

دراسة مخبرية لتقنية الأعمدة البحصية بملاط كلسي في التحسين العميق للترب الانتفاخية

د. رامي اسطة*

نورا عدنان نظام**

(تاريخ الإيداع 14 / 12 / 2020. قُبِلَ للنشر في 3 / 3 / 2021)

□ ملخص □

تقدم الدراسات النظرية السابقة أدلة واضحة على فعالية تحسين التربة بالكلس، و هو ما يستدعي زيادة الاهتمام بدراسة تقنيات جديدة تستخدم الكلس في العملية. يعتمد هذا البحث على المنهج التجريبي حيث أجريت مجموعة من الاختبارات لدراسة تأثير زمن المعالجة و البعد عن عمود التحسين من خلال القيام بمجموعة من التجارب مثل حدود أتربرخ، الوزن النوعي، القص المباشر و الانضغاطية. النموذج المصمم للدراسة هو عبارة عن قالب اسطواني معدني مملوء بتربة غضارية انتفاخية من منطقة دمسرخو و حفرة اسطوانية مركزية تملأ بالحصويات و الكلس بنسبة 50% من وزن البحص، تستخرج العينات على بعد (1D-2D-3D-4D-5D) من قطر العمود-حيث أن D قطر العمود- و كذلك على أزمنة معالجة (7-28-57-112) يوم من تشكيل عمود التحسين، اظهرت النتائج انخفاض واضح في قيم قرينة اللدونة و وكذلك زيادة في مقاومة القص ومعامل مرونة التربة و ذلك مع زيادة مدة المعالجة و نقصان البعد عن عمود التحسين.

الكلمات المفتاحية: ترب انتفاخية، انتفاخ حر، حدود أتربرخ، أعمدة كلس-بحص، قص مباشر، تشديد، زمن معالجة.

* مدرس، قسم الهندسة الجيوتكنيكية- كلية الهندسة المدنية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.

** طالبة دراسات عليا (ماجستير)، قسم الهندسة الجيوتكنيكية- كلية الهندسة المدنية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.

Experimental Study of Lime-Gravel columns Technique for the Stabilization of Expansive Soils

Dr. Rami Ousta*

Norah Nizam**

(Received 14 / 12 / 2020. Accepted 3 / 3 / 2021)

□ ABSTRACT □

Previous theoretical studies provide clear evidence of the effectiveness of soil improvement using lime, which necessitates increased interest in the study of new lime-based techniques in the process. This research is based on the experimental approach, where a set of tests were conducted to study the effect of treatment time and distance from the improvement column by conducting a set of experiments such as Atterberg limits, free swell, direct shear and consolidation. The model designed for the study is a metallic cylindrical mold filled with expansive clay from Demsarkhu area and a central cylindrical hole filled with gravel and lime mixed with 50% of the weight of the gravel. The tested samples are extracted (1D-2D-3D-4D-5D) from the column diameter –where D is the column diameter- and also at Treatment periods of(7-28-57-112) days after the Implementation of the improvement column, the results showed a clear decrease in the values of plasticity index and the free swell index as well as an increase in shear resistance and soil elasticity coefficient by increasing the treatment period and decreasing the distance from the column.

Keywords: Expansive soil, free swell, Atterberg limits, gravel-lime column, direct shear, consolidation, processing time.

* Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria, rousta663@gmail.com

** Postgraduate Student, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria, norah.nizam3@gmail.com

مقدمة:

أظهرت العديد من الدراسات الأضرار التي تعرضت لها المنشآت الخفيفة المنفذة على التربة الانتفاخية، ونظراً لعدم إمكانية تجنب الانشاء على هذه التربة الضعيفة في أغلب الأحيان، وكنتيجة للتوسع العمراني ولتطور البنية التحتية وشبكات الطرق التي تمتد على مساحات كبيرة من الأراضي، فقد ظهرت الحاجة لإيجاد طرق بسيطة واقتصادية تسمح بتحسين خواص هذه التربة وتقلل الأضرار التي تلحق بالمنشآت المقامة عليها. لذلك فإنه من الضروري إجراء أبحاث إضافية على طرق التحسين العميق للترب الانتفاخية مع المحافظة على المنشأ المنفذ على هذه التربة. قُدمت العديد من الأبحاث وخاصة التجريبية على طرق تحسين التربة ومنها التحسين بالكلس حيث اثبتت مادة الكلس فعاليتها في التحسين كما أن الكلس الطبيعي متوفر في سوريا وهو مادة اقتصادية. تقوم هذه الدراسة على تشكيل موديل مخبري بأبعاد (D= 50 cm , H=30 cm) يمثل وسطاً من التربة الانتفاخية تم تحسينها بواسطة بئر متوضع في مركز الموديل، يحتوي البئر على الكلس والحصى ويتم اشباعها بالماء بحيث تسهل عملية انتقال شوارد الكلس ضمن مسامات التربة، تُرَس تأثير هذه الأعمدة على خواص التربة المحيطة من خلال إجراء مجموعة من التجارب على عينات مأخوذة على تباعدات ومدد معالجة متباينة. يقدم هذا البحث مساهمة أفضل لفهم آلية وفعالية التحسين العميق للترب الانتفاخية باستخدام طريقة الأعمدة الحصى مع ملاط كلسي، وهي طريقة اقتصادية وسهلة التنفيذ وموادها متوفرة في سوريا.

أهمية البحث وأهدافه:

تعود بداية استخدام أوتاد الكلس إلى عام 1961 في أوكلاهوما، الولايات المتحدة بهدف إصلاح طريق سيارات، تم عندها وضع الكلس في قاع حفر منفذة في الموقع سميت الطريقة وقتها بحفر الكلس (Noble & (drill-lime (Anday, 1967) ، كذلك استخدمت أعمدة الكلس في الهند واليابان وتايوان ، تقوم أيضاً على وضع الكلس الجاف في حفر عمودية (Chiu and Chin, 1963; Holeyman et al., 1983). وفي تايلاند استخدمت أعمدة الكلس المرطب لتثبيت غضار بانكوك الطري (Petchgate & Tungboonterm, 1990). أما في المملكة المتحدة فاستخدمت هذه الطريقة لأول مرة عام 1992 لتدعيم جوانب قناة، ثم في عام 1994 استخدمت أوتاد الكلس الحي بقطر 15cm في تثبيت منحدر بطول 30m (Brookes et al, 1997). ظهرت أيضاً طريقة أعمدة الكلس في سنغافورة وماليزيا، كان فيها الاعتماد على زيادة حجم الكلس ضمن التربة عند ترطيبه مما يؤدي إلى تشدد التربة الواقعة بين الحفر المملوءة ببودرة الكلس حيث تبلغ الزيادة في حجم الكلس حوالي 85% عند إضافة الماء. كذلك لقيت هذه الطريقة انتشاراً واسعاً في السويد، فنلندا والنرويج، واستخدمت لزيادة استقرار الحفرات والمنحدرات والسدود الترابية المرتفعة، وتم تحسينها بالتدرج منذ 1967 (عند حصول Kjeld على براءة الاختراع) وبعدها أصبحت أكثر الطرق استخداماً في السويد في معالجة التربة الغضارية (Broms 1999).

