

الطرق الهندسية لقياس الخواص الفيزيائية والميكانيكية والمحتوى المائي ومعدلات السريان للصخور الجوفية الحاوية للمياه

الدكتور/ مساعد بن ناصر العواد ، الدكتور/ عماد بن سليمان الحميضي
و الدكتور/ محمد بن عبد الرحيم الصديقي
قسم هندسة النفط - كلية الهندسة - جامعة الملك سعود
ص ب 800 الرياض 11421 المملكة العربية السعودية
ت- 4676885 فاكس- 4674422

الملخص:

الحمد لله القائل "وجعلنا من الماء كل شئ حي" فهو الذي علمنا أنه لا حياة على وجه الأرض بدون ماء. ومن المعلوم أن كمية الأمطار في المملكة العربية السعودية قليلة جدا فضلا على أنها غير منتظمة وهي أكبر بلد في العالم لا يملك أنهارا أو جداول دائمة الجريان. ولكن رغم عدم وجود مورد سطحي للماء يعتمد عليه إلا أن الله قد حباها بموارد جوفية كبيرة للمياه موجودة في الطبقات الجوفية العميقة الممتدة تحت معظم أصقاعها. ومن أجل الاستفادة من تلك الموارد الجوفية لابد من تقدير محتوى المياه في تلك الطبقات بدقة وعدم استنزافها بسرعة كبيرة من أجل المحافظة عليها للأجيال القادمة.

تهدف هذه الورقة العلمية إلى بيان الأسس النظرية لطرق القياس المعملية للخواص الفيزيائية كالمسامية والنفاذية وكذلك الخواص الميكانيكية كالإنضغاط والشد وخاصة الإنهيار لصخور الطبقات الجوفية الحاوية للمياه. وسيتم بيان الطرق الرياضية (معادلات السريان خلال الأوساط المسامية) اللازمة لحساب المخزون المائي للطبقات الجوفية ومعدلات الإنتاج المتوقعة منها. وسيتم إدراج بعض الأمثلة لقياسات معملية لعينات صخرية أخذت من مكاشف بعض الطبقات في المملكة العربية السعودية.

وعليه فإن هذه الورقة العلمية ستكون مرجعا هاما في مجال المياه الجوفية مبنية الطرق المعملية والرياضية اللازمة للباحثين في ذلك المجال.

1- مقدمة

تبلغ مساحة المملكة العربية السعودية 2250000 كيلو متر مربع تشكل حوالي 80% من مساحة شبه الجزيرة العربية. تعتبر الثروة المائية بالنسبة للملكة العربية السعودية من الأهمية بمكان نظرا للطبيعة الصحراوية ذات الأمطار القليلة والغير منتظمة وكذلك لعدم وجود انهار أو بحيرات يمكن الاعتماد عليها على المدى البعيد. ولذلك تتضافر الجهود للحفاظ على الثروة المائية الجوفية التي حبا الله بها هذا البلد وذلك لكي تلبي احتياجات الأجيال القادمة. ومن هنا يتضح أن الاستنزاف السريع لهذه الثروة وذلك عن طريق الإنتاج بمعدلات عالية قد يؤدي إلى حدوث تغير كبير في الخواص الفيزيائية والميكانيكية لصخور تلك الطبقات الحاوية للماء مما يؤدي إلى انخفاض حاد في معدلات الإنتاج من نفس الطبقات مستقبلا. ومن هنا تتضح أهمية حساب

معدل الإنتاج الحرج والذي إذا تم تجاوزه تحدث المشاكل المذكورة أعلاه. وتقدم هذه الورقة طرق قياس بعض الخواص الفيزيائية والميكانيكية وتقدير المحتوى المائي وخواص السريان ومعدل الإنتاج الحرج (الأقصى) للصخور الجوفية الحاوية للماء. وبذلك يمكن عن طريق معرفة الإنتاج الحرج وغيرها من الخواص الأخرى ترشيد الاستهلاك المائي والحفاظ عليه للأجيال القادمة بإذن الله.

