

دراسة تأثير الحقن بمعلق غبار أفران الإسمنت (CKD) على مقاومة التربة الرملية الساحلية للضغط الحر

د. توفيق فياض *

د. رامي العبد * *

فاتن السقر * * *

(تاريخ الإيداع 10 / 5 / 2021. قُبل للنشر في 26 / 9 / 2021)

□ ملخص □

إنّ تقنية الحقن من أحدث التقنيات المستخدمة لتحسين ترب التأسيس، وهي تُصنّف في عدة أنماط، حيث يُعتبر نوع التربة هو العامل الأهم في اختيار نمط الحقن. يُستعمل الحقن التغلطي (Permeation Grouting) عموماً، لتحسين الخصائص الهندسية للترب الحبيبية، ويتم بضح مادة الحقن بشكل سائل إلى تربة التأسيس تحت تأثير الضغط، فتتغلغل في فراغاتها ثم تتصلب مشكّلةً مادة تربط بين حبيبات التربة، فتتحسن خصائص التربة المعالجة بالحقن بدون تغيير بنيتها الطبيعية، وهو النمط المتبع في هذا البحث.

يهدف البحث إلى دراسة تأثير الحقن (Permeation Grouting) بمعلق غبار أفران الإسمنت (CKD) على مقاومة الضغط الحر (الغير محصور) للتربة الرملية في المنطقة الساحلية في سوريا، ولتحقيق ذلك تم تصميم وتصنيع نموذج حقن مخبري، من ثم تم حقن عينات التربة بمعلق مكوّن من نسب مئوية مختلفة من (CKD) وهي (2, 4, 6, 8, 10, 12) % من الوزن الجاف للتربة المعالجة، ونسب خلط (ماء: غبار إسمنت) وهي (2:1, 4:1, 6:1, 8:1, 10:1, 12:1) من ثم تم إجراء تجارب الضغط البسيط على العينات المحقونة من أجل مدتي معالجة (7) و(28) يوم. بيّنت النتائج أن التربة الرملية المعالجة بالحقن بغبار أفران الإسمنت قد اكتسبت مقاومة عالية على الضغط الحر، وأن قيم مقاومة الضغط الحر (qu) وقيم معامل المرونة المماسي الابتدائي (Et) ازدادت بشكل ملحوظ بازدياد نسبة (CKD) في معلق الحقن وبازدياد مدة المعالجة، بينما نقصت تلك القيم بازدياد نسبة (W:CKD) في معلق الحقن، كما بيّنت أن المعامل (Et) ازداد بازدياد (qu) وأن العلاقة بينهما خطية.

الكلمات المفتاحية: تحسين التربة، الحقن التغلطي، الترب الرملية، غبار أفران الإسمنت، مقاومة الضغط الحر، معامل المرونة، مدة المعالجة.

* أستاذ مساعد، قسم الهندسة الجيوتكنيكية، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية،
tawfikabdoallahfiad@tishreen.edu.sy

* * مدرس، قسم الهندسة الجيوتكنيكية، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية،
ramihashimalabda@tishreen.edu.sy

* * * طالبة دراسات عليا (دكتوراه)، قسم الهندسة الجيوتكنيكية، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية،
alsakrfaten@gmail.com

A Study of the Effect of Grouting with Cement Kiln Dust (CKD) on Coastal Sandy Soil Strength to Unconfined Compression

Dr. Toufik Fayad*
Dr. Rami Alabdeh**
Faten Alsakr***

(Received 10 / 5 / 2021. Accepted 26 / 9 / 2021)

□ ABSTRACT □

Grouting technology is one of the latest techniques used to improve foundation soils, is classified in several types, the type of soil to be treated; is considered the most important factor in the choice of grouting type. Permeation Grouting is commonly used to improve the engineering properties of granular soils, the grouting material is pumped liquidly into the foundation soil under pressure, penetrating into the soil voids and then hardening and forming a material bonding the granules of the soil, improving the properties of the grouted soil without disturbing its natural structure, which is the type used in this research

