الجمهورية العربية السورية
الجامعة السورية الخاصة
كلية هندسة البترول

الجامعة السورية الخاصة
SYRIAN PRIVATE UNIVERSITY

دراسة الجريان ثنائي الطور
(ماء – زيت)

دراسة أعدت لنيل درجة الإجازة في هندسة البترول

إشراف الدكتور

أ.د.أيمن شقوف

إعداد الطالب

محمد غسان ثائر العبد الرجب

العام الدراسي 2025

فهرس البحث

مقدمة ..... **1.**
الفصل الأول: دراسة مرجعية للأجهزة المخبرية الحديثة ..... **3.**
- جهاز الإشباع الذاتي من نوع AST-300 ..... 3.
- جهاز أشعة (X) المؤتمت للنفوذية النسبية ..... 4.
- جهاز قياس مسامية و نفوذية العينة (CMS-300) ..... 5.
- جهاز قياس الضغط الشعري (الحاجز المسامي) ..... 6.
- جهاز الإشباع ذو الضغط العالي ..... 7.
الفصل الثاني: الصفات الفيزيائية لصخور المكامن النفطية و الغازية و طرق قياسها ..... **9.**
- الصفات الفيزيائية لصخور المكامن النفطية و الغازية ..... 9.
- المسامية ..... 9.
- خاصية التشبع بالسوائل 16
- النفوذية 22
- النفوذية النسبية – أجهزتها و طريقة قياسها 31
- خصائص إزاحة النفط بالماء من الوسط المسامي 41
- العوامل المؤثرة على عامل المردود النفطي لدى إزاحة النفط بالماء من الوسط المسامي ..... 42.
الفصل الثالث: القسم العملي **48**
النتائج والمقترحات ..... 69.
المراجع العلمية ..... 71.

مقدمـــــة

يعتبر النفط المصدر الرئيسي للطاقة في معظم دول العالم و مع تزايد عدد الآبار المحفورة فقد احتلت عمليات استثمار المكامن النفطية و الغازية مكاناً أساسياً ضمن عمليات الصناعة النفطية و الغازية, و ظهرت الحاجة الماسة إلى حل مسائل هامة متعلقة بزيادة عامل المردود النفطي.

من هذا المنطلق, فإن الهدف من بحثنا هذا هو دراسة تأثير اتجاه حقن الماء على إزاحة النفط من الوسط المسامي و من ثم تحديد الحقن الأمثل الذي يعطي أكبر عامل مردود نفطي للمكمن المدروس.

و سنعتمد في عملية التقييم على عامل الإزاحة الذي هو عبارة عن نسبة حجم النفط المستخرج إلى حجم الفراغات المسامية.

سنقوم بهذا البحث بتحديد الخواص الفيزيائية للصخور المكمنية وصولاً إلى قياسات النفوذية النسبية (ماء – نفط) حيث سنقوم بحقن الماء من الأعلى باتجاه الأسفل ثم حقنه بالاتجاه الأفقي ثم حقنه من الأسفل باتجاه الأعلى و من ثم نقوم بحساب عامل الإزاحة عند كل اتجاه حقن و عندها نحدد جهة حقن الماء المثلى التي أعطت أكبر مردود نفطي.

و يتضمن هذا البحث قسمين:

1- **القسم النظري:** الذي يتضمن فصلين:

- **الفصل الأول:** دراسة مرجعية للأجهزة المخبرية الحديثة.
- **الفصل الثاني:**
  - الصفات الفيزيائية للصخور المكمنية.
  - العوامل المؤثرة على إزاحة النفط عند حقن الماء.

2- **القسم العملي** : الذي يتضمن:

الفصل الثالث:

- نتائج قياس و حساب الصفات الفيزيائية للصخور المكمنية.
- النتائج و المقترحات.

الفصل الأول
دراسة مرجعية للأجهزة المخبرية الحديثة

الفصل الأول
دراسة مرجعية للأجهزة المخبرية الحديثة

نقوم في هذا الفصل بعرض مجموعة من الأجهزة المخبرية الحديثة و التي تمَّ التعرف عليها من خلال الدخول إلى شبكة الإنترنت.

تعتمد مبادئ عمل هذه الأجهزة الحديثة على نفس مبادئ عمل الأجهزة القديمة مع اختلاف بسيط و لكن تتميز هذه الأجهزة بسرعة إعطاء البيانات الخاصة بالقياس و ذلك من خلال عرضها على شاشة الحاسوب و برامج تشغيل خاصة بهذا القياس, كما تتميز هذه الأجهزة بالدقة الجيدة.

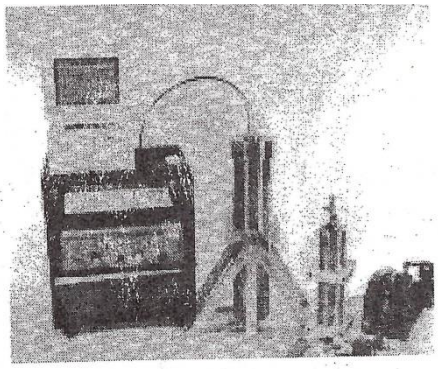
و من الأجهزة المخبرية الحديثة نذكر ما يلي:

1- جهاز الإشباع الذاتي من نوع AST-300:

هذا الجهاز عبارة عن اسطوانة وحيدة يتم التحكم بها عن طريق الحاسوب و ذلك من أجل إشباع العينات التي لها قطر محدد "5 بوصة"

و يتألف الجهاز كما في الشكل رقم (1) من حجرة إشباع و مضخة تفريغ نفرغ من خلالها النظام الذي يتكون من أوعية بلاستيكية ذات حجم ثابت توضع فيها العينات لمدة 4 أو 12 ساعة حسب متوسط نفوذية العينات.

و لكي نضمن الإشباع الكامل للعينات يجب أن نبقيها مغمورة في السائل عند إخراجها من جهاز الإشباع الذاتي.



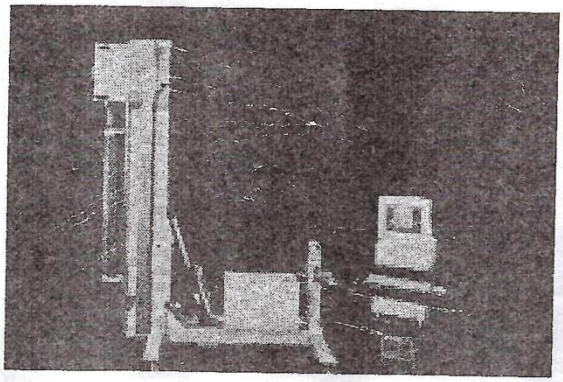
الشكل (١) : جهاز الإشباع الذاتي من نوع AST-300

2- جهاز أشعة (X) المؤتمت للنفوذية النسبية:

يستخدم هذا الجهاز لقياس النفوذية النسبية (ماء – زيت أو غاز – زيت) عند الشروط الطبقية.

يتم في هذا الجهاز الموضح في الشكل رقم (2) تزويد السوائل خلال حامل العينة المسخن. و بوجود جريان لسائلين عند درجات حرارة مرتفعة حتى ($300F^{O}$) و ضغط محدد حتى (1000psi), و يمكن هذا الجهاز من حساب مباشر للنفوذية الطورية " النفوذية الفعالة للطور المحدد" كتابع لمعدل الجريان الفردي للطور المحدد.

و يتم مسح المقطع الأمامي للتدفق المتغير باستمرار و ذلك للتزويد بقياس دقيق و مباشر لإشباع العينات بالماء عند جريان (ماء – زيت), و هذا بدوره يساعد في رسم منحنيات النفوذية النسبية, حيث يمكن الحصول على هذه البيانات من خلال الحاسوب و برامج التشغيل الخاصة بهذا القياس.



الشكل (٢) : جهاز أشعة (X) المؤتمت للنفوذية النسبية

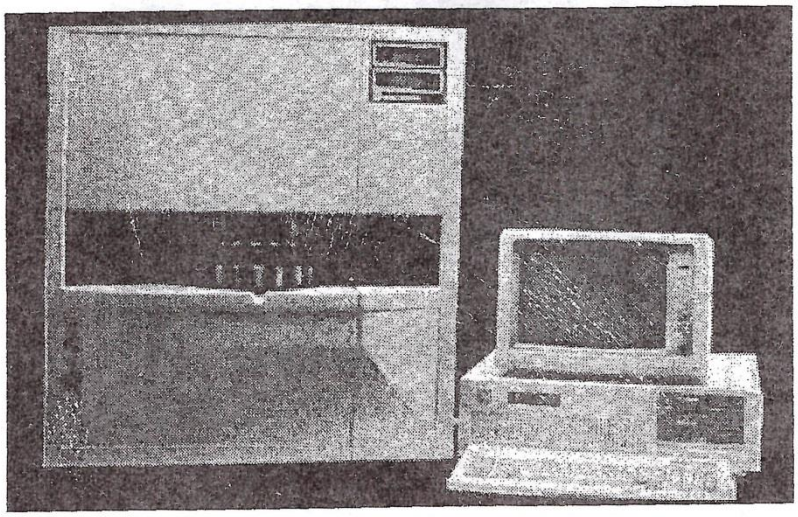
3- جهاز قياس مسامية و نفوذية العينة (CMS-300):

الجهاز مؤتمت و متكامل و يتم التحكم به عن طريق برامج تشغيل خاصة و هو مصمم لقياس مسامية و نفوذية العينات و يمكن من خلاله الحصول على البيانات التالية:

طول العينة – قطر العينة – المسامية – حجم الفراغات المسامية – نفوذية العينات باستخدام الهواء – نفوذية العينات باستخدام السائل – عامل تصحيح الانزلاق للغاز (عامل كلينكنبرغ).

يملك الجهاز الموضح بالشكل رقم (3) دقة عالية فهو يقيس نفوذية العينات التي تتراوح من 0,00005mD حتى 15D و مسامية العينات التي تتراوح من 0,01% حتى 40% و التي يمكن أن يصل عددها في الجهاز حتى 18 عينة.

يستخدم الجهاز (CMS-300) الهليوم كسائل من أجل القياس تحت شروط عمل طبيعية كما تسمح خيارات البرنامج باستخدام النتروجين من أجل تحديد النفوذية باستخدام الغاز.



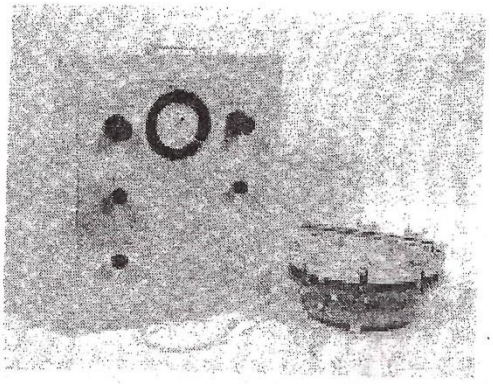
الشكل(٣) : جهاز قياس مسامية ونفوذية العينة (CMS-300)

4- جهاز قياس الضغط الشعري (الحاجز المسامي) :

يستخدم هذا الجهاز من أجل اختبارات الإزاحة الشعرية للزيت / الغاز أو المحلول الملحي/ الهواء.

يتألف الجهاز الموضح بالشكل رقم (4) من خلية الضغط و مجموعة من الأنابيب و مشابك لإغلاق الغطاء و من لوحة التحكم بالضغط و منظم لضغط الهواء و ورق ترشيح و تراب دياتومي.

يزود الجهاز بقرص بورسلين ذو نفوذية ضعيفة من أجل تحديد الإزاحة الشعرية بالنسبة للعينات و يسمح قرص البورسلين بتطبيق ضغوط من 1Bar حتى 15 Bar.

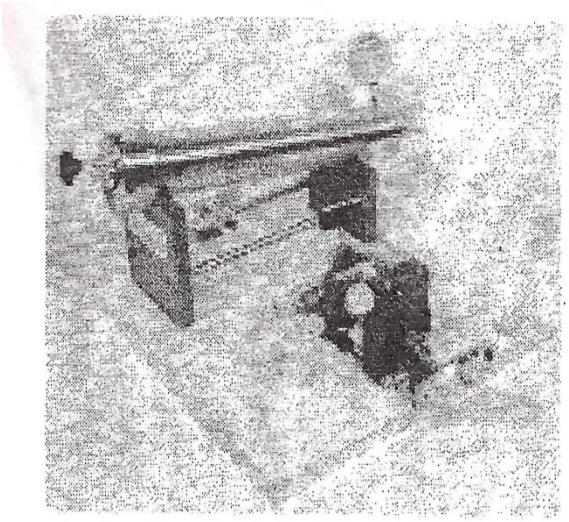


الشكل (٤) : جهاز قياس الضغط الشعري (الحاجز المسامي)

5- جهاز الإشباع ذو الضغط العالي:

الجهاز مصنع من الفولاذ الذي لا يصدأ و يحوي الجهاز الموضح بالشكل رقم (5) مجموعة من الصمامات و أنابيب من الفولاذ و قاعدة و حلقات حجز للعينات كما يزود الجهاز بمضخة أيضاً.

تسمح اسطوانة الفولاذ بإمكانية إشباع العينات تحت الضغط و الذي يتم المحافظة عليه حتى حد أعظمي يساوي 2000psi.



شكل(٥)

جهاز الإشباع ذو الضغط العالي

الفصل الثاني

الصفات الفيزيائية لصخور المكامن

النفطية و الغازية و طرق قياسها

الفصل الثاني

الصفات الفيزيائية لصخور المكامن

النفطية و الغازية و طرق قياسها

إن استثمار الحقول النفطية و الغازية له علاقة كبيرة بعملية ارتشاح السوائل و الغازات الطبقية في الوسط المسامي من الطبقة إلى قاع البئر, حيث تتعلق عملية الارتشاح هذه بكل من الصفات الفيزيائية لصخور المكامن النفطية و الغازية, و صفات السوائل الطبقية و الغازات أيضاً لأن هذه الصفات الفيزيائية المذكورة لها تأثير فعال على إنتاجية الآبار و بالتالي على مردود المكمن, و نتيجة لهذا تتبين أهمية دراسة الخواص الفيزيائية لصخور مكامن النفط و الغاز للتعرف على حركة السوائل و الغازات ضمن الطبقة و تأثير ذلك على مردود إنتاج النفط و الغاز من المكمن.

❖ الصفات الفيزيائية لصخور المكامن النفطية و الغازية:

1) المسامية:

تتوضع الفراغات المسامية لصخر ما بين الحبيبات المؤلفة له و هذه الحبيبات ترتبط مع بعضها البعض بواسطة ملاط إسمنتي يختلف من صخر إلى آخر.

و نميز نوعين من المسامية حسب وضعية الفراغات المسامية:

أ- المسامية المطلقة: و هي عبارة عن نسبة حجم جميع الفراغات المسامية المتصلة و غير المتصلة مع بعضها البعض إلى الحجم الكلي للصخر و تعطى بالعلاقة التالية:

$$\text{المسامية المطلقة} = \frac{\text{حجم الفراغات المسامية}}{\text{حجم الصخر الكلي}} = \frac{\text{حجم الصخر الكلي} - \text{حجم الحبيبات}}{\text{حجم الصخر الكلي}}$$

$$\emptyset = \frac{V_P}{V_t} \times 100 = \frac{V_t - V_s}{V_t} \times 100 = \left(1 - \frac{V_s}{V_t}\right) \times 100$$

حيث:

$\emptyset$: المسامية المطلقة (%).

V_t: الحجم الكلي للعينة الصخرية (cm^3).

V_S: حجم الحبيبات الصخرية (cm^3).

V_P: حجم الفراغات المسامية (cm^3).

كما يمكن تعيين المسامية المطلقة اعتماداً على كثافة العينة و كثافة حبيبات العينة و ذلك باعتبار أن كتلة العينة و كتلة حبيبات هذه العينة متساوية.

$$\emptyset = \left(1 - \frac{V_s}{V_t}\right) \times 100$$

$$V_S = \frac{M_s}{\rho_s}, V_t = \frac{M_t}{\rho_t}$$

من العلاقة السابقة نجد:

$$\emptyset = \left(1 - \frac{\rho_t}{\rho_s}\right) \times 100$$

حيث:

ρ_t, M_t: كتلة و كثافة العينة على الترتيب.

