

دراسة الصخور المسامية وتشوهاتها تحت تأثير الحمولات الخارجية والضغط المسامي

الدكتور عدنان خضور*

(قبل للنشر في 2006/4/26)

□ الملخص □

يهدف هذا البحث إلى دراسة الصخور المسامية المشبعة تحت تأثير الحمولات الخارجية والضغط المسامي. سوف نشرح في المرحلة الأولى كيف تتم طريقة تعيين الثوابت الميكانيكية والهيدروليكية تجريبياً، وذلك من خلال نظرية المرونة.

أما في المرحلة الثانية فسنعمل على توضيح تأثير ظهور التشققات ضمن الكتلة الصخرية الناتجة عن الحمولات الخارجية على العلاقة بين الضغط المسامي والتشوهات في الكتلة الصخرية. حيث إن سلوك الكتل الصخرية غير خطي يعود وبشكل أساسي إلى ظهور هذه التشققات الناتجة عن التحميل، يكون اتجاه هذه التشققات دائماً عمودياً على اتجاه الإجهادات الصغيرة. ونظراً لأن هذه الشقوق وضمن هذه المعطيات هي موجهة فمن الطبيعي أن العلاقة بين الضغط المسامي والتشوهات في الكتلة الصخرية ستصبح غير متجانسة.

كلمات مفتاحية: تشوهات الصخور المسامية؛ الضغط المسامي.

* أستاذ مساعد في قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين - اللاذقية - سوريا.

The Study of the Porous Rocks and Their Deformation under the Effect of Outside Loads and the Pore Pressure

Dr. Adnan Kh_oo_oadoor*

(Accepted 26/4/2006)

□ ABSTRACT □

This research tries to study saturated and porous rocks under the effect of outside loads and the pore pressure. In the first stage, we will explain how the hydraulic and mechanic constants are determined experimentally. In the second stage, we will clear out the effect of the appearance of cracks within the rock mass resulting from the outside loads, and the effect of these cracks on the relation between the pore pressure and the deformation within the rock mass. Since the non-linear behavior of the rock mass is essentially due to the appearance of these cracks resulting from loading. The direction of these cracks is always perpendicular to the direction of the minor stresses. Because these cracks within these data are directed, it is natural that the relation between the porous pressure and the distortions within the rock mass will become heterogeneous.

Key words: Deformation of the porous rocks; pore pressure.

* Associate professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering Faculty, Tishreen University, Lattakia, SYRIA.

مقدمة:

إن دراسة توزع الإجهادات ضمن طبقة صخرية يعتبر على غاية من الأهمية وذلك لعدة تطبيقات حقلية (إنتاج النفط، حساب الضغط اللازم تطبيقه على البئر لزيادة نفاذية الصخر وزيادة إنتاج البئر.....الخ). من أجل هذه الدراسات التطبيقية مهم جداً معرفة السلوك الميكانيكي للصخر المشبع ومعرفة تأثير الضغط المسامي على تشوهات الصخر.

ضمن هذا البحث سنبدأ بطرح نظرية Biot للمرونة الخطية في حالة المواد المتجانسة [1]. هذه النظرية قليلاً ما تم دراستها مخبرياً فهناك بعض الباحثين الذين أعطوا طرقاً نظرية لحساب هذه الثوابت [2,5,7,8] وآخرين حاولوا إجراء بعض القياسات المخبرية [6].

بعد ذلك سنشرح الطرق المخبرية التي يمكن إجراؤها لتحديد ثوابت هذه النظرية. قمنا بدراسة ثلاثة صخور رملية رسوبية المنشأ مختلفة النفاذية أخذت من مناطق مختلفة أطلقنا عليها التسميات التالية:

I-الصخر

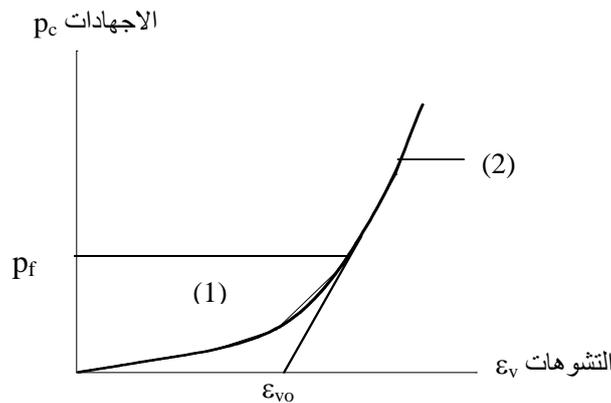
II-الصخر

III-الصخر

أظهرت الدراسات المتعلقة بسلوكية الصخور عند تعرضها للإجهادات بأنه يمكن التمييز بين منطقتين مختلفتين في منحنى العلاقة إجهاد - تشوه الشكل (1).