The research aims to study the effect of (CKD) permeation grouting on the unconfined compressive strength (UCS) of sandy soil in the coastal region, to achieve that a laboratory grouting model that simulates grouting on-site process has been designed and fabricated. The soil samples were grouted with a suspension consisting of different percentages of cement kiln dust (2,4,6,8,10,12)% as a ratio of dry weight of the treated soil, and different mixing ratios (Water:CKD) (W:C=2:1, 4:1,6:1,8:1,10:1), then we conducted unconfined compressive test on the grouted samples, for (7&28) days curing.

The results demonstrate that the grouted sand has gained high unconfined compressive strength, where the values of unconfined compressive strength (qu) and initial tangent young's modulus (Et) of grouted soil increased with increasing the (CKD) percentage and curing period, while decreased by increasing in the (W:CKD) ratio of grouting suspension, as well the value of (Et) increased with increasing the (qu) and the relation between them is a linear.

Keywords: Soil Improvement, Permeation Grouting, Sandy Soils, Cement Kiln Dust, Unconfined Compressive Strength, young's modulus, curing period.

* Associate Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria, tawfikabdoallahfiad@tishreen.edu.sy.

** Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria, ramihashimalabda@tishreen.edu.sy.

*** Postgraduate Student (PhD), Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria, alsakrfaten@gmail.com.

مقدمة:

تستخدم تقنية الحقن بشكل واسع في حقل الهندسة الجيوتكنيكية لتقوية وتكثيم ترب التأسيس الضعيفة، إنَّ مبدأ عملية الحقن بشكل عام؛ هو إدخال مواد الحقن بشكل سوائل مختلفة اللزوجة تحت الضغط بواسطة أنابيب صغيرة القطر إلى داخل التربة أو شقوق الصخور، فتتحسن خصائص الوسط المحقون [1,2, 3]. تتأثر جودة الحقن بعدة عوامل أهمها: نوع التربة، نمط الحقن ومادة الحقن ومدى مناسبتها لنوع الوسط المحقون، نسبة المادة المحقونة، نسبة الخلط، مدة المعالجة، الاختيار الصحيح لتجهيزات الحقن، عدد فتحات الحقن، تباعد فتحات الحقن، عمق الحقن، ضغط الحقن [4,5,6,7,8]، وقد ركزت العديد من الأبحاث على دراسة تأثير الحقن بالإسمنت على الخصائص الهندسية للترب الرملية، وخلصت تلك الأبحاث إلى أنه تزداد قدرة التحمل وتتنخفض النفاذية للترب الرملية المحقونة بالإسمنت بازدياد نسبة الاسمنت وفترة المعالجة [9,10, 11, 12,13, 14].