ρ_S, M_s: كتلة و كثافة حبيبات العينة على الترتيب.

ب- المسامية الفعالة: و هي نسبة حجم الفراغات المسامية المتصلة مع بعضها و الحاوية على السوائل الطبقية و التي تتم من خلالها عملية الارتشاح إلى الحجم الكلي للصخر.

و تعطى هذه المسامية بالعلاقة التالية:

$$\emptyset_E = \frac{V_{PE}}{V_t} \times 100$$

حيث:

$\emptyset_E$: المسامية الفعالة (%).

V_{PE}: حجم الفراغات المسامية المتصلة مع بعضها و الحاوية على السوائل الطبقية (cm^3).

كما تقسم المسامية حسب مبدأ تشكلها إلى النوعين التاليين:

1- المسامية الأولية: تتشكل هذه المسامية بين الحبيبات الصلبة المكونة للصخور و ذلك في أثناء عملية الترسيب.

2- المسامية الثانوية: تتشكل هذه المسامية نتيجة عمليات تفتت الصخور و انحلالها أو نتيجة عمليات الدلمتة الممثلة باستبدال شوارد الكالسيوم في الصخر الكلسي بشوارد المغنزيوم الأصغر حجماً من شوارد الكالسيوم و هذا يعطي الصخر مسامية إضافية تضاف إلى المسامية الأولية.

1-1- العوامل المؤثرة على المسامية:

1- شكل و أبعاد حبيبات الصخر:

تكون المسامية عالية بقدر ما تكون حبيبات الصخر متجانسة و متماثلة في الحجم, أما إذا كانت حبيبات الصخر غير متماثلة في الحجم فسوف تتداخل هذه الحبيبات مع بعضها البعض مما يعطي مسامية قليلة.

2- انضغاطية و تراص الصخور:

إن الضغط الذي تشكله مجموعة الصخور التي تعلو الطبقة المدروسة يؤدي إلى نقصان حجم الفراغات المسامية بسبب ازدياد درجة التلاصق بين حبيبات الصخر.

و لوحظ أنه بزوال هذا الضغط تعود الفراغات بين الحبيبات الصخرية لوضعها الأصلي تقريباً قبل تطبيق الضغط عليها لذلك فإن مسامية الصخر تتناقص بازدياد عمق توضعه.

3- أبعاد القنوات المسامية:

تقسم القنوات المسامية اعتماداً على أبعادها إلى:

- قنوات فوق شعرية.
- قنوات شعرية.
- قنوات تحت شعرية.

تعتبر القنوات الشعرية و القنوات فوق الشعرية ذات نفوذية جيدة للسوائل الطبقية في حين تعتبر القنوات تحت الشعرية غير نفوذة أو ذات نفوذية ضعيفة.

4- درجة التماسك و الالتصاق:

تتناقص المسامية كلما زادت درجة التصاق الحبيبات مع بعضها و كذلك نتيجة ازدياد نسبة الملاط الذي يربط حبيبات الصخر مع بعضها البعض.

5- نسبة الغضار بين الحبيبات:

تتناقص المسامية بازدياد نسبة الغضار حيث أن الغضار يتأثر بالسوائل أثناء مرورها و يؤدي ذلك إلى انتفاخ حبيبات الغضار و كبر حجمها الأمر الذي يؤدي إلى إغلاق المسامات جزئياً أو كلياً.

6- تكسير حبيبات الصخر:

الذي يحدث نتيجة زيادة الانضغاطية و خاصة في الأعماق الكبيرة حيث تتكسر و تتهشم الحبيبات الصخرية و تتفكك المواد اللاصقة لهذه الحبيبات و يصبح لها زوايا حادة و تتداخل فيما بينها و بالنتيجة يقل حجم الفراغات المسامية و تقل المسامية.

1-2- الطرق المخبرية المستخدمة في قياس المسامية:

إن جهاز قياس المسامية المتوفر في مخبر فيزياء الطبقة بكلية الهندسة الكيميائية و البترولية هو من تصميم و تصنيع أمريكي و يسمى (جهاز روسكا RUSKA).

و يتم قياس المسامية بواسطة هذا الجهاز بطريقتين:

✓ طريقة الحقن بالزئبق لتحديد حجم الفراغات المسامية (V_P) و حجم العينة الكلية (V_t) و بالتالي حساب المسامية من العلاقة:

$$\emptyset = \frac{V_P}{V_t} \times 100$$

✓ طريقة كوب لتحديد حجم الحبيبات الصلبة المكونة للعينة الصخرية الأسطوانية.

يتم عادة في المخبر قياس المسامية بطريقة كوب لتجنب تخريب العينات أو تلفها نتيجة دخول الزئبق إلى مساماتها.

1-2-1- قياس المسامية بطريقة كوب:

يعتمد مبدأ طريقة كوب على قانون بويل و ماريوت لتحديد حجم الحبيبات الصخرية في العينة المدروسة, حيث يتم قياس حجم الهواء المسحوب عند الضغط الجوي و قياس حجم الهواء المضغوط عند الضغط القياسي.

في هذه الطريقة يقاس حجم الجزء الصلب في العينة الصخرية (V_S) و عندها إذا عرف حجم العينة الكلي فإنه يمكن حساب حجم الفراغات المسامية بسهولة V_P حيث أنه:

$$V_P = V_t - V_S$$

و بالتالي نحصل على المسامية بتطبيق قانون المسامية المطلقة المعطى بالعلاقة التالية:

$$\emptyset = \frac{V_t - V_S}{V_t} \times 100 = \frac{V_P}{V_t} \times 100$$

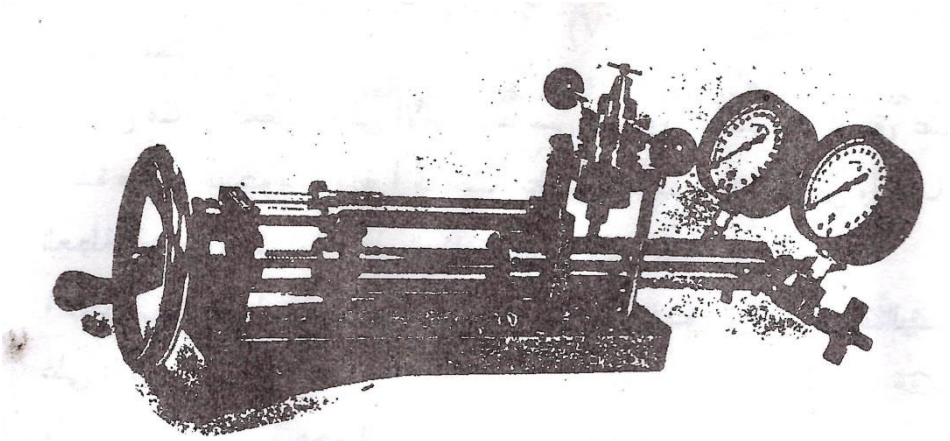
1-3- وصف جهاز قياس المسامية:

يتألف جهاز قياس المسامية كما في الشكل رقم (6) من الأجزاء التالية:

- مضخة مكبسية سعتها $(100cm^3)$ مؤلفة من اسطوانة يتحرك بداخلها مكبس لسحب و دفع الزئبق داخلها.
- حجرة فولاذية تسمى البيكنومتر موصولة بأعلى الأسطوانة, سعة هذه الحجرة تبلغ (

$50cm^3$) و توضع العينة الصخرية بداخلها, و هذا البيكنومتر كزود بغطاء ذي صمام يسمح بوصل الحجرة مع الضغط الجوي.

- مقياسي ضغط مختلفي المجال: مجال المقياس الأيسر يصل حتى (60at) أما مجال القياس الأيمن فيصل حتى (4at).
- مسطرتين مدرجتين: اليمنى مدرجة تراجعياً و تستخدم لتصفير الجهاز و قياس حجم العينة الكلي بطريقة كوب, أما المسطرة اليسرى مدرجة بشكل متوافق مع حركة المكبس و تستخدم لفحص جاهزية الجهاز و قياس حجم الفراغات المسامية بطريقة الحقن بالزئبق.
- عجلة يدوية مقرونة بقرص لقياس مقدار تقدم المكبس حتى 0,01 و مدرج بتدريجتين الأمامية توافق المسطرة اليمنى و الخلفية توافق المسطرة اليسرى.



الشكل (٦) : جهاز قياس المسامية

1-3-1- خطوات قياس المسامية بطريقة كوب:

1-3-1-1- قياس حجم العينة الكلي:

- ✓ يفتح صمام عزل مقياس الضغط المنخفض.
- ✓ يتم التصفير الدقيق للجهاز بحيث يتطابق ظهور قطرة الزئبق عند صمام

قاعدة حجرة العينة مع القراءة (صفر) على المسطرة اليمنى و العجلة اليدوية, و نعيد هذه الخطوة أكثر من مرة حتى نتأكد من تصفير الجهاز بشكل دقيق.

- ✓ يسحب مكبس المضخة للخلف حتى قيمة حجمية بحيث تكون أكبر من حجم العينة الكلي بشكل تقريبي.
- ✓ توضع العينة في حجرة البيكنومتر و يغلق غطاؤه مع إبقاء صمامه مفتوحاً.
- ✓ يدفع مكبس المضخة إلى الأمام حتى ظهور قطرة الزئبق عند قاعدة صمام البيكنومتر و يقرأ الحجم على المسطرة اليمنى و مقياس العجلة اليدوية حيث تمثل هذه القراءة الحجم الكلي للعينة.
- ✓ تكرر هذه العملية عدة مرات حتى تتوافق قراءتان متتاليتان على الأقل.

1-3-1-2- قياس حجم الحبيبات الصخرية:

- يفتح صمام عزل مقياس الضغط المنخفض ثم يتم تصفير الجهاز كما مرَّ سابقاً.
- يسحب المكبس إلى الخلف مع إبقاء صمام البيكنومتر مفتوحاً بحيث يسحب الهواء إلى البيكنومتر و ذلك إلى حجم معين (V_r).
- يغلق صمام البيكنومتر و يرفع الضغط إلى الضغط القياسي (P_r) ثم تؤخذ القراءة و يرمز لها بالرمز (V_f).
- يسحب مكبس المضخة حتى يعود الضغط إلى الضغط الجوي و ذلك حتى تصبح القراءة مساوية لـ (V_r) ثم نفتح صمام حجرة العينة و ندفع المكبس للأمام حتى حجم معين و ليكن ($V`_r$) أقل من الحجم (V_r).
- يسحب مكبس المضخة حتى يعود الضغط إلى الضغط الجوي و ذلك حتى تصبح القراءة مساوية لـ (V_r) ثم نفتح صمام حجرة العينة و ندفع المكبس للأمام حتى حجم معين و ليكن ($V`_r$) أقل من الحجم (V_r), ثم نغلق صمام حجرة

العينة و نرفع الضغط حتى الضغط القياسي (P_r) و نأخذ القراءة المقابلة على المقياس الحجمي و العجلة اليدوية و نرمز لها بالرمز ($V``_f$).

- يسحب مكبس المضخة حتى الحجم (V_r) و يفتح البيكنومتر و توضع العينة المغسولة و المجففة و المراد قياس حجم حبيباتها و يغلق البيكنومتر مرة أخرى ثم يرفع الضغط حتى الضغط القياسي (P_r) و تؤخذ القراءة المقابلة و لتكن ($V`_r$).
- يتم حساب حجم الحبيبات للعينة الصخرية من العلاقة التالية:

$$V_s = \frac{V_r - V`_r}{V_r - V`_r + V``_f - V_f}(V`_f - V_f)$$

و بعد قياس حجم العينة الكلي, عندئذٍ يمكن حساب المسامية بالعلاقة التالية:

$$\emptyset = (1 - \frac{V_s}{V_t}) \times 100$$

حيث:

V_r: حجم الهواء المسحوب عند الضغط الجوي دون وجود العينة في حجرتها و هذا الحجم هو أقل من حجم حجرة العينة و يقابله الحجم V_f عند رفع الضغط إلى الضغط القياسي (P_r).

$V`_r$: حجم الهواء المسحوب عند الضغط الجوي و له قيمة أقل من V_r و يقابله الحجم ($V``_f$) عند الضغط القياسي(P_r).

P_r : الضغط القياسي و يؤخذ عادة $2kgf/cm^2$.

2- خاصية التشبع بالسوائل:

يحتوي الصخر على فراغات حجمها (V_p) و هذه الفراغات لا تكون خالية من السوائل بل تحوي على سوائل مختلفة (ماء, نفط, غاز) بطور واحد أو طورين أو ثلاثة أطوار.

تتوزع هذه السوائل تحت ظروف ضغط و حرارة المكمن بشكل يختلف قليلاً عن حالة توزعها في العينة عند إخراجها من المكمن إلى السطح عند الضغط الجوي و الحرارة العادية.

يعبر عن حجم السوائل الموجودة في الفراغات بنسبة من حجم هذه الفراغات و هذه النسبة تسمى درجة التشبع بالسائل و هي تساوي حجم السائل الموجود في الفراغات منسوباً إلى حجم الفراغات و تؤخذ كنسبة مئوية:

$$S_o = \frac{V_0}{V_p} ؛ S_w = \frac{V_W}{V_p} ؛ S_g = \frac{V_g}{V_p}$$

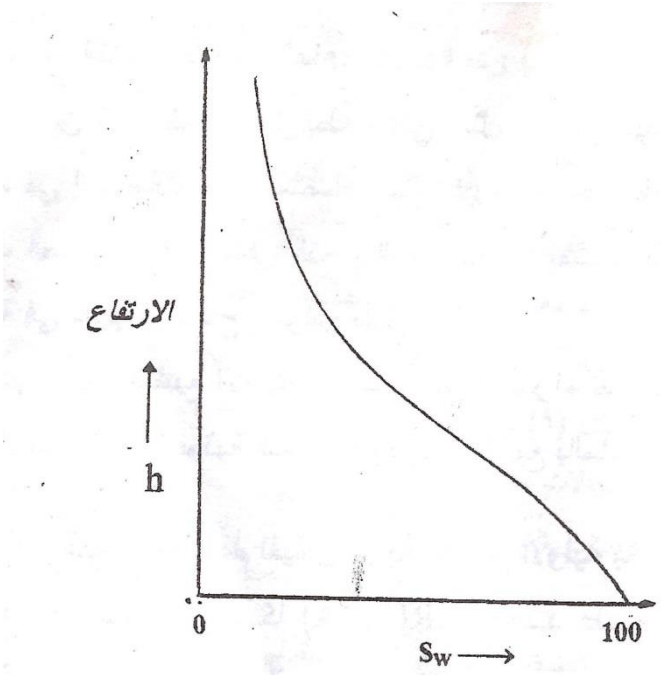
حيث أن V_0 و V_W و V_g هي حجم كل من النفط و الماء و الغاز و يكون مجموعها مساوياً إلى حجم الفراغات أي :

$$V_p = V_0 + V_W + V_g$$

إذاً مجموع درجات التشبع = 100%.

$$S_o + S_w + S_g = \frac{V_o + V_w + V_g}{V_P} = 1 = 100\%$$

عند تمثيل درجة التشبع بالماء بالعلاقة مع الارتفاع كما في الشكل رقم (7) يلاحظ أن درجة التشبع في نفس الطبقة تختلف باختلاف العمق حيث تميل المياه للهبوط إلى الأسفل نتيجة الفرق في الوزن النوعي بينها وبين النفط و الغاز و بالتالي تزداد درجة التشبع بالماء كلما ازداد العمق, و بالتالي ضمن الطبقة يتوضع الغاز في أعلى التركيب ثم النفط و من ثم الماء في الأسفل.



الشكل (٧) :علاقة درجة التشبع بالماء مع الارتفاع

يعود عدم احتفاظ العينات الأسطوانية بدرجة التشبع الأولية للسببين التاليين:

1- يؤثر في أثناء أخذ العينة بطريقة الحفر الطاحوني ضغط عمود سائل الحفر على الطبقة الذي يكون أكبر من الضغط الطبقي و نتيجة هذا الفرق بالضغط سيدخل للطبقة راشح سائل الحفر الذي يعمل على طرد قسماً من النفط و أحياناً قسماً من المياه المترابطة و بالتالي لا نحصل على درجة التشبع الأولية بالسوائل عند القياس.

