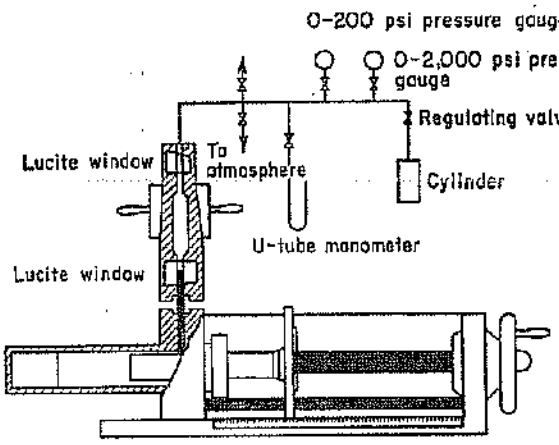
توازن بين هذين الأنبوبين ، انظر الشكل رقم (50–b) والذي يبين أنه كلما قلت الزاوية θ سيؤدي ذلك إلى ارتفاع مستوى السائل في الأنبوب .

1–7–4– توزع المسامات حسب مقاييسها – منحنيات الضغط الشعري – تشبع المسام بمادة ذات خاصية تبلل

يعين الاحتواء النسبي للمسامات ذوات المقاييس المختلفة في الوسط المسامي في أغلب الأحيان بطريقة حقن الزئبق في العينة أو بطريقة الحاجز ذي النفوذية الضعيفة .

أما طريقة حقن الزئبق ، انظر الشكل رقم (51) ، فهي على النحو التالي :



الشكل رقم (51) جهاز قياس الضغط باستخدام حقن الزئبق

توضع العينة الجافة المغسولة من النفط في حجرة مفرغة من الهواء ومملوءة بالزئبق ، يحقن الزئبق في مسامات العينة بواسطة مكبس عادي ، وذلك برفع الضغط تدريجيا ، حيث يعين نصف قطر المسام الذي يحقن فيه الزئبق بالمعادلة التالية :

$$P_K = \frac{2\,\sigma\,\mathrm{Cos}\,\theta}{r} \qquad (55\text{-}1)$$

حيث أن :

P_K – الضغط الشعري .

σ – قوة التوتر السطحي (للزئبق $\sigma = 480$ dyn/Cm ، للماء $\sigma = 72$ dyn/Cm) .

r – نصف قطر المسام .

بزيادة الضغط من P_1 إلى P_2 نستطيع حقن الزئبق في مسامات العينة والتي عند الضغط المذكور يمكننا القضاء على الضغط الشعري في هذه المسامات أو بالأحرى فإن الزئبق سيدخل في تلك المسامات والتي أنصاف أقطارها تتغير من :

$$R_1 = \frac{2\sigma \cos\theta}{P_1} \longleftarrow \text{وإلى} \quad R_2 = \frac{2\sigma \cos\theta}{P_2}$$

إن الحجم الكلي في هذه الحالة سيساوي حجم الزئبق المحقون في العينة عند رفع الضغط من من P_1 إلى P_2 . بزيادة الضغط تدريجيا سيدخل الزئبق في العينة ونصل بعدها إلى ذلك الضغط الذي مهما زدناه سوف لا تتقبل العينة الزئبق . نستطيع في أثناء سير العملية أن نسجل كمية الزئبق المحقونة في العينة عند قيم معينة من الضغط ، وعلى هذا الأساس يمكننا تعيين المسامات ذوات القياسات المختلفة في العينة المذكورة ، كما يمكننا رسم منحني الضغط الشعري بالعلاقة مع درجة التشبع بالماء .