2- الخواص الفيزيائية لصخور الطبقات الجوفية الحاوية للمياه

إن الصخور الحاوية للمياه تختلف خواصها الفيزيائية تبعاً للبيئة التكوينية لهذه الصخور. ويقصد بالبيئة التكوينية المراحل الترسيبية للصخر ونوعية وأشكال الحبيبات أو المواد الصلبة المترسبة وكمية المواد اللاحمة لهذه الحبيبات وكذلك الضغط الناتج عن ثقل الطبقات التي تعلو هذه الصخور. إن من أهم الخواص الفيزيائية التي تحدد كمية المياه الممكن استخراجها من طبقة معينة هي مسامية الصخر الحاوي للمياه ونفاذيته، وكذلك توزيع أحجام المسامات الصخرية ونسبة كل حجم معين من مجموع المسامات الكلي.

1-2 المسامية

هي قياس للفراغ المتوفر في الصخر لخزن السوائل. وتعرف بأنها نسبة المسامات إلى الحجم الكلي للصخر. يمكن تقسيم المسامية حسب ميكانيكية تكونها إلى مسامية أصلية وأخرى مستحثة. الأصلية هي التي تكونت خلال ترسيب الصخر والمستحثة هي التي تكونت بسبب بعض العمليات الجيولوجية اللاحقة لعملية ترسيب الصخر. الصخور ذات المسامية الأصلية تعتبر أكثر تماثلاً في خواصها من الصخور التي أكثر مساميتها من النوع المستحثة. بما أن الصخور تتكون من حبيبات ذات أحجام متعددة فإن الحجم والشكل والنظام التركيبي والتوزيعي لهذه الحبيبات هي من العوامل التي تؤثر على مسامية الصخر. إن جزء من الفراغ المسامي للصخر يحتوي على طين ومواد لاحمة مما يقلل من مسامية الصخر. كذلك وزن الطبقات له تأثير مباشر على مسامية الصخر حيث أن الضغط يزيد من تداخل الحبيبات مع بعضها البعض مما يحول المسامات الكبيرة إلى مسامات أصغر فأصغر. وكلما كانت الحبيبات متناسقة الأحجام كلما زادت مسامية الصخر. المسامية الفعلية هي التي تمثل المسامات المتصلة ببعضها البعض بقنوات تسمح بإنتاج السوائل المخزنة في هذه المسامات.

2-2 حساب المسامية

لحساب المسامية فإنه من الضروري قياس قيمتين من ثلاث قيم هي الحجم الكلي للعينة الصخرية وحجم المسامات وحجم المادة الصلبة المكونة للصخر، حيث أن:

$$\text{المسامية} = (\text{حجم المسامات} / \text{الحجم الكلي للعينة}) \times 100$$

$$\text{حجم المسامات} = \text{الحجم الكلي للعينة} - \text{حجم المادة الصلبة المكونة للصخر}$$

الحجم الكلي يمكن حسابه بقياس أبعاد العينة الصخرية باستعمال القدمة إذا كانت العينة منتظمة الشكل (مثلًا إسطوانية أو مكعبة). ويمكن حسابه للعينة غير منتظمة الشكل بقياس حجم السائل المزاح عند غمس العينة (المشبعة بنفس السائل) في ذلك السائل.

إن قياس حجم المسامات يعتمد على حساب حجم الهواء المستخرج من الصخر أو حساب حجم السائل المشبع للعينة الصخرية. عندما تكون العينة مشبعة بسائل معين فمن المفروض أن يكون هذا السائل قد تخلل إلى جميع المسامات المتصلة الموجودة في الصخر وشعبها. وبالتالي يكون:

حجم المسامات = (وزن العينة بعد التشبع - وزن العينة وهي جافة) \ كثافة السائل المشبع للعينة

كذلك يمكن حساب حجم المسامات باستعمال البيروميتر الزنبيقي وذلك بحساب حجم الزنبيق المفقود إلى داخل العينة الصخرية عند ضغط 53 جوي، حيث أن هذا الحجم يمثل حجم المسامات. يمكن استعمال جهاز البيكنوميتر لقياس حجم حبيبات العينة الصخرية أو حجم المادة الصلبة المكونة للصخر. حيث يتم تحديد حجم حجرة الجهاز V_1 عند ضغط معين P_1 ومن ثم يتم إدخال العينة الصخرية إلى حجرة الجهاز وحساب حجم الهواء الموجود في الحجرة عند هذا الضغط وحجمها V_0 عند ضغط آخر أعلى منه P_0 . بتطبيق قانون بويل يمكن إيجاد حجم المواد الصلبة V_g :