ظهرت مجموعة من الطرق التي تستخدم مواد إضافية في تقوية أعمدة الكلس منها استخدام طريقة مركبة في عام 1981 تقوم على إضافة الخيزران لتقوية أوتاد الكلس بهدف استغلال المواد المتاحة في البلدان التي تزرعها، إلا أن الكلس حول الخيزران إلى مادة هشّة وأفقدته خاصية المرونة، تدل هذه الطرق على أن أوتاد الكلس قد تكون غير كافية بمفردها وتحتاج إلى نوع من التقوية (Brookes et al, 1997).

أجريت العديد من الدراسات الحديثة منها المخبرية و منها الحقلية والتي تدرس تحسين الترب الغضارية بأعمدة الكلس وانتشاره ضمن الترب المحيطة حيث وُجد حدوث تأثير واضح في التربة المحيطة بانتشار شوارد الكالسيوم، إذ ينخفض حد السيولة و قرينة اللدونة (Abiodun & Nalbantoglu, 2014; Ashok & Reddy, 2016) ويزداد حد اللدونة، تستمر هذه التغيرات مع الزمن و تكون أعظمية بالقرب من عمود التحسين، كما ينطبق ذلك على خواص انضغاطية التربة (2015، الحاج; Merdhiyanto, 2015; Tonoz et al, 2003) التي تشهد تحسناً واضحاً في قيم Cc , m_v , E ، أما عند دراسة مقاومة التربة على القص وجد أن هذه الأعمدة تزيد من قدرة التحمل وتقلل الهبوطات حيث تحسن سلوك حمولة-هبوط للترب الغضارية (Khan et al, 2016; Malekpoor, Poorebrahim, 2014).

لمحة نظرية:

يعود التحسن الفوري في خواص التربة عند إضافة الكلس إلى انخفاض المحتوى المائي من جهة و تفاعلات التلدب و التجمع من جهة أخرى. كما تزداد قوة القص للتربة المحسنة تدريجياً مع الزمن من خلال التفاعلات البوزولانية عندما يتفاعل الكلس مع السيليكات والألومينات الموجودة في الغضار، تحدث التفاعلات البوزولانية على مدى عدة أشهر أو سنوات. تعمل درجة حرارة الأرض المرتفعة وقيمة الرقم الهيدروجيني العالية ($pH > 12$) على تسريع هذه التفاعلات الكيميائية لأن قابلية ذوبان السيليكات والألومينات تزداد بزيادة قيمة PH. إذ تتجاوز قيمة PH عادة الـ 12 مع نسبة مئوية قليلة من الكلس، حيث تتعلق نسبة الكلس الأمثل بمحتوى الماء وقرينة اللدونة في التربة. حيث تصبح التربة المحسنة بالكلس صلبة وحببية و يقترب سلوكها إلى سلوك الغضار مسبق التشديد (Balasubramaniam et al., 1990; Balasubramaniam and Buencuceso, 1989)

يحدد التركيب المنزالي للتربة درجة تفاعلها مع الكلس ودرجة التحسين النهائية التي ستصل إليها الطبقات المحسنة. بشكل عام تعد الترب الناعمة الحاوية على نسبة مار من المنخل NO.200 لا تقل عن 25 % وقرينة اللدونة P_i أكبر من 10 جيدة للمعالجة بالكلس. التربة التي تحتوي على كميات كبيرة من المواد العضوية (أكبر من حوالي 1%) أو الكبريتات (أكبر من 0.3%) قد تتطلب كلس إضافي و/ أو إجراءات خاصة عند الإنشاء (مثل استخدام الرماد المتطاير أو الاسمنت) (Mallea et al, 2004).

العمل المخبري:

تمت هذه الدراسة باستخدام قالب معدني بقطر 50cm وارتفاع 30cm. سماكة جدران القالب المصمم $t_w=20mm$ وسماكة صفيحة القاعدة $t_b=40mm$ كما أن القاعدة مدعمة بـ 6 عوارض معدنية متصالبة والجدران مدعمة بأحزمة معدنية دائرية على كامل المحيط لزيادة صلابة القالب ومنع التشوهات أثناء تشكيل و رص التربة. تم تشكيل التربة في القالب على طبقات بسماكة 2.5cm للطبقة حتى الحصول على عينة بارتفاع 25cm. رصت كل طبقة باستخدام مطرقتين معدنيتين وزن الواحدة 4.5kg وتسقط من ارتفاع 45cm ، وتمت عملية الرص بشكل متناظر بالنسبة لمركز القالب حتى الوصول إلى وزن حجمي $18.6 KN/m^3$. خواص العينة مبينة في الجدولين (1) و (2).

جدول (1) بعض الخواص الفيزيائية لعينة الغضار المدروس

Gs الوزن النوعي	2.73
LL(%) حد السيولة	68
PL(%) حد اللدونة	33
PI(%) قرينة اللدونة	35
SL(%) حد الانكماش	18.5
(%) الرطوبة (بروكتور)	29.4
(KN /m ³)الوزن الحجمي الطبيعي	18.6
(KN /m ³)الوزن الحجمي الجاف	14.4
(%)نسبة المواد العضوية	1.745
No. 200 (%) المار من المنخل	95.3
(%) (Clay) نسبة الغضار	62.2
(%) (Silt) نسبة السيلت	33.1
k (m/sec) معامل النفاذية	4.03×10^{-11}
Classification (ASTM) التصنيف	CH (fat clay)

جدول (2) بعض الخواص الميكانيكية لعينة الغضار المدروس

E (kN/m ²) معامل يونغ المماس	2212.09
C (kN/m ²) التماسك	31
Φ (°) زاوية الاحتكاك الداخلي	4.2
دليل الانتفاخ (%)	76.7
(KN /m ²)ضغط الانتفاخ	400

بعد الانتهاء من تشكيل العينة والحصول على قالب مملوء بالغضار بارتفاع 25cm، تم حفر عمود التحسين عن طريق غرز أنبوب معدني مفرغ بقطر 4.825 cm في مركز القالب وحتى قاعدته، ثم تم سحب الأنبوب المعدني بالتدريج واستخرجت التربة من داخله بحيث تتشكل حفرة اسطوانية.

ملئت الحفرة بخليط من الحصى والكلس بنسبة كلس 33% من الوزن الكلي لمواد العمود. تمت عملية الملء على ثلاث مراحل ورصت كل طبقة يدوياً (بحيث كان الوزن الحجمي لمادة العمود 13.5 KN/m^3). تمت حماية سطح الغضار من اختلاطه بالكلس عن طريق تغطية السطح المحيط بالحفرة أثناء ملء العمود بالخليط. يبين الشكل (1) مراحل تشكيل عمود التحسين.



الشكل(1): تشكيل عمود التحسين المكون من الحصىيات وبودرة الكلس الجاف

بعد تشكيل العمود تم تغطية السطح بنسيج ثم بطبقة من الرمل بسماكة 2cm، ثم بنسيج آخر قبل وضع الغطاء المعدني، شكل(2)، الغاية من استخدام طبقة الرمل هي التوزيع المنتظم للإجهادات وحماية سطح الغضار من الترطيب الفجائي عند غمر العينة بالماء (ASHOK & REDDY, 2016).