تُعتبر تجربة الضغط الحر (الغير محصور) من أهم التجارب المخبرية لتقييم جودة تحسين الترب المعالجة، كما أنها الاختبار الموصى به لتقييم كمية المادة المستعملة لثبيث التربة، وذلك كونها تجربة بسيطة وموثوقة إضافةً لسهولة وسرعة إجرائها [5,15,16]. تناولت أبحاث عديدة [14,15,16,17] دراسة تأثير الحقن بالإسمنت على (qu) مقاومة الضغط الحر للرمال المعالج بالحقن، واستنتجت تلك الأبحاث أنَّ (qu) للرمال المحقون بالإسمنت تُحكَّم بعوامل مختلفة منها: نسبة الماء للإسمنت (W/C)، الكثافة النسبية للرمال، حجم حبيبات الرمل، محتوى النواعم، الوزن النوعي للرمال وللإسمنت، نوع الإسمنت، مدة المعالجة. وقد أشار عدد من الباحثين [5,9] إلى أنَّ مقاومة الضغط الحر لمادة الحقن ونسبة الماء للإسمنت (W/C) في معلق الحقن؛ هما من أهم المتغيرات التي تحدد قيمة (qu) للرمال المحقون، وأنَّ قيمة (qu) تتخفض بازدياد النسبة (W/C) وتزداد بنقصانها، وذلك بسبب ازدياد النزف (Bleeding) الحاصل عند ازدياد نسبة الماء للإسمنت (W/C) في معلق الحقن، وأظهرت دراسات أخرى توافقاً مع هذه النتيجة [16,18,19] ، كما بيّنت دراسة أخرى أنه تزداد قيمة النزف لمعلق الإسمنت عموماً بازدياد النسبة (W/C) وأنَّ الزيادة خطية تقريباً بازدياد تلك النسبة [20]، وأيضاً استنتج عدد من الباحثين أنَّ مقاومة الضغط الحر تتخفض عند اللزوجة العالية لمعلق الإسمنت [6,9,16,21]. كما قام باحثون بدراسة تأثير الحقن بالإسمنت على أربع أنواع من الرمال ووجدوا أنَّ (qu) تزداد بانخفاض حجم حبيبات الرمل وذلك بسبب ازدياد السطح النوعي مما يؤدي لروابط إسمنتية أقوى بازدياد الوزن النوعي [19]. الدراسات المذكورة أعلاه استخدمت مواد حقن تقليدية، وتحديدًا كان الإسمنت مادة الحقن الأكثر استخداماً سواءً في الدراسات السابقة أو على أرض الواقع، لكنَّ استخدام الإسمنت أو المواد التقليدية عموماً مكلف اقتصادياً، لذلك ولتخفيض تكاليف معالجة ترب التأسيس الضعيفة، هناك توجه كبير وعالمي لاستخدام النواتج الجانبية الصناعية في تحسين ترب التأسيس، ومنها مادة غبار أفران الإسمنت المنتج الجانبي من صناعة الإسمنت البورتلاندي والتي يُشكل تراكمها خطراً بيئياً وصحياً [22, 23,24,25].

يُنْتج غبار أفران الإسمنت بكميات هائلة أثناء تصنيع الإسمنت البورتلاندي العادي، وتختلف خصائصه الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية تبعاً لعدة عوامل: المواد الخام المستخدمة في تصنيع الإسمنت، نمط عمل الفرن، أنظمة تجميع الغبار، نوع الوقود المستخدم. وهو مشابه تقريباً للإسمنت البورتلاندي العادي بالتركيب الكيميائي وبالوظائف الميكانيكية مما يجعل (CKD) صالحاً للاستعمال لعدة تطبيقات منها استخدامه في تحسين التربة [24,25,26]، وقد أُجريت العديد من الأبحاث [27, 28, 29,30] التي أثبتت أنَّ إضافة (CKD) للترب المدروسة، يُحسن خصائص الفيزيائية والميكانيكية لتلك الترب بشكل كبير ويحقق فوائد بيئية واقتصادية، ولكن جميع الأبحاث المذكورة استخدمت تقنية الخلط

لدراسة تأثير (CKD) كمادة مثبتة، لذلك قمنا بدراسة تأثير الحقن (Permeation Grouting) بمعلق غبار أفران الإسمنت على مقاومة الضغط الحر.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في:

- استخدام تقنية الحقن (Permeation Grouting) لتحسين ترب التأسيس الرملية، بدلاً من استخدام الطرق التقليدية ذات الكلفة العالية كالأساسات العميقة المستخدمة عادةً عند التأسيس على الرمل المخلخل.
- التخلص من الكميات الهائلة لمخلفات معامل الإسمنت في سوريا، والتي تهدد البيئة والصحة العامة، وذلك بالاستفادة من مادة غبار أفران الإسمنت (CKD) والاستغناء عن استخدام مواد تحسين التربة التقليدية المكلفة.