2- عند رفع العينة إلى السطح سوف يتغير الضغط عليها مما يؤدي إلى تمدد السوائل ضمن العينة و بالتالي فإن درجة التشبع للسوائل الموجودة ضمن العينة عند الشروط السطحية تختلف عن درجة التشبع الأولية في الشروط الطبقية.

2-1- درجة التشبع الأولية بالماء:

هي عبارة عن كمية المياه المترابطة والتي تمثل المياه غير المتحركة الموجودة في المسامات غير المتصلة مع غيرها، كما وتوجد في المسامات الصغيرة وفي أماكن التحام الذرات ولا تشارك هذه المياه المترابطة في عملية ارتشاح السوائل ضمن الطبقة .

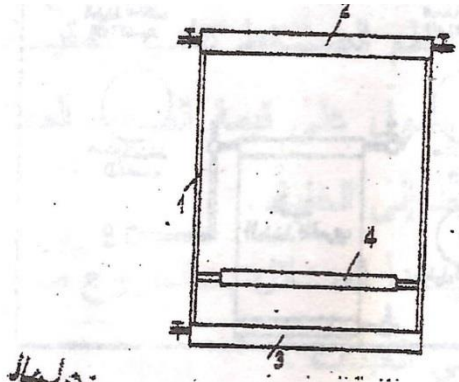
ويفيد تحديد درجة التشبع الأولية بالماء في إجراء حسابات النفوذية النسبية ورسم علاقة النفوذية النسبية مع درجة التشبع بالماء .

٢-١-١- الجهاز المستخدم لقياس درجة التشبع الأولية بالماء:

هذا الجهاز من نوع روسكا (RUSKA) ويعتمد على تطبيق قيم متزايدة للضغط بحيث تتناسب قيم الضغط هذه مع أنصاف أقطار القنوات المسامية ويسمح هذا الجهاز برسم منحنيات تربط ما بين درجة تشبع الفراغات المسامية بسائل ما وبين الضغط ويستفاد من هذه المنحنيات لمعرفة توزع المسامات حسب مقاييسها داخل عينة صخرية معينة, و أيضاً تحديد المنطقة الانتقالية بين النفط و الماء.

و يتألف الجهاز من الأقسام التالية:

- خلية الضغط و هي عبارة عن وعاء اسطواني مصنوع من الفولاذ يتألف من الأجزاء التالية كما في الشكل قم (8).

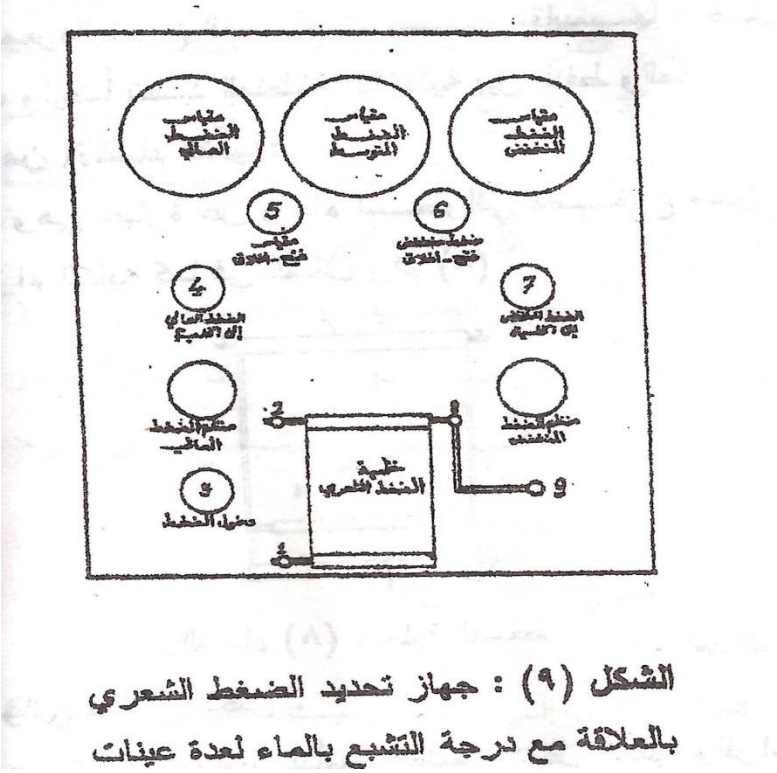


الشكل (٨) : خلية الضغط

1. جدار اسطواني فولاذي ثخين.
2. غطاء علوي مزود بصمامين لتأمين الضغط داخل الخلية و إفراغه.
3. قاعدة سفلية لتثبيت الخلية عليها.
4. حاجز خزفي مثبت بمشابك معدنية و يكون الحاجز مغموراً بالماء لتجنب تبخر الماء الموجود فيه.

- لوحة تأمين الضغط الشكل (9) و التي تتضمن ما يلي:

1. مقاييس ضغط ذوات مجالات مختلفة.
2. صمامات العزل و الوصل لتوجيه جريان الغاز باتجاه الخلية و المقاييس.
3. منظمات الضغط لتأمين الضغط المطلوب على المقياس المحدد.
4. مدخل و مخرج الغاز حيث يوصل مصدر الغاز مع المدخل و خلية الضغط الشعري مع المخرج.



الشكل (٩) : جهاز تحديد الضغط الشعري بالعلاقة مع درجة التشبع بالماء لعدة عينات

2-1-2- خطوات قياس كمية المياه المترابطة:

بعد التأكد من جاهزية الخلية و إشباع العينات الصخرية بالماء و إشباع الحاجز الخزفي يوضع تحت العينات طبقة من الغضار الدياتومي بالإضافة إلى ورقة ترشيح مبللة بالماء و ذلك من أجل الحصول على اتصال شعري و تام و مباشر بين العينة و الحاجز الخزفي, أما خطوات إجراء التجربة فهي كما يلي:

1. يوضع التراب الدياتومي و ورق الترشيح فوق الحاجز الخزفي ثم نضع العينات فوق الحاجز و نغلق الجهاز.

2. تغلق كافة الصمامات الموجودة على الخلية و لوحة التحكم و توصل لوحة التحكم مع الخلية بخرطوم مرن من خلال الصمام (8).
3. يفتح الصمام (3) بهدف إيصال الضغط بلوحة التحكم و ننظم الضغط على مقياس الضغوط العالية و المتوسطة بإدارة المنظم باتجاه عقارب الساعة بحيث تكون قيمة الضغط على المقياس (4psi).
4. نفتح الصمام (6) و ننظم الضغط على المقياس المنخفض بحيث يكون (2psi) و بعد الحصول على قيمة الضغط المطلوبة نفتح الصمام (7) لإيصال هذا الضغط إلى الخلية .
5. نفتح الصمام (8) فيبدأ السائل بالخروج من خلال الصمام (1) نتيجة تأثير الضغط على العينات.
6. عند توقف السائل عن الخروج (حالة تعادل شعري) نغلق الصمام (8) ثم يفتح الصمام (2) لتنفيس الخلية و جعل الضغط فيها مساوياً للضغط الجوي.
7. نفك غطاء الخلية و نستخرج العينات منها و توزن بدقة و بعد وزنها نعيدها إلى الخلية و نغلق الصمام (2).
8. عند الانتهاء من مجال مقياس الضغط المنخفض نغلق الصمامين (6,7).
9. ننظم الضغط بواسطة منظم الضغوط العالية على المقياس الأوسط و عندما نحصل على قيمة الضغط المطلوب نفتح الصمام (4) لإيصال هذا الضغط إلى الخلية, عندئذٍ نفتح لصمام (8) فيبدأ السائل بالخروج من خلال الصمام (1), و عند توقف السائل عن الخروج (حالة تعادل شعري) نعيد الخطوات (6,7).
10. عند الانتهاء من مجال المقياس الأوسط نغلق الصمام (5) و نعيد الخطوة (9) على المقياس الكبير حيث نستمر بتطبيق الضغوط بشكل متزايد حتى القيمة (35psi) و هي قيمة الضغط المسموح بتطبيقه (هذه القيمة تتعلق بما

يسمى ضغط إحلال الحاجز).

بعد الانتهاء من التجربة يتم حساب درجة التشبع بالماء عند الضغوط المطبقة ثم حساب كمية المياه المترابطة (درجة التشبع الأولية بالماء) و ذلك وفق ما يلي:

بفرض: M_1 وزن العينة الجافة.

M_2: وزن العينة و هي مشبعة بالماء.

M_3: وزن العينة بعد كل نقطة قياس.

في هذه الحالة يفترض أن يكون حجم الفراغات المسامية للعينة مساوياً لحجم الماء الكلي:

$$V_p = \frac{M_2 - M_1}{\rho}$$

حيث:

ρ: كثافة الماء المشبعة به العينة و تساوي (1).

حجم الماء المتبقي في العينة بعد كل نقطة قياس :

$$V_{wi} = \frac{M_3 - M_1}{\rho}$$

و بالتالي تكون درجة التشبع بعد كل نقطة قياس:

$$S_{wi} = \frac{V_{wi}}{V_p} = \frac{(M_3 - M_1)/\rho}{(M_2 - M_1)/\rho} \times 100 = \frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \times 100$$

3-النفوذية:

و هي قدرة الصخر على إمرار الموائع إلى قاع البئر لدى وجود فارق ضغط (ΔP) بين الضغط الطبقي و ضغط القاع.

تحوي الطبقة غالباً نوعين أو ثلاث من الموائع التي تمر ضمن القنوات المسامية (نفط – ماء – غاز) و اعتماداً على ذلك تختلف النفوذية لكل مائع من هذه الموائع أثناء ارتشاحها ضمن الوسط المسامي.

لذا تقسم النفوذية إلى الأنواع الرئيسية التالية:

- النفوذية المطلقة: هي نفوذية الصخر لدى إمرار مادة واحدة ضمنه ذات صفات كيميائية خاملة غير قابلة للتفاعل مع الصخر, و يرمز لهذه النفوذية بالرمز (K).
- النفوذية الفعالة: هي نفوذية الصخر لدى إمرار أكثر من طور ضمنه و يرمز لها (K_g,K_w,K_o).
- النفوذية النسبية: هي نسبة النفوذية الفعالة إلى النفوذية المطلقة.

$$\overline{K_w} = \frac{K_w}{K} \quad , \qquad \overline{K_o} = \frac{K_o}{K} \quad , \qquad \overline{K_g} = \frac{K_g}{K}$$

إن معامل النفوذية له واحدة السطح و هذا يعلل فيزيائياً بأن عملية الارتشاح تتم ضمن سطح مقطع قنوات الوسط المسامي, و نظراً لصغر أبعاد الفراغات المسامية استبدلت هذه الواحدة (واحدة السطح m^2) بواحدة تدعى بالدارسي (D) و التي تعرّف كما يلي:

الدارسي: هي نفوذية وسط مسامي لعينة ما طولها 1cm و مساحة مقطعها $1cm^2$ يمرر من خلالها بزمن قدره ثانية واحدة كمية $1cm^3$ من السائل لزوجته 1سنتي بواز عند فارق ضغط يساوي 1 جو.

هناك طبقات تختلف فيها النفوذية العمودية عن النفوذية الأفقية و تسمى هذه الطبقات بالطبقات غير المتجانسة بالنسبة للنفوذية, و تعيين النفوذية العمودية و الأفقية ضروري جداً و ذلك لتحديد أمكنة تثقيب مواسير التغليف و كيفية توزيع آبار الحقن.

3-1- العوامل المؤثرة على قياس النفوذية المطلقة:

- تأثير انزلاق الغاز (تأثير كلينكنبرغ): تكون النفوذية المطلقة باستخدام الغاز بشكل عام أكبر منها باستخدام السوائل بسبب أن للغاز درجة انزلاق عند جدران الأنبوبة أو الفراغ الذي يمر فيه لا تساوي الصفر, بينما تكون سرعة السائل مساوية للصفر عند جدران الأنبوبة و تكون عظمى عند مركز الفراغ الذي يمر

فيه السائل, و يحدث انزلاق الغاز بشكل كبير في الفراغات.

يتأثر انزلاق الغاز بالضغط المتوسط و نوع الصخر و يحدث الانزلاق أكثر عندما تكون الفراغات ضيقة أي أن المسار الحر لجزيئات الغاز صغير حيث أن الغاز يكون على وشك أن يحبس فينزلق و يمر من خلال الفتحات الضيقة, كذلك على الطاقة الموجودة في الغاز و التي تؤدي إلى انزلاقه و حركته.

- نسبة سائل الحفر: تملك الطفلة عدداً كبيراً من المواد التي لها خاصية التأين و قابلية امتصاص الماء داخل تركيبها فيزداد حجمها و تسبب ما يسمى بانتفاخ الطفلة و بالتالي يقل حجم الفراغات الإنتاجية مع الزمن نتيجة نقص النفوذية.
- السوائل المتفاعلة: يؤدي تفاعل هذه السوائل مع الصخر أو مع سوائل الطبقة إلى إحداث تغيير في التركيب الهندسي للحبيبات و الفراغات و يحصل تغير النفوذية إما بالزيادة نتيجة لتآكل الحبيبات و زيادة حجم الفراغات كما يحدث في أثناء عملية التحميض لزيادة نفوذية الطبقة المنتجة أو النقصان نتيجة ترسب بعض المواد ضمن فراغات الطبقة.
- وزن عمود الطبقات فوق الطبقة المقاسة لها النفوذية: يرافق إخراج العينات إلى السطح تغير في ضغطها من الضغط الطبقي إلى الضغط الجوي و يؤدي ذلك إلى تمدد كل من حبيبات الصخر و كذلك السوائل الموجودة بها و هذا يؤدي إلى تغير نفوذية الصخر.
- أبعاد الحبيبات: يتناسب معدل الجريان مع مربع نصف قطر الحبيبات و كذلك النفوذية التي لها واحدة السطح و بالتالي فإن الصخر ذو الحبيبات و الفراغات الصغيرة له نفوذية أصغر من نفوذية الصخر ذي الحبيبات و الفراغات الكبيرة.
- نظم الترابط بين الحبيبات: تقل النفوذية بازدياد درجة الترابط بين الحبيبات.

3-2- قياس النفوذية المطلقة:

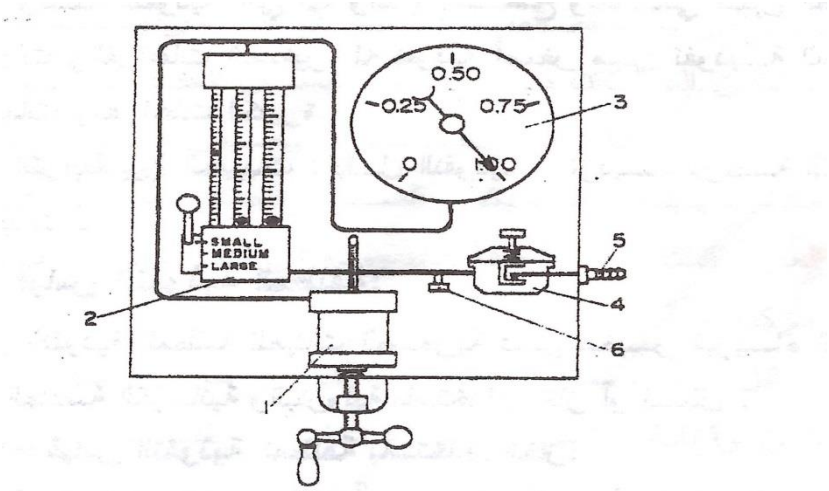
يتم قياس النفوذية المطلقة للعينات الصخرية في مخبر فيزياء الطبقة في كلية الهندسة الكيميائية و البترولية باستخدام الغاز أو السائل.

3-2-1- قياس النفوذية المطلقة باستخدام الغاز:

يعتمد مبدأ هذه الطريقة على قياس تدفق الغاز عبر عينة جافة ذات طول و مقطع معروفين و ذلك لدى تمرير غاز ذي لزوجة معينة من خلال هذه العينة و ذلك عند حرارة معينة عند تطبيق فارق الضغط المناسب.