الشكل(2): تغطية سطح التربة بالرمل وتجهيز القالب للعملية الترطيب والتحميل

من أجل تطبيق الإجهادات على سطح العينة، تم استخدام غطاء معدني بقطر 49.4 cm وسماكة 1.3 cm حيث تم تعريض السطح لإجهاد بقيمة 2.6 KN/m^2 ثم غمرت التربة بالماء حتى أعلى القالب وترك للاختبار من أجل مدد المعالجة المدروسة (7-28-57-112) يوم.
عند اتمام كل مدة من مدد المعالجة المدروسة يتم إزالة الحمولة وكذلك طبقة الرمل، واستخراج العينات من التربة المحيطة بالعمود باستخدام انبوب معدني مفرغ على تباعدات مختلفة من محور العمود المركزي (1D-2D-3D-4D-5D). حيث أن D يمثل قطر عمود التحسين.

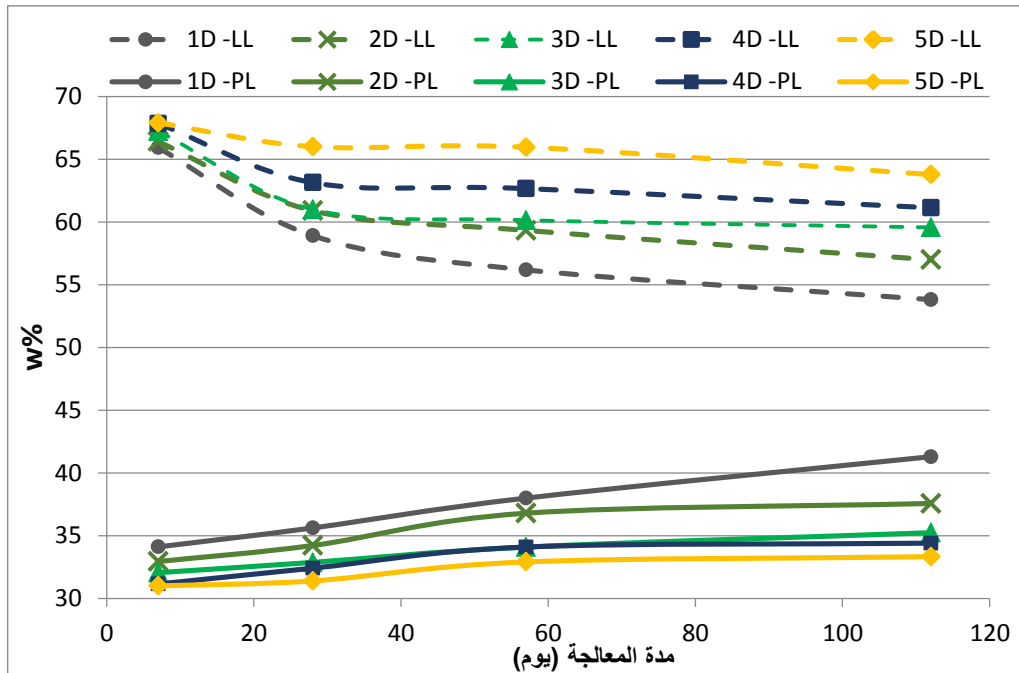
النتائج والمناقشة:**1- تجارب حدود اتربرغ (Atterberg limits):**

بهدف تحديد تأثير أعمدة الكلس مع الحصىات على حدود أتربرغ وتغيراتها مع مدة المعالجة ومع البعد عن عمود التحسين، تم استخراج مجموعة من العينات عند مدد معالجة (7-28-57-112) يوم، وعلى مسافات d مساوية إلى (1D-2D-3D-4D-5D) من محور عمود التحسين، مع العلم أن D قطر عمود التحسين.

أجريت على هذه العينات تجريبي حد السيولة واللدونة. يظهر الشكل (3) نتائج التجريبتين حيث يوضح أنه من أجل مدة معالجة سبعة أيام وعلى بعد 1D يكون معدل الانخفاض في حد السيولة 3% ، ومن أجل مدة معالجة 112 يوم يصل معدل الانخفاض إلى 20.5% . أما في حالة البعد "d" المساوي لخمس مرات قطر العمود (أي 5D) عن محور عمود التحسين فإن معدل الانخفاض في حد السيولة هو 0% عند مدة 7 أيام (أي عدم وجود تحسن نتيجة عدم وصول الكلس)، و 6% عند المدة 112 يوم. هذه النتائج متوافقة مع نتائج (Ashok & Reddy, 2015) في حالة عمود كلس صافي، حيث وصل فيها انخفاض حد السيولة حتى 27% عند مدة معالجة 120 يوم وذلك لعينة واقعة على بعد 1D، أي أن إضافة الحصىات إلى عمود الكلس وما يرافقه من نقصان من محتوى الكلس في العمود لا يؤثر على فعالية التحسين في التربة المحيطة والناجمة عن انتشار الكلس فيها.

يمكن من الشكل (3) ملاحظة حدوث تقارب في قيم LL و PL وبالتالي نقصان قيم قرينة اللدونة PI، وذلك مع زيادة مدة المعالجة والاقتراب من عمود التحسين، يشير النقصان في قيم قرينة اللدونة إلى الانخفاض في الخواص الانتفاخية للتربة المقترنة بقيم PI.

