الإشباع Saturation :

الإشباعات هي نسبة حجم المائع إلى حجم الفراغ في الصخر

يمثل الجزء من الحجم المسامي في الصخر الذي تشغله الموائع الطبقية.

يمثل الإشباع جزءاً من مسامات الطبقة المشغول بمائع معين

- **فالإشباع المائي** يعني الجزء أو النسبة المئوية من الحجم المسامي الحاوي على **مياه طبقية**. وبتواجد الماء وحيداً مالئاً للمسامات الصخرية تكون الطبقة مشبعة كلياً بالماء (أي 100% ماء) - يرمز للإشباع بالحرف S يضاف إليه حرف ثانوي يستخدم للدلالة على نوعية الإشباع .

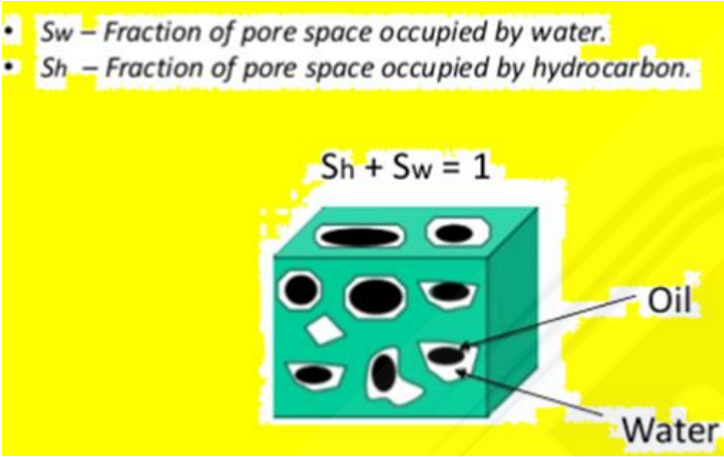
(**Sw: الإشباع بالماء، So: الإشباع بالنفط و Sh : الإشباع بالهيدروكربون**).

- يعرف **الإشباع بالهيدروكربون** بحجم المسامات المملوءة بالنفط و الغاز

يمكن أن يملأ الفراغ المسامي بالغاز، النفط، أو الماء، ويجب أن يكون حاصل جمع هذه الإشباعات معاً في الصخر 100% . $Sh + Sw = 1$

على الرغم من تواجد حالات نادرة من الإشباعات بموائع أخرى غير الماء والنفط والغاز(غاز ثنائي أوكسيد الكربون ،هواء)

اذاً : يكون مجموع الإشباعات في الطبقة الصخرية 100% ويساوي الواحد



إذا كان الإشباع بالماء أقل من 100% هذا يعني :
الإشباع بالهيدروكربون يساوي ما تبقى من 100%
(أي نطرح منها قيمة الإشباع بالماء)

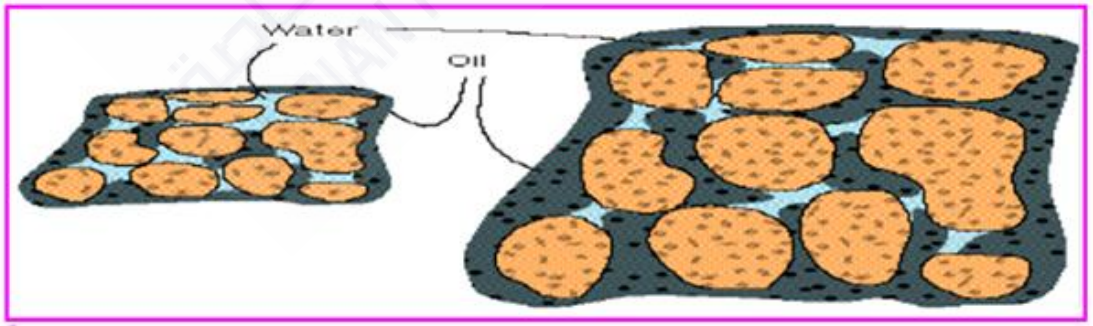
يتفاوت الإشباع بالماء في الطبقات بين 100% --- وقيم صغيرة جداً ولكن نادراً ما يكون صفراً

$$S_h=1-S_w$$

توزع الاشباعات في الصخور الخازنة

الإشباعات في الصخور الخازنة للهيدروكربون تتكون من(نفط + ماء + أو غاز)
ففي التشكيلات المنتجة تكون المياه مرتبطة بالحبات الصخرية، والنفط بين الفراغات
يتحرك بشكل حر والاندفاع إلى خارج التشكيلة باتجاه تجويف البئر
تختلف النسب بشكل متفاوت كما في الشكل

ويعد تحديد الإشباع بالماء و بالفحوم الهيدروجينية أحد أهم الأهداف الأساسية للقياسات الجيوفيزيائية البئرية.



ما هي أنواع الاشباعات :

-الاشباعات القابلة للانتاج : تكون الموائع قابلة للحركة بين الحبات الصخرية

--الاشباعات الغير قابلة للإنقاص : وهي الاشباعات التي تبقى ضمن الطبقة ولا يمكن ازاحتها أو استخراجها.