$$V_g = \frac{P_0}{P - P_1} (V_0 - V_1)$$

3-2 النفاذية

بما أن المسامية تمثل سعة تخزين الطبقة للسوائل فإن النفاذية هي قابلية هذه الطبقة لسريان هذه السوائل خلال مساماتها. والنفاذية المطلقة هي نفاذية الصخر لسائل غير متفاعل عندما يكون الصخر مشبعاً بالكامل بنفس السائل. إن النفاذية تعتمد على عدة عوامل مثل مسامية الصخر وحجم وعدد القنوات المفتوحة لجريان السائل وكذلك خواص جدران هذه القنوات. الشكل رقم (1) يوضح علاقة نفاذية الصخر بمساميته. إن نظرية سريان السوائل في الأوساط المسامية ترجع إلى العالم دارسي والذي لاحظ أن هنالك علاقة مباشرة بين سرعة سريان السائل في الوسط المسامي ومعدل الفرق في الضغط على طرفي الوسط وميل هذه العلاقة هي نفاذية الصخر لهذا السائل. وقد عبر عن هذه النظرية بالقانون التالي:

$$K = \frac{q \mu L}{A (P_i - P_o)}$$

حيث أن (q / A) هو معدل السريان و $(P_i - P_o) / L$ هو معدل الانخفاض في الضغط على طول الوسط المسامي و μ هي لزوجة السائل (أنظر إلى الشكل رقم (2)).

4-2 حساب النفاذية

يمكن التعبير عن نفاذية الصخر معامياً بحساب نفاذيته للغازات ونفاذيته للسوائل، مع العلم أن نفاذية الصخر للغاز عند الضغط العالي تقترب من نفاذيته للسائل. لذا يمكن حساب نفاذية الصخر للسائل وذلك بمد خط العلاقة بين نفاذية الصخر للغاز ومقلوب متوسط الضغط إلى أن يتقاطع مع محور النفاذية (شكل رقم (3)). إن نفاذية الصخر للسائل هي تقاطع هذه العلاقة مع محور النفاذية. ولحساب نفاذية الصخر للغاز يمكن استعمال ماسك العينات الأسطوانية الموضح بالشكل رقم (4) ومن ثم السماح للغاز بالمرور خلال العينة الجافة تماماً. يسجل الوقت اللازم لمرور حجم معين من الغاز خلال العينة تحت ضغوط مختلفة. بعد حساب نفاذية الصخر للغاز عند هذه الضغوط ترسم العلاقة الخطية بينها وبين مقلوب متوسط الضغوط. يمكن قياس نفاذية الصخر المتشبع للسائل مباشرة دون اللجوء للطريقة السابقة وذلك باستعمال ماسك العينات وضخ سائل غير متفاعل بدلاً من الغاز خلال العينة ومن ثم حساب النفاذية بمعلومية معدل السريان ومعدل الضغط. كذلك يمكن حساب النفاذية عند الظروف الحرارية والضغط العالية كما هو الحال في بعض الطبقات الحاوية للمخزون المائي وذلك بتمثيل هذه الظروف معامياً.

5-2 توزيع أحجام المسامات ونسبها خلال العينة

يمثل هذا التوزيع أحجام المسامات المتنوعة الموجودة في عينة صخرية معينة ونسبة كل مسامات ذات حجم معين من مجموع المسامات الكلي. ويؤثر هذا التوزيع في قيمة نفاذية الصخر. ويمكن تمثيل هذا التوزيع بيانياً وذلك برسم علاقة كالتالي في شكل رقم (5). هذا التمثيل يعطي فكرة واضحة عن عرض قنوات السريان في العينة الصخرية وكذلك يمكن معرفة تناسق وانتظام المسامات الصخرية من عدمه.