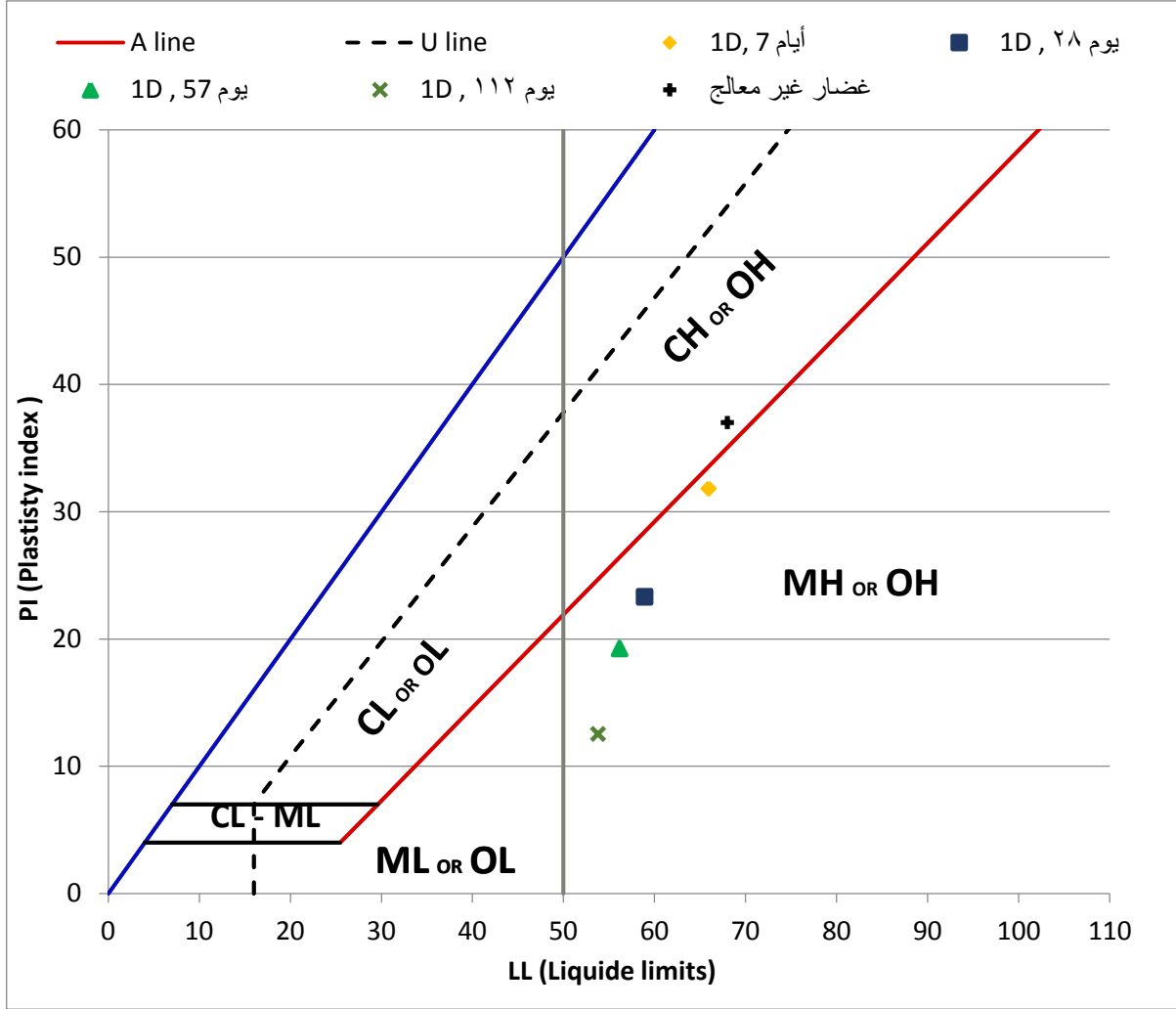
يمكن تفسير النتائج السابقة بالتفاعلات الكيميائية التي تحدث نتيجة لهجرة شوارد Ca^{+2} ضمن كتلة التربة المعالجة والتي تسبب انخفاض رطوبة التربة، التكتل وتلبد جزيئات الغضار. إذ أنّ إضافة عمود الكلس والحصى إلى كتلة التربة المرصوفة يؤدي إلى انتشار أيونات الكالسيوم والهيدروكسيل ضمن كتلة التربة المحيطة، كما يسهل وجود الماء انتشار أيونات Ca^{+2} وحصول تفاعلات فيزيائية كيميائية بين الشوارد والغضار مما يؤدي إلى تغيير الخصائص المعدنية والتركيبية للتربة. كما أن وجود نسبة عالية من شوارد الكالسيوم يسبب إضعاف قوى الجذب بين جزيئات الغضار وبالتالي انهيار طبقة الانتشار المزدوج الموجودة عادة بين جزيئات الغضار (Abiodun and Nalbantoglu, 2015).



الشكل (3): تغيرات حد اللدونة PL وحد السيولة LL مع مدة المعالجة والبعد عن عمود التحسين

2- تصنيف التربة (Classification):

اعتماداً على نظام التصنيف من الـ ASTM ، تم تصنيف التربة الغضارية غير المحسنة المستخدمة في البحث بـ CH أي غضار عالي اللدونة، أما بعد إضافة عمود الكلس مع الحصويات إلى كتلة التربة وانتشار شوارد الكالسيوم ضمنها تحول تصنيف التربة إلى MH (سيلت عالي اللدونة) يعود ذلك إلى حدوث تفاعلات التبادل والتكثف بين الجزيئات والتي تغير تصنيف التربة، هذه النتيجة موضحة في الشكل (4) الذي يمثل مخطط اللدونة (Plasticity Chart) وتغير تصنيف التربة مع تغير مدة المعالجة وذلك لعينات مستخرجة على بعد 1D من مركز العمود.



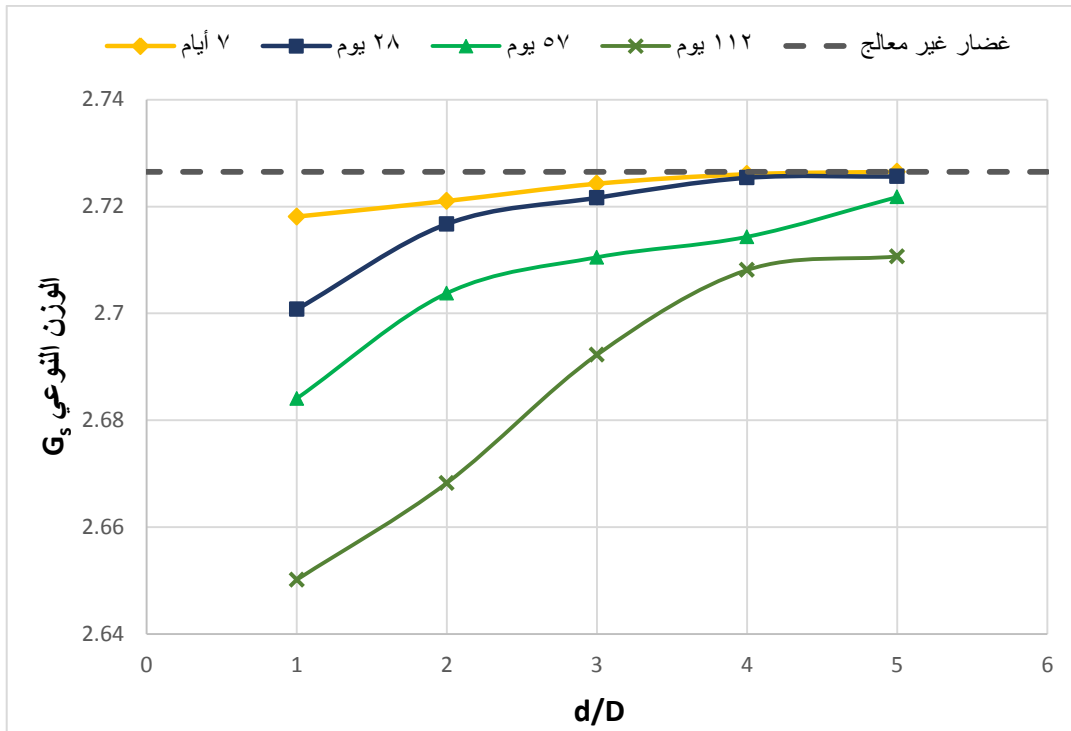
الشكل(4): تصنيف التربة وفق ASTM من خلال مخطط اللدونة، وتغيراتها مع مدة المعالجة لعينات تقع على بعد 1D من مركز العمود.

3- تجربة الوزن النوعي (Specific Gravity weight):

بههدف دراسة تغيرات قيمة الوزن النوعي GS للتربة بعد المعالجة وعلاقتها بمدة المعالجة والبعد عن عمود التحسين، وكذلك من أجل استنتاج تغيرات قيم معامل المسامية البدائي e_0 ، أجريت تجربة الوزن النوعي باستخدام البيكنومتر وفق (ASTM-D 854 – 98)، وذلك على عينات مجففة بفرن بدرجة حرارة 105°C .

