

## دراسة السلوك الإجهادي التشوهي للترب الرملية المحقونة بالسيليكا

الدكتور منذر عمران الزاوي\*

(تاريخ الإيداع 13 / 7 / 2010. قُبل للنشر في 19 / 10 / 2010)

### □ ملخص □

إن حقن التربة الرملية المخلخلة بالسيليكا له أهمية تقنية واقتصادية خاصة في مجال الهندسة الجيوتكنيكية لأنه قليل الكلفة نسبياً فهو بسبب نفاذية الرمل لا يتطلب ضوابط معقدة لحقن المادة فضلاً عن كفاءته في تلقي الحمولات، ويهتم هذا البحث بدراسة السلوك الإجهادي التشوهي للكتلة المتصلبة المركبة من الرمل ومادة الحقن (السيليكا) ومن أجل تحقيق هذه الغاية تم إجراء تجارب الزحف على عدد كبير من العينات المختبرة وتقييم نتائجها، واستنباط بارامترات الزحف بدلالة تغير الإجهادات المطبقة على العينات المختبرة، وأدخلت البارامترات المذكورة في القانون الريولوجي الخاص بموديل "كالفن المعمم" الذي تم اعتماده كموديل ريولوجي لدراسة سلوكية المادة المحقونة، ولدى مقارنة نتائج الحساب مع نتائج التجارب المخبرية تبين أن الموديل المعني يمكن اعتماده بدقة كافية لرسم منحنيات زحف خاصة بالتربة الرملية المحقونة وتوفير زمن وكلفة تجارب الزحف المخبرية ويبرهن إن معادلة التشوه المعتمدة صالحة لتبني قانون مادة جديد من أجل الحساب العددي للمنشآت المحقونة والمدعمة بطريقة العناصر المحددة .

الكلمات المفتاحية: الحقن، التربة الرملية، السيليكا، الزحف .

\* أستاذ مساعد - قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## The deformation stress behaviour studying of the silicate injected sand

Dr. Mounzer Omran Alzawi\*

(Received 13 / 7 / 2010. Accepted 19 / 10 / 2010)

### □ ABSTRACT □

The injection of loose sandy soil with silicate has a technical and economical importance especially in the field of Geotechnical Engineering because of its low cost, and it does not need complex compressors to inject the material because of its high permeability of the sand as well as its efficiency in receiving loads. This research is interested in studying the deformation stress behaviour of the rigid sand-silicate mass. To realize this purpose, the creep experiments were done on a large number of tested samples and their results were evaluated and the creep pyrometers were taken out in terms of the stresses change applied on the tested samples. The previous pyrometers were entered in rheological law which is specialized in Popularized Calvin Model which is used as a rheological model to study the injected material behavior. It was noticed when the calculation results were compared with the laboratory experiments results that the previous model can be accurately adopted to draw special injected sand creep curves and to save the cost and the time of the laboratory creep experiments and it assures that the used deformation equation is valid for the adoption of a new material law for the numerical exact calculation of the injected and supported constructions with the FEM.

**Keyword :** injection, sand, silicat , creep.

---

\* Assosiate Professor, Department of Geotechnical engineering, Tichreen University, Lattakia, Syria.

**مقدمة:**

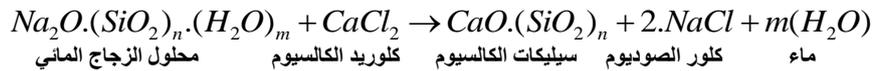
لا زالت مسألة حقن التربة هدفاً لكثير من الأبحاث والدراسات التجريبية سواء أكان ذلك متعلقاً بتكنولوجيا التنفيذ أم بمادة الحقن المستخدمة أم بسلوكية التربة المحقونة، فحقن التربة طريقة ناجحة لتقويتها وتكثيمها وتستخدم بفعالية في تقوية الأتربة المخلخلة أو الضعيفة وفي تثبيت المنحدرات، وتدعيم الأساسات ، وإصلاح حالات الانهيار الصعبة في التربة، وإن تحقيق الكفاءة المطلوبة في عملية تنفيذ الكتلة المحقونة تتطلب قبل أي شئ معرفة وافية بخواص مادة الحقن وبخواص التربة المحقونة كذلك معرفة السلوك الإجهادي التشوهي للمادة المركبة (التربة + مادة الحقن) [1]، ولا زالت الأبحاث المنشورة في هذا المجال تغلب ناحية على ناحية أخرى أو تتعمق في اتجاه على حساب اتجاه آخر مما يتطلب الاستمرار في البحث والتجريب لاسيما وإن كثيراً من مواد الحقن والمستحلبات تظهر كل عام. لا يدعي هذا البحث تقديم إحاطة شاملة بسلوكية التربة الرملية المحقونة بالسيليكا فهذا يخرج عن قدرة هذا البحث وحده وعن قدرة غيره من الأبحاث الكثيرة المنشورة في هذا المجال لكنه يأخذ الناحية الريولوجية بعين الاعتبار ويعتبر المادة المحقونة خاضعة لقانون المادة اللزج المرن لأن اعتماد السلوكية للزجة المرنة في الحسابات يتيح استثماراً أفضل للمادة.

**أهمية البحث وأهدافه:**

يكتسب حقن التربة الرملية المخلخلة أهمية اقتصادية خاصة لأنه أقل كلفة بكثير من تحسين التربة الرملية بالزجاج الغاطس أو بالرص العميق كما أن صلاحية الحقن لأعمال التدعيم والتقوية في الأماكن الضيقة بين الأساسات وتحتها أو تحت الأوتاد يجعل معرفة سلوكية التربة المحقونة ضرورة لاغنى عنها . يهدف البحث إلى دراسة السلوك التشوهي الإجهادي للتربة الرملية المحقونة بالسيليكا لبناء فكرة واضحة عن مدى مقاومة كتلة التربة المحقونة تحت تأثير الإجهادات وبناء قانون مادة جديد أو علاقة بين الإجهاد والتشوه يمكنها تعديل مصفوفة المادة في برامج العناصر المحددة وبالتالي الحصول على استقرار واضح عن مقدار زيادة قدرة تحمل التربة الرملية المحقونة تحت الأساسات.