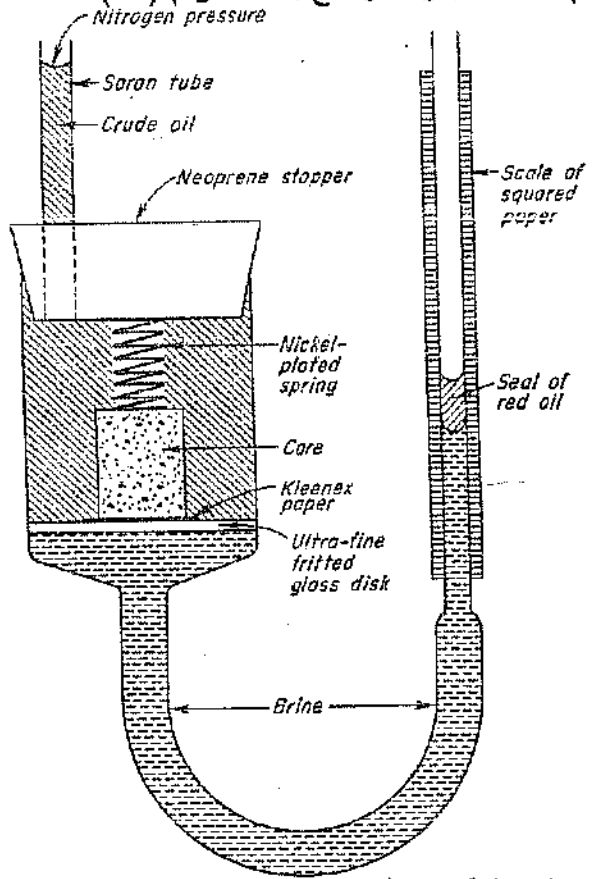
إن أهم مميزات هذه الطريقة هي السرعة ، حيث أنه لرسم منحني الضغط الشعري يلزمنا أقل من ساعة فقط ، كذلك نستطيع رفع الضغط أكثر بكثير من رفعه في أثناء قياس الضغط الشعري بالنسبة لدرجة التشبع بواسطة الحاجز ذي النفوذية الضعيفة ، وقد وضحت هذه الطريقة بالتفصيل في كتاب فيزياء الطبقة (1) القسم العملي .

أما سيئات هذه الطريقة فهي اختلاف خاصية التبلل بين الزئبق والسوائل الحقيقية. كذلك لا يمكن استخدام العينة التي أجري عليها القياس مرة أخرى .

كذلك من الممكن تعيين توزع المسامية حسب مقاييسها بطريقة القوة النابذة

ومضمون هذه الطريقة كالتالي : لدى دراسة العينة المشبعة بالسائل تتولد قوة مركزية نابذة تساعد على خروج السائل من مسامات العينة ، حيث ولدى زيادة سرعة دوران الجهاز فإن السائل سيخرج من المسامات ذوات المقاسات الأصغر . وهكذا يمكننا زيادة سرعة الدوران حتى تخرج الكمية الممكن استخراجها من العينة، ويسجل حجم السائل الخارج من العينة عند كل سرعة دوران ، وبالتالي وحسب سرعة الدوران تحسب القوة النابذة ، ومن ثم الضغط الشعري ، وبواسطته تعيين مقاييس المسامات المختلفة . وتتصف هذه الطريقة بالسرعة في إعطاء النتائج اللازمة .

لدى دراسة توزع المسامات ذوات المقاييس المختلفة بطريقة الحاجز ذي النفوذية الضعيفة يستخدم عادة الجهاز الموضح بالشكل رقم (52) .

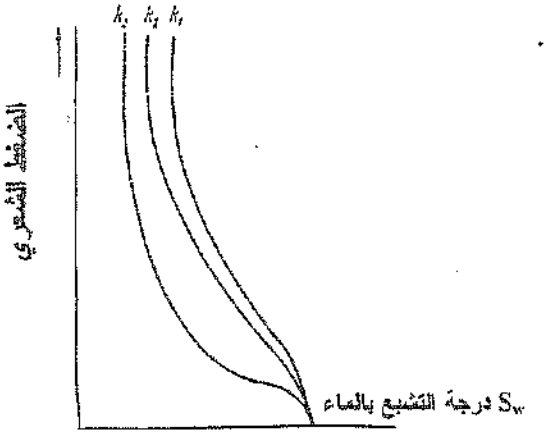


الشكل رقم (52) جهاز دراسة توزع المسامات حسب مقاييسها بطريقة الحاجز ذي النفوذية الضعيفة

توضع العينة المشبعة بالسائل (ماء أو كيروسين) في الحجرة على الحاجز ذي النفوذية الضعيفة ، هذا الحاجز يكون مصنوعا من الفخار أو من الخزف ، حيث أن مساماته تكون ذوات مقاييس أصغر من مسامات العينة المدروسة .