- تزداد كمية المياه غير قابلة للإنقاص في الصخور ذات الحبات الصخرية الصغيرة (مساميَة ضيِقَة)، كما في الغضار الذي ترتبط بسطوح حباته طبقة من المياه المرتبطة وهذا ما يفسر، أنه كلما كان الصخر مشوب بالشيل كلما قلت الصفات الخزنيَة للصخر

الإشباع المائي غير القابل للانقاص :

مهما كانت الطبقة الخازنة غنية بالنفط أو الغاز، تبقى دائماً فيها كمية صغيرة من المياه بصورة مياه شعرية لا يمكن استبدالها بالنفط أو الغاز ويطلق عليها اسم الإشباع المائي غير القابل للتخفيض، الإشباع بالماء المحجوز ، ماء غير قابل للإنقاص

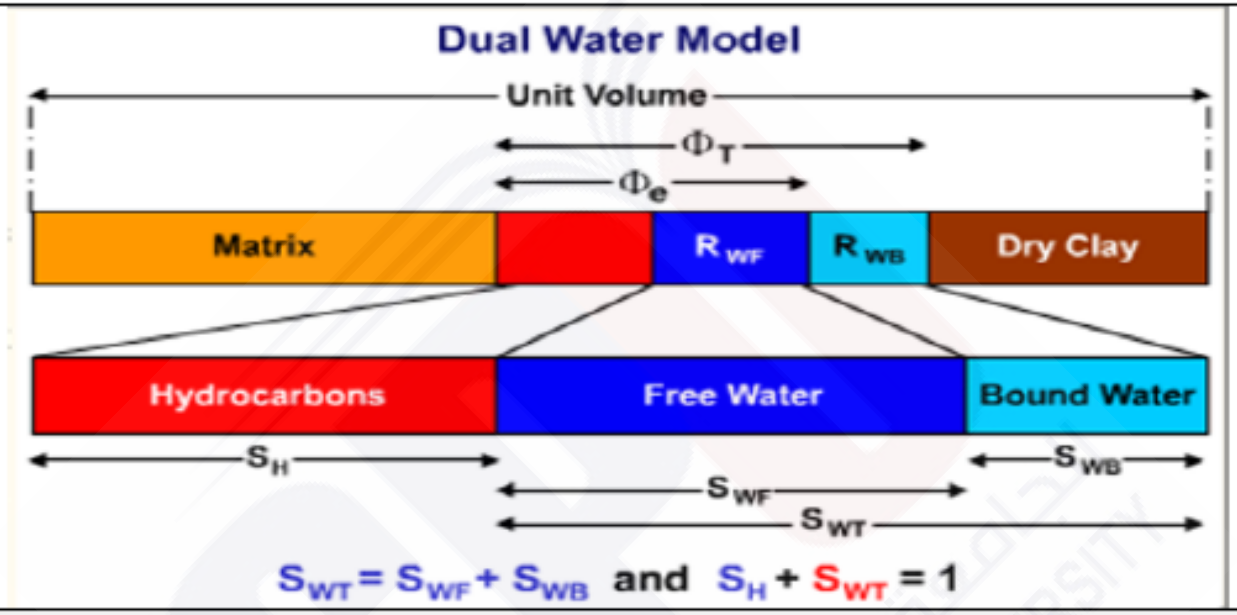
.

الإشباع النفطي المتبقي : Residual hydrocarbons

كذلك الأمر بالنسبة للإشباع بالنفط أو الغاز، فمن المحال تخليص الطبقة الخازنة من كامل الهيدروكربون بواسطة الجريان النظامي للموائع أو بتقنيات الاستخراج الأخرى حيث يبقى بعض الهيدروكربون محجوزاً بجزء من المسامي، الذي يسمى **الإشباع النفطي المتبقي .**

وفي حال وجود الطبقات الخازنة الحاوية للماء في الأسفل والنفط في الأعلى فلا يكون السطح الفاصل بينهما حاداً دائماً، بل يكون الانتقال تدريجياً من 100% ماء إلى الأغلبية النفطية ، ويصل الإشباع بالماء بالجزء العلوي من الطبقة للحد الأدنى وتسمى هذه القيمة الإشباع بالماء غير القابل للتخفيض **Swi**

- يعبر عما سبق بالمعادلة المستخدمة من قبل شلمبيرجير



الشكل نموذج الماء المزدوج

Φt: المساميَة الكليَة total porosity.

Φe: المساميَة الفعالة effective porosity.

Rwf: مقاوميَة الماء الحر free water.

Rwb: مقاوميَة الماء المرتبط bound water.

Sh : الاشباع بالهيدروكربون

Swt : الاشباع المائي الكليَ.

Swf : الاشباع بالماء الحر .

Swb : الاشباع بالماء المرتبط.