**طرائق البحث ومواده :**

تعتبر مادة السيليكا (سيليكا الكالسيوم) من أفضل المواد لحقن الأتربة الرملية الناعمة نظراً إلى سهولة الحصول عليها وإلى تصلبها الكبير بعد الحقن مما يرفع من متانة التربة المحقونة ويقلل هبوطها ويؤمن لها الكتامة المناسبة ويحصل على السيليكا بمفاعلة مادة الزجاج المائي (محلول سيليكا الصوديوم) مع مادة كلوريد الكالسيوم:



حيث يلعب كلوريد الكالسيوم دور المادة المحفزة للتصلب فيحل الكالسيوم محل الصوديوم وتنتج سيليكا الكالسيوم المتصلبة المقاومة [2] .

إن الزجاج المائي مادة متوفرة بأسعار معتدلة في المخابرات الكيميائية في القطر العربي السوري وفي مصافي النفط المختلفة، وهي مادة مستخدمة أصلاً في عملية اللحام البارد لكن عند خلط هذه المادة بالماء بنسبة معينة نحصل على محلول يمكن أن يضاف إليه كلوريد الكالسيوم ويحقن بضغط مناسب في التربة بمعونة الضاغط عبر أنبوب

الحقن حيث يتغلغل ضمن مسامات التربة فيسدها بالكامل ويعد أن يتم التفاعل تترسب في المسامات مادة السيليكا الصلبة التي تتراكم مع حبيبات التربة مشكلة كتلة متصلبة كثيفة من التربة المحقونة .  
وقد تم سلفاً تجهيز كتل رملية متصلبة محقونة بالسيليكا أعدت لاقتطاع عينات منها من أجل إجراء التجارب المخبرية عليها .

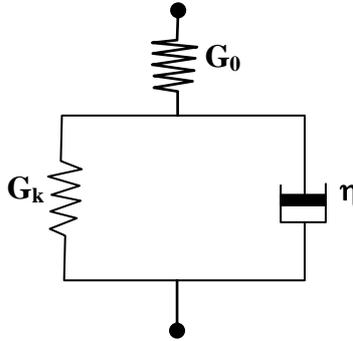
#### الأساس النظري: الموديل الريولوجي لسلوك التربة المحقونة بالسيليكا

يشكل اعتماد الموديل الريولوجي المناسب أساساً لاغنى عنه لحساب المنشآت المحقونة وتوصيف السلوك الإجهادي التشوهي وشرح تعقيدات السلوكيات الخاصة بالكتلة المركبة من التربة ومادة الحقن فالكتلة المركبة المعنية (رمل - مادة حقن) يجب أن تحقق المتطلبات الستاتيكية الانشائية التالية :

• المرونة .

• اللزوجة أو اللزوجة المرنة .

وعلى الموديل الريولوجي المعتمد أن يعكس الخواص المحققة لهذه المتطلبات ، أما السلوكية اللدنة فلم تدرس في إطار هذا البحث لأن تمثيلها الريولوجي معقد جدا ويحتاج إلى بحث مستقل خاص به لذلك تم تمثيل الخواص اللدنة تقريبا من خلال معيار منفصل للانهايار يتعلق بالإجهاد والتشوه. يبين الشكل (1) الموديل الريولوجي المقترح في البحث وهو ما يطلق عليه (موديل كالفن Kelvin المعمم)، حيث تبقى الإجهادات المطبقة وفق هذا الموديل أقل من إجهاد السيلا  $\sigma_f$ .



الشكل 1 : الموديل الريولوجي المقترح (نموذج كالفن)

مثلت المرونة بعنصر هوك (الناضج) ، ومثلت اللزوجة بعنصر نيوتن (المكبس) ، وأجريت الصياغة التحليلية للموديل الريولوجي بفرض أن التربة المحقونة بالسيليكا تحقق فرضية "تمائل الخواص المثالي ideal isotropic" [3] ، ويمكن كتابة العلاقات التالية المعروفة لعناصر الموديل المبين في الشكل (1) :

$$(1) \quad \Delta \varepsilon_{ij} = \frac{1}{3G_0} \Delta \sigma_{ij} , \quad \Delta \varepsilon_{ij} = \frac{1}{3G_k} \Delta \sigma_{ij} \quad : \text{عنصر هوك}$$

$$(2) \quad \Delta \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2\eta} \Delta \sigma_{ij} \quad : \text{عنصر نيوتن}$$

ويمكن باستخدام نظرية التجميع لدى "Reiner" [4] التعبير عن الموديل المقترح وفق الشكل البارامترية التالي:

$$(3) \quad \Delta \varepsilon_{ij} = \frac{1}{3G_0} \Delta \sigma_{ij} + \frac{1}{3G_k} \Delta \sigma_{ij} (1 - e^{-\frac{G_k t}{\eta}})$$

حيث :  $\Delta \varepsilon_{ij}$  : دفياتور التشوه .

$\Delta \sigma_{ij}$  : دفياتور الاجهاد .

$G_0$  : معامل مرونة القص في المجال المرن .

$G_k$  : معامل مرونة القص في مجال المرونة اللزجة .

$\eta$  : معامل اللزوجة .

وباعتبار أنه لا يمكن إثبات وجود تأثير حاسم للتغير الحجمي اللزج على السلوك الإجهادي التشوهي فقد وجدنا أن التغير الحجمي المرن يمكن اعتماده بدقة كافية ، ويعبر عنه بالعلاقة التالية :

$$(4) \quad \varepsilon_{KK} = \frac{1}{3K_0} \sigma_{KK}$$

حيث :  $\varepsilon_{KKJ}$  : تنسور Tensor التشوه .