- الجهاز المستخدم: هذا الجهاز هو من نوع روسكا (RUSKA) و يتألف من الأقسام التالية كما في الشكل رقم (10):

1. حامل العينة مزود بغطاء سفلي يحوي ثقوباً و مزود بميزان حرارة لمعرفة حرارة الغاز الذي يمر عبر العينة.
2. ثلاثة أنابيب متدرجة في القطر: تحدد عن طريق مفتاح له ثلاثة مجالات متناسبة مع أقطار هذه الأنابيب.
3. مقياس ضغط مرتبط بالأنابيب لقياس فرق الضغط.
4. منظم ضغط يتصل بالمصدر الغازي لوضع الضغط على المجال المحدد.
5. بزال بين الحامل و منظم الضغط يسمح بتسريب كمية صغيرة من الغاز إلى الجو مما يسمح بتنظيم الضغط و تعديله بدقة.



الشكل(١٠) : جهاز قياس النفوذية المطلقة باستخدام الغاز

- طريقة إجراء القياس:

1. تغسل العينة الاسطوانية المراد قياس نفوذيتها و تجفف.
2. توضع العينة ضمن اسطوانة مطاطية قطرها الداخلي يساوي القطر الخارجي للعينة, ثم توضع هذه الاسطوانة المطاطية الحاوية على العينة ضمن حامل العينة و تثبت بإحكام.
3. يدرا صمام الاختبار إلى الأنبوب ذي المقياس الكبير.
4. يفتح صمام اسطوانة مصدر الغاز و يعدل بواسطة منظم الضغط حتى نصل إلى ضغط مقداره (0,25at) على مقياس الضغط, و عندها يجب أن يكون ارتفاع الفواشة ضمن المجال (140/20) تدريجة لأن هذا المجال يؤمن استقرار الجريان بشكل أفضل.
5. إذا كان ارتفاع الفواشة أقل من المجال المذكور فإنه يدار صمام الاختبار إلى الأنبوب ذي المقياس المتوسط و يرفع الضغط حتى القيمة (0,5at) فإذا لم ترتفع الفواشة إلى قيمة تقع ضمن المجال المذكور سابقاً فإنه يتم تدوير صمام الاختبار إلى الأنبوب ذي المقياس الصغير و يرفع الضغط إلى القيمة (1at) و يؤخذ ارتفاع الفواشة و تجرى الحسابات اللازمة بعد

معرفة الكمية الحجمية الوسطية من الغاز.

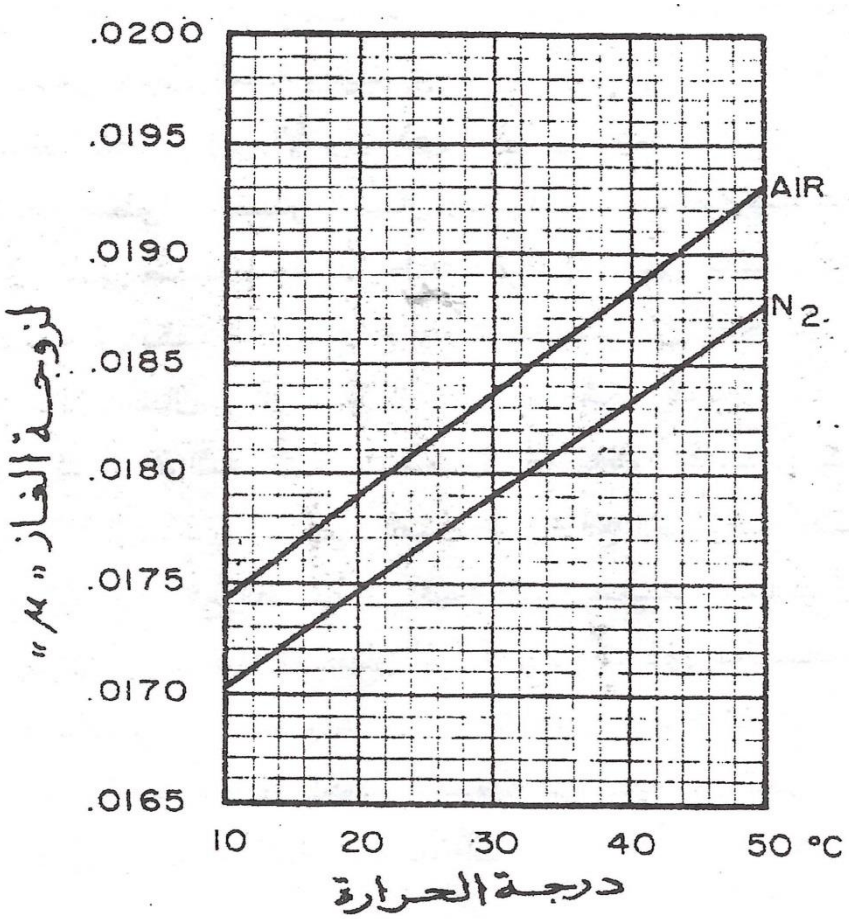
6. يتم حساب النفوذية المطلقة بالمعادلة التالية:

$$K = \frac{\overline{Q_g}.\mu_g.L}{F.\Delta P}$$

حيث:

K: النفوذية المطلقة بالدارسي(D).

μ_g: لزوجة الغاز بالسنتي بواز (CP) و يتم الحصول عليها من المنحني الموضح في الشكل رقم (11) الذي يربط بين درجة الحرارة و لزوجة الغاز المستخدم.



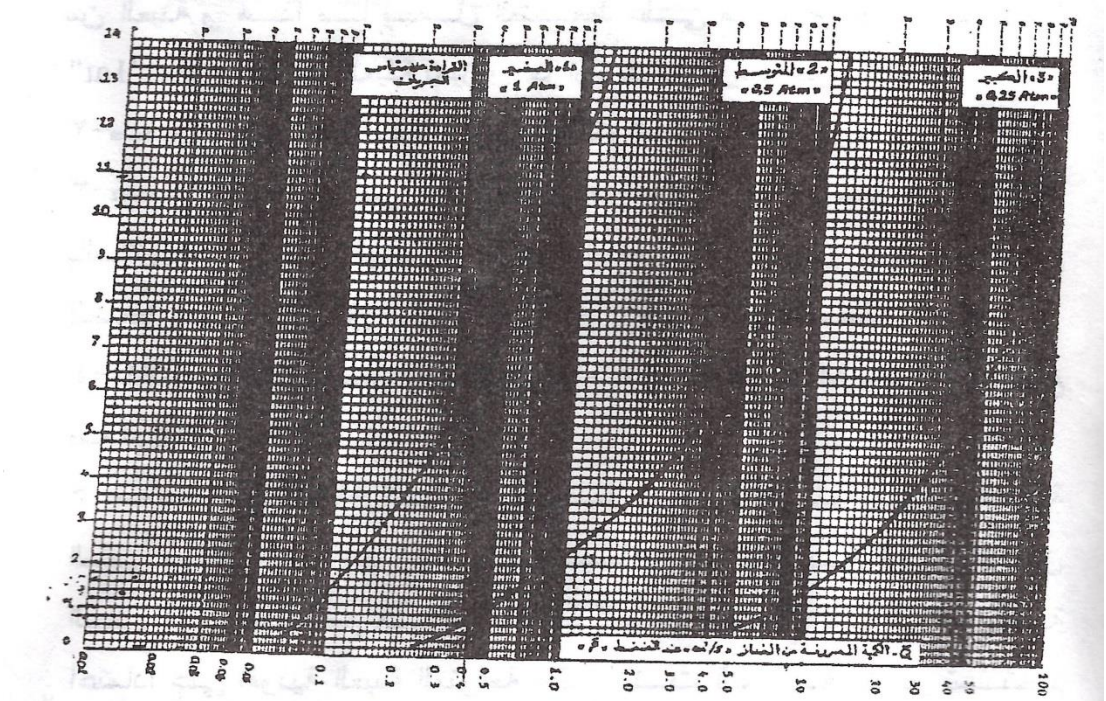
الشكل (١١) : علاقة لزوجة الغاز بدرجة الحرارة

$\overline{Q_g}$: الكمية الحجمية الوسطية من الغاز cm^3/s و نحصل عليها من المنحني الموضح بالشكل رقم (12) الذي يربط بينها و بين مقدار ارتفاع الفواشة مع الأخذ بعين الاعتبار مقياس الجريان و تؤخذ القيمة الوسطية بسبب تذبذب الضغط على مدخل العينة.

L: طول العينة (cm).

ΔP: فاقد الضغط يؤخذ من مقياس الضغط (at).

F: مساحة سطح مقطع العينة (cm^2).



الشكل (١٢) : الكمية الحجمية الوسطية المصروفة من الغاز بالعلاقة مع القراءة على أنابيب الجريان الثلاثة لمقياس الجريان

3-2-2- قياس النفوذية المطلقة باستخدام السائل:

يعتمد مبدأ هذه الطريقة على قياس الزمن اللازم لمرور كمية محددة من السائل عبر عينة مشبعة بنفس السائل عند ضغط و درجة حرارة محددين.

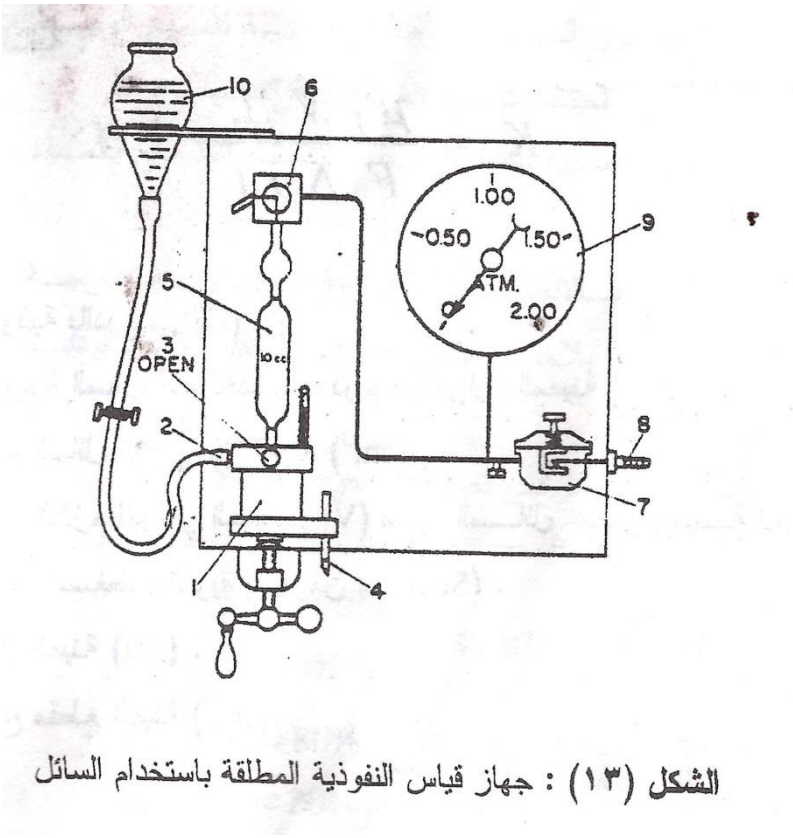
i. الجهاز مستخدم : و هو من نوع روسكا (RUSKA) و يتألف من الأقسام التالية كما في الشكل (13):

- ✓ ماسك العينة له من الأسفل غطاء يتصل مع أنبوب السائل الخراج من العينة و هذا ما يجعل الضغط على مخرج العينة مساوياً (1at), و يزود ماسك العينة بميزان حرارة لقياس درجة حرارة السائل.

- ✓ صمام موجود أعلى حامل العينة لإملاء السحاحة بالسائل.
- ✓ صمام تفريغ الغاز في أعلى السحاحة, يفتح أثناء ملء السحاحة بالسائل حتى يطرد الهواء, فيتعادل الضغط داخل السحاحة مع الضغط الجوي, و يغلق صمام التفريغ هذا أثناء تطبيق الضغط.
- ✓ منظم ضغط الغاز و مقياس الضغط Manometer يتصلان مع صمام التفريغ.
- ✓ سحاحة عليها انتفاخ كروي, تتصل هذا السحاحة من الناحية السفلى بحامل العينة و من الناحية العليا بصمام تفريغ الغاز فوق السائل الذي يتصل مع منظم ضغط الغاز, و يتم تبديل السحاحة اعتماداً على نفوذية العينة المتوقعة فكلما كانت النفوذية أكبر تستخدم سحاحة بحجم أكبر.

ii. طريقة القياس:

- ✓ تغسل العينة الصخرية و تجفف و توزن.
- ✓ تشبع العينة بالسائل المراد قياس النفوذية به تحت التخلية حيث يجب أن يكون السائل خامل كيميائياً و لا يتفاعل مع العينة ثم يتم وزن العينة بعد الإشباع (سنتكلم عن كيفية إشباع العينات بشكل مفصل في القسم العملي).
- ✓ نضع العينة داخل ماسك العينة و تحكم بشكل جيد.



الشكل (١٣) : جهاز قياس النفوذية المطلقة باستخدام السائل

- ✓ نفتح صمام الملء و صمام التفريغ ليتم ملء السحاحة بالسائل حتى الانتفاخ العلوي الموجود أعلى السحاحة ثم نغلق كل من صمام الملء و صمام التفريغ.
- ✓ يطبق الضغط بعد تعديله بالمنظم بحيث تسمح سرعة هبوط السائل بأخذ الزمن بشكل دقيق.
- ✓ نغلق الصمام العلوي فيبدأ السائل في السحاحة بالهبوط و عند وصول سطح السائل إلى الإشارة العليا يشغل عداد الزمن ثم يوقف عداد الزمن في لحظة وصول سطح السائل إلى الإشارة السفلى و يسجل الزمن, عندها يتم حساب النفوذية المطلقة بالسائل من العلاقة التالية:

$$K = \frac{\mu_L . V . L}{F . \Delta P . t}$$

حيث:

K: النفوذية بالدارسي (D).

μ_L: لزوجة السائل المستخدم عند درجة الحرارة المعينة (CP).

V: حجم السائل الذي يعبر العينة (cm^3).

t: الزمن اللازم لمرور الحجم (V) من السائل عبر العينة تحت تأثير فارق الضغط (ΔP)و يقدر الزمن بـ (Sec).

L: طول العينة (cm).

F: سطح مقطع العينة (cm^2).

4- النفوذية النسبية, أجهزتها و طريقة قياسها:

غالباً ما تحوي صخور المكامن النفطية بنفس الوقت مادتين أو ثلاث مواد في حالة جريان مع بعضها, حيث أن نفوذية الصخر في أثناء عملية الجريان لمادة ما من هذه المواد ستكون أصغر من النفوذية المطلقة.

أظهرت الدراسات و الأبحاث المستمرة أن النفوذية الفعالة و النفوذية النسبية لعدة مواد لها علاقة كبيرة بدرجة تشبع الفراغات المسامية بالماء و بالصفات الفيزيائية و الكيميائية للسوائل و الوسط المسامي.

يتم تمثيل نتائج جريان النفط و الماء أو الغاز و النفط على شكل منحنيات بيانية فعلى محور السينات توضع درجة تشبع الوسط المسامي بالماء و على محور العينات توضع قيم النفوذية النسبية.

لندرس مثلاً علاقة النفوذية النسبية للنفط و الماء بدرجة التشبع بالماء لصخر ما:

لدى تخفيض درجة التشبع بالنفط حتى 20% و بالتالي زيادة درجة التشبع بالماء حتى 80% فإنه يلاحظ من المنحني انخفاض النفوذية النسبية للنفط حتى القيمة صفر.

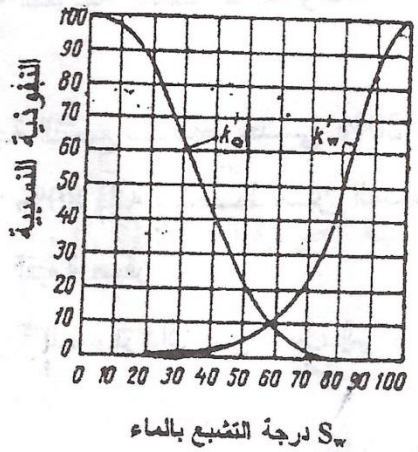
بينما النفوذية النسبية للماء تزداد حتى تصل إلى حوالي 52%.

$$\left.\begin{matrix} S_w = 100\% \\ S_o = 0\% \end{matrix}\right\} \overline{K_o} = 0\,,\overline{K_w} = 1$$

$$\left.\begin{matrix} S_w = 80\% \\ S_o = 20\% \end{matrix}\right\} \overline{K_o} = 0\,, \overline{K_w} = 0{,}52$$

تسمى درجة التشبع بالنفط 20% بدرجة التشبع بالنفط المتبقي لأن النفط سوف يتماسك تماسكاً قوياً مع الصخر بسبب تأثير القوى الشعرية عليه.