تبين النتائج في الشكل(5) انخفاض قيم الوزن النوعي، حيث ينخفض الوزن النوعي بمقدار 2.8% للعينات ضمن نطاق 1D والمستخرجة عند مدة معالجة 112 يوم. يعتبر هذا الانخفاض مقارب لما حصل عليه (Alhaj, 2015) حيث بلغ مقدار النقصان في الوزن النوعي 1.2% لعينة مستخرجة على بعد 1D، مع الإشارة إلى انه استخدم في دراسته أوتاد كلس صافي.

يمكن ربط نقصان الوزن النوعي بتفاعلات التلبد flocculation التي تسبب تجمع حبيبات التربة على شكل كتل وانخفاض مساميتها (Islam, 2001).

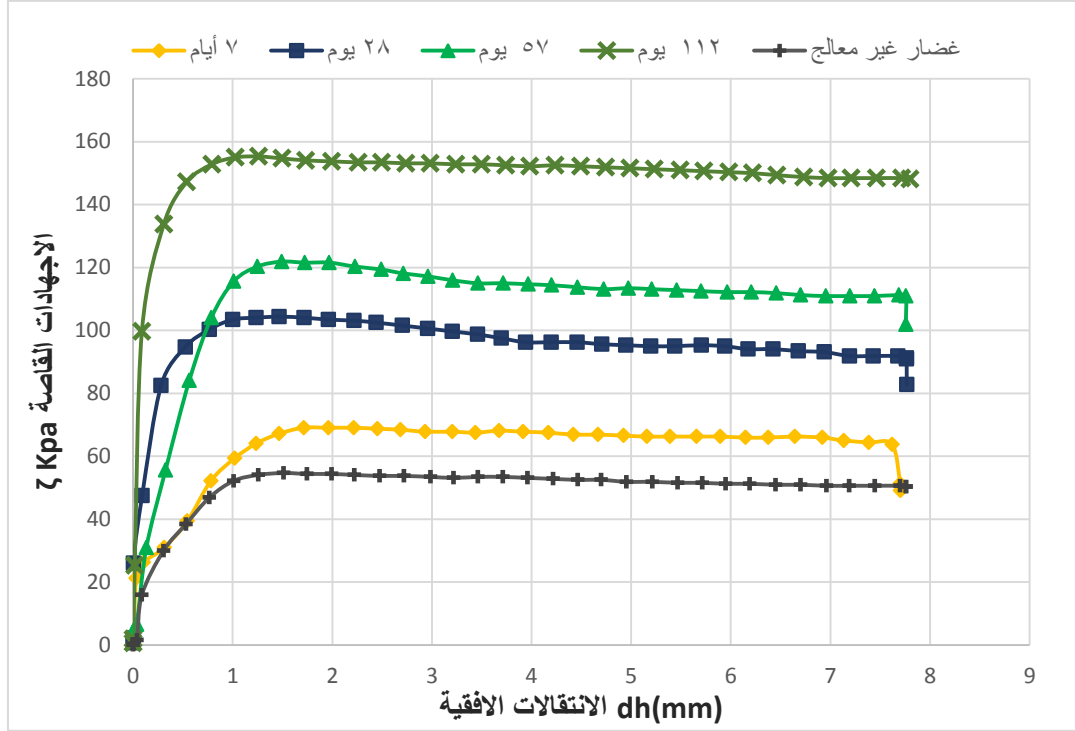


الشكل(5): تغيرات الوزن النوعي مع مدة المعالجة والبعد عن عمود التحسين

4. تأثير التحسين على مقاومة القص:

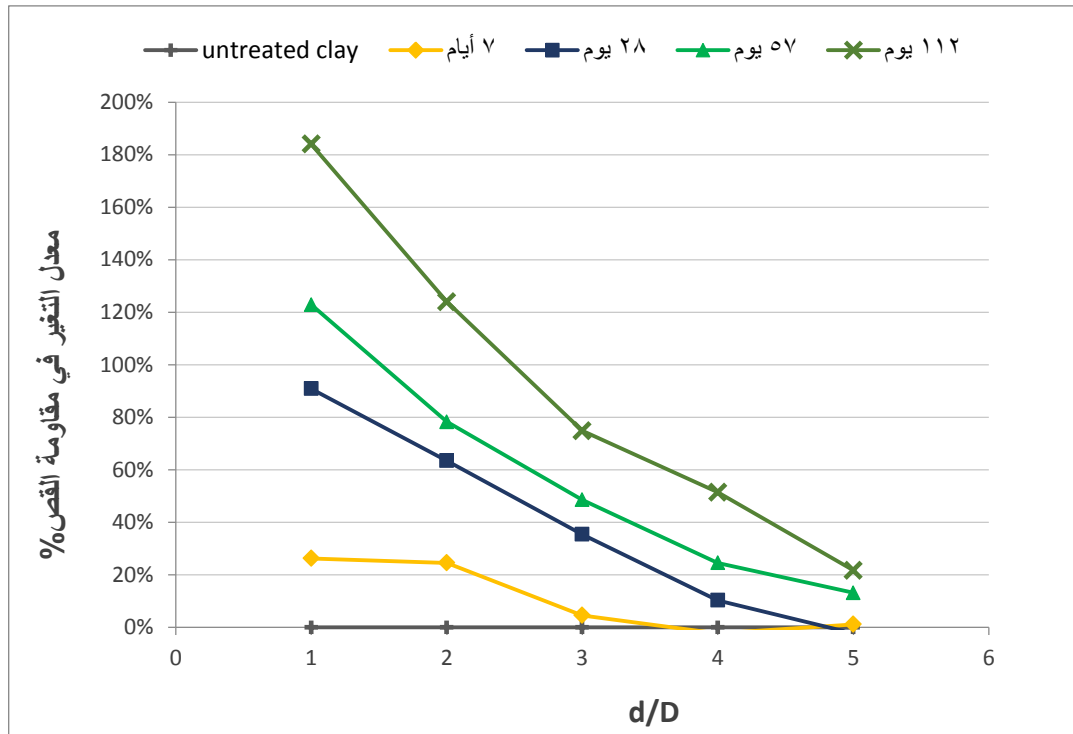
يهدف دراسة تأثير أعمدة الكلس والحصويات على مقاومة القص للتربة المحيطة، تم إجراء تجربة القص المباشر (ASTM-D 3080-98) غير المصرفة على العينات المستخرجة عند مدد معالجة مختلفة ومسافات d تبعد عن مركز عمود التحسين من مرة حتى خمس مرات القطر. اجريت التجربة على عينات مشبعة بسرعة قص 3 mm/min ، حيث أنه بعد استخراج العينات وتجفيفها ثم تشكيلها برطوبة وكثافة بروتكتور ثم وضعها في حلقة الأودومتر وغمرها بالماء لمدة أربعة أيام مع منع التغير الحجمي في العينة حتى الوصول إلى درجة الاشباع، وعند وصول العينات للاشباع أجريت عليها تجربة القص المباشر.