حساب الإشباع Saturation calculation

يتم حساب الإشباع بواسطة البرنامج، الذي يقدم العديد من الخيارات لحساب الإشباع مثل معادلة أرشي Archie ، أندونيسيان Indonisian علاقة أرشي للإشباع من أكثر العلاقات ملائمة في الخزانات الكربونائية .

يحسب الاشباع من خلال علاقة أرشي التي تربط بين المسامية والمقاومية وثوابت أخرى تتعلق بالليتولوجيا

(Archie)

$$Sw = \left[\frac{a * Rw}{\phi^{m} * Rt} \right]^{\frac{1}{n}}$$

حيث أن

sw الإشباع المائي في القطاع غير المجتاح uninvited zone.

Rw مقاومية المياه الطبقية resistivity of water

Rt المقاومية الحقيقة للمنطقة غير المجتاحة true resistivity

Φ مسامية التشكيلة formation porosity

m ثابت السمنتة cementation factor

n ثابت الإشباع ويأخذ عادة القيمة 2 في الصخور الكربونائية .

Sw = water saturation

Rw = formation water resistivity

Rt = formation resistivity

ϕ = porosity

Empirical constants

n = saturation exponent

a = cementation exponent

m = cementation factor

n = 2	n = 2
a = 0.81	a = 1
m = 2	m = 2

بعد التبديل بمعامل الطبقي

في الطبقات النظيفة وضعت علاقة آرشي لحساب الإشباع المائي :

حساب الإشباع المائي من علاقة آرشي

من أجل النطاق النظيف (غير مجتاح):

$$S_W = \sqrt[n]{FR_W/R_T}$$

F: المعامل الطبقي.

R_W: مقاومية المياه الطبقية .(Ωm).

R_T: المقاومية الحقيقية للطبقة (Ω.m) .

يمكن استنتاج الإشباع المائي من القياسات الكهربائية البئرية حسب العلاقة أعلاه مكتوبة بالشكل التالي :

$$S_W = \sqrt[n]{FR_W/R_T}$$

وإذا استعضنا $R_O = FR_w$ بقيمة مقاومية الصخر المشبع كليا (أي $S_W=1$)

نحصل على العلاقة التالية :

$$S_W = \sqrt[n]{\frac{R_O}{R_t}}$$

$\frac{Rt}{Ro}$ دليل المقاومية ونستخدم هذه العلاقة في حساب

- قيمة الإشباع المائي المائي S_w

- وقيمة الاشباع الهيدروكاربوني (أي النفط والغاز)

$Sh=1-Sw$

بعد الحصول على :

R_o من الجزء المشبع كليا بالماء من الطبقة

و R_t من مناطق الاشباع الغازي أو النفطي لنفس الطبقة

بفرض أن العامل الطبقي لم يتغير فيها

- يعطي دليل المقاومية مقياساً لمبررات اختيار الطبقة ويشير إلى أهميتها من الناحية النفطية إذ :

-تكون الطبقة مشبعة بالماء إذا كان دليل المقاومية دون / 3/

-وتكون الطبقة عادة مشبعة على الأكثر بالماء إذا كان دليل المقاومية بين / 3/ و / 5/ .

-وتكون الطبقة عادة مشبعة على الأكثر بالنفط إذا كان دليل المقاومية بين / 5/ و / 10/ .

-وتكون عادة حاملة للنفط إذا كانت قيمة دليل المقاومية فوق / 10/ .

كما أن حساب الإشباع في القطاع المغسول invaded zone تحسب من خلال العلاقة التالية :

(Archie)

$$S_{xo} = \left[\frac{a}{\Phi^m} \times \frac{R_{mf}}{R_{xo}} \right]^{1/2}$$

حيث أن :

Sxo الإشباع المائي في النطاق المغسول flushed zone.

Rxo مقاومية النطاق المغسول .

Rmf مقاومية راشح الحفر .

من أجل النطاق المغسول (المجتاح بسائل الحفر):

$$S_{XO} = \sqrt[n]{F R_{mf} / R_{XO}}$$

F: المعامل الطبقي.

S_{XO}:الإشباع المائي في النطاق المجتاح (%).

$$R_{XO} = 1 - S_{hr}$$

m -ثابت يؤخذ من التقارير المخبرية الخاصة بالتشكيلة المدروسة

R_{mf} -قيمة مقاومية راشح الحفر من تقارير الحفر الخاصة بكل بئر

R_T - تؤخذ من التسجيل البئر للمقاومية العميقة .

R_{XO} - تؤخذ من التسجيل البئر للمقاومية الضحلة .

R_W - تحسب قيمة مقاومية المياه الطبقية باستخدام برنامج IP-

S_{hr} - الاشباع الهيدروكربوني المتبقي في النطاق المجتاح

تتحدد من مقارنة قيم الإشباع بالماء في القطاع المغسول

معها في القطاع السليم غير المجتاح

قيمة الحجم الإجمالي من النفط المُزاح (المدحور) بسبب عملية الاجتياح

ومقدارها $\emptyset(S_{xo} - S_w)$

ذلك لأن $S_h = (1 - S_w)$ و $S_{hr} = (1 - S_{xo})$.