يدفع السائل من العينة بواسطة الآزوت وذلك بزيادة الضغط في حجرة العينة ، حيث يقاس هذا الضغط بواسطة مقياس الضغط . في البداية ولدى زيادة الضغط فإن الآزوت سيدخل في المسامات الكبيرة ويدفع منها السائل خلال الحاجز ذي النفوذية الضعيفة في أنبوب مدرج والذي يساعدنا على قياس كمية السائل الخارجة من العينة عند ضغط معين . يستطيع الآزوت اختراق الحاجز ذي النفوذية الضعيفة عند تلك الحالة فيما إذا زاد الضغط في حجرة العينة عن الضغط الشعري في مسامات الحاجز .

بزيادة الضغط في حجرة العينة وقياس السائل الخارج من العينة بواسطة الأنبوب المدرج الموضح على الشكل رقم (52) عند ضغوط مختلفة نستطيع وباستعمال المعادلة (1-55) تعيين تركيب المسامات في العينة المدروسة ذات المقاييس المختلفة ، حيث أثبتت هذه النتائج أن أنصاف أقطار المسامات والتي بضمنها تتسم حركة السائل تتراوح بين 5 - 30 ميكرونا . كذلك من الممكن بواسطة هذه النتائج تعيين المسامات ذوات المقاييس المختلفة ورسم منحنيات الضغط الشعري بالعلاقة مع درجة التشبع بالماء .



الشكل رقم (53) الضغط الشعري بالعلاقة مع درجة التشبع بالماء

الشكل رقم (53) يوضح هذه المنحنيات عند نفوذية مختلفة حيث توضع على محور السينات درجة التشبع بالماء وعلى محور العينات الضغط الشعري .

باستخدام طريقة الحاجز ذي النفوذية الضعيفة يمكن الحصول على علاقة ($P_K - S_w$) والتي تكون أقرب إلى الحقيقة من غيرها وذلك بسبب استخدام الماء والنفط ، حيث أن النموذج المستخدم سيكون بهذا الشكل أقرب إلى الشروط الطبقية من غيره .

تستعمل منحنيات الضغط الشعري بالعلاقة مع درجة التشبع بالماء لتعيين كمية المياه المترابطة بالعينة ولدراسة تركيب المنطقة الانتقالية "نفط – ماء" ، " ماء – غاز " ، حيث سنتكلم عنها فيما بعد . من الشكل رقم (53) يتبين أن نفوذية الوسط المسامي لها تأثير كبير على خاصية العلاقة $P_K = f(S_w)$ وكذلك تؤثر على شكل هذه العلاقة الصفات الأخرى للصخور والسوائل .

كان ليفيريت (Leveret) الباحث الأول الذي حاول تبيان تأثير صفات الصخور والسوائل على العلاقة $P_K = f(S_w)$ ، حيث مثل هذه المعلومات المحصول عليها للضغط الشعري بالنسبة إلى درجة التشبع في علاقة موحدة لطبقات مختلفة :

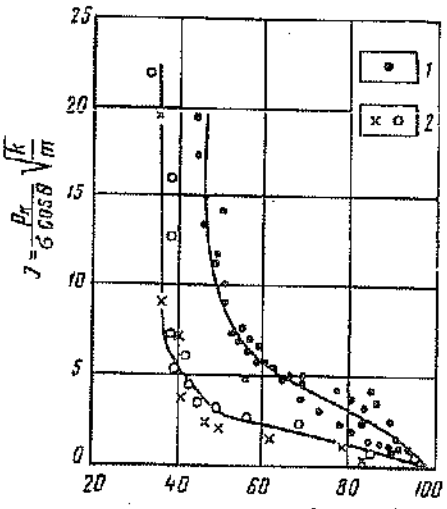
$$J(S_w) = \frac{P_K}{\sigma \, Cos\theta} \sqrt{\frac{K}{\phi}} \qquad (56\text{-}1)$$

من المعادلتين (1–24) و (1–54) يتبين أن تابع ليفيريت يمثل علاقة الضغط الشعري P_K لدرجات تشبع مختلفة على الضغط الشعري الوسطي والمحسوب على أساس نصف قطر القنوات المسامية الوسطي ، حيث أن P_K الموجود في المقام ستكون ثابتة لكل المنحني بينما P_K الموجود في البسط سيكون متغيرا لاختلاف درجات التشبع .

من المحاولة التي أجراها ليفيريت وذلك بوضع هذه العلاقة وهي بدون واحدة قياس أراد أن يتوصل إلى تطابق كل المنحنيات المرسومة لصخور ذوات نفوذية مختلفة بمنحني واحد ، حيث ينوب هذا المنحني الوحيد عن كل المنحنيات ويعتبر

المنحني الوسطي لهم ولكن لم يتوصل إلى الهدف الذي ابتغاه .