يهدف البحث إلى

دراسة تأثير تغيير كل من نسبة (CKD)% ونسبة (W/CKD) في معلق الحقن، وتأثير مدة المعالجة على مقاومة الضغط الحر ومعامل المرونة للتربة الرملية المدروسة.

طرائق البحث ومواده:

اعتمد البحث المنهج التجريبي في الدراسة وذلك وفق المراحل التالية:

- 1- تحديد خواص التربة الرملية المستخدمة من خلال التجارب المخبرية التي طبقت على عينات التربة الرملية الطبيعية قبل المعالجة بالحقن.
- 2- تحديد خواص غبار أفران الإسمنت المستخدم من خلال التجارب المخبرية التي طبقت عليه قبل استخدامه في الحقن.
- 3- إجراء عملية الحقن من أجل نسب غبار الإسمنت المدروسة وجميع نسب (W:CKD) ومدتي معالجة (7 و 28) يوم
- 4- تحضير العينات لاختبار الضغط البسيط بعد انتهاء كل عملية حقن.
- 5- إجراء تجارب الضغط البسيط على عينات التربة الرملية المعالجة بالحقن بمعلق غبار أفران الإسمنت بعد انقضاء فترة المعالجة اللازمة.

1- مواد البحث

➤ التربة الرملية

تم إحضار كميات الرمل اللازمة لهذا البحث، من شاطئ بلدة صنوبر جبلة التي تقع في الجنوب الشرقي من مدينة اللاذقية وتبعد مسافة 13 كم عن مركز المدينة. وتم إجراء التجارب المخبرية لتحديد مواصفات التربة الطبيعية حيث أُجريت جميع التجارب وفق مواصفات ASTM [31]. يبين الجدول (1) الخواص الفيزيائية والميكانيكية للتربة الرملية الطبيعية، ويبين الشكل (1) منحنى التدرج الحبي لهذه التربة.

➤ غبار أفران الإسمنت

تم استخدام غبار أفران الإسمنت (CKD) المنتج في معمل إسمنت طرطوس، وأجريت التجارب المخبرية اللازمة لتحديد خصائصه الفيزيائية والميكانيكية بالإضافة إلى تحليل كيميائي وتحليل حبي لعينات منه في المخبر الموجود بمعمل إسمنت طرطوس. وقد حُفظت عينات غبار الإسمنت المستخدمة في الدراسة في أوعية بلاستيكية محكمة

الإغلاق، وتم جلب عينات جديدة طازجة كل ثلاثة أشهر، يبين الجدول (2) بعض الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لغبار الإسمنت، ويبين الجدول (3) نتائج التحليل الكيميائي، كما يبين الشكل (1) منحنى التدرج الحبي لغبار الإسمنت المستخدم في الدراسة.

الجدول (1): الخواص الفيزيائية والميكانيكية للتربة الرملية الطبيعية المدروسة

المواصفات	القيمة
الرطوبة (%)	2.6
الوزن النوعي (G _s)	2.73
الوزن الحجمي الكلي $\gamma_t (kN/m^3)$	15.73
الوزن الحجمي الجاف $\gamma_d (kN/m^3)$	15.33
الوزن الحجمي الجاف الأعظمي $\gamma_{dmax} (kN/m^3)$	16.7
الوزن الحجمي الجاف الأصغري $\gamma_{dmin} (kN/m^3)$	14.5
عامل الكثافة النسبية I _D	41.67
زاوية الاحتكاك الداخلي ϕ°	38.69
معامل النفاذية K (cm/sec)	0.00133
المكافئ الرملي (%)	97.9
المسامية (n)	0.44
معامل التجانس C _U	1.72
معامل الاتحناء C _Z	0.82
نسبة المار من المنخل 200 (%)	0
تصنيف التربة بحسب (USCS)	تربة رملية سيئة التدرج الحبي (sp)