6-2 قياس توزيع المسامات في الصخر

يمكن قياس هذا التوزيع باستعمال جهاز يقيس كمية الزئبق الداخل في العينة عند كل ضغط معين. ولكي يمكن للزئبق أن يدخل في فراغ معين يجب أن يضخ الزئبق بضغط يساوي الضغط الشعري عند مدخل (عنق) ذلك الفراغ. في كل مرحلة من مراحل زيادة ضغط الضخ يكون الحجم المضخ من الزئبق تقسيم الحجم الكلي للمسامات يساوي التشبع الجزئي للعينة في تلك اللحظة، أو يمثل نسبة المسامات المشبعة بالزئبق. عند كل ضغط هنالك مسامات بأحجام معينة يتم تشبيعها بالزئبق، والمسامات التي أصغر من هذه المسامات تكون غير مشبعة وذلك لعدم تمكن الزئبق من دخولها لعدم كفاية الضغط. وبالتالي فإن نسبة المسامات المشبعة عند هذا الضغط تمثل نسبة المسامات التي هي أكبر من مسامات ذات حجم معين. ويمكن حساب هذا الحجم المعين كالتالي:

$$\text{حجم المسامات بالميكرون} = 88,38 / \text{الضغط}$$

3- الخواص الميكانيكية لصخور الطبقات الجوفية الحاوية للمياه

من المعلوم أن الطبقات الصخرية الجوفية الحاوية للمياه توجد على أعماق كبيرة مقارنة بطبقات المياه السطحية مما يعرضها للعديد من الاجهادات الموضعية. هنالك ثلاثة اجهادات موضعية تؤثر على أي صخر

يقع على أعماق كبيرة تحت سطح الأرض كما هو الحال في صخور الطبقات الجوفية الحاوية للمياه. هذه الاجهادات هي الإجهاد العمودي الرئيسي (σ_v) والإجهاد الأفقي الرئيسي الأكبر (σ_H) والإجهاد الأفقي الرئيسي الأصغر (σ_h). وفي حالة ما إذا كان الصخر مشبعاً بالسوائل فإن تلك الاجهادات تصحح بطرح قيمة ضغط السائل المسامي (Pp) وتسمى حينذاك الاجهادات الرئيسية الفعلية (σ_e) وتحسب كالتالي (أنظر شكل رقم (6)) :

$$\sigma_e = \sigma_i - Pp$$

وبذلك تتغير حالة الاستقرار لصخور الطبقات الحاوية للمياه مع بداية الإنتاج ومن ثم تتغير الخواص الميكانيكية والفيزيائية لتلك الصخور مما قد يؤثر سلباً على معدلات الإنتاج من تلك الطبقات وكذلك حالة الاستقرار الميكانيكي للآبار والمعدات المستخدمة في الإنتاج. سيتم في المقاطع التالية بيان بعض الخواص الميكانيكية للصخور ومن ثم سيتم بيان تأثير الإنتاج الجانر للمياه على خواص الطبقة وعلى إنتاجيتها المستقبلية.

1-3 - مقاومة الأنضغاط

مقاومة الصخر للأنضغاط من الأهمية بمكان عند حساب معدل الإنتاج الحرج من طبقة ما. فكلما كانت مقاومة الصخر للأنضغاط عالية كان هناك هامش كبير متاح للإنتاج من تلك الطبقة دون مشاكل. ويمكن قياس مقاومة الصخر للأنضغاط معملياً باستخدام عينات من صخور الطبقة تقطع على شكل أسطواني بحيث لا تقل نسبة القطر إلى الارتفاع عن 2,5 توضع راسياً في جهاز قياس الأنضغاط. وعند تجهيز العينة بمقاييس للأنفعال يمكن حساب نسبة بوزون. ويوضح الشكل رقم (7-ب) طريقة الاختبار والمعدات اللازمة لذلك.

2-3 - مقاومة الشد

لمعرفة مقاومة الصخر للشد أهمية كبيرة فكلما كانت مقاومة الصخر للشد عالية أمكن إنتاج السوائل المخزنة في تلك الصخور بمعدلات إنتاج عالية دون مشاكل مثل مشكلة إنتاج الرمل المصاحب للسوائل والذي يتسبب في تخريب معدات الإنتاج من مضخات وصمامات وأنباب وغيرها. تقاس مقاومة الصخر للأنضغاط معملياً باستخدام شرائح صخرية على شكل أسطواني نصف قطرها يساوي الارتفاع (السمك). ويوضح الشكل رقم (7-أ) طريقة القياس والتجهيزات اللازمة لقياس مقاومة الصخر للشد. وتقريباً تقدر مقاومة الصخر للشد بعشر قيمة مقاومة الصخر للأنضغاط لجميع أنواع الصخور تقريباً.