- المنطقة 1 لم يتم فيها إغلاق التشققات الأولية الموجودة في الصخر وهي ذات سلوك إجهاد- تشوه غير خطي.

- المنطقة 2 تم فيها إغلاق التشققات بشكل كامل وهي ذات سلوك إجهاد- تشوه خطي.



الشكل (1) مناطق اختلاف الثوابت

كما أننا سنهتم بالصخور التي تظهر فيها تشققات شاقولية (موجهة) أثناء تحميلها بالإجهادات $(\sigma_1 - \sigma_3)$ ، ففي حالة الصخر I تظهر هذه التشققات واضحاً وبشكل مبكر وتكون موازية لاتجاه الحمولة. وهذا يسبب عادة زيادة في حجم العينة. وبما أن التشققات التي ظهرت هي عمودية على الإجهادات الصغيرة فمن المؤكد أن العلاقة بين الضغط المسامي وتشوهات الكتلة الصخرية سوف تكون غير متجانسة.

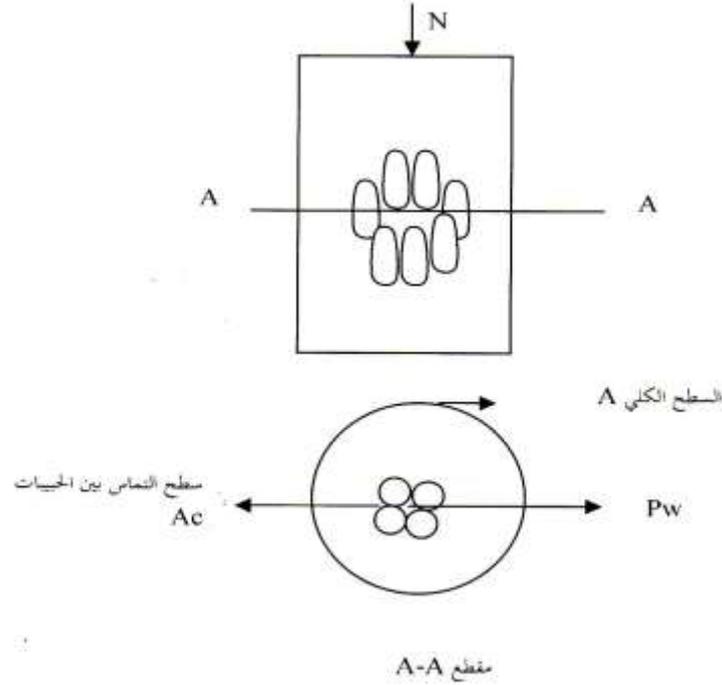
حالة الصخور المتجانسة (نظرية المرونة الخطية):

مقدمة نظرية:

في حالة المواد المتماثلة كالصخور مثلاً (بعكس المواد السائبة) لا يمكن تطبيق نظرية الاجهادات الفعالة لترزاكي 1923:

$$(1) \quad \sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + p_i$$

حيث σ_{ij} الاجهادات الكلية، σ'_{ij} الاجهادات الفعالة، p_i الضغط المسامي ويمكننا أن نتأكد من ذلك، إذ يكفي أن نأخذ عينة صخرية ذات مسامية n مشبعة بسائل ما والضغط المسامي فيها p_w ، الشكل (2)



الشكل (2) يبين الفرق بين A_c و A

إذا أخذنا في هذه العينة مقطعاً $A-A$ فإن الفراغات المسامية سوف تكون متصلة ببعضها من خلال السطح A_c علماً أن السطح الكلي هو A وبشكل عام فإن القوى المنتقلة عن طريق هذا المقطع وبتجاه العمودي عليه هي N والاجهادات الكلية هي :

$$(1) \quad \sigma_n = N/A$$

ولكن القوى N هي مجموع القوى المطبقة من خلال نقاط التماس بين مكونات العينة والقوى المنتقلة من خلال الضغط المسامي.

