

## 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<sub>o</sub>o<sub>o</sub>door\*

(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

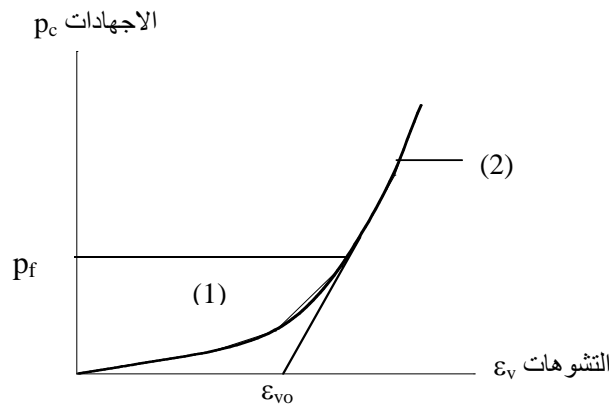
II-الصخر

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.

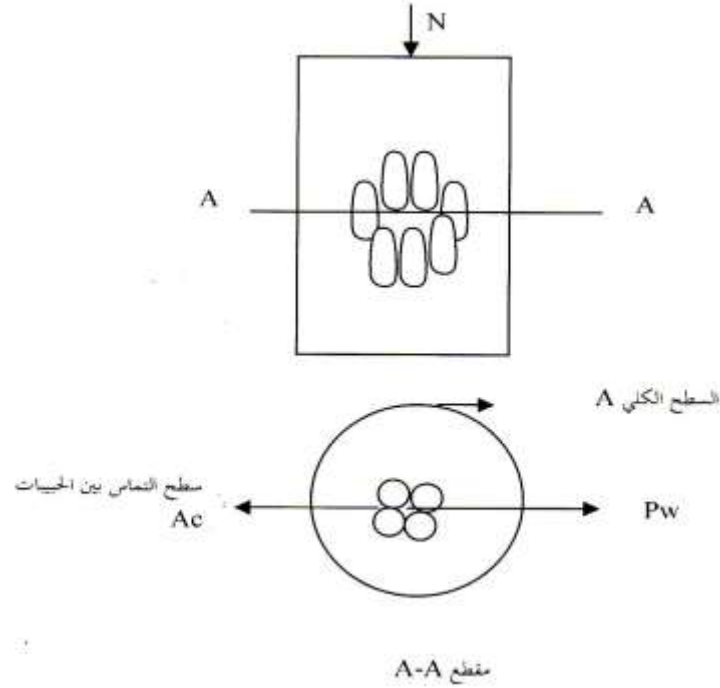
## حالة الصخور المتجانسة (نظرية المرونة الخطية):

### 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  $\sigma_{ij}$  الاجهادات الكلية،  $\sigma'_{ij}$  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 الاجهادات هي:

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

وإذا فرضنا أن الاجهادات 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،  $\nu$  - 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:  $H$  ،  $R$  ،  $E$  ،  $\nu$  .  
 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 المتناسكة 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:  $\alpha$  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:

$$(10) \quad \Theta = \frac{P_c}{H_1} + \frac{P_i}{R} \quad \text{و} \quad \varepsilon_v = \frac{P_c}{K} + \frac{P_i}{H}$$

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:

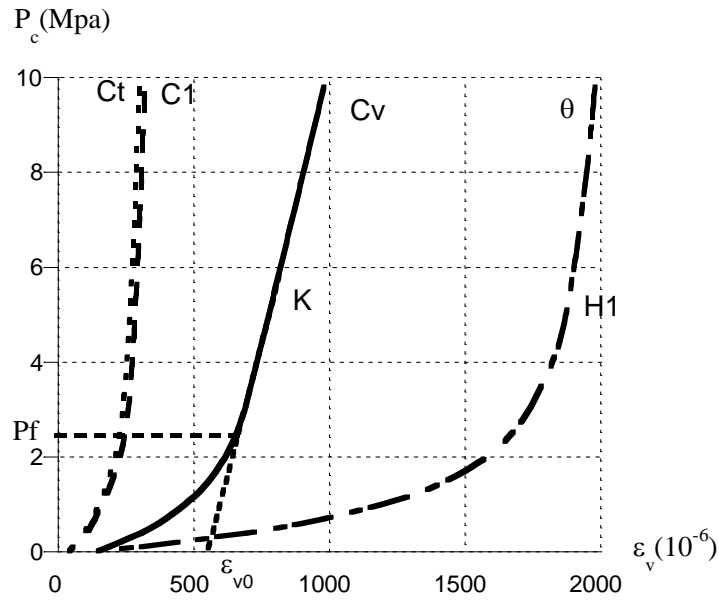
في هذه الحالة يكون  $P_i=0$  وبالتالي نحصل على  $\varepsilon_v = \frac{P_c}{K}$  و  $\Theta = \frac{P_c}{H_1}$  يتم تطبيق قوى محورية  $P_c$

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  $\varepsilon_{v0}$  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  $\varepsilon_{v0}$  فنبينها 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  $\varepsilon_v$

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

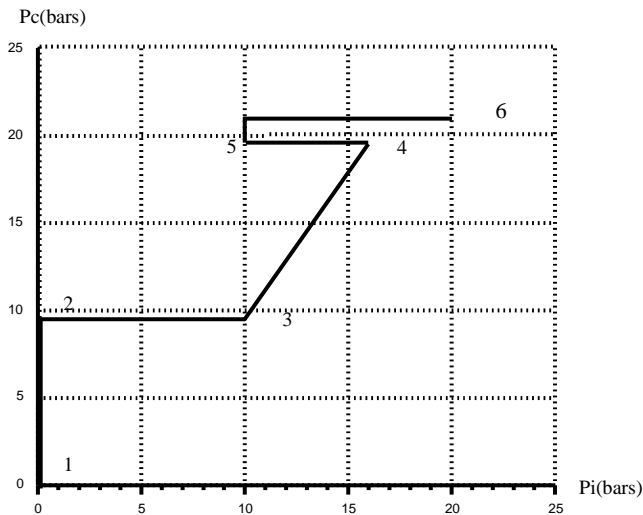
تجربة مصرفة

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  $\varepsilon_{v0}$  صغيرة جداً مقارنة بمسامية الصخر.

#### B- التجربة المصرفة جزئياً:

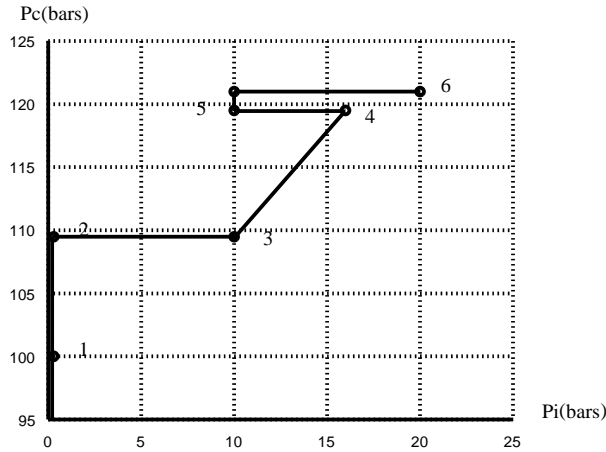
بالإمكان إجراء هذه التجربة في منطقتين حسب الشكل 1

- 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  $10 \text{ kg/cm}^2$  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 <sub>1</sub>	H	R	α	K	H <sub>1</sub>	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:

$\delta$  - صلابة المكونات الصلبة في العينة في هذه الحالة إن ثابت Biot للإجهادات الفعالة هو:

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

يتم تعيين قيمة  $\delta$  من المخطط  $(\epsilon_V - P_c)$ ، وقيم  $\delta$  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	$\delta$	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  $\alpha$  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  $\alpha$ . 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<sup>o</sup> 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<sup>o</sup> 23, pp4924-4937, 1973
- 5-COUSSY, O.- *A general theory of thermo-poro-elastoplasticity for saturated porous materials*. TAMP 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