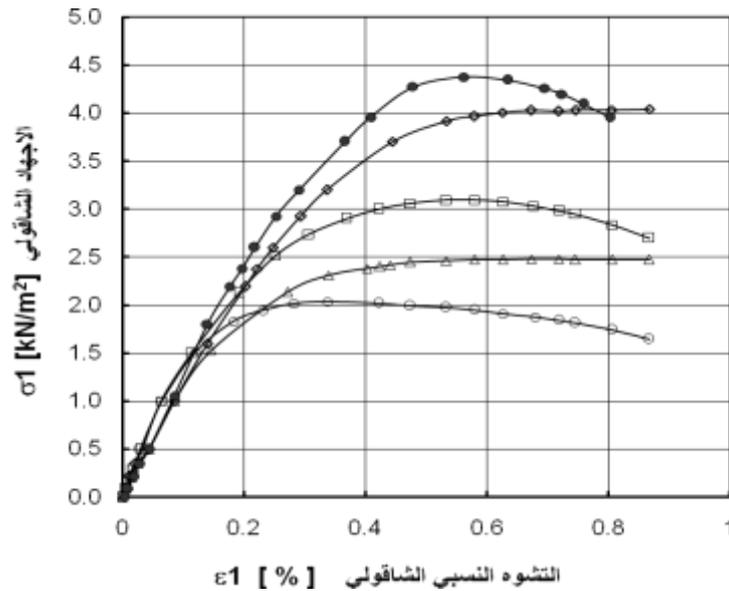
$\sigma_{KK}$  : تنسور الاجهاد .

$K_0$  : معامل الضغط .

### النتائج والمناقشة:

#### أ - تجارب الضغط غير المحصور والقص المباشر

اجريت تجارب الضغط غير المحصور على عينات اسطوانية مختلفة من التربة المحقونة بالسيليكا وتأتي ضرورة إجراء هذه التجارب باعتبارها معياراً للتحميل في تجربة الزحف وفق نظام DIN 18136-18137 [5] كما روعيت تعليمات نظام DIN 4093-1048 [6] ، [7] في إجراء التجارب ، وقد دلت نتائج الاختبارات أن إجهاد الضغط غير المحصور لأغلب العينات المجربة كان في المجال بين القيمتين  $3,0 \text{ MN/m}^2$  ، و  $4,0 \text{ MN/m}^2$  واقتطعت العينات من الكتلة المحقونة بواسطة أخذ الجزرات بعد مرور 21 يوماً على حقنها أي في مرحلة التصلب المكتمل .

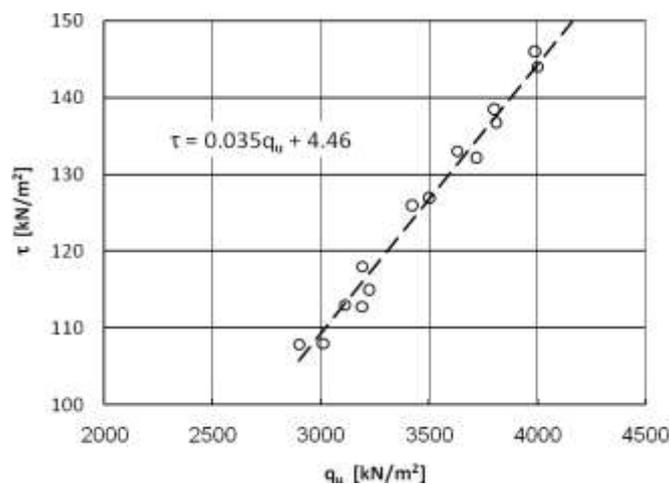


الشكل 2 : تجارب الضغط الوحيد المحور على عدد من اسطوانات من الرمل المحقون بالسيليكات

يبين الشكل (2) السابق نتائج تجارب الضغط الوحيد المحور (غير المحصور) على عدد من العينات الإسطوانية المجربة، وتشير أشكال المنحنيات إلى قابلية الرمل المثبت بالسيليكات على الزحف وهو ما بحثنا فيه في الفقرات القادمة.

كما أجريت من أجل المقارنة والتعرف إلى سلوكية المادة تجارب القص المباشر على العينات وتبين أن العلاقة بين قيم الضغط الحر وحيد المحور وبين قيم مقاومة القص المقابلة لها هي علاقة خطية كما هو موضح في الشكل (3)، معادلتها التقريبية:

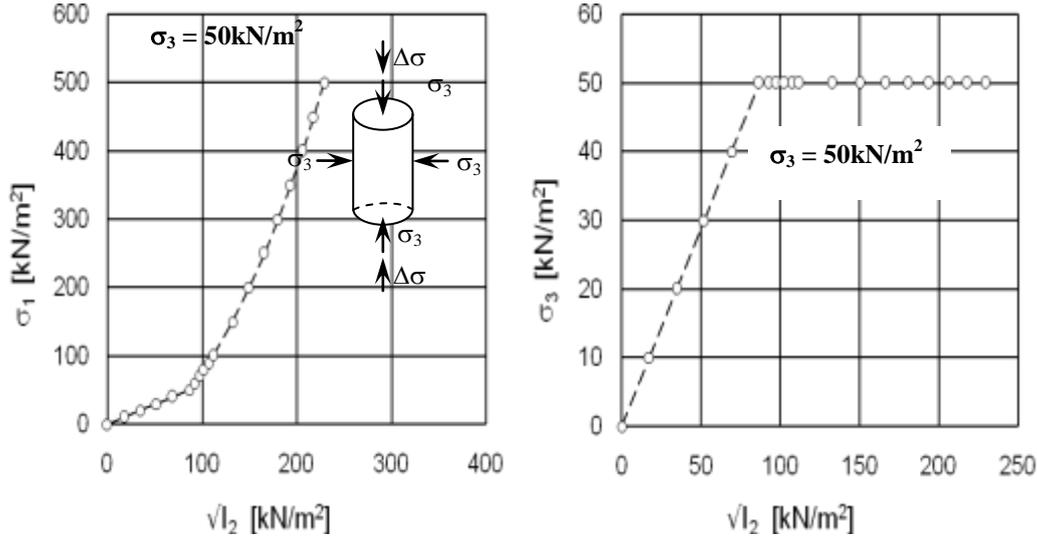
$$(5) \quad \tau = 0.035q_u + 4.46$$



الشكل 3 : العلاقة بين قيمة الضغط الحر ومقاومة القص

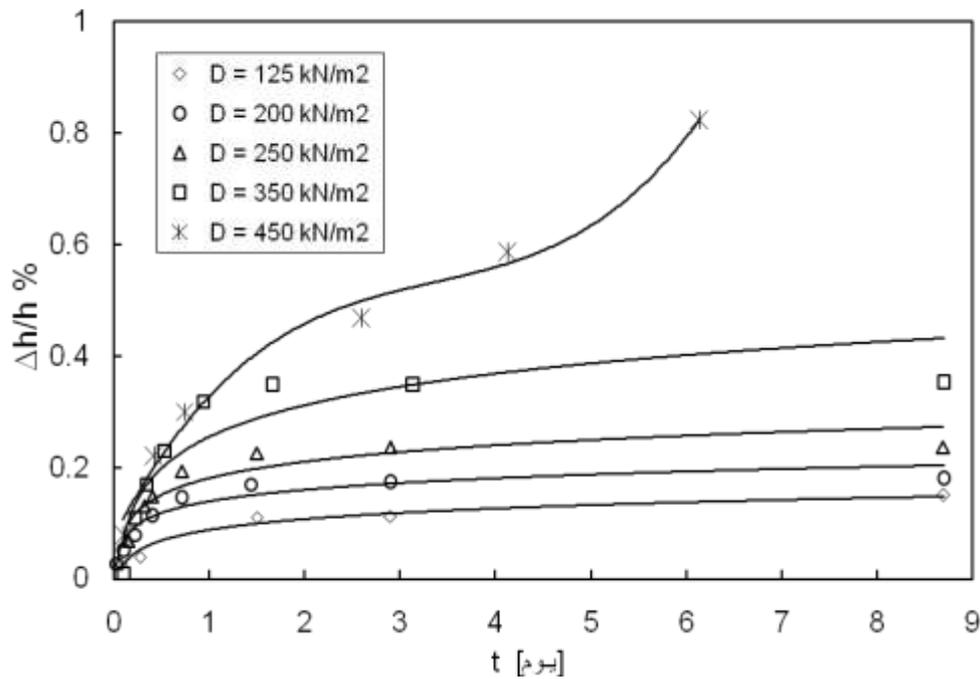
## ب - تجارب الزحف وتقييمها

من أجل التحقيق العملي للعلاقة العلمية النظرية (3) التي تسمى قانون الزحف أجريت تجارب الزحف ثلاثية المحاور حيث عرضت العينات المختبرة في كل مرة إلى حمولة ناظرية ثابتة محملة على مراحل قيمة الحمولة في كل مرحلة تبلغ 20% من قيمة إجهاد الانهيار في تجربة الضغط غير المحصور [8] .



الشكل 4 : آلية التحميل المعتمدة في الاختبارات

جرى التحميل في الاختبارات على مرحلتين حيث حملت في المرحلة الأولى الإجهادات الهيدروستاتيكية تدريجياً بدءاً من الصفر حتى بلوغ قيمة إجهاد التطويق ثم ثبتت قيمة إجهاد التطويق وبدأت مرحلة التحميل الدفياتيوري بالزيادة التدريجية لقيمة الإجهاد الناظمي والشكل (4) يبين بوضوح آلية التحميل المعتمدة في الاختبارات. اقتطعت من الكتلة المحقونة من أجل إجراء الاختبارات اللازمة عليها عينات اسطوانية أجريت عليها تجارب الزحف ثلاثي المحاور من أجل أجهاد تطويق جانبي قيمته  $50, 100, 150 \text{ kN/m}^2$  ،  $\sigma_3 = 50$  ، ... على التوالي وفق تزايد منتظم، ترك ثابتاً لمدة عشرة أيام لكل إجهاد، وقيست التشوهات بانتظام . يبين الشكل (5) التالي منحنيات الزحف لإحدى زمر العينات المختبرة بدلالة تغير دفياتور الإجهاد :  $D = \Delta\sigma = (\sigma_1 - \sigma_3)$  .



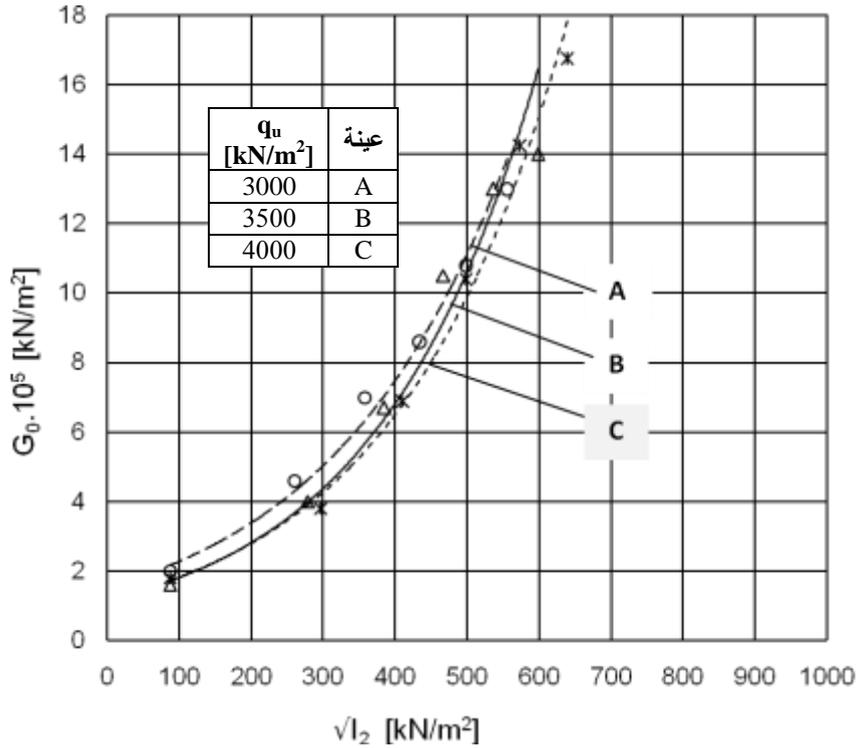
الشكل 5 : منحنيات الزحف من أجل اجهاد تطويق  $\sigma_3 = 50 \text{ kN/m}^2$