3-3 - خاصية الانهيار

مما سبق يتضح أن خاصية مقاومة الصخر للشد والأنضغاط هي أحادية الإجهاد حيث يسلط الإجهاد على اتجاه واحد فقط من العينة الصخرية. ولتمثيل الواقع حقيقة كما هو الحال في صخور الطبقات الجوفية الحاوية للماء يجب أن يؤخذ بالاعتبار الاجهادات المسلطة على ثلاثة اتجاهات مختلفة كما وسبق بيانه. وتقاس خاصية

الانهيار باستخدام خلية هوك وجهاز لتوليد اجهادات الانضغاط ولآخر لتوليد الضغط الحاصر. توضع عينة صخرية مجهزة على شكل أسطواني بحيث لا تقل نسبة القطر إلى الارتفاع عن 2,5 توضع راسيا في خلية هوك ومن ثم يتم وضع الخلية في جهاز الانضغاط ويتم زيادة قيمة الضغط الحاصر حتى تصل لقيمة محددة سلفا عندها تثبت قيمة الضغط الحاصر وتزداد قيمة الإجهاد الراسي حتى تنكسر العينة. وتكرر العملية عدة مرات باستخدام عينات أخرى وقيم مختلفة للضغط الحاصر. ويرسم قيم الضغط الحاصر مع مقابلاتها من قيم الإجهاد الراسي عند الانهيار تتكون لدينا دوائر موهر ويرسم مماس لتلك الدوائر تتكون لدينا خاصية الانهيار لذلك الصخر. ويوضح الشكل رقم (8) طريقة الاختبار والمعدات اللازمة لذلك بينما يوضح الشكل رقم (9) طريقة بيان حدود خاصية الانهيار. ومن أشهر الطرق الرياضية لتمثيل خاصية الانهيار للصخور هي طريقة موهر-كولومب والتي تربط بين الإجهاد المسلط واجهاد القص الحاصل بعد تطبيق قيمة معينة للضغط الحاصر واجهاد القص الأصلي دون ضغط حاصر و زاوية الاحتكاك الداخلي للصخر وتكتب كالتالي:

$$\tau_f = \tau_0 + \sigma \tan \phi$$

وهناك طرق أخرى عيده لتمثيل خاصية الانهيار للصخور تتسم بالتعقيد مما يجعلها صعبة التطبيق على ارض الواقع. وتستخدم خاصية الانهيار مع الخواص الفيزيائية الأخرى لحساب معدل الإنتاج الحرج من طبقة ما.

4-3 - تأثير معدلات الإنتاج العالية على الخواص الميكانيكية للطبقة الخازنة للماء

بناء على المعادلة المذكورة أعلاه فإن الإنتاج بمعدلات عالية من الطبقة الخازنة للماء سوف يؤدي إلى هبوط سريع من الضغط المسامي وبالتالي زيادة في قيم الاجهادات الموضعية الرئيسية مما قد يؤدي إلى تأثر البنية التركيبية لصخور الطبقة الحاوية للماء (المسامات) وذلك إما بتحطيم بعض الحبيبات المكونة للصخر أو بتحطيم المادة اللاصقة بين تلك الحبيبات. إن أي تأثر لمسامية ونفاذية الصخور الحاوية للماء بسبب زيادة الاجهادات الموضعية سوف يؤدي إلى حدوث تلف غير قابل للإصلاح في البنية المسامية للصخر وبالتالي عدم القدرة نهائيا على العودة إلى معدلات الإنتاج السابقة. ويوضح الشكل رقم (10) أن هناك علاقة عكسية بين الاجهادات المسلطة على الصخر والنفاذية المطلقة ويمكن ترجمة ذلك رياضيا كالتالي:

$$k = a_0 + a_1 (\sigma - P_p) + a_2 (\sigma - P_p)^2 + a_3 (\sigma - P_p)^3 + \dots$$

وقد تؤدي الاجهادات المسلطة إلى حدوث تشوه دائم في التركيب المسامي للصخر كما هو مبين في الشكل رقم (11). لذلك يجب حساب معدل الإنتاج الماني الحرج والذي يجب أن لا يزيد الإنتاج عنه تلافيا لحدوث أي تلف في الخواص الفيزيائية والميكانيكية لصخور الطبقات الحاوية للماء.