يبين الشكل(6) تغيرات مقاومة القص مع مدة المعالجة على عينات مستخرجة على بعد $1D$ من عمود التحسين. حيث تظهر المنحنيات زيادة مقاومة القص مع زيادة مدة المعالجة وتستمر الزيادة حتى المدة القصوى المدروسة والتي تبلغ 112 يوم ، وقد بلغ معدل التحسين $(26.3 - 90.3 - 122.86 - 183.4)$ خلال مدد معالجة (7-28-57) يوم على الترتيب، وذلك لعينة مستخرجة على بعد $1D$ من محور العمود.



الشكل(6): تغيرات مقاومة القص مع مدة المعالجة لعينات مستخرجة على بعد 1D،
الاجهاد الناظمي σ (300 Kpa)

يبين الشكل(7) معدل التغير في مقاومة القص والذي يعبر عن نسبة التغير في مقاومة القص $\Delta\zeta_{max}$ منسوباً إلى مقاومة القص للتربة الغضارية غير المحسنة $\zeta_{max,0}$. يمكن ملاحظة الزيادة في معدل تغير مقاومة القص مع زيادة مدة المعالجة ومع الاقتراب من عمود التحسين، كما توضح المنحنيات زيادة مسافة الانتشار بزيادة مدة المعالجة، بحيث تصل إلى 3D عند مدة معالجة 7 أيام، 4D عند مدة معالجة 28 يوم وتتجاوز الـ 5D عند المدة 57 يوم وما فوق. يتجاوز تأثير التحسين بالكس 75% حتى مسافة 3D عند مدة المعالجة 112 يوم، بينما يكون معدل ارتفاع المقاومة أقل عند البعدين 4,5D. تشبه هذه النتائج ما حصل عليه (Muntohar,2010)، حيث استخدم الباحث تجربة الضغط الحر لدراسة تغيرات المقاومة ووجد أن العينات الواقعة على بعد 1D تتضاعف مقاومتها عند مدة معالجة 14 يوم، في حين أنه في هذا البحث تزداد مقاومة التربة بمقدار 91% عند مدة معالجة 28 يوم.



الشكل (7): تغيرات معدل الزيادة في مقاومة القص مع البعد عن عمود التحسين ومدة المعالجة

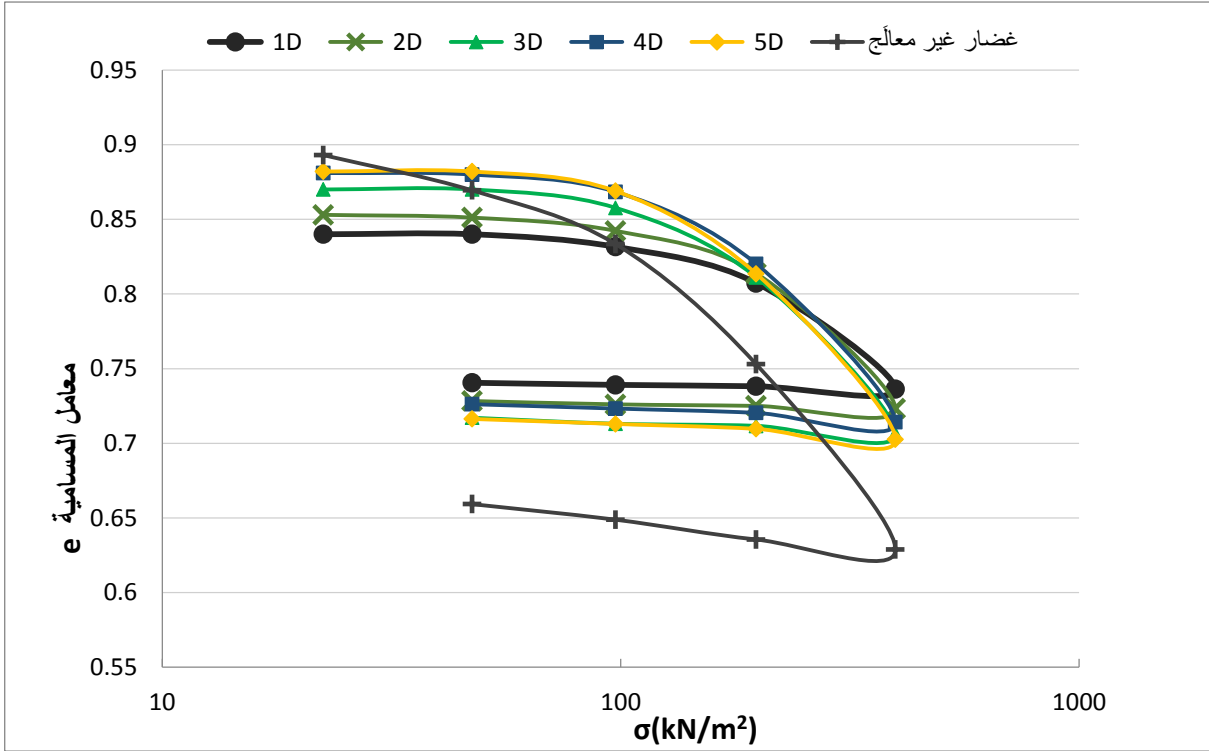
يكون معدل الزيادة خلال الـ 28 يوم أكبر من أزمنة المعالجة اللاحقة حتى مسافة 3D، هذه الزيادة في المقاومة قد تكون ناتجة عن تفاعلات التلبد، بينما تكون الزيادة الشبه ثابتة بعد زمن 28 يوم ناتجة عن التفاعلات البوزولانية المستمرة مع الزمن وما ينتج عنها من مواد رابطة (CSH, CAH, CSAH).

5- تأثير التحسين على خواص الهبوط للتربة:

لدراسة تغيرات خواص الانضغاطية للتربة الغضارية المعالجة وتأثرها بأعمدة الكلس والحصىوات أجريت تجربة الانضغاط أحادي البعد بجهاز الأودومتر وفق اشتراطات (ASTM-D 2435-96)، على العينات المستخرجة عند مدد معالجة مختلفة ومسافات تبعد عن مركز عمود التحسين حتى خمس مرات قطره. بعد استخراج العينات تم إعادة تشكيلها وفق كثافة ورطوبة بروكتور قبل وضعها على جهاز التشديد وإجراء التجربة مع المحافظة على حجم أولي ثابت للعيينة في بداية التجربة.