$$(2) \quad N = P_w(A - A_c) + N_c$$

حيث إن N_c هي القوى المطبقة من خلال نقاط التماس بين مكونات الصخر. فإن محصلة الإجهادات هي:

$$(3) \quad \sigma_n = p_w \left(1 - \frac{A_c}{A}\right) + \frac{N_c}{A}$$

وإذا فرضنا أن الإجهادات المنتقلة من خلال مكونات العينة هي:

$$\sigma_n^c = \frac{N_c}{A}$$

فإن العلاقة (3) تصبح :

$$(4) \quad \sigma_{ij} = p_w \left(1 - \frac{A_c}{A}\right) + \sigma_{ij}^c$$

إذا أصبح الحد $\frac{A_c}{A}$ في العلاقة (4) قريباً من الصفر أي أن مساحة نقاط التماس A_c مهملة مقارنة بالمساحة الكلية A (كما في حالة الرمال) فإننا سوف نعود إلى علاقة تيرزاكي، وكلما اقترب الحد من 1 أي كلما قلت مسامية الصخر فإننا سوف نصل إلى حالة الصخور الصماء كالصخور البركانية التي تكون فيها الاجهادات الفعالة هي نفسها الإجهادات الكلية. وقد كان Biot أول من درس هذه العلاقة [1,2] وفرض أن العلاقة بين الاجهادات والضغط المسامي من جهة وبين التشوهات من جهة أخرى للأجسام المتجانسة والمستمرة والخاضعة لنظرية المرونة تكون على الشكل التالي:

$$(5) \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \text{trace } \varepsilon \delta_{ij} + \frac{p}{3H} \delta_{ij}$$

حيث إن:

p - الضغط المسامي، E - عامل يونغ، ν - عامل بواسون، H - عامل تأثير الضغط المسامي (عامل Biot) ونلاحظ في العلاقة 5 ومع فرض أن أي تغيير في حجم السائل الموجود ضمن المسامات يعود فقط نتيجة لتطبيق الاجهادات الكروية

$$\begin{matrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{matrix}$$

والضغط المسامي، بالتالي يمكن اعتماد العلاقة الآتية:

$$(6) \quad \theta = \frac{1}{3H_1} \text{trace } \sigma + \frac{p}{R}$$

حيث أن:

H_1 و R هما ثوابت المعادلة. وبذلك نجد أنه يلزمنا من المعادلتين 5 و 6 أربعة ثوابت لتحديد العلاقة بين التشوهات من جهة والإجهادات المطبقة مع الضغط المسامي من جهة أخرى وهذه الثوابت هي: H ، R ، E ، ν .
 علماً أنه يمكننا أن نثبت رياضياً أن $H_1 = H$ لذلك سنشتق علاقة الطاقة الناتجة عن التشوهات الخطية مرتين، علماً أن هذه الطاقة تعطى بالعلاقة:

$$(7) \quad W = \frac{1}{2} (\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} + p\theta)$$

بالاشتقاق الأول نجد:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial w}{\partial \sigma_{ij}} \quad \text{و} \quad \Theta = \frac{\partial w}{\partial p}$$

وبالاشتقاق مرة ثانية نجد:

$$\frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial p} = \frac{\partial^2 W}{\partial \sigma_{ij} \partial p} \quad \text{و} \quad \frac{\partial \Theta}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial^2 W}{\partial p \partial \sigma_{ij}}$$

ومنه

$$(8) \quad \frac{\partial \Theta}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial p}$$

ومن العلاقات 5 و 6 و 8 نجد أن $H_1 = H$

ومن الممكن أيضاً وبأخذ مقلوب المصفوفة 5 أن نحصل على علاقة الاجهادات الفعالة للمواد المتماسكة كالصخر وهذه العلاقة مشابهة لعلاقة تراكبي في المواد السائبة كالتراب

$$(9) \quad \sigma_{ij} = 2G(\varepsilon_{ij} + \frac{\nu \text{trace } \varepsilon}{1-2\nu}) - \alpha p \sigma_{ij}$$

حيث: α عامل Biot للاجهادات الفعالة.

G عامل القص.

الدراسة التجريبية:

أجريت الدراسة على ثلاث عينات من الصخر الرملي رسوبي المنشأ مختلفة النفاذية أخذت من مناطق مختلفة أطلقنا عليها التسميات المخبرية التالية:

| | | |
|-----|---------|------------|
| 9% | مساميته | -الصخر I |
| 11% | مساميته | -الصخر II |
| 20% | مساميته | -الصخر III |

تم اختيار هذه الصخور استناداً إلى نتائج دراسة مخبرية حيث تبين أنها ذات نفاذة عالية وأن الفراغات فيها تتصل ببعضها بشكل جيد مما يسهل عملية إشباعها بالماء.