4 - طرق حساب المحتوى المائي للطبقات الجوفية الحاوية للمياه

إن الحجم الحقيقي للمسامات المشبع بالماء لمتكون معين يمثل حجم المخزون المائي لذلك المتكون، ويعبر عن هذا الحجم بالمعادلة التالية:

$$V_w = V_b \phi (1 - S_r)$$

حيث أن V_b هو حجم الممكن المائي و ϕ هي المسامية و S_r هي نسبة الماء الغير ممكن استخراجه نتيجة للضغط الشعيري.

ولتحديد الحجم الكلي للممكن المائي يتم الاستعانة بخارطة السماكة (Isopach map). في هذه الخريطة توصل المواقع التي في المتكون التي لها نفس السماكة بخط واحد يسمى الخط الكنتوري (Contours) ويكتب على هذا الخط مقدار سمك الطبقة على طول هذا الخط، ويكرر هذا لباقي جميع المواقع (أنظر شكل رقم (12)). وبهذا يكون المتكون المائي قد قسم إلى شرائح معلومة السماكة و محاطة بخطي كنتور والحجم الكلي لهذه الشرائح هو حجم للمتكون المائي:

$$V_b = \sum_{i=1}^n V_i$$

حيث أن V_i هو حجم شريحة واحدة و n هو عدد الشرائح.

ويمكن حساب V_i بعدة طرق منها:

1- الطريقة الحسابية:

$$V_i = \frac{h_i}{2} (A_n + A_{n+1})$$

إذا كان $A_{n+1} / A_n > 0.5$

$$V_i = \frac{h_i}{3} (A_n + A_{n+1} + \sqrt{A_n \times A_{n+1}})$$

إذا كان $A_{n+1} / A_n < 0.5$

حيث أن A_n هي المساحة المحاطة بالخط الكنتوري السفلي للشريحة i و A_{n+1} هي المساحة المحاطة بالخط الكنتوري السفلي للشريحة i .

2- الطريقة البيانية: في هذه الطريقة مقدار المساحة المحاطة بكل خط من خطوط الكنتور ترسم بيانيا مقابل قيمة سماكة المتكون الذي يمثله هذا الخط الكنتوري، ثم يرسم منحنى خلال هذا النقاط الناتجة. وتمثل المساحة تحت المنحنى حجم المتكون المائي (انظر شكل رقم (13)).

عند قياس قيمة المسامية معمليا يجب الأخذ بالاعتبار أن هذه القيمة تمثل مسامية الموقع الذي أخذت منه العينة الصخرية ولا تمثل جميع المواقع حيث أن المسامية عادتا تكون متغيرة من مكان إلى آخر في نفس المتكون، لذا يجب حساب مسامية تمثل متوسط المسامية في الممكن المائي باستخدام الطرق الإحصائية.

أما S_r فيمكن قياسها معمليا وذلك بتفريغ العينة الصخرية المأخوذة من المتكون من الهواء ثم تشبييعها بالماء المأخوذ من نفس المتكون. ثم إنتاج هذا الماء بضغط الهواء المتواصل إلى أن ينقطع خروج الماء ولم يعد هنالك ماء يمكن استخراجه بالرغم من الاستمرار بضخ الهواء. وبالتالي يكون:

$$S_r = 1 - (\text{حجم الماء المستخرج} / \text{حجم المسامات})$$

5- معادلات حساب السريان ومعدلات الإنتاج من المكامن المائية

إن معرفة الإمكانيات المتاحة للإنتاج المائي من طبقة جوفية ما يعتبر أمرا حيويا يعتمد عليه التخطيط الحضري والصناعي بشكل كبير. ولمعرفة معدل الإنتاج الحرج أهمية كبرى في المحافظة على إنتاجية الطبقة على المدى البعيد دون حدوث مشاكل تقنية. وفي هذا الجزء من البحث سوف يتم بيان طريقة حساب معد السريان معمليا ومن ثم سيتم بيان طريقة حساب معدل السريان الفعلي في البئر وكذلك كيفية حساب معدل السريان الحرج. واعتمادا للقياس المعمل للمسامية وكذلك أبعاد الطبقة والبئر ولزوجة الماء (أنظر الشكل رقم (14)) يمكن حساب معدل التدفق المائي من الطبقة إلى البئر باستخدام القانون التالي:

$$q = \frac{2\pi k h \Delta P}{\mu \ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right)}$$

وبتعويض قيمة النفاذية المبينة بالمعادلة التالية:

$$k = a_0 + a_1(\sigma - P_p) + a_2(\sigma - P_p)^2 + a_3(\sigma - P_p)^3 + \dots$$

يمكن حساب معدل الإنتاج الحرج لتلك الطبقة.