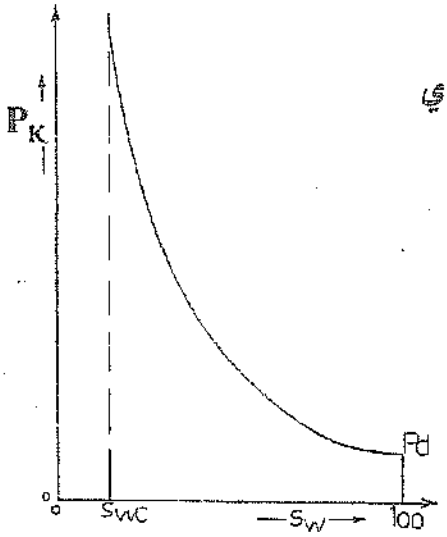
الشكل رقم (54) يوضح العلاقة $J = f(S_w)$ والمحصول عليها لصخور الطبقات المنتجة المختلفة .



S_w درجة التشبع بالماء

1 و 2 صخور رملية مسمنتة مساميتها % 30 - 20 = ϕ ، نفوذيتها K = 50 - 300 md

الشكل رقم (54) تابع ليفيريت J بالعلاقة مع درجة التشبع بالماء



الشكل رقم (55) منحني تغير الضغط الشعري بالعلاقة مع درجة التشبع بالماء

1-7-5- تفسير منحني الضغط الشعري

لدينا عينة مشبعة بالماء 100% ، ونريد إزاحة هذه المياه من العينة بحقن سائل غير مبلل فيها ونستخدم الهواء ، وهذا يحتاج إلى قوة معينة يتم بموجبها إزاحة الماء (السائل المبلل) وإدخال السائل غير المبلل ، ويعبر عن هذه القوة بضغط الإزاحة ، انظر الشكل رقم (55) .

نلاحظ من المنحني أن الضغط ارتفع

إلى القيمة P_d ، بينما ما زال التشبع بالماء 100% . كذلك نلاحظ بعد النقطة P_d أنه بزيادة الضغط فإن درجة التشبع بالماء تبدأ بالتناقص ، وهذا الضغط هو الفرق بين ضغط الهواء المدفوع والماء المزاح أي أن :

$$P_w - P_{nw} = P_K$$

لذا يعبر المنحني السابق عن تغير P_K مع S_w ، حيث أن قيمة الضغط عند لحظة تشبع معينة تساوي :

$$P_K = \frac{2\sigma \cdot \text{Cos}\,\theta}{r}$$

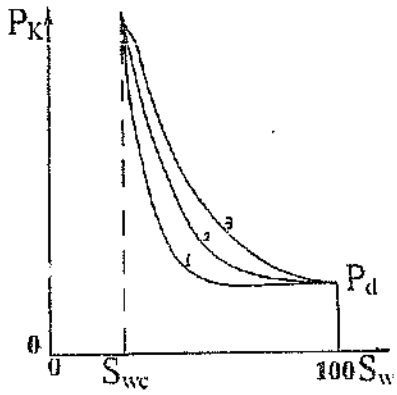
يلاحظ من العلاقة السابقة أن الضغط الشعري يتناسب عكسيا مع نصف قطر الفراغات المسامية كما أسلفنا سابقا ، لذا فإن أقل قيمة للضغط الشعري تكون في الفراغات الكبيرة وأكبر قيمة له تكون في الفراغات الصغيرة ، وعلى ذلك فإن الماء يزاح أولا من الفراغات الكبيرة ويحل محله الهواء ، ويكون P_d هو أقل قيمة للضغط الشعري اللازمة لإزاحة الماء وإحلال الهواء مكانه ، وإن أي قيمة أقل من P_d لا تزيح الماء من الفراغات المسامية . واعتمادا على ما سبق نصل إلى تعريف ضغط الإزاحة .

ضغط الإزاحة : هو أقل قيمة من الضغط الشعري P_K اللازمة لإزاحة السائل المبلل من الصخر المشبع به وإحلال السائل غير المبلل بدلا منه .

بعد إزاحة الماء من الفراغات الكبيرة بتأثير P_d يزاح الماء من الفراغات المسامية الأصغر فالأصغر باستمرار زيادة P_K .