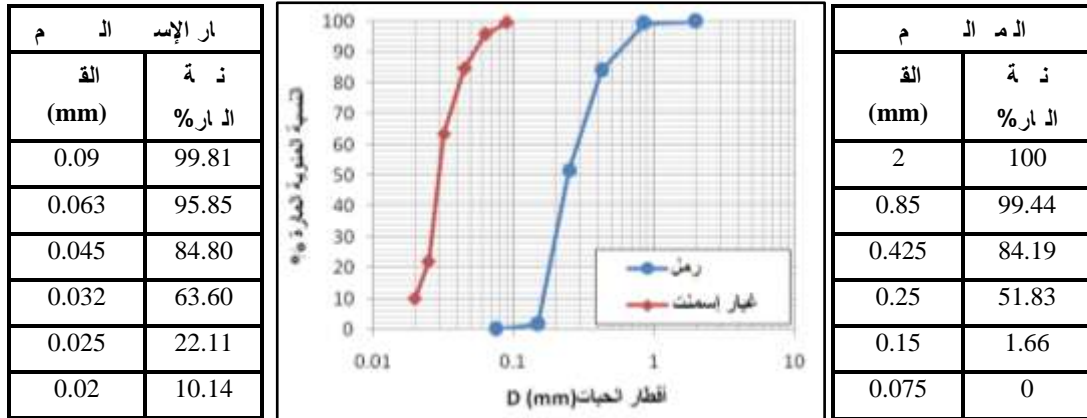
الجدول (2): بعض الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لغبار الإسمنت المستخدم

المواصفات	القيمة
الوزن النوعي (G _s)	3.1
معامل النعومة "معامل بلين" (cm^2 / gr)	3330
زمن بداية التجمد (دقيقة)	196
زمن نهاية التجمد (دقيقة)	287
مقاومة الضغط عند 7 يوم (N / mm^2)	34
مقاومة الضغط عند 28 يوم (N / mm^2)	41
نسبة المار من المنخل 20 مكرون (%)	10.142

الجدول (3): التحليل الكيميائي لغبار أفران الإسمنت المستخدم

المركب	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I
الوزن (%)	61.88	21.25	4.6	4.1	2.71	3.05	0.61	0.18	1.03

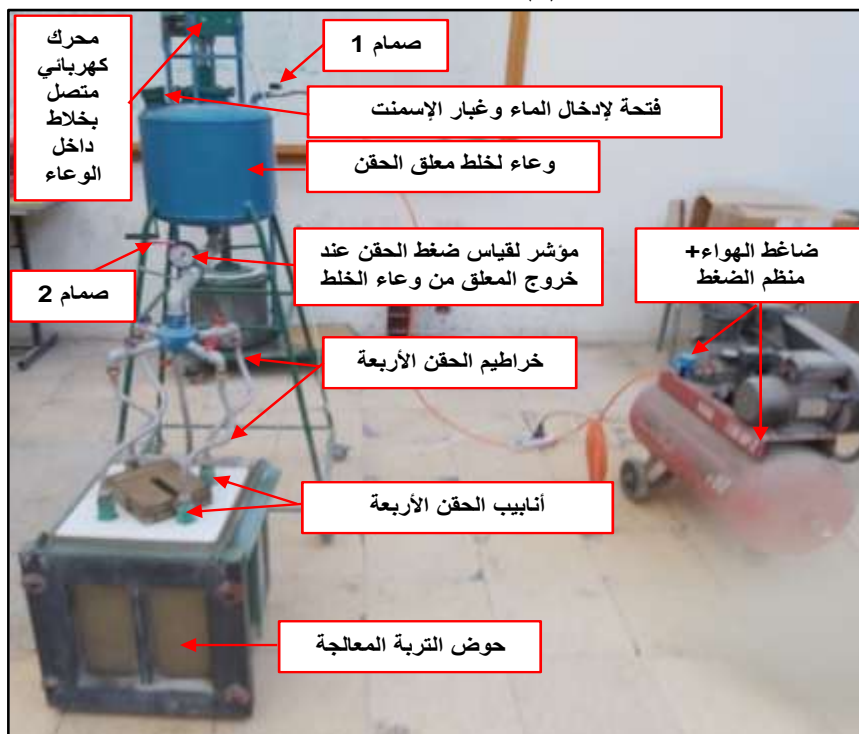
حيث: L.O.I (Loss On Ignition) الفاقد بالحرق