إن منحنيات الزحف أعلاه هي علاقة بين التشوه النسبي  $\Delta h/h$  والزمن  $t$  لذلك استقرنا منها قيم البارامترات الريولوجية  $G_0, G_k, \eta$  للعينات المجربة والمؤلفة من : (تربة + مادة حقن) .

بناء على نتائج الاختبارات حسبت الإجهادات والتشوهات بدلالة ثوابت الحالة الإجهادية  $I_1, I_2, I_3$  ، وقد نسبت التغيرات في بارامترات الزحف المحسوبة إلى جذر ثابت الحالة الإجهادية الثاني  $I_2$  المعطى بالعلاقة التالية بسبب تضمنه كلا من الإجهاد الناظمي وإجهاد التطويق :

$$(6) \quad I_2 = 2.(\sigma_1 \sigma_3) + (\sigma_3)^2$$

كما درست ورسمت تغيرات بارامترات المادة بالعلاقة مع جذر ثابت الحالة الإجهادية الثاني كما يلي :  
**أولاً:** درست العلاقة بين تغير قيم  $G_0$  ، و  $\sqrt{I_2}$  ثلاث زمر من العينات A,B,C مقاوماتها على الضغط الحر غير المحصور هي على الترتيب :  $3000-3500-4000 \text{ kN/m}^2$  وتدل النتائج كما في الشكل (6) أن العينة مهما كانت مقاومتها على الضغط غير المحصور فهي تعطي نتائج متقاربة والعلاقة هي علاقة تابعة أسية متزايدة بانتظام .



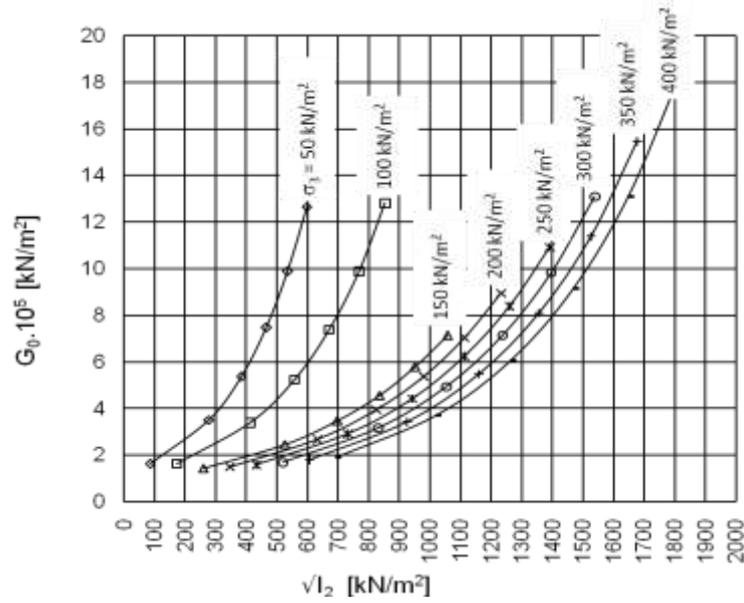
الشكل 6 : تغير قيم  $G_0$  بدلالة جذر ثابت الحالة الإجهادية الثاني لعينات مختلفة المقاومة (من أجل  $\sigma_3 = 50 \text{ kN/m}^2$ )

وقد أمكن بدقة مقبولة باستخدام نتائج التجارب المخبرية للعينات المختلفة وباستخدام مبادئ التقريب الرياضي استنتاج العلاقة الآسية الواردة في الجدول (1) الآتي بين  $G_0$  و  $\sqrt{I_2}$  بدلالة قيم مختلفة لإجهاد التطويق .

الجدول 1 : العلاقة التقريبية الآسية بين  $G_0$  ، وبين جذر ثابت الحالة الإجهادية الثاني من أجل قيم مختلفة لإجهاد التطويق