1- طرق التحميل:

عندما نطبق إجهادات متماثلة $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P_C$ وضغط ماء مسامي P_i على عينة صخرية فإن

المعادلتين 5 و 6 تصبحان على الشكل الآتي:

$$(10) \quad \Theta = \frac{P_C}{H_1} + \frac{P_i}{R} \quad \text{و} \quad \varepsilon_{\nu} = \frac{P_C}{K} + \frac{P_i}{H}$$

حيث أن:

P_C - ضغط محوري $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$

P_i - ضغط الماء المسامي.

K-عامل التشوه الحجمي.

H و R ثابت علاقة Biot

ومن خلال العلاقة 10 نجد أنه بالإمكان إجراء عدة أنواع من التجارب وذلك حسب طريقة تطبيق P_c و P_i

A- التجربة المصرفة:

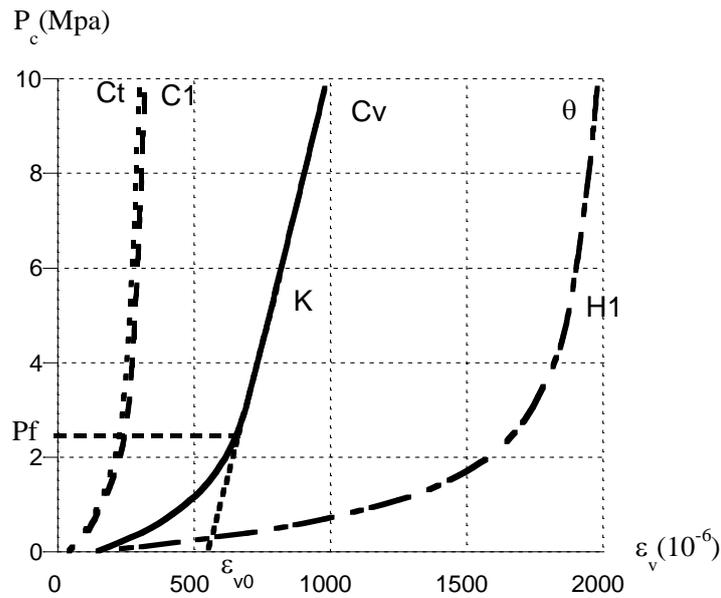
في هذه الحالة يكون $P_i=0$ وبالتالي نحصل على $\varepsilon_v = \frac{P_c}{K}$ و $\Theta = \frac{P_c}{H_1}$ يتم تطبيق قوى محورية P_c

وقياس التشوهات الحجمية: $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2$ (تجربة الضغط ثلاثي المحاور). يتم قياس التشوهات بواسطة قارئات

تنزومترية كهربائية، أما حجم السائل المزاح من العينة الناتج عن تطبيق هذه الحمولة فيتم تجميعه وقياسه بواسطة أنابيب شعيرية. يوضح الشكل 3 العلاقة بين $p_c - \varepsilon_v$ (ومنها يتم تعيين K، كما يوضح $p_c - \Theta$) ومنها يتم

تعيين H_1 وذلك في القسم الخطي. ننوه هنا إلى أنه من العلاقة $p_c - \varepsilon_v$ (والتي تسمى بتجربة تحديد الصلابة يتم عادةً تحديد ε_{v0} وهي ما تسمى بالتشققات الأولية و p_f هو الضغط اللازم لإغلاق التشققات الأولية كافة.

إن الشكل (3) هو للصخر I والمخططات البيانية للصخور II و III متشابهة معه في الشكل



الشكل (3) التجربة المصرفة للصخر

إن قيم K و H_1 تم قياسها من الشكل 3 وضمن القسم الخطي ونبين هذه القيم في الجدول (1) أما قيم p_f

و ε_{v0} فبينها في الجدول (2).