تستمر هذه العملية حتى تصبح درجة التشبع بالماء S_w مساوية لأدنى قيمة لها وعندها لا تقل درجة التشبع بالماء في العينة رغم زيادة P_K ويعطي خطا موازيا للمحور الرأسي إلى ما لانهاية . كذلك يمكن عن طريق منحني الضغط الشعري معرفة مدى تجانس أو عدم تجانس الصخر ، حيث أنه كلما كان الصخر أكثر تجانسا كان منحني الضغط الشعري أكثر أفقيا وذلك لأن الفراغات بين الحبيبات في

الصخر المتجانس تكون متساوية مما يؤدي إلى إزاحة الماء من كل الفراغات المتساوية عند وصول الضغط الشعري إلى ضغط الإزاحة ، ويتضح هذا الأمر على الشكل رقم (56) حيث يلاحظ تناقص درجة التشبع للصخر المتجانس بدرجة كبيرة مع ثبات قيمة P_d .



1- صخر متجانس ؛ 2- صخر متوسط التجانس ؛ 3- صخر غير متجانس

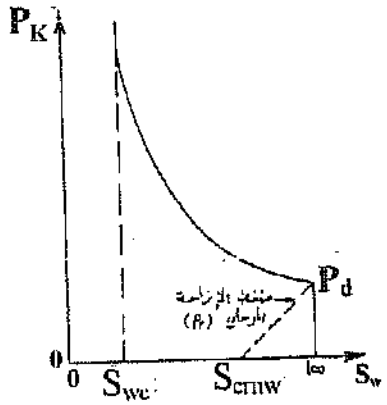
الشكل رقم (56) علاقة الضغط الشعري بدرجة التشبع بالماء

أما في حالة الصخر غير المتجانس فإن منحني الضغط الشعري يكون بشكل منحن ولا يظهر فيه جزء أفقي ، ويعلل ذلك أن الفراغات في الصخر غير المتجانس تكون مختلفة الأقطار ، لذا يحتاج كل فراغ إلى قيمة P_d مختلفة عن الأخرى .

في الصخور متوسطة التجانس يكون منحني P_K بين المنحنيين السابقين ، وهذا موضح على الشكل رقم (56) .

كذلك يجب التفريق بين ما يسمى بضغط الإزاحة الابتدائي P_d وضغط الإزاحة المرحلي P_r حيث أن :

ضغط الإزاحة الابتدائي P_d هو الضغط الشعري اللازم لإزاحة الماء وإدخال الهواء في الصخر عندما يكون الصخر مشبعا بدرجة أقل من 100 % ، ويكون الضغط في هذه المرحلة أقل من P_d وتتناقص قيمته كلما قلت درجة تشبع الصخر بالماء عن 100 % ، انظر الشكل رقم (57) .



الشكل رقم (57) علاقة الضغط الشعري بدرجة التشبع بالماء

إن أقل قيمة لضغط الإزاحة المرحلي هي القيمة صفر وذلك عندما يكون تشبع الصخر بالسائل غير المبلل (هواء) هي الدرجة الأدنى S_{crnw} ، حيث أنه بعد هذه القيمة لا يحتاج الضغط كي يتحرك مبدئيا ، حيث يبدأ في التحرك عند هذه النقطة تحت تأثير أقل ضغط ولا توجد قيمة للضغط في هذه المرحلة عندها لا يبدأ السائل في الإزاحة ، أي أن :

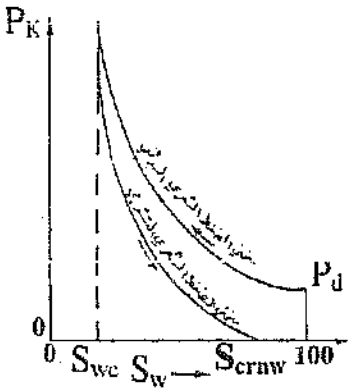
$$P_d > P_r > 0$$

$$1 - S_{crnw} < S_w < 100$$

1-7-6- منحني الضغط الشعري التشربي والدفعي

ينتج منحني الضغط الدفعي إذا كان الصخر مشبعا تشبعا كاملا بالماء ثم دفع في داخله هواء أو أي سائل غير مبلل للصخر وذلك بتطبيق إزاحة معين وإن اتجاه منحني الضغط الشعري الدفعي هو اتجاه تناقص تشبع السائل المبلل للصخر ، ويبدأ من $S_w = 100\ \%$ حتى $S_w = S_{wc}$ ، انظر الشكل رقم (58) .