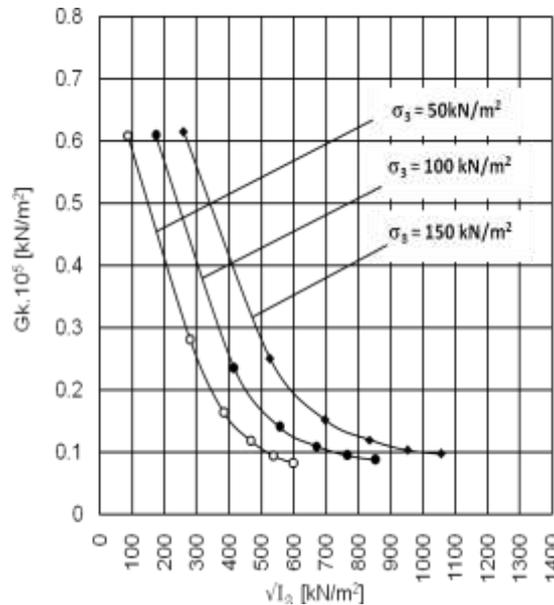
إجهاد التطويق	العلاقة التقريبية
50 kN/m <sup>2</sup>	$G_0 = 1.158.e^{0.004.\sqrt{I_2}}$
100 kN/m <sup>2</sup>	$G_0 = 0.988.e^{0.003.\sqrt{I_2}}$
150 kN/m <sup>2</sup>	$G_0 = 0.862.e^{0.002.\sqrt{I_2}}$
200 kN/m <sup>2</sup>	$G_0 = 0.761.e^{0.002.\sqrt{I_2}}$
250 kN/m <sup>2</sup>	$G_0 = 0.676.e^{0.002.\sqrt{I_2}}$
300 kN/m <sup>2</sup>	$G_0 = 0.603.e^{0.002.\sqrt{I_2}}$
350 kN/m <sup>2</sup>	$G_0 = 0.539.e^{0.002.\sqrt{I_2}}$
400 kN/m <sup>2</sup>	$G_0 = 0.484.e^{0.002.\sqrt{I_2}}$

رسمت المنحنيات كما في الشكل (7) وفق العلاقات المبينة في الجدول السابق والتي تبين العلاقة بين  $G_0$  و  $\sqrt{I_2}$  :



الشكل 7 : تغير قيم  $G_0$  بدلالة جذر ثابت الحالة الإجهادية الثاني بدلالة تغير ضغط التطويق

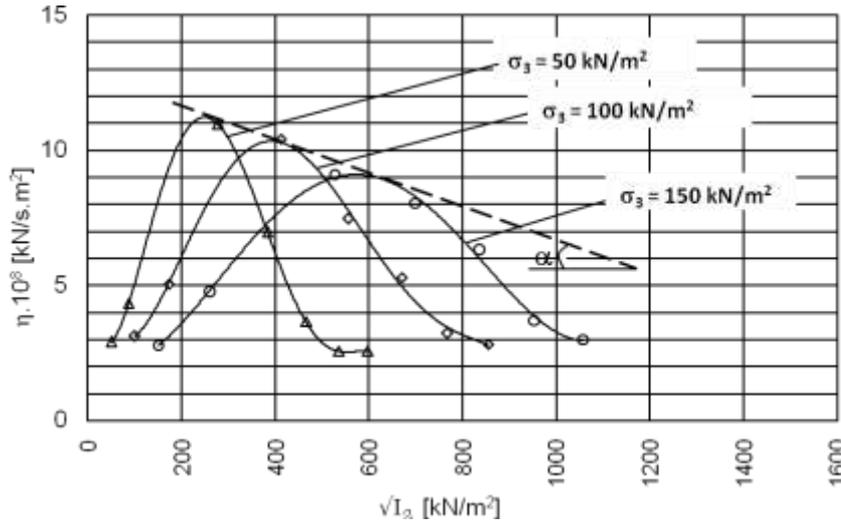
**ثانياً :** يتغير معامل القص  $G_k$  (في مجال المرونة اللزجة) مع تزايد قيمة الإجهاد الناظمي المطبق  $\sigma_1$  أي مع تزايد جذر ثابت الحالة الإجهادية الثاني  $\sqrt{I_2}$  (أي تزايد الإجهادات الناظمية)، وتبين المنحنيات المرسومة على الشكل (8) أن قيمة  $G_k$  تنخفض في البداية بشكل حاد مع زيادة قيمة الإجهاد الناظمي ثم تستمر في الانخفاض وتثبت عند قيمة معينة مهما تزايد الإجهاد الناظمي .



الشكل 8 : تغير قيم  $G_k$  بدلالة جذر ثابت الحالة الإجهادية الثاني

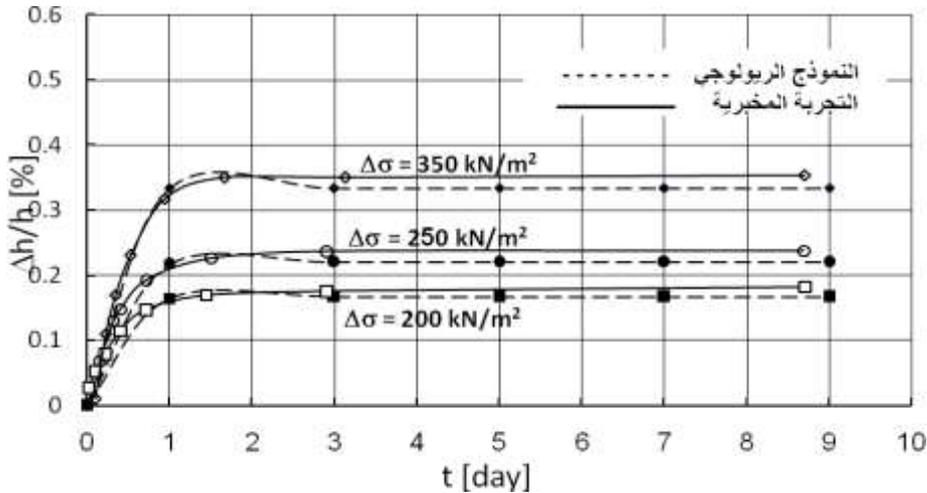
**ثالثاً :** تتزايد قيمة اللزوجة  $\eta$  مع تزايد قيمة ثابت الحالة الإجهادية حتى تصل إلى أقصى قيمة لها عندما يكون جذر ثابت الحالة الإجهادية مساوياً إلى أربعة أمثال قيمة إجهاد التطويق  $\sqrt{I_2} = 4.\sigma_3$  تقريباً ولوحظ أن القيم العظمى للزوجة تنخفض مع زيادة إجهاد التطويق وتقع جميع القيم العظمى (الذرى) على مستقيم واحد ميله كما هو مبين على الشكل (9) بحسب بالعلاقة التالية :