بينما تسمى درجة التشبع بالماء 20% بدرجة التشبع بالمياه الأولية (المياه المترابطة, حيث أن المياه في هذه الحالة تكون غير قادرة على الحركة لأنها موجودة في المسامات المسدودة و غير المتصلة مع غيرها و في أماكن التحام الذرات فيما بينها حيث لا تشارك هذه المياه في عملية الارتشاح الشكل (14).



الشكل (١٤) : علاقة النفوذية النسبية بدرجة التشبع بالماء

4-1- العوامل المؤثرة على النفوذية النسبية (ماء – نفط):

تعرّف النفوذية النسبية بأنها النسبة بين النفوذية الفعالة و النفوذية المطلقة و تتأثر النفوذية الفعالة في حال جريان النفط و الماء بمعدل جريان كل منهما و بالتالي فإن كمية الجريان النسبية لكل من الماء و النفط تحدد بواسطة نفوذيتها النسبية.

$$\overline{K_w} = \frac{K_w}{K} \qquad\qquad \overline{K_o} = \frac{K_o}{K}$$

تعطى إنتاجية الماء و النفط بالعلاقات التالية:

$$q_w = \frac{K_w . F . \Delta P}{\mu_w . L}$$

$$q_o = \frac{K_o . F . \Delta P}{\mu_o . L}$$

$$\frac{q_w}{q_0} = \frac{\frac{K_w . F . \Delta P}{\mu_w . L}}{\frac{K_o . F . \Delta P}{\mu_o . L}} = \frac{\frac{K_w}{\mu_w}}{\frac{K_o}{\mu_o}} = \frac{K_w}{K_o} \times \frac{\mu_o}{\mu_w}$$

K_w: النفوذية الفعالة للماء.

K_o: النفوذية الفعالة للنفط.

$\frac{\frac{K_w}{\mu_w}}{\frac{K_o}{\mu_o}}$: عامل حركية الماء و النفط على الترتيب.

$\frac{q_w}{q_0}$: عامل الإنتاجية النسبي.

نلاحظ أن نسبة لزوجة النفط إلى لزوجة الماء $\frac{\mu_o}{\mu_w}$ تؤثر على النفوذية النسبية و يكون هذا التأثير كبير في الصخور ذات النفوذية المطلقة المنخفضة بينما يكون ضئيلاً في الصخور ذات النفوذية الكبيرة, لذلك يجب تغيير مواصفات الطبقة بحيث تزيد من حركية النفط نسبة إلى حركية الماء و نخفض من التصاق السائل بجدران القنوات المسامية للنفط بهذا الوسط المسامي ستزداد نتيجة ازدياد النفوذية الفعالة للنفط.

نتيجة الأبحاث و التجارب المستمرة تم التوصل إلى أن النفوذية النسبية لا تتعلق فقط بدرجة التشبع بالماء و إنما بعوامل أخرى مثل تدرج الضغط و

خاصية التبلل و بالتوتر السطحي كذلك توصل الباحث إفروس (EFROS) إلى أنه بالإضافة إلى تساوي خاصية التبلل θ و المسامية $\emptyset$ عند الشروط الطبقية و المخبرية فإنه يجب تحقيق الشرط التالي:

$$\left[\frac{\sigma}{k/grad\ p/}\right]_{Mod} = \left[\frac{\sigma}{k/grad\ p/}\right]_{Nat}$$

σ: التوتر السطحي على الحد الفاصل بين النفط و الماء.

k: النفوذية المطلقة.

$grad\ p$: تدرج الضغط.

لكي تتحقق هذه المعادلة في المخبر لا يحق لنا استعمال نفط ميت و ذلك لتأثره بالظروف الخارجية التي تؤثر على تركيبه, لأن للنفط الطبقي كثافة و لزوجة و قوة توتر سطحي معينة في مثل هذه الحالة يتم أخذ نفط سطحي و يضاف بنسبة (6/%8) إلى الكيروسين و تخفض قوة التوتر السطحي إلى القيمة المطلوبة حتى تتساوى قوة التوتر السطحي للنفط المحضر مع قوة التوتر السطحي للنفط الطبقي ثم نضيف زيت خاص (زيت السيليكون) لزيادة لزوجة المزيج دون التأثير على قوة التوتر السطحي و يضاف هذا الزيت الخاص من أجل الوصول إلى لزوجة النفط المطلوبة و ذلك لأن لزوجة الكيروسين منخفضة.

يضاف النفط إلى الكيروسين و ليس العكس لأنه عند إضافة الكيروسين إلى النفط (علماً أن σ الكيروسين أكبر من σ النفط) فإننا نحتاج إلى كمية كبيرة من الكيروسين لتخفيض لزوجة النفط السطحي و بالتالي ترتفع σ للنفط ارتفاعاً

ملحوظاً لذلك فإن النفط يضاف إلى الكيروسين و ذلك للحصول على النفط المطلوب الذي يحقق معادلة إفروس (EFROS).

و هكذا نجد أنه أثناء حركة النفط و الماء في الوسط المسامي فإن نسبة إنتاجية الماء إلى إنتاجية النفط $(\frac{q_w}{q_o})$ لا تعين فقط بواسطة النفوذية النسبية و إنما أيضاً بعلاقة لزوجة النفط و الماء $(\frac{\mu_o}{\mu_w})$.

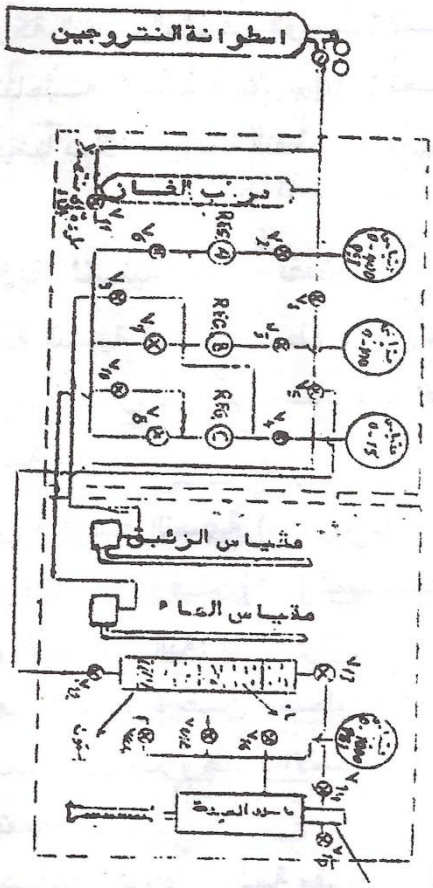
4-2- قياس النفوذية النسبية (ماء – نفط):

يعتمد مبدأ قياس النفوذية النسبية (ماء – نفط) على حقن الماء على مدخل عينة مشبعة بالنفط و قياس حجم الماء و النفط الخارجين من العينة خلال فترات زمنية معينة.

4-2-1- جهاز قياس النفوذية النسبية (ماء – نفط):

يتألف الجهاز الموضح في الشكل رقم (15) المستخدم لقياس النفوذية النسبية (ماء – نفط) من الأجزاء التالية:

- مصدر للضغط: و هو عبارة عن اسطوانة نتروجين أو ضاغط هوائي مزود بصمام و منظم و هذه الاسطوانة ذات جدار ثخين لتتحمل الضغوط المرتفعة.
- وحدة التحكم بالضغط: و تحوي ثلاثة مقاييس للضغط و مجموعة من الصمامات و المنظمات للضغط, حيث تستخدم الصمامات للتحكم باتجاه جريان الغاز و تستخدم المنظمات لتطبيق الضغط المطلوب على المقياس المحدد.



الشكل(١٥): مخطط جهاز قياس النفوذية النسبية (ماء – نفط)

أما في الجهة الخلفية فيوجد اسطوانة مملوءة لمنتصفها بالماء تقوم بترطيب الغاز المار من خلالها و ذلك بهدف تفادي سحب أية كمية من السائل المشبعة به العينة.

- وحدة ماسك العينة: تتكون من الأجزاء التالية:

✓ ماسك العينة: عبارة عن اسطوانة فولاذية خارجية تحوي بداخلها اسطوانة فولاذية تحوي مجموعة من الثقوب يوضع بداخلها جوان مطاطي الذي توضع العينات المدروسة بداخله.

✓ مقياس للضغط مع مجموعة من الصمامات للتحكم بالضغط

المطبق على ماسك العينة: صمام تأمين الضغط حول العينة, صمام التصريف, صمام التفريغ.

✓ مقياس الضغط المنخفض: الأول مائي و الثاني زئبقي.

✓ تثبت من الجهة الخلفية لوحدة ماسك العينة اسطوانتان: الأولى لتأمين الضغط حول العينة بواسطة الماء و الثانية مكبسية كبيرة تحوي الماء لحقنه داخل العينة و إزاحة النفط منها.

- أنابيب اختبار مدرجة بدقة: تستخدم في قياس حجم الماء و الزيت الخارجان من العينة.

4-2-2- تحضير العينة للاختبار(ماء – نفط):

يتضمن تحضير العينة الاسطوانية الخطوات التالية:

- غسل العينة بالمذيبات و تجفيفها و وزنها و هي جافة.
- تقاس مسامية العينة و نفوذيتها المطلقة بالغاز ثم توزن بعد القياس.
- تشبع العينة بالماء و تحدد كمية المياه المترابطة.
- يتم إشباع العينة بالنفط بشكل جيد ثم يتم تحديد النفوذية المطلقة باستخدام النفط و توزن العينة المشبعة بالنفط.
- عن طريق الأوزان يحسب حجم السائل الداخل إلى العينة الذي يقارن مع حجم الفراغات المسامية المقاس بجهاز قياس المسامية و بالتالي يمكن التأكد من إشباع العينة بشكل جيد و عند تساوي حجم النفط مع حجم الفراغات المسامية تكون العينة قد أشبعت تماماً بالنفط.

4-2-3- الخطوات العملية لقياس النفوذية النسبية (ماء – نفط):

بعد تحضير الجهاز بشكل دقيق و تحضير العينة نقوم بما يلي:

1. نعين ضغط الجريان (P_1) المراد تطبيقه على العينة حيث P_1 هو الضغط المطبق على مدخل العينة لإزاحة النفط منها.
2. توضع العينة داخل الماسك بعد التحضيرات اللازمة للماسك و ذلك بعد وضعه بشكل عمودي و تحضير الرأس المعدني (الفولاذي).
3. نطبق حول العينة ضغط بمقدار ($200+P_1$) لتثبيت العينة.
4. نطبق ضغط الجريان على لوحة التحكم بالضغط.
5. نضع أسفل ماسك العينة أنبوب مدرج ذو حجم ($2cm^3$) و ننتظر حتى ظهور أول قطرة نفط و ذلك نتيجة تطبيق ضغط الجريان عندئذٍ نبدأ بقياس الزمن و ننتظر حتى خروج آخر قطرة ثم نقرأ الزمن مباشرة.
6. يتم استبدال الأنبوب بآخر ذو حجم ($2cm^3$) بعد امتلائه حتى ($1,75cm^3$) مع قراءة الزمن ثم نسجل رقم الأنبوب و الزمن.
7. نكرر عملية استبدال الأنابيب بحجوم متزايدة مع قراءة الزمن التراكمي عند كل عملية تبديل و نستمر بالتجربة حتى تصبح نسبة الماء إلى النفط أكبر من 100 أي :

$$(V_w/V_o) \geq 100$$

8. نترك الأنابيب حتى يتم فصل النفط عن الماء و نأخذ حجم كل من النفط و الماء في كل أنبوب ثم تحول هذه الحجوم إلى حجوم تراكمية عند إجراء الحسابات التي سنجريها في القسم العملي من هذا البحث.

ملاحظة:

يتم تعيين ضغط الجريان الذي يجب تطبيقه على مدخل العينة بواسطة المنحني الخاص الذي يربط بين ضغط الجريان و النفوذية المطلقة باستخدام الغاز حيث تحسب النسبة بين النفوذية المطلقة بالغاز و بالسائل و بناءً على هذه النسبة يتم اختيار المنحني المستخدم من المنحنيات الثلاثة الموجودة في الشكل حيث تقرأ قيمة النفوذية بالغاز على محور السينات و منها يرفع عمود فيلاقي المنحني المختار ثم نسقط من نقطة التلاقي على محور العينات فنقرأ قيمة ضغط الجريان (P_1) ثم تضرب القيمة الناتجة بـ (2).

5- خصائص إزاحة النفط بالماء من الوسط المسامي:

تتم إزاحة النفط بالماء من الوسط المسامي عند وجود مياه جانبية فعالة لها مصدر تغذية من السطح أو من خلال المياه المحقونة ضمن آبار الحقن.

يتحرك النفط و المادة المزيحة له (الماء) سوية في الوسط المسامي, و لكن لا يحدث أبداً إزاحة كاملة للنفط بواسطة المادة المزيحة و إنما إزاحة جزئية لأن هذه المادة المزيحة لا تؤثر على النفط بشكل إزاحة مكبسية.

نتيجة لعدم تجانس مقاييس المسامية فإنه لدى سير عملية توضع المادة المزيحة ذات اللزوجة الصغيرة مكان النفط لإزاحته من الطبقة باتجاه الآبار فإنه لا بد من أن تسبق المادة المزيحة للنفط أثناء الجريان, و هذا يؤدي إلى تغير النفوذية الفعالة للنفط و للمادة المزيحة باستمرار.

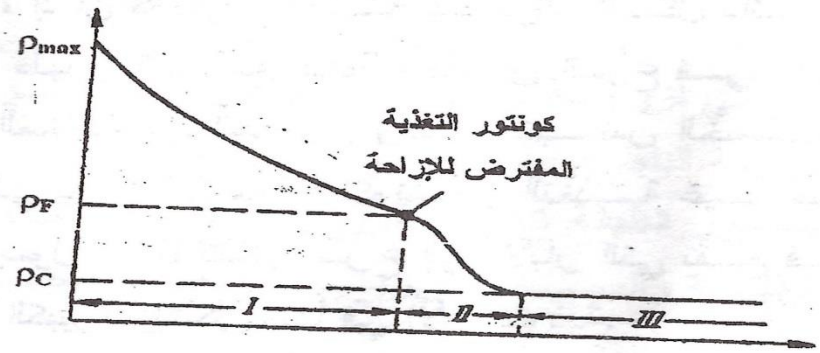
في الطبقات التي تبدي عدم تجانس لدرجة كبيرة فإن المياه تقوم بالتغلغل و العبور إلى الآبار الإنتاجية و ذلك من خلال المجالات عالية النفوذية و التي

تؤدي إلى إبقاء كميات كبيرة من النفط ضمن الفراغات المسامية ذات النفوذية الضعيفة و يمكن أن تحصل هذه الحالة ضمن الطبقات التي تبدي تجانس, و يعود ذلك لعدم استقرار جبهة الإزاحة, كل هذا يؤدي إلى إزاحة النفط من المجالات العالية النفوذية و بقاء المجالات القليلة النفوذية مشبعة بالنفط.

إن الصورة الحقيقية لتغير درجة التشبع بالماء على طول العينة في لحظة من الزمن لدى إزاحة النفط بالماء موضحة بالشكل رقم (16):

نلاحظ من الشكل وجود ثلاث مناطق ضمن الطبقة و هي:

- **المنطقة الأولى(I):** تتغير فيها درجة التشبع بالماء من $S_W \leftarrow S_{Wmax}$ حيث تنخفض درجة التشبع بالماء على كونتور التغذية المفترض للإزاحة بشكل معتدل باتجاه الجزء المشبع بالنفط من الطبقة الذي تتم فيه إزاحة النفط بتدرج بعد خضوعه لعمليات غسل متكررة من قبل الماء.
- **المنطقة الثانية (II):** حيث يصبح المنحني شديد الميلان, و تسمى هذه المنطقة بالمنطقة الانتقالية و تنخفض فيها درجة التشبع بالماء من $S_{wc} \leftarrow S_{wf}$.
- **المنطقة الثالثة (III):** و تسمى بالمنطقة الثابتة حيث يتحرك من خلالها النفط فقط, و يمكن أن يصل طول هذه المنطقة في الشروط الطبيعية إلى عشرات الأمتار.