الجدول (1) قيم H_1 و K

| الصخر | K | H_1 | $\alpha=K/H_1$ |
|-------|-------|--------|----------------|
| I | 28000 | 50 000 | 0.56 |
| II | 8400 | 11 900 | 0.7 |
| III | 2500 | 3 333 | 0.75 |

تجربة مصرفة

الجدول (2) قيم p_f و ε_v

| الصخر | p_f (bars) | $\varepsilon_{v0} \times 10^{-6}$ |
|-------|--------------|-----------------------------------|
| I | 30 | 600 |
| II | 35 | 780 |
| III | 40 | 1400 |

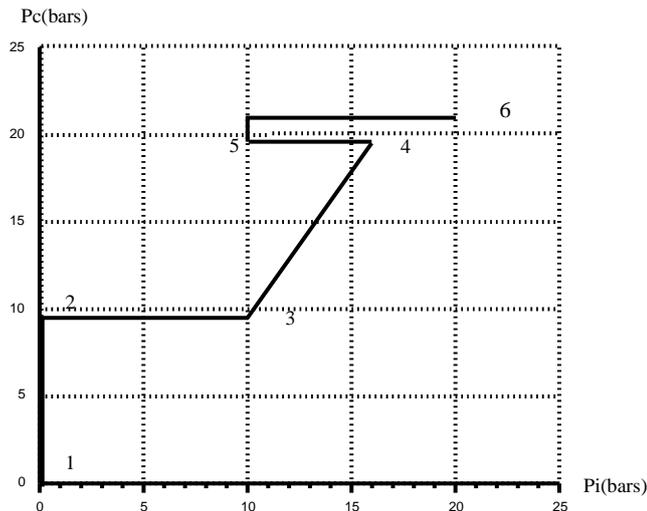
تجربة مصرفة

ومن الشكل 3 نجد أن التشوهات المحورية C_1 و تشوهات القص C_t متشابهة تماماً وهذا يدل على تجانس العينة بحالتها الأولية. ومن الجدول 2 نلاحظ أن حجم التشققات الأولية ε_{v0} صغيرة جداً مقارنة بمسامية الصخر.

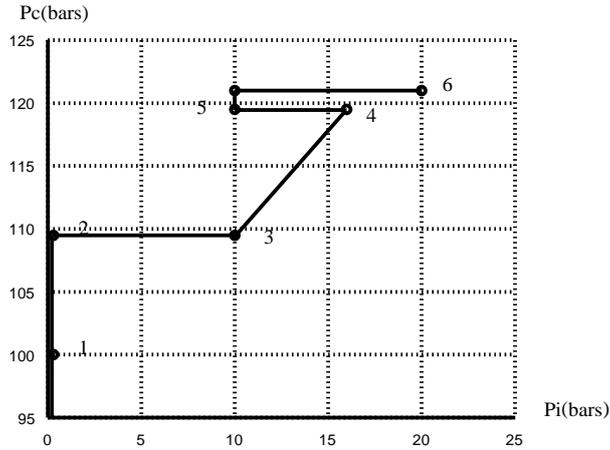
B- التجربة المصرفة جزئياً:

بالإمكان إجراء هذه التجربة في منطقتين حسب الشكل 1

- في المنطقة 1 وهي غير خطية أي قبل إغلاق التشققات الأساسية ويوضح الشكل 4-a هذه الطريقة.
- في المنطقة 2 وهي خطية أي بعد إغلاق كافة التشققات الأولية ويوضح الشكل 4-b هذه الطريقة.



الشكل (4-a)



الشكل (4-b)

يتم تطبيق الحمولات بطريقة متدرجة بقيمة 10kg/cm^2 نبدأها بـ $P_c=10$ ثم $P_i=10$ وذلك وفق المراحل الآتية: من النقطة 1 وللطريقتين 4-a و 4-b نقوم بزيادة P_c حتى النقطة 2 بطريقة مصرفة ومن ثم نزيد P_i حتى النقطة 3 بطريقة غير مصرفة وفي النقطة 3 لدينا $P_c=P_i$ ثم نقوم بزيادة P_c حتى النقطة 4 بطريقة غير مصرفة وهذه الزيادة في P_c سوف تؤدي إلى زيادة في P_i ولإعادة P_i إلى قيمتها الأساسية نخفض قيمتها حتى النقطة 5 أي كالقيمة الأساسية في النقطة 3 ومن جديد نقوم بزيادة P_i حتى النقطة 6 مع المحافظة على $P_c=\text{const}$ كما هو موضح في الشكل 4. ومن ثم نعيد هذه العملية بين النقطة 3 و 6 مرات عديدة. من خلال هذه التجربة يمكن قياس الثوابت الآتية:

$$1- \text{عندما تكون } P_i=\text{const} \text{ فهذه تجربة مصرفة ومنها يمكن قياس } \Delta\Theta = \frac{\Delta p_c}{H_1} \text{ و } \Delta\varepsilon_V = \frac{\Delta p_c}{K}$$

$$2- \text{عندما تكون } P_c=\text{const} \text{ في هذه الحالة تصبح العلاقة 10 بالشكل } \Delta\Theta = \frac{\Delta p_i}{R} \text{ و } \Delta\varepsilon_V = \frac{\Delta p_i}{H}$$