$$(6) \quad \tan \alpha = \Delta \eta_{\max} / \Delta(\sqrt{I_2})_{\max}$$



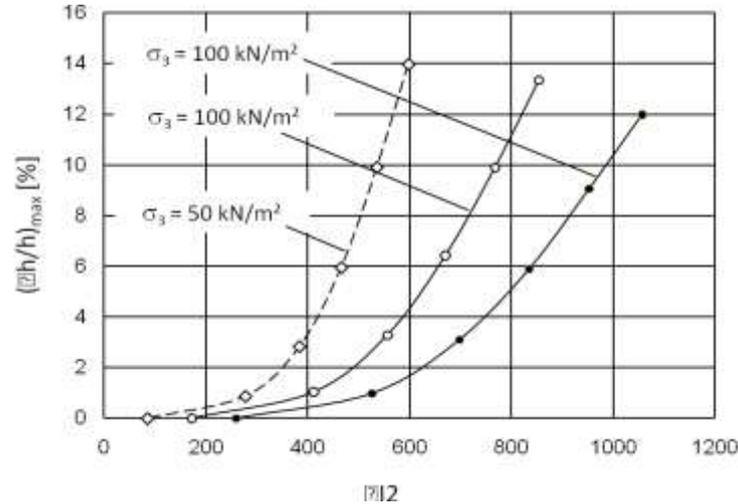
الشكل 9 : تغير قيم  $\eta$  مع تغير جذر ثابت الحالة الإجهادية الثاني بدلالة قيمة إجهاد التطويق

وحتى يمكن التحقق من صحة النموذج الريولوجي المختار فقد عوضت في علاقة التشوه المعادلة (3) قيم البارامترات المذكورة سابقاً التي حصل عليها من الاختبارات وحسبت قيم التشوه لجميع القيم ورسمت بالاعتماد عليها منحنيات الزحف من أجل قيم مختلفة لدفياتور الإجهاد  $\Delta\sigma$  وتحت إجهادات تطويق مختلفة ، ومن ثم تمت مقارنة المنحنيات المحسوبة مع المنحنيات المخبرية .



الشكل 10 : المقارنة بين منحنيات الزحف المخبرية والحسابية من أجل قيم مختلفة لدفياتور الإجهاد

ويبين الشكل (10) نموذجاً من المنحنيات المقارنة لإحدى مجموعات العينات حيث إجهاد التطويق  $\sigma_3=50\text{kN/m}^2$  وتدل المقارنة كما هو ظاهر في الشكل على تقارب جيد ومقبول بين القيم التجريبية والحسابية مما يؤكد صلاحية وصحة الموديل الريولوجي المقترح ، وقد تحقق هذا التقارب أيضاً من أجل إجهادات التطويق الأخرى  $\sigma_3 = 100 , 150 , 200 \text{ kN/m}^2$  وتجعل هذه النتيجة استخدام معادلة الموديل الريولوجي المقترح مقبولاً ومبرراً .

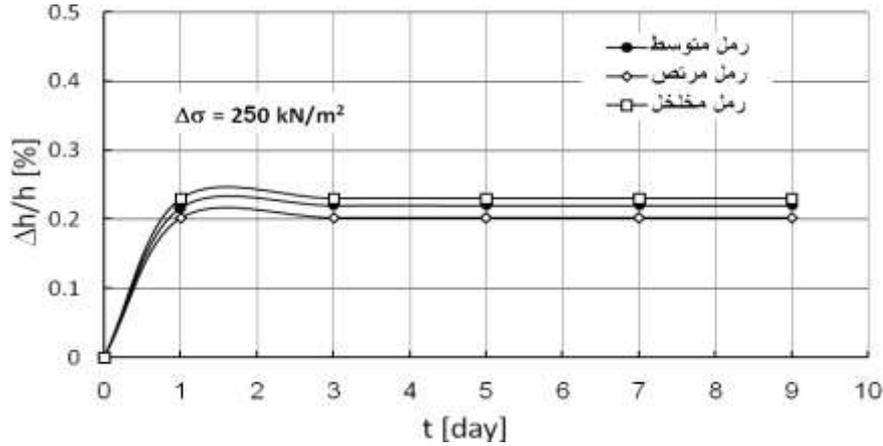


الشكل 11 : تغير التشوه مع تزايد جذر ثابت الحالة الإجهادية الثاني

إن العلاقة بين قيم التشوه الأقصى (التشوه الذي يبدأ عنده الزحف) وقيم ثابت الحالة الإجهادية الثاني كما في الشكل (11) تشير بوضوح إلى الاقتراب من السلوكية المرنة كلما زادت إجهادات التطويق مع تناقص قيم التشوهات القصوى وهي نتيجة قريبة من افتراض SCHUBERT [8] .

### ج - تأثير نوع الرمل على صلاحية اختيار الموديل الريولوجي

أثبتت نتائج الاختبارات أن الموديل الريولوجي المعتمد يصلح للتربة الرملية المحقونة مهما كان نوعها، وتم تكرار الاختبارات من أجل أنواع مختلفة من الرمل الناعم والمتوسط والخشن، وكان واضحاً وفق ما بينته النتائج أن الرمل مهما كان نوعه فهو يسلك سلوكاً متشابهاً من الناحية الريولوجية عند خلطه بمستحلب السيليكا، وأن الموديل الريولوجي المعتمد (موديل كالفن المعمم) يمكن اعتباره صحيحاً للتربة الرملية المحقونة بالسيليكا، ويبين الشكل نموذجاً من مخططات الزحف الحسابية لثلاثة أنواع من التربة الرملية



الشكل 12 : نماذج مخططات الزحف وفقا لحالة الرمل

### الاستنتاجات والتوصيات:

بنتيجة إجراء التجارب المخبرية المذكورة أعلاه على أنواع متعددة من الرمل المعامل أو المحقون بالسليكات ومن خلال تقييم ومناقشة النتائج المحصول عليها والتي عرضنا قسما منها في سياق البحث أعلاه يتبين أن:

- مقاومة الضغط الحر الوحيد المحور للرمل المحقون لا تخرج عن المجال  $3,0 - 4,0 \text{ MN/m}^2$  . أنظر الشكل (2) .