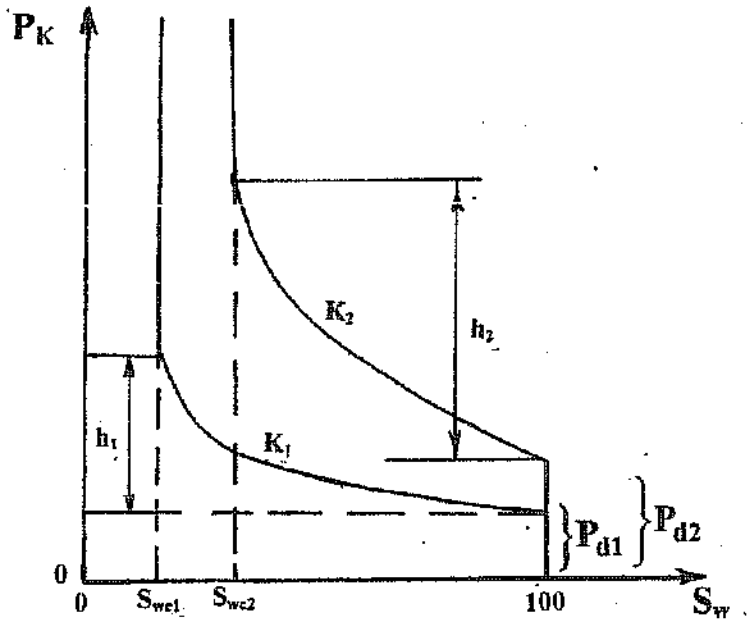
إذا وضع الصخر الذي يحتوي على السائل غير المبلل (هواء) ودرجة التشبع بالماء $S_{wc} = S_w$ في وسط مائي فإن الصخر يتشرب بالماء وبذلك نحصل على منحني الضغط الشعري التشربي .



الشكل رقم (58) منحني الضغط الشعري التشربي والدفعي

من خلال ما سبق نستنتج ما يلي :

1. تربط الضغط الشعري علاقة مع درجة التشبع بالسائل المبلل ويتناسب معه عكسيا .
2. يتوقف الضغط الشعري على حجم الفراغات في الصخر ، وتكون قيمته كبيرة في الصخور ذوات الحبيبات الصغيرة ، وقيمته صغيرة في الصخور ذوات الحبيبات الخشنة الكبيرة .
3. لا يوجد حد فاصل بين مستوى النفط والماء في الطبقات النفطية ولكن توجد منطقة يتغير فيها التشبع بالماء من القيمة $S_w = 100\ \%$ عند قيمة $P_d = P_K$ إلى قيمة $S_{wc} = S_w$ وهذه المنطقة تدعى بالمنطقة الانتقالية (Transition Zone) وعلى هذا الأساس لا يوجد ما يسمى السطح الفاصل بين النفط والماء (WOC) والسطح الفاصل (GWC) أو الغاز والنفط (GOC) .
4. تكون المنطقة الانتقالية صغيرة في حالة الصخور المتجانسة ذوات النفوذية الكبيرة ، بينما تكون كبيرة كلما كانت الطبقة غير متجانسة وكلما كانت نفوذيتها صغيرة كما في الشكل رقم (59) .
5. تكون درجة التشبع الأدنى بالماء (S_{wc}) كبيرة في حالة الصخور غير المتجانسة ذوات النفوذية الصغيرة والعكس صحيح .



$K_1 > K_2$, $h_1 < h_2$, $S_{wc1} < S_{wc2}$

الشكل رقم (59) علاقة الضغط الشعري بدرجة التشبع بالماء

1-7-7- المياه المترابطة

لتعيين كمية المياه المترابطة (درجة التشبع الأولية بالماء) هناك ثلاث طرق :

1. طريقة تحليل العينات الأسطوانية والتي جرى تطبيقها لدى استعمال سائل حفر ذي أساس نفطي .
2. تحسب من نتائج القياسات الكهربائية .
3. تعين بواسطة منحني الضغط الشعري بالعلاقة مع درجة التشبع بالماء .

الشكل رقم (60) يوضح علاقة درجة التشبع بالماء المحسوبة من العينات الأسطوانية المأخوذة لدى استعمال سائل حفر ذي أساس نفطي بالنسبة إلى نفوذية الصخور المقاسة بواسطة الهواء . توضح هذه النتائج بشكل عام أن درجة التشبع