إذ يُستدل من قدرة راشح الحفر

على دحر وطرد النفط خلال عملية الاجتياح، أن الطبقة الخازنة

نفوذة إزاء النفط، ويتوقع بالتالي، إنتاج النفط منها عند

وضعها في الاستثمار.

حيث أن Sxo هي إشباع القطاع المغسول

ويحسب الحجم الإجمالي للنفط

bulk volume hydrocarbon بالعلاقة :

$$BVH = \Phi_{eff} * S_{hm}$$

حساب الحجم الإجمالي للماء من خلال العلاقة

$$BVW = \Phi_{eff} * S_w$$

حيث أن Φ eff المسامية الفعالة BVW bulk volume water الحجم الإجمالي للماء .

حساب الاشباع النفطي hydrocarbon saturation من خلال العلاقة :

$$Sh = 1 - Sw$$

ويمكن أن يقسم الإشباع النفطي إلى إشباع نفطي متبقي residual و إشباع نفطي متحرك movable وذلك وفق الشكل التالي :

$$Shm = Sh - Shr$$

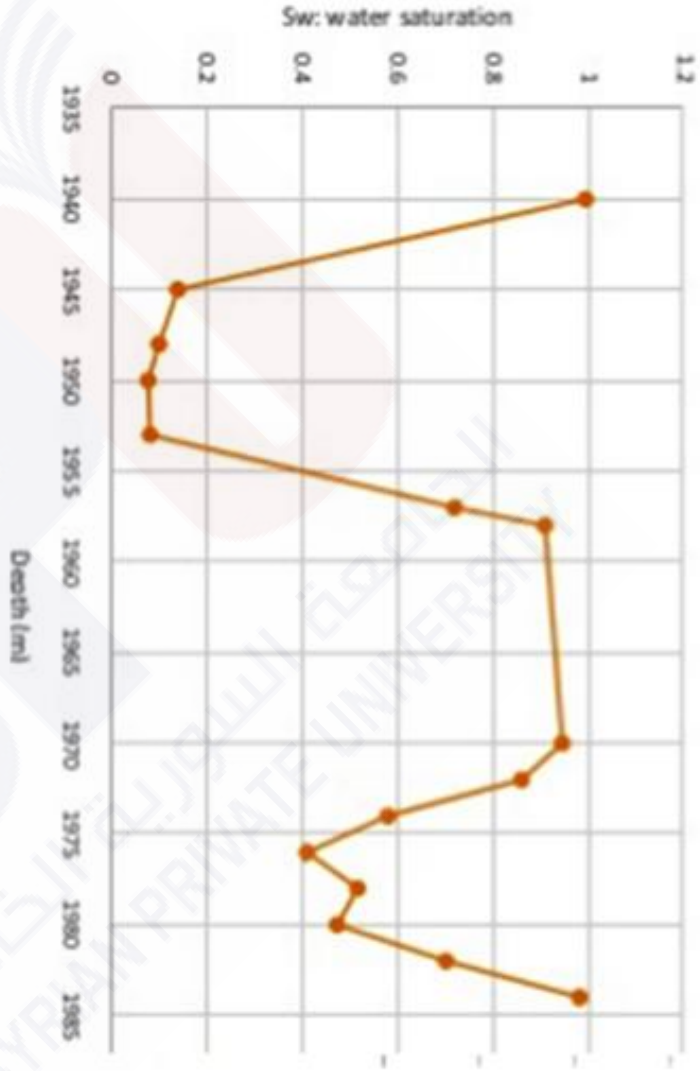
حيث Shm كمية الإشباع النفطي المتحرك ، Shr الإشباع النفطي المتبقي.

أما الإشباع النفطي المتبقي فيحسب من العلاقة :

$$Shr = 1 - Sxo$$

Calculation of water saturation

Depth	Sw (Archie)
1940	0.994843
1945	0.138062
1948	0.098991
1950	0.076076
1953	0.080283
1957	0.720201
1958	0.909509
1970	0.946029
1972	0.860707
1974	0.579751
1976	0.409946
1978	0.515847
1980	0.473365
1982	0.701677
1984	0.982143



العامل الطبقي والمسامية Formation Factor and Porosity:

تحقق تجريبيا أن مقاومية الطبقة النظيفة الحاملة للماء Ro (خالية من الغضار أو الشيل وتخلو من الفحوم الهيدروجينية) تتناسب طردا مع مقاومية المائع Rw الذي يشبع مساماتها كليا .
يسمى (F) : Formation Resistivity Factor بعامل المقاومية الطبقي ويعطى بالعلاقة التالية :

$$Ro = F\ Rw$$

حيث (Ro : هي مقاومية الطبقة الصخرية الخالية من الغضار والمشبعة 100% بالمائع ذي المقاومية Rw).

يعتمد (F) formation factor على:

- مسامية التشكيل وهندسية الفراغات ويتناسب عامل المقاومية الطبقي عكسا مع المسامية
- ليتولوجية الطبقات Lithology of the formation
- درجة السمنتة Degree of cementation
- وشكل توزع الغضار بالصخر ونسبته .