- أجريت للمقارنة تجارب القص المباشر على العينات وتبين أن العلاقة بين قيم الضغط الحر وحيد المحور وبين قيم مقاومة القص المقابلة لها هي علاقة خطية كما هو موضح في الشكل (3) معادلتها التقريبية:

$$(7) \quad \tau = 0.035.q_u + 4.46$$

- إن سلوكية التربة الرملية المحقونة بالسليكات ليست سلوكية مرنة خالصة وإنما سلوكية مرنة لزجة .
- يتزايد معامل القص المرن مع تزايد ثابت الحالة الإجهادية (أي تزايد الإجهادات الناظمية) وفق علاقة أسية بينما يتناقص باضطراد معامل القص اللزج مع تزايد الإجهادات الناظمية .
- تتزايد قيم اللزوجة بشكل صاعد مع تزايد الإجهاد الشاقولي المطبق حتى تبلغ قيمتها القصوى ومن ثم تتناقص بشكل مستمر حتى تبلغ قيمة معينة تثبت عندها وتشير النتائج الى أن القيمة القصوى للزوجة تقل خطيا مع تزايد إجهاد التطويق وتقع القيم القصوى (الذرى) على مستقيم واحد ميله :

$$\tan \alpha = \Delta \eta_{\max} / \Delta (\sqrt{I_2})_{\max}$$

- تشير المقارنة بين القيم التجريبية والحسابية إلى أن النموذج المقترح (نموذج كالفن المعمم) يصلح لتوصيف سلوك التربة الرملية المحقونة بالسليكات ويمكن اعتماده بتقريب جيد وبالتالي فإن المعادلة (3) قابلة للتطوير لربطها بالإجهادات في التربة واستقراء قيم التشوه في الكتلة المحقونة تحت المنشآت المدعمة والأساسات .
- إن النموذج المبسط المقترح سهل البرمجة والإدخال في مصفوفة المادة بطريقة العناصر المحددة وهو بذلك تطوير لقانون مادة جديد أكثر دقة من قوانين المادة المعتمدة عادة في الحساب العددي للكتل المحقونة في التربة. إن ما يجعل للبحث قيمة اقتصادية هو إمكانية تنفيذ الحقن في التربة الرملية باستخدام ضواغط بسيطة قليلة الكلفة دون الحاجة إلى ضواغط معقدة، وذلك بسبب نفوذية الرمل حيث لا تحتاج مادة الحقن إلى ضغوط عالية لحقنها

في التربة كما أن المادة متوفرة في القطر العربي السوري في مصافي النفط والمخابر الكيميائية بشكلها السائل وإن سهولة إعدادها وخلطها وحقنها في التربة ورخص ثمنها يجعل منها حلا اقتصاديا مهما لمشاكل التأسيس.

إن النتائج التي حصلنا عليها في البحث تجعل في الإمكان الاستعاضة عن تجارب الزحف وكسب الوقت اللازم لإجرائها وتوفير الكلفة المترتبة عليها بالاعتماد ببساطة في توصيف التربة الرملية المحقونة بالسليكات على موديل كالفن المعمم كما أن الموديل المقترح ومعادلة التشوه الريولوجي يشكلان أساسا لتطوير قانون مادة جديد للكثل الرملية المحقونة ويمكن بسهولة تعديل مصفوفة المادة في طريقة العناصر المحددة وحساب التشوهات والإجهادات في كثل الحقن التدعيمية تحت الأساسات والأبنية بناء على مصفوفة المادة المعدلة .

إن نتائج البحث قابلة للتطوير ويمكن الاستعانة بها لمقارنة الموديل المعتمد مع موديلات أخرى وبالتالي الحصول على قانون مادة جديد ومن ثم تعديل مصفوفة المادة في برامج العناصر المحددة كي تأخذ بعين الاعتبار السلوكية الجديدة للمادة وبالتالي فتح الأفق لتطوير البحث والمتابعة فيه .

### المراجع:

1. KUTZNER, CH. " *Injektionen im Baugrund* " , Enke Verlag, Stuttgart, 1991. 17-28 .
2. PICHLER , H. " *Gesteinsbildende Minerale im Dünnschliff* ". Enke Verlag, 1987. 14-16 ,
3. HANSWALTER G . " *Phänomenologische Rheologie* " 3. Auflage , Springer Verlag, Berlin , 1994 . 64-81.
4. Reiner, M. " *Rheologie in elementarer Darstellung* " , VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1968. 8-17.
5. DIN 18136 . " *Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit* " , Beuth Verlag GmbH, Berlin , 1987 . 44-49.
6. DIN 4093 . " *Einpressen in den Untergrund* " , Beuth Verlag GmbH, Berlin , 1987. 5-12.
7. DIN 1048 . " *Prüfverfahren für Beton, Frischbeton, Festbeton gesondert hergestellter Probekörper* " , Beuth Verlag GmbH, Berlin , 1991 . 55-72.
8. SCHUBERT, A. " *Ein Beitrag zum Spannungs-Verformungsverhalten Silikatgel-injizierter Sande* ", Heft 4 der Schriftenreihe des Lehrstuhl und Prüfamtes für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik TU- München , 1985 . 37-58.
9. STETZLER-KAUFMANN, B. " *Stoffverhalten chemisch injizierter Sande* ", Heft 94 der Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der U. Fridericiana in Karlsruhe , 1983. 32-39.