6- أمثلة لبعض القياسات المعملية لخواص بعض الصخور

تتنوع الصخور الحاوية للماء حسب أماكن تواجد في العالم ولكن تبقى الصخور الرملية هي الأوفر حظا كما هو الحال عليه في المملكة العربية السعودية مثل طبقة المنجور (رمل + طفلة) ، الساق (حجر رملي) والوجد (حجر رملي وحصى). ويبين الجدول رقم (1) بعض الأمثلة للخواص المقاسة معمليا لبعض الصخور.

7- الخلاصة

بناء على المعادلات والتحليلات المبينة في هذه الدراسة يمكن استخلاص النتائج والتوصيات التالية:

- من الضروري قياس الخواص الفيزيائية كالمسامية والنفاذية والتوزيع المسامي و الخواص الميكانيكية مثل مقاومة الشد والانضغاط وخاصية الانهيار لصخور الطبقات الحاوية للماء معمليا وذلك لاستخدامها في حساب معدلات السريان ومحتوى المخزون المائي ومعدلات الإنتاج الحرجة.

- يجب حساب معدل الإنتاج الحرج لصخور الطبقات الحاوية للماء تلافياً لحصول أي تلف في المسامية والنفاذية والخواص الميكانيكية مما قد يتسبب في فقدان القدرة على الوصول لمعدلات إنتاج اقتصادية من تلك الطبقات الجوفية.
- تعتمد معدلات الإنتاج من الطبقات الجوفية الحاوية للماء بشكل مباشر على النفاذية والخواص الميكانيكية لصخور الطبقة وقيم الاجهادات الموضعية الرئيسية وقيمة الضغط المسامي.
- عند تعدي معدلات الإنتاج المسموح بها من طبقة ما فان خواص الطبقة ستتغير وبالتالي سيتأثر معدل الإنتاج المستقبلي وسيتم إنتاج كميات كبيرة من الرمل مما سيتسبب في تلف المعدات المستخدمة على آبار تلك الطبقة.

8- المراجع

- 1- وزارة الزراعة والمياه - المملكة العربية السعودية : "أطلس المياه" 1405 هـ - 1985م.
- 2- Musaed N. J. Al-Awad: "Relationship Between Reservoir Productivity and Pore Pressure Drop.", A Paper Accepted for Publication in the Journal of King Saud University, Engineering Sciences, 1999.
- 3- Musaed N. J. Al-Awad: "Influence of Pore Pressure Drop on Reservoir Petrophysical Properties.", A Paper Submitted to the Indian Journal of Engineering, 1999.
- 4- Emad S. Al-Homadhi : " Artificial Sandstone Cores Production with a Wide Range of Rock Matrix Properties" , A Paper Accepted for Presentation in the Third International Jordanian Mining Conference , April 2000
- 5- Gene Anderson., "Coring and Core Analysis Handbook", Petroleum Publishing Company, Tulsa, 1975.
- 6- James W. Amyx., "Petroleum reservoir engineering physical properties", McGraw-Hill book company, 1960.

- Petroleum Engineering Department, King Saud University: “**Short Course on Petroleum Reservoir Evaluation**”, Third Saudi Engineering Conference, Nov. 1991. -7
- Al-Awad, M. N. J. and Alsayed, N. A. : “**Effect of Drilling Induced Stresses on Formation Productivity.**” The Fifth International Conference on Mining, Petroleum and Metallurgical Engineering, Suez Canal University, Suez, Egypt, Feb., 1997. -8
- Jaeger J.C. and Cook N.G.W. : “**Fundamentals of Rock Mechanics.**” 3rd edition, Chapman and Hall, London, 593 pp., 1979. -9