الشكل(١٦) : تغير درجة التشبع بالنفط والماء على طول الطبقة لدى إزاحة النفط بالماء

إن أهم خصائص إزاحة النفط بالماء (نظام دفع الماء) هي:

1- التغير القليل للضغط الطبقي و للإنتاجية:

لأن فرق الضغط الحاصل بين كونتور التغذية و منطقة السحب يؤدي إلى حركة المياه إلى الجزء المشبع بالنفط و بالتالي يؤدي إلى تثبيت قيمة الضغط حيث تكون كمية المياه المتحركة مساوية لكمية السائل المنتجة.

2- صغر و ثبات قيمة العامل الغازي:

لأنه في هذا النظام يكون الضغط الطبقي أكبر من ضغط الإشباع حيث لا يرتشح غاز حر في الطبقة.

3- إماهة الآبار:

تحصل بشكل أسرع نسبياً من سرعتها في باقي أنظمة الدفع, إذ أن كونتور التغذية يتحرك بشكل دائم إلى مركز المكمن و يبدأ ظهور الماء مع النفط كما أن التنوع في وتائر السحب في الأجزاء المختلفة من المكمن و عدم تجانس

الخصائص الخزنية للوسط المسامي يؤدي إلى حركة لكونتور التغذية غير متساوية مما يؤدي إلى وصول المياه بشكل أسرع إلى الآبار التي تقع في الطبقات ذات النفوذية الكبيرة و بشكل أبطأ في الأقل نفوذة.

إن تخفيض إنتاجية الآبار آخذين بعين الاعتبار المتطلبات الإنتاجية سيساعد مع الزمن على إنتاج النفط من الآبار دون إماهة و في أسوأ الأحوال إلى تقليص نسبة الإماهة فيها, عدا عن ذلك و في أغلب الأحيان لدى ظهور المياه التماسية في البئر فإنه يرفع قاع البئر باتجاه الأعلى باستخدام جسر إسمنتي الذي يؤدي بدوره إلى إنتاج النفط غير المماه بصورة مؤقتة.

6- العوامل المؤثرة على عامل المردود النفطي لدى إزاحة النفط بالماء من الوسط المسامي:

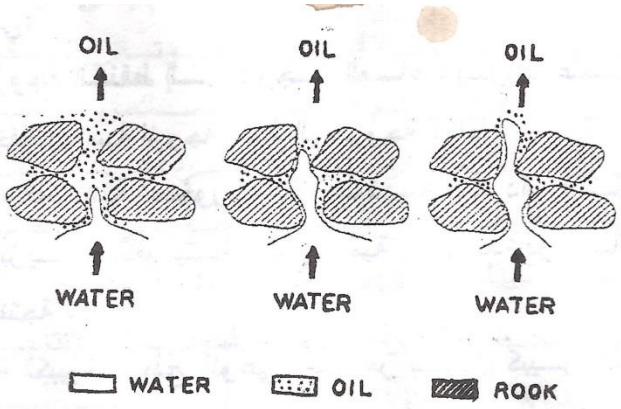
يفهم من عامل المردود النفطي للطبقات بالعلاقة التي توضح نسبة درجة التشبع بالنفط الأولية و درجة التشبع بالنفط المتبقية إلى درجة يتعلق عامل المردود النفطي بشكل الطاقة المستخدمة, حيث أن أكبر قيمة لعامل المردود النفطي يتم التوصل إليها لدى إزاحة النفط بالماء و ذلك بسبب كبر الاحتياطي من طاقة المياه الجانبية, و يتراوح عامل المردود النفطي عند نظام دفع الماء الفعال بين (60-65)% و من أهم العوامل المؤثرة على عامل المردود النفطي لدى إزاحة النفط بالماء ما يلي:

- نسبة لزوجة النفط إلى لزوجة الماء: يزداد عامل المردود النفطي بانخفاض نسبة لزوجة النفط إلى لزوجة الماء.\
- الصفات الفيزيائية لصخور الطبقة المنتجة: يزداد عامل المردود النفطي

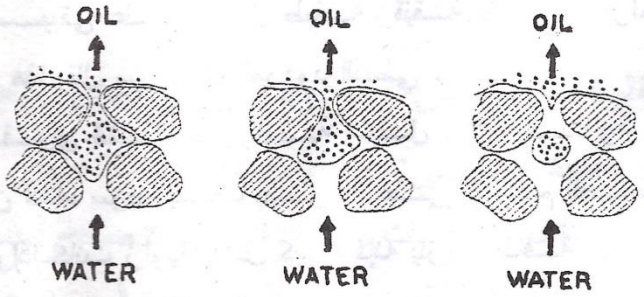
بزيادة النفوذية و المسامية و بزيادة درجة التجانس للطبقة المنتجة تؤثر القيمة الكبيرة للسطح النوعي للصخر بشكل كبير على عامل المردود النفطي ففي الصخور ذات الحبيبات الصغيرة يكون السطح النوعي كبيراً و بالتالي فإن تأثير القوى الشعرية سيكون كبيراً على عملية ارتشاح السائل في الوسط المسامي, حيث أن النفط سيعمل دوماً على جعل سطح الطور الصلب غير محب للماء و بالتالي فإن جزءاً منه سيبقى على شكل طبقة رقيقة لا يمكن إزاحتها من الطبقة, و هذا يقلل من عامل المردود النفطي.

- تأثير القوى الشعرية و زاوية التبلل: إذا كانت زاوية التبلل صغيرة فإن الماء سوف ينساب بسرعة على الجسم الصلب محاولاً تغطيته, و إذا كانت زاوية التبلل كبيرة فإنه يلزمنا طاقة خارجية حتى ينساب الماء على الجسم الصلب.

بشكل عام كلما كبرت زاوية التبلل بالماء θ كلما كانت كمية النفط الملتصق بالصخر أكبر و بالتالي تكبر كميات النفط التي ستبقى في الطبقة و التي لن نتمكن من استخراجها و هذا يقلل من عامل المردود النفطي و هذا يلاحظ في الشكل رقم (17) و الشكل رقم (18).



الشكل(١٧): عملية إزاحة النفط بالماء عندما تكون زاوية التبلل $\theta = 180^{\circ}$



الشكل (١٨): عملية إزاحة النفط بالماء عندما تكون زاوية التبلل $\theta = 0^{\circ}$

نلاحظ من الشكل (17) أنه عندما تكون زاوية التبلل $\theta = 180^{\circ}$ فإن النفط سوف يزيح المياه من سطح الصخر و يحل محله و عندها فالمياه سوف تجري من خلال الفراغات دون أن تزيح النفط.

أما عندما تكون زاوية التبلل $\theta = 0^{\circ}$ كما في الشكل (18) فنلاحظ أن الماء يقوم بإزاحة النفط الملامس للصخر و في هذه الحالة يكون التوتر السطحي بين المياه و الصخر أكبر من التوتر السطحي بين النفط و الصخر.

كما أن القوى الشعرية تعمل على عرقلة جريان النفط من الطبقة إلى قاع البئر و بالتالي بقاء النفط محتجزاً ضمن المسامات و هذا يقلل من عامل المردود النفطي, و للتغلب على هذه القوى الشعرية فإنه يجب استهلاك قدر كبير من الطاقة العاملة على دفع النفط نحو البئر الإنتاجية.

- سرعة إزاحة النفط بالماء: عندما تكون الطبقة غير محبة للماء و القوى الشعرية تعاكس إزاحة النفط من الوسط المسامي بالماء فإن عامل المردود النفطي سيزداد بزيادة سرعة حركة تقدم خط التقاء النفط مع الماء, أما عندما تكون القوى الشعرية ضعيفة التأثير فإن سرعة الإزاحة سوف لن تؤثر على قيمة عامل المردود النفطي, في بعض النماذج الطبقية و عند عمليات الإزاحة الشعرية و إعادة توزع السائل في الفراغات المسامية للطبقة و الجريان من طبقة إلى أخرى تكون ناتجة عن تأثير القوى الشعرية فإن ذلك سيساعد على زيادة فعالية إزاحة النفط بالماء, في مثل هذه الحالة و بزيادة سرعة الإزاحة فإن عامل المردود النفطي سوف ينخفض بسبب انخفاض فعالية الإزاحة الشعرية للمياه نتيجة لزيادة سرعة الإزاحة, أما في الصخور المتشققة فإن زيادة سرعة الإزاحة تؤثر سلباً على عامل المردود النفطي لذلك تخفض سرعة الإزاحة إضافة إلى أن المياه التي تقوم بالإزاحة يجب أن تكون ذات خاصية إزاحة شعرية كبيرة لكي تعبر إلى الأجزاء المشبعة بالنفط و تعمل على طرده إلى الشقوق و منها إلى الآبار مما يؤدي إلى زيادة

عمل المردود النفطي.

الفصل الثالث

القسم العملي

الفصل الثالث

القسم العملي

مقدمة:

يتضمن القسم العملي في هذا البحث كافة الأعمال التي قمنا بها في مخبر فيزياء الطبقة بكلية الهندسة الكيميائية و البترولية.

و يتضمن القسم العملي الأعمال التالية:

1. غسل العينات الاسطوانية من أجل استخلاص السوائل و الشوائب الموجودة فيها و من ثم تجفيف هذه العينات.
2. قياس أبعاد هذه العينات و من ثم قياس سطح مقطعها.
3. قياس نفوذية العينات الأسطوانية باستخدام الغاز.
4. إشباع العينات الاسطوانية بالمياه تحت التفريغ و الضغط, و إجراء تجربة الضغط الشعري لتحديد كمية المياه المترابطة.
5. إشباع العينات الاسطوانية بالزيت.
6. قياس نفوذية العينات الاسطوانية باستخدام الزيت.
7. إجراء قياسات النفوية النسبية (ماء – زيت) و حساباتها.

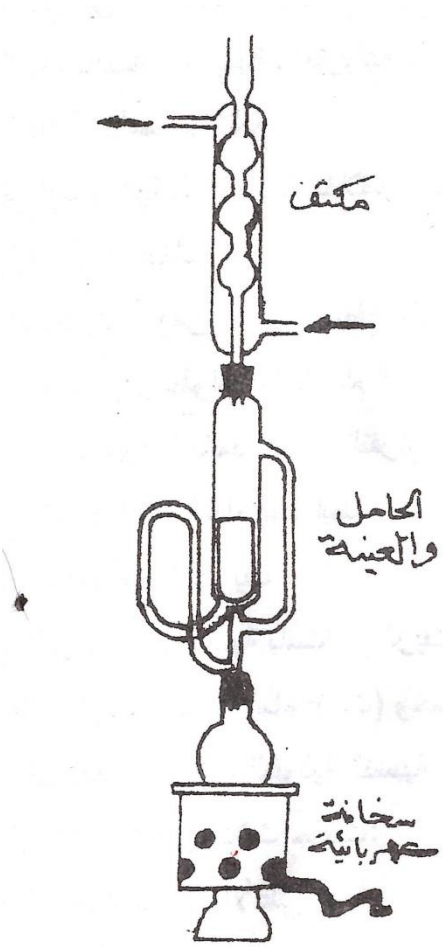
و في هذا البحث تم غجراء قياسات النفوذية النسبية (ماء – زيت) حيث تم حقن المياه بشكل أفقي.

8. النتائج و المقترحات.

3-1- غسل العينات الاسطوانية:

لتحديد الصفات الفيزيائية للعينات الاسطوانية (مسامية, نفوذية, إلخ.....) يجب تحريرها من محتوياتها (نفط , ماء) و يتم ذلك عن طريق استخدام جهاز ساكس ليت لغسل

العينات الاسطوانية الموضح بالشكل رقم (19):



الشكل رقم (١٩) : جهاز ساكس ليت لغسل العينات

3-2- قياس مسامية العينات الاسطوانية:

تم الحصول على مسامية العينات المدروسة باستخدام طريقة كوب المشروحة في القسم النظري في الفقرة (1-2-1), فكانت معطيات القياس و النتائج على الشكل التالي:

العينة	V_F ,cm^3	V_F`,cm^3	V_F``,cm^3	V_t, cm^3	V_S,cm^3	ϕ, %
S-1	11.55	18.93	8.36	14.36	10.84	24.51
S-2	11.55	20.08	8.36	15.14	12.52	17.305
S-3	11.55	19.57	8.36	14.28	11.77	17.58
S-4	11.55	18.82	8.36	13.44	10.67	20.61
S-5	11.55	19.36	8.36	15.61	11.47	26.52

حيث أن:

$$V_s = \frac{V_r - V`_r}{V_r - V`_r + V``_F - V_f} \times (V`_F - V_F)$$

$$\emptyset = (1 - \frac{V_s}{V_t}) \times 100$$

3-3- قياس النفوذية المطلقة للعينات باستخدام الغاز:

باتباع نفس الطريقة المشروحة في القسم النظري في الفقرة (3-2-1) حصلنا على المعطيات و النتائج التالية:

العينة	الطول L(cm)	مقطع لعينة $F(cm^2)$	فرق الضغط المطبق a t	ارتفاع الفواشة h	الكمية الحجمية الوسطية المصروفة من لغاز $\overline{Qg}$ (cm^3/S)
S-1	3.05	4.83	0.5	50	3.102
S-2	3.38	4.599	0.5	107	9.311
S-3	3	4.83	1	56	0.33
S-4	3.05	4.41	0.5	102	9.113
S-5	3.34	4.79	0.5	35	1.61

العينة	درجة حرارة المخبر $T(^oC)$	لزوجة الغاز μ_g (Cp)	النفوذية المطلقة باستخدام الغاز k_g (mD)
S-1	19.5	0.01785	69.9
S-2	19.5	0.01785	244.11
S-3	19.5	0.01785	3.66
S-4	19.5	0.01785	225.12
S-5	19.5	0.01785	39.8

حيث أن:

$$K_g = \frac{\overline{Q_G}.\mu_g.L}{F.\Delta P}$$

3-4- إشباع العينات الاسطوانية بالسائل:

إن عملية إشباع العينات الاسطوانية هامة جداً بغية الحصول على نتائج تعكس الصورة الحقيقية لمؤشرات الطبقة, ففي مخبر فيزياء الطبقة بكلية الهندسة الكيميائية و البترولية يتم إشباع العينات الأسطوانية بالسائل تحت التفريغ و من ثم تعريضها لضغط يكون كافياً لإدخال السائل ضمن الفراغات المسامية الضيقة.

