادةً تترك العينة (10-15) يوم. يتم تسجيل كمية الماء النهائية التي تشربتها العينة بشكل طبيعي  $V_{wsp}$  (تساوي كمية النفط النهائية المزاحة من العينة).

✘ حساب التشرب الديناميكي للماء (Water Dynamically Imbibition)، كما في

الشكل (8-B)، حيث يتم وضع العينة في حاضن العينة المملوء بالماء ويتم حقن الماء في العينة بفعل قوة الطرد المركزي (إجبار العينة على تشرب الماء) وتسجيل كمية الماء النهائية التي تشربتها العينة ديناميكياً (بالقوة)  $V_{wd}$ .

✘ حساب التشرب الكلي للماء (Water Total Imbibition) طبيعياً وديناميكياً:

$$V_{wt} = V_{wsp} + V_{wd}$$

✘ حساب مؤشر التشرب للماء (Water Imbibition Index):  $I_w = \frac{V_{wsp}}{V_{wt}}$

✘ حساب التشرب الطبيعي للنفط (Oil Spontaneously Imbibition)، كما هو

موضح في الشكل (8-C) وذلك وفق الخطوات التالية:

- يتم إخراج العينة التي أصبحت مشبعة بالماء  $(S_w = 1 - S_{or})$  من حاضن العينة ويتم غمرها في أنبوب معايرة (Calibrated Collection Tube) مملوء بالنفط، لكي نسمح للعينة بتشرب النفط بشكل طبيعي.
- نراقب كمية النفط التي تنتشرها العينة (تساوي كمية الماء المزاح من العينة نتيجة التشرب الطبيعي للنفط) حتى نجد أن عملية التشرب قد توقفت بالكامل.

- يتم تسجيل كمية النفط النهائية التي تشربتها العينة بشكل طبيعي  $V_{Osp}$  (تساوي كمية الماء النهائية المزاحة من العينة).

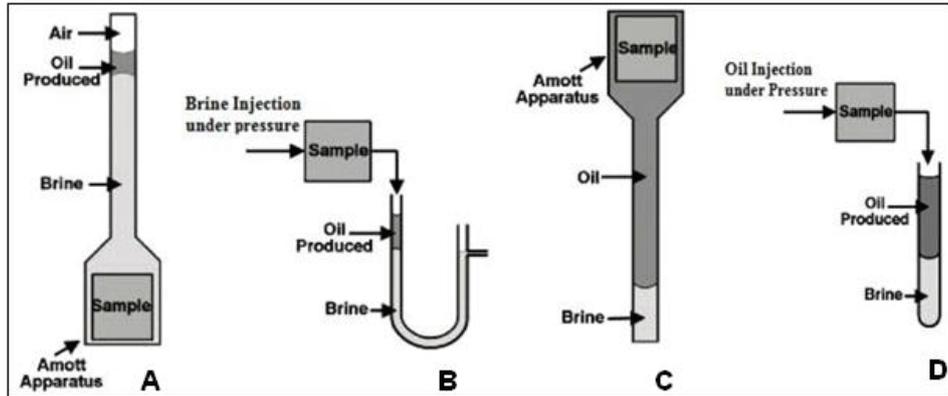
☒ حساب التشرب الديناميكي للنفط (Oil Dynamically Imbibition)، موضح في الشكل (8-D)، حيث يتم وضع العينة في حاضن العينة المملوء بالنفط ويتم حقن النفط في العينة بفعل قوة الطرد المركزي (إجبار العينة على تشرب النفط) وتسجيل كمية النفط النهائية التي تشربتها العينة ديناميكياً (بالقوة)  $V_{Od}$ .

☒ حساب التشرب الكلي للنفط (Oil Total Imbibition) طبيعياً وديناميكياً:

$$V_{Ot} = V_{Osp} + V_{Od}$$

☒ حساب مؤشر التشرب للنفط (Oil Imbibition Index):  $I_O = \frac{V_{Osp}}{V_{Ot}}$

☒ حساب مؤشر أموت-هارفي (Amott-Harvey Index):  $I_{AH} = I_W - I_O$



الشكل (8) اختبار أموت-هارفي (Amott-Harvey)

- ❖ تم تنفيذ اختبار التبلل على عدة عينات سدادية مأخوذة من العينة اللبية ISB130 في مختبر (CoreLab) بطريقة أموت-هارفي وفق الحالات الثلاثة التالية:
- 1. اختبار أموت-هارفي على العينات الحديثة (Fresh Samples):

هذه العينات السدادية الحديثة تم حفرها من العينة اللبية مستخدمين (Isopar-L) كسائل حفر، ثم تم حقن النفط الخام فيها (Flushed with Dead Crude Oil) بهدف إشباعها بالنفط الخام وإزالة الغازات والماء القابل للحركة منها، بعد ذلك يستمر الاختبار

بنفس طريقة اختبار أموت-هارفي المشروح مسبقاً، نتائج اختبار أموت-هارفي على العينتين الحديثتين (29A, 29B) موضحة في الجدول (5).