يتعلق **عامل المقاومية الطبقي** ببنية المسامات وبتوزع حجومها وقد اقترح آرشي Archie صيغة تربط بين المسامية Φ والعامل الطبقي F بالعلاقة التالية :

$$F = a / \theta^{m}$$

حيث : m عامل السمنتة أو أس المسامية cementation ويتم تحديده تجريبيا .

a = cementation exponent m = cementation factor

كما وفرت الخبرة قبولا للعلاقات التالية التي تربط المسامية بالعامل الطبقي F (اعتمادا على تركيب الصخر وبنية المسامات):

للرمال $F = 0.62/\Phi^{2.15}$

الطبقات المتراصة $F = 1/\Phi^{2}$

تعرف العلاقة الأولى عموما بعلاقة همبل Humble formula

والثانية بعلاقة أرشي للعامل الطبقي وتبسط علاقة همبل إلى الشكل :

$F = 0.81/\Phi^{2}$ Shell Formula

تعد علاقة همبل مرضية الحبيبية ، ويمكن الحصول على نتائج أفضل من أجل الصخور الحوارية عند استخدام العلاقة $F=1/\Phi^{2}$

a - قيمة تجريبية يتم تحديدها لكل منطقة أو ربما لكل نوع من أنواع الصخور الخازنة

وتأخذ في الرمال قيمة $a_{sand}=0.81$

وفي الصخور المتماسكة قيمة الواحد

بينما تأخذ m : قيما واقعة بين 1.8 و 2.5 وحتى 3.0 .

R_W: مقاومية المياه الطبقية

ماء الطبقة هو الماء غير المُلوّث براشح الحفر الذي يملأ الطبقة الصخرية المسامية. وتُعدُّالمقاومية الكهربائية لماء الطبقة R_w متغيّراً هاماً في عملية التفسير،لأنها مطلوبة من أجل حساب قيمة الإشباع (بالماء و/أو بالفحوم الهيدروجينية) من معطيات التسجيلات الكهربائية الأساسية.

هناك عدة مصادر للمعلومات

حول مقاومية ماء الطبقة، تشمل جداول المياه والتحاليل الكيميائية ومنحني الكمون الذاتي SP والحسابات المتنوعة للمقاومية والمسامية والعروض المتقاطعة cross plots المتعلقة بها.

R_w مأخوذة من الجداول المائية

تتوفر في العديد من الأقاليم المنتجة للنفط جداول منشورة، تتضمّن معطيات المقاومية للعديد من مياه الطبقات، تم جمعها من حقول مختلفة ومن آفاق منتجة مختلفة من الأقليم. أما مصادر قيم R_w فهي من قياسات تتم على عينات المياه المأخوذة أثناء الإنتاج، أو من اختبار الإنتاج

R_w مأخوذة من التحاليل الكيميائية

أن القياسات المباشرة لمقاومية ماء الطبقة التي تتم على عينة مائية مستخرجة من البئر،هي الأفضل دائماً

تتحدد الناقلية الكهربائية (أو المقاومية R_W) من التركيز ودرجة الحرارة

يتم عادة أخذ عينات مائية من الطبقة الخازنة وتحليلها مخبريا بعد التخلص من كل المواد الأخرى التي تحويها، والتي قد تسبب أخطاء في قراءة المقاومية، مع مراعاة إجراء القياسات في درجات حرارة مماثلة للحرارة، التي أخذت فيها العينة (حرارة التشكيلة الخازنة التي أخذت منها) حيث أن للحرارة تأثير كبير على المقاومية (علاقة عكسية).

كما يمكن أن تكون هذه المصادر التسجيلات الجيوفيزيائية البئرية.

يمكن الحصول على مقاومية ماء الطبقة R_w من منحني الكمون الذاتي SP.

وتتمثل استجابة منحني الكمون الذاتي SP في طبقة نظيفة بالعلاقة:

$$SP = -K \log \frac{R_{mf}}{R_w}$$

حيث: K ثابتة تعتمد على درجة الحرارة

R_w مأخوذة من تسجيلات المقاومية والمسامية

تسجيل R_{wa}

يتم حساب تسجيل المقاومية الظاهرية لماء الطبقة R_{wa} من العلاقة:

$$R_{wa} = \frac{R_t}{F}$$

حيث: R_t المقاومية المأخوذة من تسجيل مقاومي عميق الاستكشاف

F العامل الطبقي المحسوب من قراءات تسجيل المسامية.