الشكل (1): منحنى التدرج الحبي للمواد المستخدمة في البحث

2- الأجهزة والأدوات المستخدمة

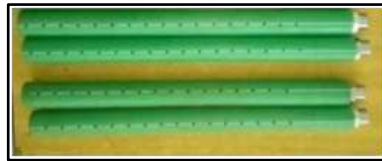
بعد الاطلاع على الدراسات المرجعية [3,7] قمنا بتصميم وتصنيع نموذج حقن مخبري مع إجراء التعديلات التي تؤمن جودة وسهولة عملية الحقن والتي تجعل عملية الحقن في المخبر أقرب ما تكون لعملية الحقن في الموقع، ويتألف من المعدات والتجهيزات التالية والمبينة بالشكل (2):



الشكل (2): نموذج الحقن المخبري المستخدم في الدراسة

1- حوض قابل للتركيب ووضع التربة الرملية فيه، تم تصنيعه من مادة الفيبر الشفاف القاسي والحديد، أبعاده الداخلية (30cm x 30cm x 38cm).

- 2- وعاء خلط أسطواني الشكل مصنوع من الحديد وله فتحة لإدخال الماء وغبار أفران الإسمنت، وله صمام (1) لإدخال الهواء المضغوط، وصمام (2) لخروج معلق الحقن، ومزود بمؤشر لقياس ضغط الحقن عند خروج المعلق منه، ويتصل بخراطيم الحقن الأربعة، ويدخله خلط يتصل بمحرك كهربائي خارجي، يتم في هذا الوعاء خلط معلق الحقن آلياً قبل عملية الحقن وطيلة فترة الحقن.
- 3- خراطيم الحقن الواصلة بين وعاء الخلط وأنابيب الحقن.
- 4- أنابيب الحقن وهي مسدودة من الأسفل ومصنوعة من مادة بولي بروبيلين، قطر كل أنبوب (20mm) وارتفاعه (25cm)، يوجد على سطح كل أنبوب (64) ثقب؛ كل ثقب بقطر (3mm) مبينة في الشكل (3).
- 5- ضاغط هواء مزود بمنظم للضغط.



الشكل (3): أنابيب الحقن المثقبة والمسدودة من الأسفل

3- تنفيذ عملية الحقن في المخبر

لتحضير العينات المحقونة، تم حقن التربة بمعلق غبار أفران الإسمنت وفق الخطوات التالية: بعد التأكد من جفاف الحوض تماماً تم دهنه بالزيت المعدني، من ثم تم وضع أنابيب الحقن على ارتفاع (5cm) من قاع الحوض على مسامير مثبتة بقاعدة الحوض المعدنية مهمتها تحديد مكان كل أنبوب، وتمت المحافظة على شاقولية وتباعد الأنابيب بواسطة مُحدد معدني علوي يُوضع عند أعلى الحوض. تم ملء الحوض بالتربة المجففة في فرن درجة حرارته (105) درجة مئوية لمدة (24) ساعة، وذلك بسكبها من خلال قمع وُضع على ارتفاع ثابت عند أعلى الحوض، وبذلك تمت تعبئة الحوض بالتربة بدون أي إزاحة للأنابيب الأربعة. بعد ذلك تم تحضير معلق الحقن في وعاء الخلط بأخذ كمية محددة مسبقاً من غبار أفران الإسمنت % (2, 4, 6, 8, 10, 12) من الوزن الجاف للتربة المعالجة مع ما يناسبها من الماء بحسب نسبة الخلط المدروسة {W:CKD= (2:1, 4:1, 6:1, 8:1, 10:1)} وتم إدخالهم عبر الفتحة الخاصة بإدخال مواد معلق الحقن وبعد إغلاق الفتحة بإحكام، تم تشغيل المحرك المتصل بخلاط داخل وعاء الخلط واستمر المزج خلال عملية الحقن لتفادي انفصال ذرات الغبار عن الماء في المعلق، بعد ذلك بدأت عملية الحقن بفتح الصمام (1) وضخ الهواء المضغوط إلى وعاء الخلط تحت ضغط ثابت (1.5-2) bar، ومن ثم فتح الصمام (2)، فضخ المعلق إلى داخل خراطيم الحقن الأربعة ومنها لأنابيب الحقن، ومن خلال ثقب هذه الأنابيب إلى التربة، وبذلك تم انتشار معلق الحقن ضمن مسامات التربة الشكل (4).