Sample Identification	29A	29B
Depth, meter	3107.83	3107.88
<b>Basic Parameters of Test Samples</b>		
Permeability to Air, millidarcies	1.3	1.8
Porosity, fraction BV	0.110	0.115
Pore Volume, cc	7.482	8.072
Initial Water Saturation, fraction Vp*	0.376	0.281
Effective Permeability to oil @ Swi, md	0.070	0.17
<b>Imbibition of Water</b>		
Spontaneous Imbibition, fraction Vp	0.080	0.081
Dynamic Imbibition, fraction Vp	0.361	0.421
Total Imbibed, fraction Vp	0.441	0.502
Effective Permeability to brine @ Sor, md	0.05	0.08
Terminal water saturation, fraction Vp**	0.817	0.783
<b>Imbibition of Oil</b>		
Spontaneous Imbibition, fraction Vp	0.000	0.000
Dynamic Imbibition, fraction Vp	0.428	0.396
Total Imbibed, fraction Vp	0.428	0.396
Effective permeability to oil @ Swr	0.03	0.02
Residual Water Saturation, fraction Vp***	0.389	0.387
<b>Wettability Indices</b>		
Amott Wettability Index to Water	0.182	0.160
Amott Wettability Index to Oil	0.000	0.000
Amott-Harvey Wettability Index	0.182	0.160
*Saturation after flush with oil to remove gases and moveable brine.		
**Saturation at the end of brine imbibition cycle.		
***Saturation at the end of oil imbibition cycle.		

الجدول (5) نتائج اختبار أموت-هارفي على العينتين الحديثتين

## 2. اختبار أموت-هارفي على العينات النظيفة (Clean Samples):

هذه العينات السدادية النظيفة تم تنظيفها باستخدام مزيج من الكلوروفورم والميتانول بهدف إزالة الأملاح والهيدروكربونات المتبقية (Residual Hydrocarbons)، ويتم إشباعها بالنفط الخام، بعد ذلك يستمر الاختبار بنفس طريقة اختبار أموت-هارفي المشروح مسبقاً، نتائج الاختبار على العينتين النظيفتين (6B, 12B) في الجدول (6).

نمذجة وتحليل المؤشرات التابعة للتشبع في حقل العزبة الجنوبي الشرقي

Sample Identification	6B	12B
Depth, meter	3098.89	3100.50
<b>Basic Parameters of Test Samples</b>		
Permeability to Air, millidarcies	79	1861
Porosity, fraction BV	0.112	0.140
Pore Volume, cc	5.487	7.278
Initial Water Saturation, fraction Vp*	0.080	0.203
Effective Permeability to oil @ Swi, md	3.4	203 (497)++
<b>Imbibition of Water</b>		
Spontaneous Imbibition, fraction Vp	0.046	0.076
Dynamic Imbibition, fraction Vp	0.292	0.371
Total Imbibed, fraction Vp	0.337	0.447
Effective Permeability to brine @ Sor, md	4.5	181
Terminal water saturation, fraction Vp**	0.417	0.650
<b>Imbibition of Oil</b>		
Spontaneous Imbibition, fraction Vp	0.009	0.027
Dynamic Imbibition, fraction Vp	0.219	0.275
Total Imbibed, fraction Vp	0.228	0.302
Effective permeability to oil @ Swr	6.4	519 (706)++
Residual Water Saturation, fraction Vp***	0.189	0.347
<b>Wettability Indices</b>		
Amott Wettability Index to Water	0.135	0.169
Amott Wettability Index to Oil	0.040	0.091
Amott-Harvey Wettability Index	0.095	0.078
++ Permeability to fluid in the reverse flow direction		
*Saturation after flush with oil to remove moveable brine.		
**Saturation at the end of brine imbibition cycle.		
***Saturation at the end of oil imbibition cycle.		

الجدول (6) نتائج اختبار أموت-هارفي على العينتين النظيفتين

3. اختبار أموت-هارفي على العينات المعاد تخزينها (Restored Samples):  
تتم عملية إعادة التخزين (Restoration or Aging) على العينات النظيفة، حيث يتم وضع العينة النظيفة بعد إشباعها بالنفط الخام في وعاء فولاذي مملوء بالنفط الخام بدرجة حرارة الخزان لفترة زمنية طويلة (Aging)، ثم يتم بعد ذلك حقن النفط الخام

فيها (Flushed with Dead Crude Oil)، بعد ذلك يستمر الاختبار بنفس طريقة اختبار أموت-هارفي المشروح مسبقاً، نتائج هذا الاختبار على العينات المعاد تخزينها (12A, 14B, 22A, 22B) موضحة في الجدول (7).