تكون في القطاعات الحاملة للمياه والنظيفة $R_t = R_0$

$= FR_w$ وعندها تكون قيمة R_{wa} المستخلصة مساوية لـ R_w

يمكن حساب قيمة R_w ، عندما تتوفر المسامية (أو العامل الطبقي) والمقاومية الحقيقية من العلاقة $(R_w = R_0/F)$

وتعمل هذه التقنية عبر المجالات، التي تبقى فيها مقاومية مياه الطبقة ثابتة، أو أنها تتغير تدريجاً فقط. ومن حسن الحظ، أن هذه الحالة هي السائدة في معظم المناطق المنتجة للنفط

يمكن أخذ Rw مباشرة من

قيم قياسات المقاومية المسجلة أمام التشكيلة الخازنة (بالنسبة للطبقة المائية الحاملة) .
لكن هذه القراءات تتميز بالحساسية العالية ويتوجب توفر شروط دقيقة ومحددة من أجل اعتمادها، كقيم صحيحة لمقاومية المياه الطبقية والشروط هي:

- **طبقة عديمة الغضار(بحيث لا تؤثر المياه الممتزة والمرتبطة بالغضار على دقة القياس)**
- **النطاق ذو المسامية الأعلى Φmax من التشكيلة الخازنة**
- **أخذ أقل قيمة ل Rw يتم الحصول عليها بعد تطبيق الشرطين السابقين**

تحدد أيضاً قيمة مقاومية المياه الطبقية R_W
من خلال برنامج IP-V3.5 بحساب قيمة R_W بالتطبيق على مخطط (Picket plot)
الذي يجمع بين المسامية والمقاومية العميقة والاشعاع الطبيعي لكل بئر على حدا ، لتكون الدقة جيدة ويتم ذلك ضمن الطبقة المائية

يمكن الحصول على مقاومية R_w
إذا قسنا درجة حرارة قاع البئر (BHT) Bottom Hole Temperature.
والتدرج الحراري الطبيعي في المنطقة Geothrmal Gradient

قياس الحرارة مع العمق من المدخلات التي يطلبها البرنامج
لا يتوفر قياس الحرارة في جميع الآبار لذا تم حساب التدرج الحراري من أجل هذه الآبار وفق العلاقة التالية :

$$T.G=\frac{BHT-Ts}{DT}$$

حيث : T_S درجة الحرارة السطحية C^0
BHT درجة حرارة قعر البئر C^0
D_T العمق الكلي

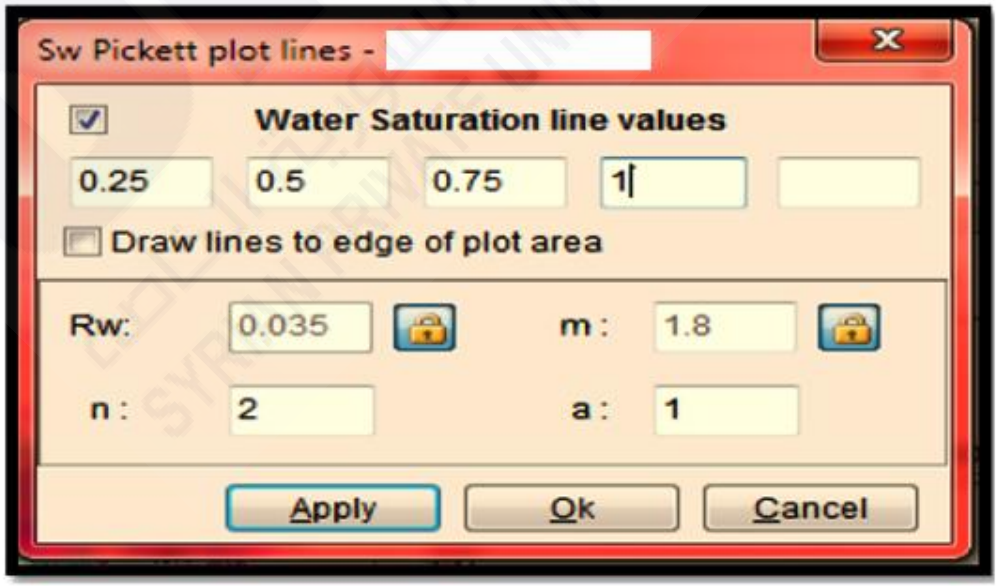
تحديد Rw من مخططات (Pickett plot)

تتكون هذه المخططات من تقاطع ثلاث قيم للقياسات، وهي:

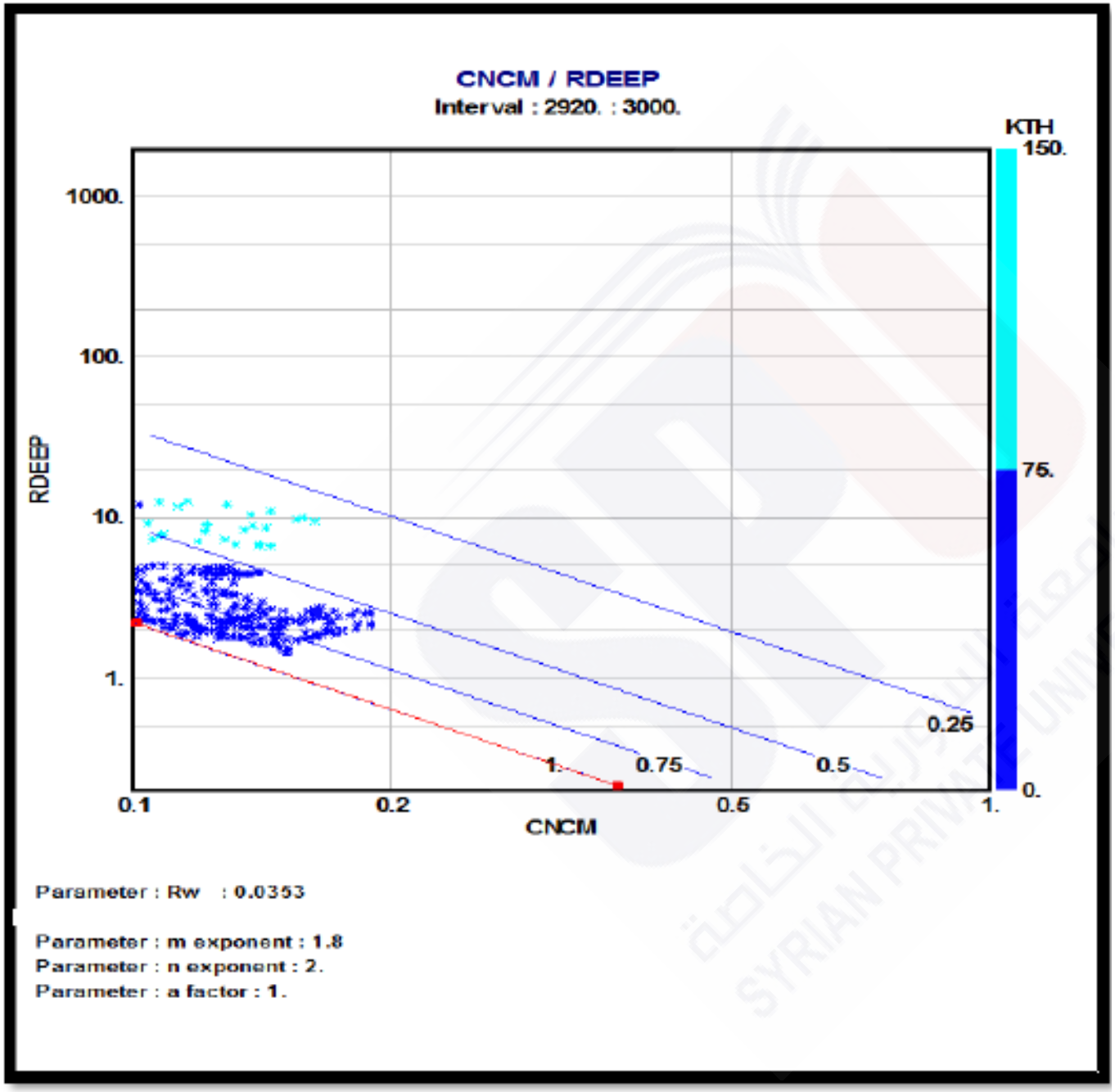
- قيم المقاومية العميقة R_{ILM} وتعتمد على المحور X.
- قيم المسامية النيترونية CNCM وتعتمد على المحور Y.
- قيم الإشعاعية GR بدون النشاط الاشعاعي لمركبة اليورانيوم(U) التي تدل على الغضار (KTH) ، ويتم اعتمادها على المحور Z.

تدخل هذه القيم من أجل العمق الموافق للنطاق الحامل للماء في التشكيلة الخازنة المدروسة، ولكن في حال عدم وجودها، فإننا نبحث عن أقرب تشكيلة مجاورة حاملة للماء بعد ذلك يتم ادخال قيمة أس السمنتة (m) المعتمد، وقيمة الثابت (a)، وأس الاشباع(n)

يدل القسم العلوي على نسب الاشباع المائية التي تمثل على الشكل وفق خطوط



مثال :



مخطط PickettPlot لتحديد قيمة مقاومية المياه الطبقية R_w

يتم التعديل والازاحة حتى وصول خط الاشباع المائي ذو القيمة (1) لأول مجموعة من القيم الممثلة على المخطط ، عندها نحصل على قيمة مقاومية مياه الطبقية

في أسفل المخطط تعطى قيمة مقاومية مياه الطبقية والتي تساوي 0.035 Ω.m

يمكن أن تعتمد هذه القيمة من أجل باقي آبار الحقل

المقاومية الحقيقية للتشكيلة الخازنة

Rt (true resistivity):

تحدد مقاومية النطاق غير المجتاح(النظيف) من أجل الحصول على قيم دقيقة للإشباعات الحقيقية، من خلال قراءات سابرة المقاومية العميقة R_{deep} ، وتصحيحها بحذف قيم المقاومية الضحلة R_{xo} التي تمثل مقاومية التشكيلة المملوءة بسائل الحفر، عوضاً عن المائع الحقيقي للتشكيلة ، وذلك كون قراءات المقاومية تكون تراكمية مع العمق ، أي تمثل مجموع مقاومية السماكة الصخرية بدءاً من جدار البئر وصولا إلى النطاق غير المجتاح.