يبين الشكل (8) تغير معامل المسامية مع الاجهاد لعينات مستخرجة عند مدة معالجة 112 يوم وعلى تباعدات مختلفة عن مركز عمود التحسين. حيث تظهر المنحنيات انخفاض انضغاطية التربة نتيجة انتشار شوارد الكالسيوم، وذلك حتى للعينات الواقعة على بعد 5D من العمود، يزداد الانخفاض في انضغاطية التربة مع زيادة الاقتراب من العمود، حيث وصلت نسبة التحسن في الانضغاطية عند المجال (200-400) KN/m² إلى 17% لعينات واقعة على بعد 1D من مركز العمود عند مدة معالجة 112 يوم، أما من أجل 5D عند نفس الاجهاد ونفس مدة المعالجة فكانت نسبة التحسين 11.7%. يشير نقصان انضغاطية التربة مع الاقتراب من عمود التحسين إلى تغير خواص التربة وتفاعلها مع الكلس المنتشر من العمود، حيث أن انتشار الكلس في كتلة التربة يؤدي إلى انحلال مركبات الألومينا والسيليكا في الوسط عالي القلوية خلال التفاعلات الفيزيائية والكيميائية بين الغضار والكلس، مما يؤدي إلى إنتاج أيونات أحادية التكافؤ قابلة للتبادل من

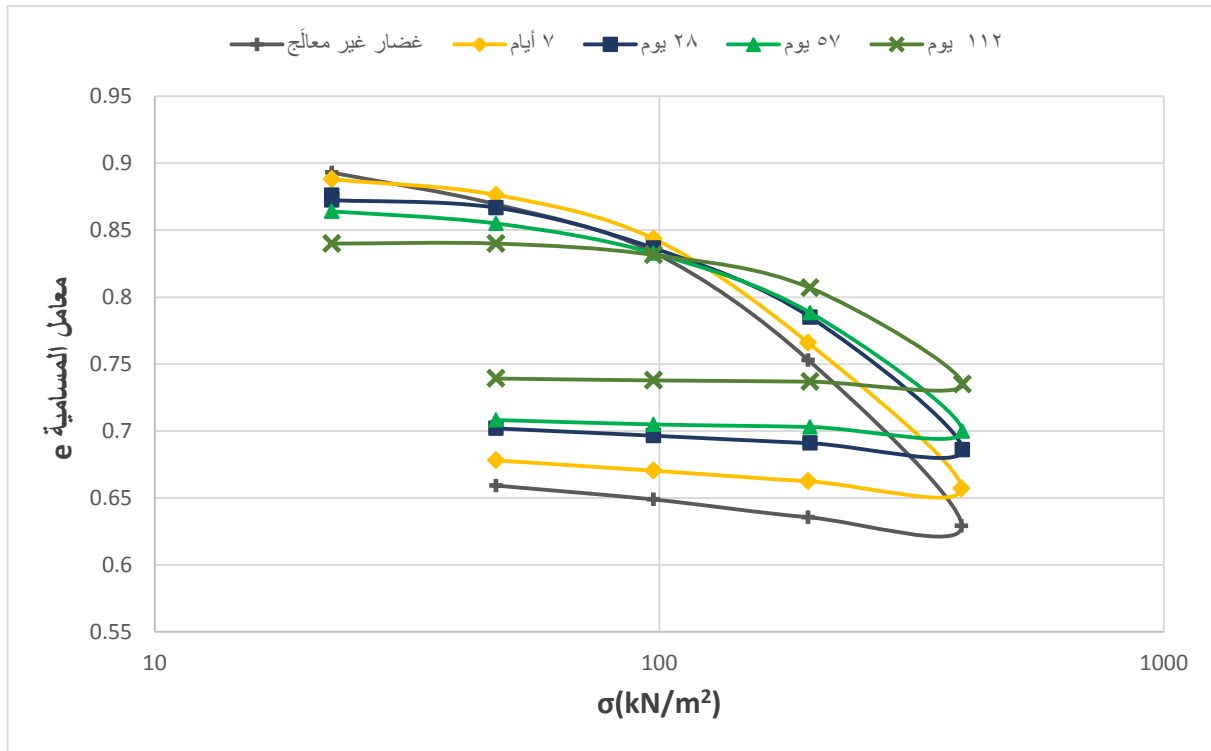
الصوديوم والبوتاسيوم مع أيونات الكالسيوم ثنائية التكافؤ وتشكيل مركبات من ألومينات الكالسيوم وهيدرات السيليكات (CSH وCAH)، هذه المركبات هي المسؤولة عن انخفاض انضغاطية التربة (Wong, 2004).



الشكل (8): تغيرات انضغاطية التربة المعالجة مع البعد عن عمود التحسين لعينات مستخرجة عند مدة معالجة 112 يوم

كذلك عند دراسة تغيرات الانضغاطية مع مدة المعالجة لعينة تبعد بمقدار 1D عن مركز عمود التحسين يلاحظ حدوث انخفاض في انضغاطية التربة مع زيادة مدة المعالجة كما هو موضح في الشكل (9)، حيث تكون نسبة التحسن لعينة تقع على بعد 1D من أجل مدد معالجة (7,28,57,112) يوم وذلك ضمن مجال الاجهادات $(200-400) \text{ KN/m}^2$ هي على الترتيب % (4.5,9,11.3,17)، يعود هذا الانخفاض في الانضغاطية إلى التفاعلات البوزولانية التي ينتج عنها المركبات المذكورة سابقاً (CSH، CAH)، تعتبر هذه التفاعلات طويلة الأمد وهو ما يفسر الانخفاض الواضح في الانضغاطية مع مدة المعالجة (AustStab, 2010).

حيث أنه عند معالجة التربة بالكلس، ترتفع قيم الضغط المسبق وتكون زيادته واضحة مع زيادة مدة المعالجة (Balasubramaniam & Buensuceso, 1989)، يسبب هذا الارتفاع تحوّل سلوك التربة من مشددة طبيعياً إلى تربة مسبقة الاجهاد. قام (Tonoz et al, 2003) بتفسير ذلك لتلبد جزيئات الغضار والذي يسبب تأثير كيميائي الأصل يشبه سبق الاجهاد مما يزيد من الاجهاد الفعال الشاقولي ويخفض من خواص الانضغاطية.



الشكل(9): تغيرات انضغاطية التربة مع مدة المعالجة لعينات مستخرجة على بعد 1D عن مركز عمود التحسين

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

تم إجراء برنامج مخبري شامل لدراسة الخصائص الهندسية الميكانيكية و الفيزيائية لتربة غضارية معالجة بأوتاد الكلس و الحصى. سبب اضافة أيونات الكالسيوم إلى التربة الغضارية الانتفاخية حدوث تغييرات كبيرة في الخصائص الهندسية للتربة. حيث عدل انتشار الكلس من بنية و تركيب و محتوى النواعم في التربة المعالجة وهذا التغير معتمد على مدة المعالجة و البعد القطري عن عمود التحسين. تشير نتائج الاختبارات المجراة إلى أن الخصائص الهندسية مثل اللدونة و السيولة و الانتفاخ و الانضغاط و المقاومة على القص تغيرت مع مدد علاج مختلفة و مع البعد عن عمود التحسين.

وقد لوحظ أنه مع زيادة مدة المعالجة و ضمن مسافات قريبة من عمود المعالجة، تم الحصول على زيادة مقاومة ملحوظة. إذ تسبب التحسن الفيزيوكيميائي في بنية التربة تشكيل روابط قوية بين جزيئات الغضار ناتجة عن التفاعلات البوزولانية والتي تعطي التربة مقاومة قص ، وصلابة أفضل. من أهم الاستنتاجات يمكن ذكر ما يلي:

١. تتعلق درجة التحسين بمدة المعالجة وبالبعد القطري عن عمود التحسين، حيث تشير نتائج الاختبارات المجراة إلى أن خصائص التربة مثل اللدونة والسيولة والانتفاخ والانضغاط والمقاومة على القص قد تغيرت بشكل متباين وذلك حسب مدة المعالجة والبعد عن عمود التحسين.