Sample Identification	12A	14B	22A	22B
Depth, meter	3100.50	3100.98	3103.42	3103.42
Ageing Period	2 weeks	4 weeks	4 weeks	8 weeks
<b>Basic Parameters of Test Samples</b>				
Permeability to Air, millidarcies	1590	935	258	306
Porosity, fraction BV	0.143	0.155	0.132	0.131
Pore Volume, cc	7.222	8.089	6.514	6.414
Initial Water Saturation, fraction Vp*	0.210	0.069	0.124	0.115
Effective Permeability to oil @ Swi, md +	155 (993)++	418	12.1	11.7 (46.9)++
<b>Imbibition of Water</b>				
Spontaneous Imbibition, fraction Vp	0.062	0.074	0.015	0.023
Dynamic Imbibition, fraction Vp	0.367	0.457	0.269	0.483
Total Imbibed, fraction Vp	0.429	0.532	0.3	0.51
Effective Permeability to brine @ Sor, md	289	88	8.3	7.7
Terminal water saturation, fraction Vp**	0.639	0.601	0.408	0.622
<b>Imbibition of Oil</b>				
Spontaneous Imbibition, fraction Vp	0.007	0.025	0.008	0.031
Dynamic Imbibition, fraction Vp	0.429	0.408	0.207	0.452
Total Imbibed, fraction Vp	0.436	0.433	0.215	0.483
Effective permeability to oil @ Swr	326 (546)++	52 (127)++	1.1 (5.8)++	0.63 (14.2)++
Residual Water Saturation, fraction Vp***	0.203	0.168	0.193	0.139
<b>Wettability Indices</b>				
Amott Wettability Index to Water	0.145	0.140	0.054	0.046
Amott Wettability Index to Oil	0.016	0.057	0.036	0.065
Amott-Harvey Wettability Index	0.129	0.082	0.018	-0.018
+ After ageing				
++ Permeability to fluid in the reverse flow direction				
*Saturation after the wettability restoration (ageing).				
**Saturation at the end of brine imbibition cycle.				
***Saturation at the end of oil imbibition cycle.				

الجدول (7) نتائج اختبار أموت-هارفي على العينات المعاد تخزينها

### الاستنتاجات والتوصيات:

- بشكل عام نلاحظ وجود تطابق جيد بين معطيات الاختبارات ونتائج النماذج الرياضية، لذلك يمكن الاعتماد على هذه النماذج الرياضية في النمذجة الديناميكية للحقل.
- نلاحظ من منحنيات الضغط الشعري أن نسبة التشبع بالمياه المترابطة تتراوح بين 8% (من الشكل (4)) و 12% (من الشكل (5))، و أن نسبة التشبع بالنفط المتبقي حوالي 12%.
- نلاحظ من منحنيات النفوذية النسبية في الشكل (7) أن نسبة التشبع بالمياه المترابطة حوالي 9% ، و أن نسبة التشبع بالنفط المتبقي حوالي 12%.
- أثناء النمذجة الديناميكية يجب أن تكون نسبة التشبع بالمياه المترابطة واحدة في نموذج الضغط الشعري وفي نموذج النفوذية النسبية، لذلك يجب اعتبار أن نسبة التشبع بالمياه المترابطة في نموذج الضغط الشعري هي 9% وإعادة بناء نموذج الضغط الشعري مستخدمين نفس النماذج الرياضية المشروحة سابقاً.
- بالاطلاع على نتائج اختبارات أموت-هارفي نستنتج ما يلي:
  - الصخر يتراوح بين حيادي (Neutral) إلى مبلل بالماء (Water Wet).
  - بالمقارنة بين نتائج الاختبار على العينات الحديثة والعينات النظيفة نلاحظ وجود فارق طفيف جداً والذي من المحتمل أن يكون ناتجاً عن التسريب أثناء أخذ العينة بالنسبة للعينات الحديثة.
  - بالمقارنة بين نتائج الاختبار على العينات المعاد تخزينها نلاحظ تأثير طفيف لزمان التخزين (Aging Period).

- 1) Tarek Ahmad, Reservoir Engineering HANDBOOK, 2003.
- 2) Kantzas, Apostolos, Fundamentals of Fluid Flow in Porous Media.
- 3) Jill S, Buckley, Fundamentals of Wettability.
- 4) CoreLab, Centrifugal Relative Permeability and Capillary Pressure Analysis Study for Selected Samples from well ISB130, AFPC, Syria, 2002.