مقاومية راشح الحفر R_{mf}:

يتم تحديد مقاومية سائل الحفر مخبرياً على السطح قبل أن يتم حقنه في البئر، وذلك من أجل تصحيحات قيم المقاوميات المقيسة، وحسب نوع المواد الداخلة في تركيب سائل الحفر، تتغير مقاوميته بشكل كبير، فيمكن أن يكون ذو مقاومية عالية جداً، أو عازلاً في حال كان ذو أساس نفطي OBM ، أو أن يكون ذو ناقلية عالية جداً في حال استخدام سوائل حفر مالحة، ذات أساس مائي WBM عند مصادفة طبقات ملحية ، وذلك منعاً لذوبانها أو تهدمها.

مثال :

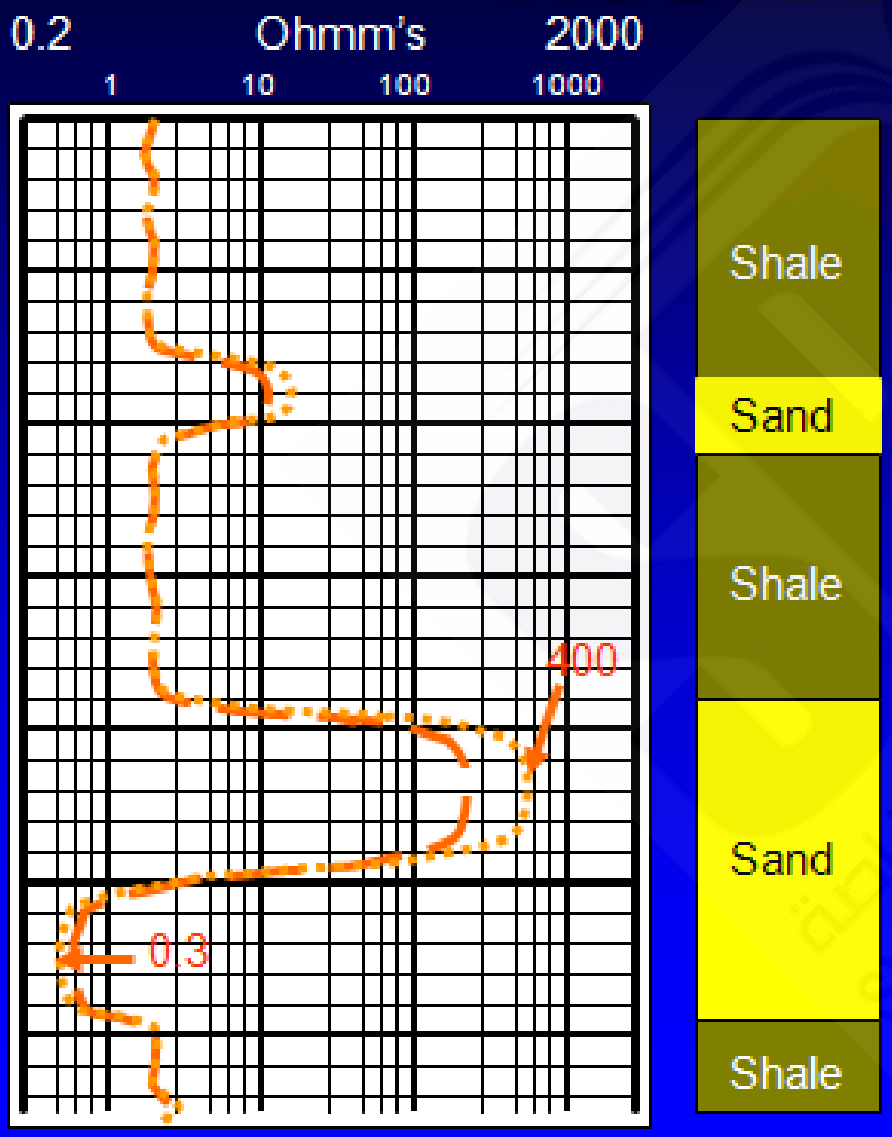
Calculation of formation water resistivity : **Rw**

Depth	Rt	Rw
2025	0.95	0.073837
2028	0.7	0.037128
2029	0.1	0.0045
2030	0.8	0.054332
2031	0.9	0.052893
2034	0.7	0.054406
2035	0.7	0.047541
2036	0.7	0.047541
2037	0.85	0.047488

Rw= 0.05, this is used in Archie's equation to calculate water saturation in oil and gas bearing zone

مثال :

Resistivity



Basic "Archie" resistivity formula:-

$$Sw^{n} = \frac{a \times Rw}{\phi^{m} \times Rt}$$

Sw = water saturation
Rw = formation water resistivity
Rt = formation resistivity
= porosity
a, m, n are constants
(default a=1, m=2, n=2)

Example porosity = .26 (26%)

Sw = 100%

Rw = .02 (at reservoir temp)

Sw = 3%