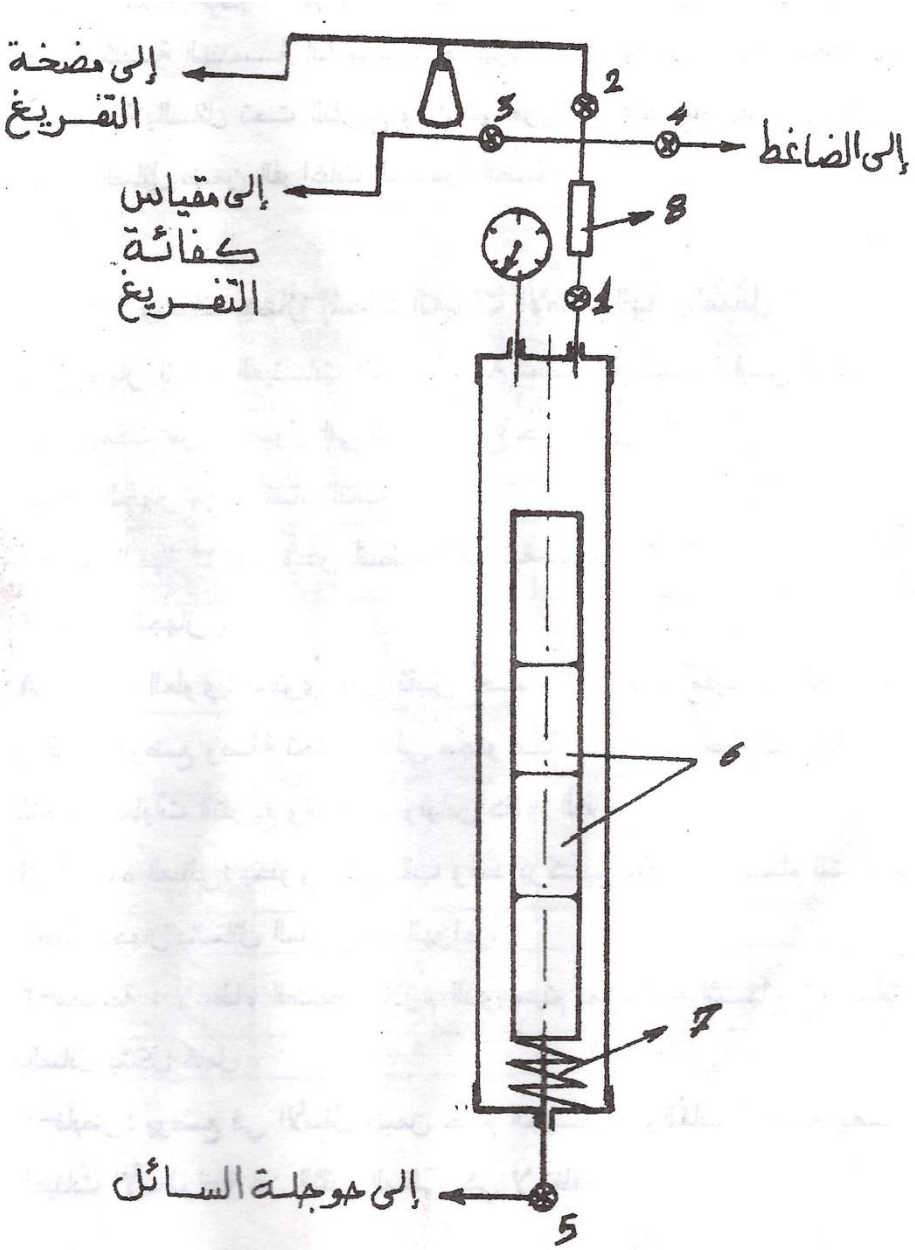
3-4-1- وصف جهاز إشباع العينات الاسطوانية بالسائل:

يعتبر جهاز إشباع العينات الاسطوانية المصنع محلياً في المخبر جهازاً يمكننا من الوصول إلى كفاءة إشباع جيدو تفوق 98%.

و يتألف الجهاز من الأقسام التالية:

- **جسم الجهاز**: عبارة عن أسطوانة معدنية مجوفة.
- **غطاء الجهاز**.
  - **A. الغطاء العلوي**: يحتوي على ثقبين أحدهما لوضع مقياس الضغط و الثاني لوضع وصلة تحتوي على مجموعة من الصمامات اللازمة للتحكم بعمليات التفريغ و الضخ, و قياس كفاءة التفريغ.
  - **B. الغطاء السفلي**: يحتوي على ثقب واحد يركب عليه صمام للتحكم بتعبئة الجهاز بالسائل المفرغ من الهواء.
- **مضخة**: لإعطاء الضغط اللازم الذي سيتم بموجبه إشباع العينات بالسائل بشكل كامل.
- **نابض**: يوضع في الأسفل ضمن جسم الجهاز, و الغاية منه إبعاد العينات الاسطوانية عن الثقب السفلي لكي لا تغلقه.
- **حوجلة**: يوضع فيها السائل المراد إشباع العينات به.

يبين الشكل رقم (20) جهاز إشباع العينات الاسطوانية بالسائل.



الشكل رقم (٢٠): رسم تخطيطي لجهاز إشباع العينات الاسطوانية بالسائل

3-4-2- إشباع العينات الاسطوانية بالماء و حساب كمية المياه المترابطة:

تم إشباع العينات المغسولة و المجففة بالماء بواسطة الجهاز الموضح بالشكل رقم (20) ثم تم وزنها و هي مشبعة, و بعد ذلك وضعت العينات بجهاز قياس الضغط الشعري لعدة عينات و تم طرد المياه المتحركة من العينات بالطريقة المذكورة في القسم النظري. في الفقرة (2-1-2).

بما أن أعلى ضغط مطبق هو 35psi, فإننا نحسب عنده كمية المياه المترابطة بتطبيق

العلاقة:

$$S_{wc} = \frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \times 100$$

كانت نتائج القياس و حساب كمية المياه المترابطة للعينات المدروسة كما يلي:

العينة	وزن العينة الجافة M_1 (g)	وزن العينة المشبعة M_2 (g)	وزن العينة بعد تطبيق الضغط 35Psi M_3(g)	كمية المياه المترابطة S_{wc} (%)
S-1	29.3184	32.723	30.4112	32.09
S-2	33.1572	35.69	34.134	38.56
S-3	31.7266	34.108	32.772	43.89
S-4	29.9976	32.7187	30.8973	33.06
S-5	30.7342	34.8161	32.5644	44.836

3-5- إشباع العينات الاسطوانية بالنفط:

بعد أن تمت عملية إشباع العينات الاسطوانية بالمياه و طرد المياه القابلة للحركة منها, حصلنا على عينات أسطوانية تحتوي على مياه مترابطة فقط و بعد ذلك تم إشباع العينات الاسطوانية بالنفط, و بالتالي حصلنا على عينات تمثل الطبقة باحتوائها على مياه مترابطة و نفط.

يتم إشباع العينات الأسطوانية بالنفط تحت التفريغ و الضغط باستخدام الجهاز المشروح في الشكل رقم (20).

من أجل تعيين كفاءة الإشباع بالنفط توزن العينات الاسطوانية قبل عملية الاشباع و بعدها و الفرق بين الوزن يمثل وزن النفط الداخل إلى العينة و بقسمته على كثافته نحصل على حجم النفط داخل العينة, و يقارن هذا الحجم مع حجم الفراغات المسامية لمعرفة

كفاءة الاشباع.

3-6- قياس النفوذية المطلقة للعينات الاسطوانية باستخدام الزيت:

باتباع الطريقة المذكورة في القسم النظري و في الفقرة (3-2-2) تم الحصول على النفوذية المطلقة للعينات الاسطوانية المدروسة, و كانت نتائج القياسات و الحسابات كما يلي:

العينة	درجة حرارة المخبر $T(^oC)$	لزوجة الزيت $\mu_o(cp)$	فرق الضغط $\Delta P(at)$	الحجم $V(cm^3)$	الزمن $t(sec)$	النفوذية المطلقة $k(mD)$
S-1	19	76.2	1.5	0.75	480	50.12
S-2	16	91.5	1.6	1	253	166.1
S-3	20	73.6	2.1	0.0893	2280	0.852
S-4	17	86.8	1.5	1	254	157.51
S-5	20	73.6	1.7	0.75	790	28.65

حيث أن:

$$K = \frac{V.\mu_o.L}{t.\Delta P.F}$$

L: طول العينة.

F: مساحة مقطع العينة.

3-7- قياس معطيات النفوذية النسبية (ماء – زيت) و حساباتها:

يتم قياس معطيات النفوذية النسبية للنظام (ماء – زيت) بالجهاز المبين بالشكل رقم (15).

و تم إجراء الحسابات باستخدام الكمبيوتر بالطريقة التالية بعد صياغتها على شكل برنامج:

- **الخطوة الأولى:**

حساب مقلوب الكمية الكلية للمياه المحقونة لكل نقطة $(1/W_i)$, حيث أن الكمية الكلية للمياه المحقونة تساوي الكمية الكلية للسائل المستخرج:

$$W_i = \frac{Q_i + V_i}{V_P} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{W_i} = \frac{V_P}{Q_i + V_i}$$

W_i: الكمية الكلية للمياه المحقونة.

Q_i: الكمية الكلية للنفط المستخرج.

V_i: الكمية الكلية للمياه المستخرجة.

- **الخطوة الثانية:**

حساب معدل جريان السائل في كل نقطة قياس, و تساوي المشتق الأول للحجم بالنسبة للزمن:

$$Q = \frac{\mathrm{d}_v}{d_t}\left(\frac{cm^3}{S}\right)$$

الحجم الكلي للنفط و الماء:

$$V_T = Q_i + V_i$$

حيث أن:

Q_i: الحجم الكلي للنفط الخارج.

$$Q_T = Q_i + Q_w$$

للنقطة الأولى (I=1):

$$Q_{T1} = \frac{V_1 - V_2}{t_1 - t_2}$$

للنقاط من (I=2) و حتى (I=N−1):

$$Q_{Ti} = \frac{1}{2} \times \left[\frac{V_{i-1} - V_i}{t_{i-1} - t_i} + \frac{V_i - V_{i+1}}{t_i - t_{i+1}}\right]$$

V_i: حجم الماء و الزيت التراكمي عند النقطة (i)

للنقطة الأخيرة (I=N):

$$Q_{TN} = \frac{V_{N-1} - V_N}{t_{N-1} - t_N}$$

الواحدة هنا هي cm^3/min بسبب تعويض الزمن بواحدة (min) حتى يتم الحساب بأرقام صغيرة.

و بنفس الطريقة يتم الحساب بالنسبة للزيت الخارج:

$$Q_{Oi} = \frac{1}{2} \times \left[\frac{V_{i-1} - V_i}{t_{i-1} - t_i} + \frac{V_i - V_{i+1}}{t_i - t_{i+1}}\right]$$

حيث تمثل (V_i) هنا حجم الزيت التراكمي عند النقطة (i).

- **الخطوة الثالثة:**

حساب جداء مقلوب الكمية الكلية للمياه المحقونة ($1/W_i$) بمقلوب الحقن النسبي ($1/I_r$):

$$\frac{1}{W_i}.\frac{1}{I_r} = \frac{1}{W_i}.\frac{(K_O.\hat{o}S_{wi}).\Delta P.A.60}{Q_{Ti}.L.\mu_O}$$

$K_O.\hat{o}S_{wi}$: بالميلي دارسي.

Q: نعوضها بالـ Cm^3/S و هي محسوبة مسبقاً بالواحدة cm^3/min لذلك نضرب بـ 60.

- **الخطوة الرابعة:**

حساب معدل الجريان الجزئي للنفط (f_0):

$$f_{Oi} = \frac{Q_{Oi}}{Q_{Ti}}$$

- **الخطوة الخامسة:**

حساب نسبة النفوذية النسبية:

$$\frac{K_{rw}}{K_{ro}} = \frac{1 - f_o}{f_o} . \frac{\mu_w}{\mu_o}$$

- **الخطوة السادسة:**

حساب النسبة النفوذية للنفط:

$$K_{ro} = \frac{f_o}{d(\frac{1}{W_i . I_{ri}})/d(\frac{1}{W_i})}$$

- **الخطوة السابعة:**

حساب النفوذية النسبية للماء:

$$K_{rw} = (\frac{K_{rw}}{K_{ro}}) \times K_{ro}$$

- **الخطوة الثامنة:**

$$\overline{S_w} = \frac{Q_i}{V_P} + S_{wi}$$

$$S_{wf} = \overline{S_w} - f_o . W_i$$

حيث أن:

Q_i: حجم الزيت التراكمي عند النقطة (i).

S_{wi}: درجة التشبع الأولية بالماء.

$\overline{S_w}$: درجة التشبع الوسطية للعينة بالماء.

S_{wf}: درجة التشبع بالماء عند مخرج العينة.

- **الخطوة التاسعة:**

رسم علاقة كل من K_{rw} و K_{ro} مع درجة التشبع بالماء S_{wf}.

و فيما يلي استعراض كامل نتائج قياس و حساب النفوذية النسبية.

❖ **النفوذية النسبية (ماء – زيت) عند الحقن بشكل أفقي:**

نلاحظ عند إجراء هذه التجربة أنه في البداية يخرج الزيت من العينة بشكل طبيعي كما في حالة الحقن من الأعلى, و بعد ذلك يلاحظ انخفاض كمية الزيت الخارج بشكل كبير لمدة زمنية ما, و من ثم يعود و يخرج الزيت من العينة.

في هذه الحالة لا يمكن إجراء حسابات النفوذية النسبية (نحصل على قيم سالبة لـ K_{ro} و K_{rw}) و بالتالي لا نتمكن من رسم منحنيات النفوذية النسبية.

يتم رسم منحنيات حجم الزيت التراكمي بالعلاقة مع الزمن فنلاحظ ظهور عتبات تدل على ثبات حجم الزيت التراكمي مع الزمن و هذا ناتج عن انخفاض كمية الزيت الخارجة بشكل كبير و عندها يتم تصحيح هذا المنحني بوصل النقاط التي لا تظهر شذوذ في كمية الزيت الخارجة بشكل انسيابي و يتم ارجاع النقاط الشاذة عند العتبات من المنحني الجديد و بالتالي نستطيع إجراء حسابات النفوذية النسبية و رسم منحنياتها.

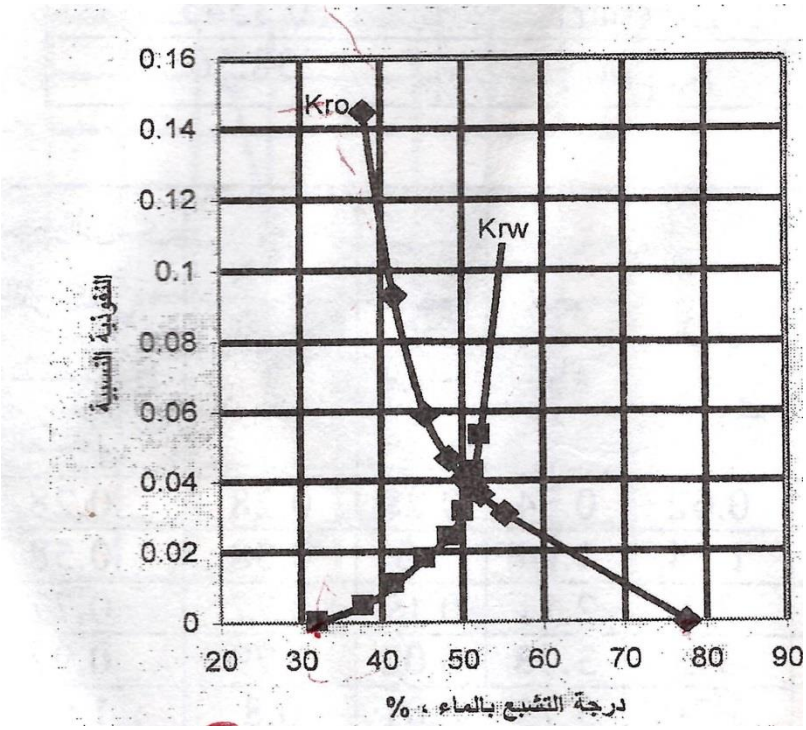
❖ **النفوذية النسبية (ماء – زيت) عند الحقن بشكل أفقي:**

مواصفات العينة S-1	
V_P (cm^3)	3.52
L (cm)	3.05
d (cm)	2.48
μ_o (CP)	66.2
μ_w (CP)	0.996
K_o (mD)	50.12
ΔP (bar)	0.709
S_{wi} (%)	32.09

تسلسل	الزمن بالدقائق	حجم الماء والزيت	حجم الماء	حجم الزيت	حجم الزيت التراكمي	حجم الزيت التراكمي بعد تصحيح المنحني	حجم الماء والزيت التراكمي
1	4.5	0.7	0.39	0.31	0.31	0.31	0.7
2	32.28	1.49	1.26	0.23	0.54	0.54	2.19
3	57.58	2.3	2.29	0.01	0.55	0.67	4.49
4	80.28	2.82	2.81	0.01	0.56	0.77	7.31
5	100.68	3.38	3.37	0.01	0.57	0.84	10.69
6	119.02	3.93	3.7	0.23	0.8	0.91	14.62
7	135.67	4.35	4.18	0.17	0.97	0.97	18.97

✓ **نتائج الحسابات:**

S_{wf}	K_{ro}	K_{rw}
32.09	1	0
37.827	0.1447	0.0046
41.65	0.0931	0.0106
45.465	0.0596	0.018
48.35	0.045	0.024
50.16	0.041	0.0312
51.46	0.0382	0.0428
52.2	0.0361	0.053