- II. تركزت فعالية عمود التحسين في المنطقة المحيطة بعمود التحسين ولبعد عن مركز العمود يساوي تقريباً ثلاثة أضعاف قطر عمود التحسين، مع العلم أن النتائج تشير إلى حدوث تغيرات في خواص التربة حتى مسافة (5D) خمس مرات قطر العمود.
- III. يزداد التحسن في خواص التربة المحيطة بعمود الكلس والحصويات مع زيادة مدة المعالجة، ويكون معدل التحسن أكبر خلال مدة المعالجة 28 يوم ثم ينخفض معد التحسن للخواص الفيزيائية عند الأزمنة الأكبر، أما بالنسبة للخواص الميكانيكية استمرار التحسن بمعدل ثابت تقريباً مع الزمن وبعد المدة 28 يوم، قد يعود ذلك للتفاعلات البوزولانية التي قد تستمر لسنوات في حال توفر الكلس والماء، هذه التفاعلات ينتج عنها مواد رابطة تزيد من متانة التربة.
- IV. ينتشر الكلس الموجود ضمن عمود الكلس والحصويات ضمن التربة الغضارية المحيطة ويعمل على معالجتها وتحسين خواصها حيث تتخفض انتفاخية التربة الموافقة للانخفاض في حد السيولة والزيادة في حد اللدونة، يكون التحسن الأعظمي خلال مدة المعالجة 28 يوم، يستمر التحسن مع الزمن ولكن بمعدل أقل، كما يكون تأثير الزمن أوضح مع الاقتراب من عمود التحسين.
- V. انتشار الكلس ضمن التربة الغضارية قد عدل من بنية وتركيب ومحتوى النواعم في التربة المعالجة وغير من تصنيف التربة من CH غضار عالي اللدونة إلى MH سيلت عالي اللدونة.
- VI. يكون التحسن في الخواص الميكانيكية واضحاً مع زيادة مدة المعالجة، والذي يمكن تفسيره بأن تشكل المواد الاسمنتية CAH و CSH ناتج عن تفاعل بطيء قد يستغرق عدة أشهر أو سنوات.
- VII. تزداد مقاومة التربة المحيطة بالعمود على القص المباشر مع مدة المعالجة والاقتراب من عمود التحسين.
- VIII. يسبب انتشار الكلس في التربة تحسن خواص الانضغاطية، حيث وجد زيادة قيم معامل يونغ الأودومتري E، ويكون المجال الأكثر تأثراً حتى مسافة 2D من مركز العمود.

التوصيات:

1. إجراء دراسة تشمل تأثير شروط ترطيب مختلفة ومقارنة النتائج للتوصل إلى طريقة الترطيب الأمثل وتأثيرها على انتشار الكلس ضمن التربة المحيطة.
2. دراسة التحسين بأعمدة الكلس والبحص باستخدام قوالب بأبعاد أكبر بحيث يتم دراسة التحسن الحاصل على مسافات أكبر من 5 أضعاف قطر عمود التحسين ولمدد زمنية أطول من المدة المستخدمة في هذه الدراسة، مع امكانية استخدام عدة أعمدة تحسين في القالب.
3. دراسة التحسين بأعمدة الكلس في الحقل باستخدام أعمدة بأبعاد حقيقية ولأعماق كبيرة.

References:

1. NOBLE, D.F.; ANDAY, M.C. *Migration of lime deposited in drill holes*. Virginia Highway Research Council Publication, 1967.
2. CHIU, KH.; CHIN, KY. *The Study of Improving Bearing Capacity of Tapei Silt using Quicklime Piles*, Proceedings 1, 1963,367-393 .
3. HOLEYMAN, A . ; FRANKI, S. A . ; MITCHELL, J. K. *Assessment of Quick Lime Pile Behaviour*. Proceedings Vol. 2, 8th European Conf, 1983, 897-902.

4. BROMS, B.B. Keynote lecture: *Design of lime, lime/cement and cement columns*. In: International Conference on Dry Mix Methods: Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization. Balkema, Rotterdam, 1999. p. 125-153
5. PETCHGATE, K.; TUNGBOONTERM, P. *Installation of lime columns and their performance*. Proceedings of the 10th Southeast Asian Geotechnical Conference, Taipei 1, 1990, 121-124.
6. BROOKES, A. H.; West, G. ; Carder, D. R. *Laboratory trial mixes for lime-stabilised soil columns and lime piles*. Vol. 306. Thomas Telford, 1997.
7. ABIODUN, A.A. ; NALBANTOGLU, Z. *Lime pile techniques for the improvement of clay soils*. Canadian Geotechnical Journal, 52.6, 2015, 760-768.
8. ASHOK, P.; REDDY, G. Sreenivasa. *Lime pile technique for the improvement of properties of clay soil*. International Journal of Science and Research (IJSR), 2016, 5-11.
9. MERDHIYANTO, Puguh. *Sand-Lime Column Stabilization On The Consolidation Of Soft Clay Soil*. PhD Thesis. Universitas Muhammadiyah Surakarta. 2015.
10. KHAN, M.; HUSSAIN, S.; NASEER, S.; JAMIL, S. M.; ALI, L. *A Comparative Study of Ground Improvement by Lime and Granular*. In: 8th International civil engineering congress, 2016, p. 281.
11. MALEKPOOR, M. R.; POOREBRAHIM, Gh. R. *Behavior of compacted lime-soil columns*. International Journal of Engineering, 27.2, 2014, 315-325.
12. BALASUBRAMANIAM, A. S.; BUENSUCESO JR, B. R. *On the overconsolidated behavior of lime treated soft clay*. In: International Congress of Soil Mechanics and Foundation Works. 12. 1989. p. 1335-1338.
13. MALLELA, J. ; QUINTUS, H. V. ; SMITH, K. *Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design*. The National Lime Association, 2004, 200: 1-40.
14. ASHOK, P. ; REDDY, G.S. *Lime Pile Technique for the Improvement of Properties of Clay Soil*. International Journal of Science and Research, Vol. 5, NO.11, 2016, 1204-1210.
15. ABIODUN, A.A. ; NALBANTOGLU, Z. *Lime pile techniques for the improvement of clay soils*. Canadian Geotechnical Journal, 52.6, 2015, 760-768.
16. ISLAM, S. *Permeability characteristics of lime treated soils*. Master of Engineering thesis, BUET, Dhaka, 2001.
17. MUNTOHAR, A.S. *A Laboratory test on the strength and load-settlement characteristics of improved soft soil using lime-column*. Dinamika Teknik Sipil, Vol.10, No.3, 2010, 202-207.
18. WONG, P. K. *Ground improvement case studies chemical lime piles and dynamic replacement*. Australian Geomechanics Society Jnl, 2004, 39.2.
19. AUSTSTAB, *Technical Note – What is Lime?*, Pavement Recycling and Stabilization Association , Vol 4, no.1, pp.1-3, 2010
20. TONOZ, M.; GOKCEOGLU, C.; ULUSAY, R. *A laboratory-scale experimental investigation on the performance of lime columns in expansive Ankara (Turkey) clay*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2003, 62.2: 91-106.
21. Haji Muhammad; Awad Talal. *The Effectiveness of Micro Lime Pegs for Reducing the Swelling Energy and Pressure of Puffy Clay Soil*, A study prepared for a Master's Degree in Civil Engineering, Damascus University, 2015.