من خلال هذه العلاقات يمكن حساب R, H, H_1, K وهذه الثوابت تم قياسها في منطقة إغلاق التشققات والمنطقة التي لم تغلق فيها بعد. كافة الثوابت معطاة بالجدول 3

جدول 3 قيم (R, H, H1, K)

| | الثوابت قبل إغلاق التشققات | | | | | الثوابت بعد إغلاق التشققات | | | | |
|-----------|----------------------------|----------------|-------|-------|------|----------------------------|----------------|---------|-------|------|
| | K | H ₁ | H | R | α | K | H ₁ | H | R | α |
| I الصخر | 5 263 | 10 000 | 9 100 | 1 666 | 0.58 | 60 000 | 80 000 | 100 000 | 6 250 | 0.6 |
| II الصخر | 2 250 | 2 900 | 2 690 | 420 | 0.84 | 42 000 | 61 000 | 70 600 | 2 800 | 0.59 |
| III الصخر | 1 430 | 2 000 | 1 820 | 600 | 0.79 | 5 400 | 6 900 | 7 400 | 1 200 | 0.73 |

3- التجربة التي يكون فيها $P_c=P_i$ في هذه الحالة تصبح علاقة Biot رقم 10 بالشكل الآتي:

$$(11) \quad \Delta\varepsilon_V = \Delta P \left[\frac{1}{K} + \frac{1}{H} \right] = \frac{\Delta P}{\delta}$$

حيث إن:

δ - صلابة المكونات الصلبة في العينة في هذه الحالة إن ثابت Biot للإجهادات الفعالة هو:

$$(12) \quad \alpha = 1 - \frac{K}{\delta}$$

يتم تعيين قيمة δ من المخطط $(\epsilon_V - P_c)$ ، وقيم δ للصخور الثلاثة معطاة في الجدول رقم 4. حيث تمثل K فيه قيمة عامل صلابة الصخر والمعطاة سابقاً.

جدول 4 (نتائج تجربة $P_c = P_i$)

| الصخر | δ | K | $\alpha = 1 - K/\delta$ |
|-------|----------|--------|-------------------------|
| I | 44 000 | 28 000 | 0.36 |
| II | 25 000 | 8 400 | 0.66 |
| III | 22 000 | 2 500 | 0.89 |

تحليل النتائج:

من الملاحظ أن العامل α للإجهادات الفعالة هو مستقل تماماً عن طريقة تطبيق الحملات وقيمته ثابتة بالرغم من اختلاف التجارب وتتعلق فقط بعامل النفاذية. بينما قيم R, H, H_1, K فتتعلق بالحالة التي أجريت فيها التجربة قبل إغلاق التشققات أو بعدها. من هنا نرى أن وجود التشققات له تأثير فقط على قيمة هذه الثوابت وليس له تأثير على α . بمقارنة القيم التجريبية بين H و H_1 نجد أن قيمها متقاربة.

المراجع:

- 1-BIOT, M.A.- *General theory of three dimensional consolidation*, J.of appl.phys., vol.12, pp155-165, 1941
- 2-BIOT, M.A.- *Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid*, J.of appl. phys., vol.26, N^o 2, 1955
- 3-BIOT, M.A. and D.G.WILLS . - *The elastic coefficients of the theory of consolidation*. J.appl.Mech.,24,594-601, 1957
- 4-BIOT, M.A. - *Non linear and semi-linear rheology of porous solids*. *J.Geophy.*, vol.78, n^o 23, pp4924-4937, 1973
- 5-COUSSY, O.- *A general theory of thermo-poro-elastoplasticity for saturated porous materials*. TIMP GS9, 1988
- 6-FATT I. - *The Biot-Willis elastic coefficients for a sandstone*. J.of appl. Mech., 26, pp296-297, 1958
- 7-GEERTSMA, J.A. - *A remark on the analogy between thermo elasticity and the elasticity of saturated porous media*. J. Mech. Phy. Solids, 6, pp 13-16, 1957
- 8-УХОБ, С.Б. - *Скальные основания гидротехнических сооружений*. Энергия , Москва, 2002