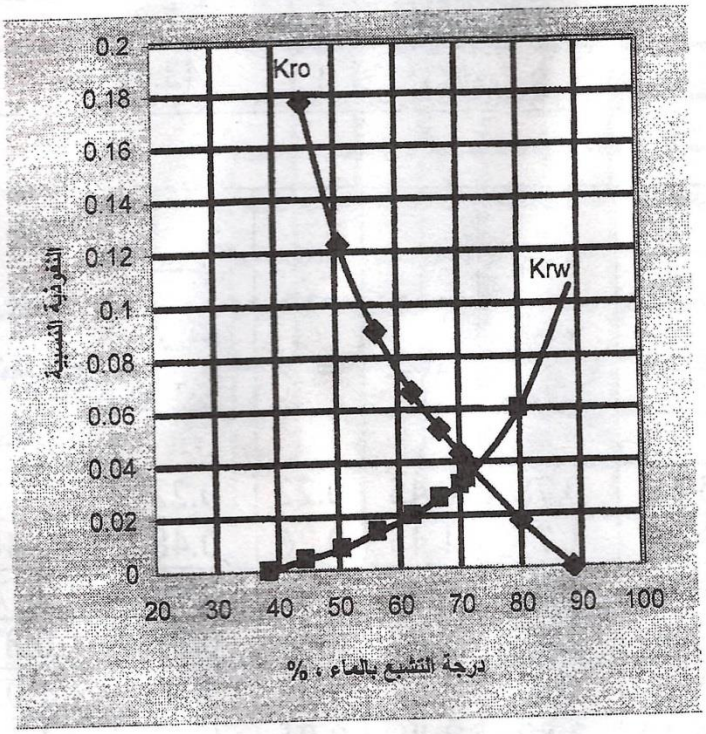
❖ **النفوذية النسبية (ماء – زيت) عند الحقن بشكل أفقي:**

مواصفات العينة S-2	
V_P (cm^3)	2.62
L (cm)	3.38
d (cm)	2.42
μ_o (CP)	73.6
μ_w (CP)	0.996
K_o (mD)	166.1
ΔP (bar)	0.3545
S_{wi} (%)	38.56

تسلسل	الزمن بالدقائق	حجم الماء والزيت	حجم الماء	حجم الزيت	حجم الزيت التراكمي	حجم الزيت التراكمي بعد تصحيح المنحني	حجم الماء والزيت التراكمي
1	5.25	0.62	0.34	0.28	0.28	0.28	0.62
2	28.4	1.54	1.24	0.3	0.58	0.58	2.16
3	47.05	2.3	2.11	0.19	0.77	0.77	4.46
4	68.41	3.1	3.08	0.02	0.79	0.92	7.56
5	89.1	3.74	3.73	0.01	0.8	1.04	11.3
6	111.13	4.19	4.18	0.01	0.81	1.13	15.49
7	131.4	4.53	4.14	0.39	1.2	1.2	20.02

✓ **نتائج الحسابات:**

S_{wf}	K_{ro}	K_{rw}
38.56	1	0
44.63	0.177	0.00413
50.64	0.123	0.008
57.03	0.0901	0.016
62.32	0.0667	0.0214
66.76	0.0541	0.0265
70.21	0.0432	0.03135
71.248	0.0394	0.0335



الشكل رقم (٢٧)

نلاحظ من الشكل أن : كمية النفط المتبقي = 11.34 %

وكمية المياه المترابطة =38.56 %

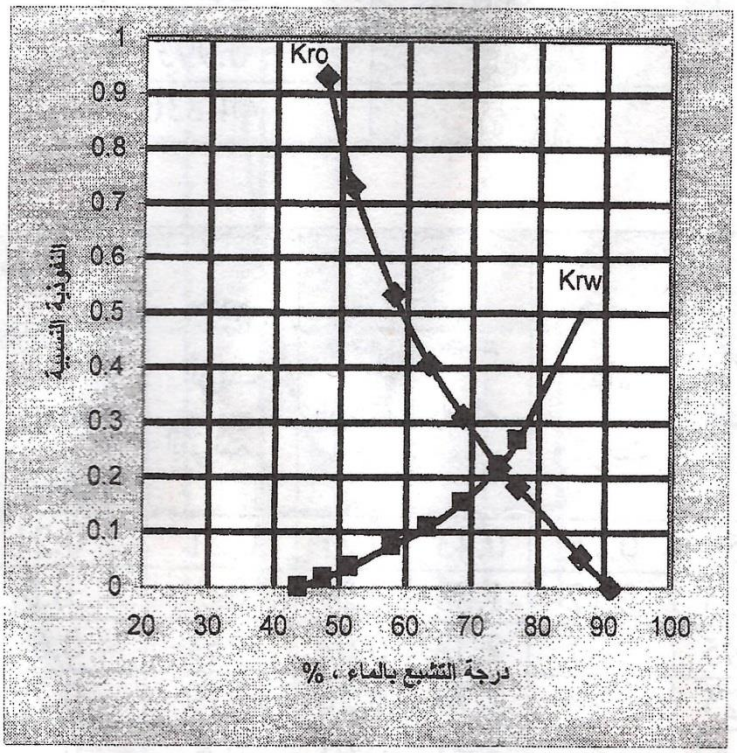
❖ النفوذية النسبية (ماء – زيت) عند الحقن بشكل أفقي:

مواصفات العينة S-3	
V_P (cm^3)	2.51
L (cm)	3
d (cm)	2.48
μ_o (CP)	73.6
μ_w (CP)	0.996
K_o (mD)	0.852
ΔP (bar)	7.8
S_{wi} (%)	43.89

تسلسل	الزمن بالدقائق	حجم الماء والزيت	حجم الماء	حجم الزيت	حجم الزيت التراكمي	حجم الزيت التراكمي بعد تصحيح المنحني	حجم الماء والزيت التراكمي
1	5.5	0.78	0.45	0.22	0.22	0.22	0.78
2	33.16	1.71	1.45	0.26	0.48	0.48	2.38
3	59.76	2.24	2.23	0.01	0.49	0.7	4.62
4	82.8	2.87	2.49	0.38	0.87	0.87	7.49
5	105.4	3.4	3.37	0.03	0.9	1.02	10.89
6	126.12	3.89	3.88	0.01	0.91	1.14	14.78
7	147.63	4.27	3.95	0.32	1.23	1.23	19.05

✓ **نتائج الحسابات:**

S_{wf}	K_{ro}	K_{rw}
43.89	1	0
47.6	0.931	0.017
51.22	0.735	0.03699
57.98	0.534	0.0752
63.34	0.408	0.1079
68.58	0.312	0.153
74.1	0.219	0.221
76.89	0.184	0.268



الشكل رقم (٢٨)

نلاحظ من الشكل أن : كمية النفط المتبقي = 9.12 %

وكمية المياه المترابطة =43.89 %

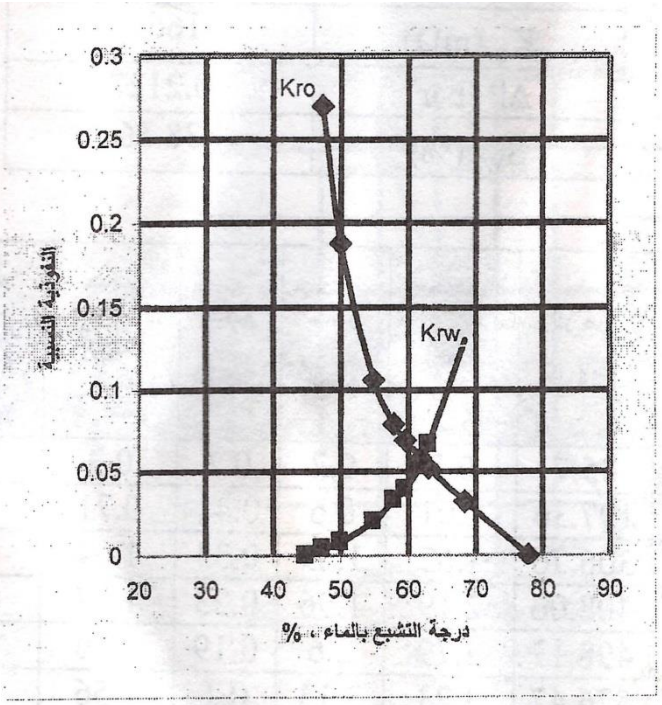
❖ النفوذية النسبية (ماء – زيت) عند الحقن بشكل أفقي:

مواصفات العينة S-5	
V_P (cm^3)	4.14
L (cm)	3.34
d (cm)	2.47
μ_o (CP)	73.6
μ_w (CP)	0.996
K_o (mD)	28.65
ΔP (bar)	0.993
S_{wi} (%)	44.836

تسلسل	الزمن بالدقائق	حجم الماء والزيت	حجم الماء	حجم الزيت	حجم الزيت التراكمي	حجم الزيت التراكمي بعد تصحيح المنحني	حجم الماء والزيت التراكمي
1	6.5	0.75	0.43	0.21	0.21	0.21	0.75
2	37.05	2.12	1.83	0.29	0.5	0.5	2.76
3	64.95	2.41	2.38	0.03	0.53	0.68	5.17
4	89.25	3	2.74	0.26	0.79	0.79	8.27
5	110.43	3.42	3.41	0.01	0.8	0.88	11.69
6	129.13	3.87	3.71	0.16	0.96	0.96	15.56
7	144.62	4.47	4.41	0.06	1.02	1.02	20.03

✓ **نتائج الحسابات:**

S_{wf}	K_{ro}	K_{rw}
44.836	1	0
47.3	0.27	0.004
49.92	0.188	0.008
54.85	0.106	0.0216
57.85	0.0793	0.0329
59.55	0.0691	0.0394
61.84	0.05839	0.0543
62.97	0.0524	0.0667



الشكل رقم (٢٩)

نلاحظ من الشكل أن : كمية النفط المتبقي = 22.1 %

وكمية المياه المترابطة =44.836 %

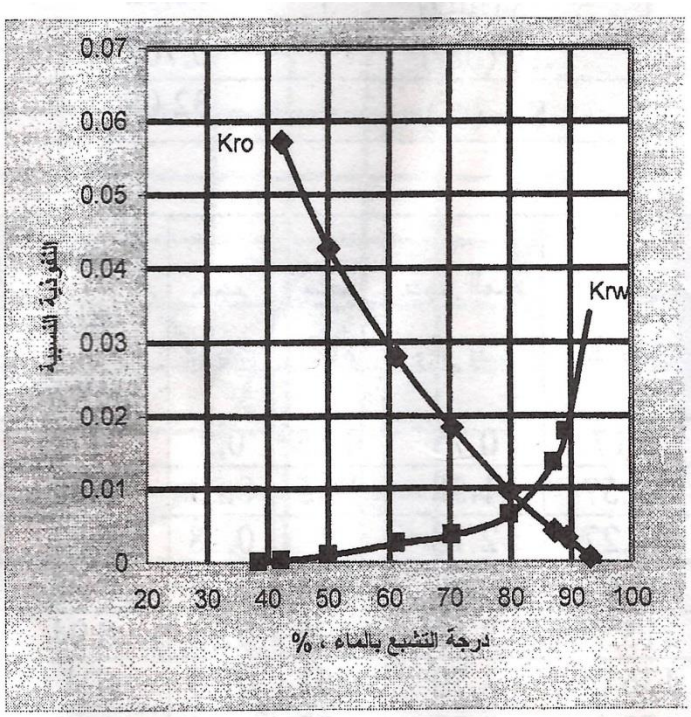
❖ النفوذية النسبية (ماء – زيت) عند الحقن بشكل أفقي:

مواصفات العينة S-2	
V_P (cm^3)	2.62
L (cm)	3.38
d (cm)	2.42
μ_o (CP)	66.2
μ_w (CP)	0.996
K_o (mD)	166.1
ΔP (bar)	0.2127
S_{wi} (%)	38.56

تسلسل	الزمن بالدقائق	حجم الماء والزيت	حجم الماء	حجم الزيت	حجم الزيت التراكمي	حجم الماء والزيت التراكمي
1	35.7	0.5	0.2	0.3	0.3	0.5
2	197.36	1.01	0.6	0.41	0.71	1.51
3	306.76	1.62	1.29	0.33	1.04	3.13
4	408.06	2.19	1.96	0.23	1.27	5.32
5	498.17	2.79	2.6	0.19	1.46	8.11
6	576.47	3.23	3.13	0.1	1.56	11.34
7	646.58	3.97	3.89	0.08	1.64	15.31

✓ **نتائج الحسابات:**

S_{wf}	K_{ro}	K_{rw}
38.56	1	0
42.26	0.057	0.00026
49.8	0.0416	0.0012
61.17	0.0286	0.00257
70.1	0.0183	0.00433
79.77	0.0095	0.00634
87.4	0.00491	0.0135
88.64	0.00332	0.0177



الشكل رقم (٣٠)

نلاحظ من الشكل أن : كمية النفط المتبقي = 5.4 %

وكمية المياه المترابطة =38.56 %

النتائج و المقترحات

- ✓ عند الحقن الأفقي فإن المياه و تحت تأثير الثقالة تتغلغل في الجزء السفلي من العينة و تزيح الزيت منه و يبقى جزء من القسم العلوي للعينة لا يتعرض فيه الزيت للإزاحة لذلك فإن عامل الإزاحة عند الحقن الأفقي أقل من الحقن فيما لو تم عمودياً حيث تتوزع بشكل متجانس على كامل مقطع العينة (جبهة إزاحة متجانسة).
- ✓ بالنسبة للعينات ذات النفوذية الصغيرة فنلاحظ زيادة لا بأس بها لعامل الإزاحة عند الحقن الأفقي, و هذا يعود برأينا إلى إزاحة الزيت من القسم السفلي و العلوي للعينة بسبب حدوث ظاهرة التغلغل الشعري, حيث يحصل في هذه الحالة انخفاض في سرعة إزاحة الزيت بالماء مما يسمح للمياه و تحت تأثير القوى الشعرية أن تتغلغل ضمن العينة ذات النفوذية الضعيفة مزيحة الزيت منها و هذا بدوره يساهم في رفع عامل المردود.
- ✓ بعد قياس النفوذية النسبية (ماء – زيت) عند الحقن الأفقي للعينة (S-2) مع الأخذ بعين الاعتبار تخفيض ضغط الجريان لاحظنا عدم ظهور عتبات في منحني حجم الزيت التراكمي بالعلاقة مع الزمن حيث لم يحدث انخفاض كبير جداً في كمية الزيت الخارجة, و تم حساب عامل الإزاحة و كانت النتائج على النحو التالي:

العينة	ضغط جريان PSi	النفوذية المطلقة باستخدام الزيت (mD)	زمن الإزاحة بالدقائق	حجم الفراغات المسامية (Cm^3)	حجم الزيت المستخرج (Cm^3)	عامل الإزاحة عند الحقن الأفقي (%)
S-2	3	166.1	646.58	2.62	1.64	62.59

نلاحظ من الجدول السابق ازدياد عامل الإزاحة بشكل كبير عند تخفيض ضغط الجريان و ذلك عند الحقن الأفقي للماء.

المراجع العلمية

1-الأستاذ الدكتور المهندس جورج عبد الأحد:

فيزياء الطبقة النفطية و الغازية (الجزء الأول) 1997-1998.

2-الأستاذ الدكتور المهندس جورج عبد الأحد

الدكتور المهندس عماد نوفل:

فيزياء الطبقة النفطية و الغازية ا (الجزء العملي) 1996-1997.

3-الأستاذ الدكتور المهندس جورج عبد الأحد

الدكتور المهندس عماد نوفل:

هيدروليك الموائع الجوفية 1994-1995

4-الدكتور المهندس غسان حسن:

هندسة المخزون البترولي 1995-1996

5- مشروع تخرج بإشراف الدكتور المهندس جورج عبد الأحد.

الدكتور المهندس عماد نوفل:

دراسة مخبرية لزيادة عامل الإزاحة أثناء قياسات النفوذية النسبية (ماء – نفط) – (غاز – نفط) 2000-2001

6- الدكتور محمود كابر:

هندسة إنتاج النفط و الغاز (ا) 2000-2001

7- F.CRAIG.JR :

The reservoir engineering aspects of water flooding . 1970

8- شبكة الإنترنت.