الشكل (4): صورة مجهرية لتغلغل معلق الحقن في التربة الرملية بعد (28) يوم

نلاحظ من الشكل (4) تغلغل معلق الحقن ضمن فراغات التربة وانتشاره أفقياً ووصوله لأطراف العينة.

4- تحضير العينات لاختبار الضغط البسيط

تم تحضير العينات لاختبار الضغط البسيط، بعد انتهاء كل عملية حقن مباشرة من أجل جميع النسب المدروسة، وذلك باستخدام قوالب بلاستيكية أسطوانية الشكل، قابلة للفك والتركيب، نسبة ارتفاعها إلى قطرها ($H/D = 2$)، حيث قطرها الداخلي ($D = 5\text{cm}$) وارتفاعها ($H = 10\text{cm}$) مبيّنة في الشكل (5)، إذ تم ربط كل قالب بمربطين بلاستيكيين ومن ثم دهنت القوالب البلاستيكية من الداخل بالزيت المعدني من أجل سهولة إخراج العينة من القالب، ومن ثم غُرزت في التربة المحقونة وأُخرجت مباشرة، وأُقيت العينات للمعالجة (28,7) يوم، كما هو مبين في الشكل (6). بعد انقضاء فترة المعالجة المحددة، تم فك القالب البلاستيكي بقص المرباط البلاستيكية؛ وتم بسهولة إخراج العينة سليمة، الشكل (7) و (8).



الشكل (5): القالب البلاستيكي المستخدم لأخذ العينات الشكل (6): بعض العينات المحضرة بعد عملية الغرز في التربة المحقونة



الشكل (7): إخراج العينات من القالب البلاستيكي القابل للفك



الشكل (8): بعض العينات بعد إخراجها من القالب البلاستيكي

5- تجارب الضغط البسيط

لدراسة تأثير نسب % (CKD) ونسب (W:CKD) وتأثير مدة المعالجة على مقاومة الضغط الحر للتربة المعالجة بالحقن، تم إجراء تجارب الضغط البسيط المحوري على العينات المحضرة كما ذكر أعلاه، وفق المواصفة (ASTM D4219) وباستخدام الجهاز المبين بالشكل (9) الموجود في مخبر ميكانيك التربة بجامعة تشرين، حيث قمنا بتكرار تجربة الضغط البسيط من أجل مدتي معالجة لكل نسبة، وذلك بتطبيق قوة شاقولية محورية بسرعة ثابتة مقدارها (1mm/min) حتى انهيار العينة وتم تسجيل الحمولة الشاقولية والتشوه الشاقولي، وبواسطة هذه التجارب تم الحصول على مقاومة الضغط الحر، ومعاملات المرونة من أجل كل نسبة، كما تم رسم ودراسة مخططات (الإجهاد - التشوه النسبي) لكل نسبة.



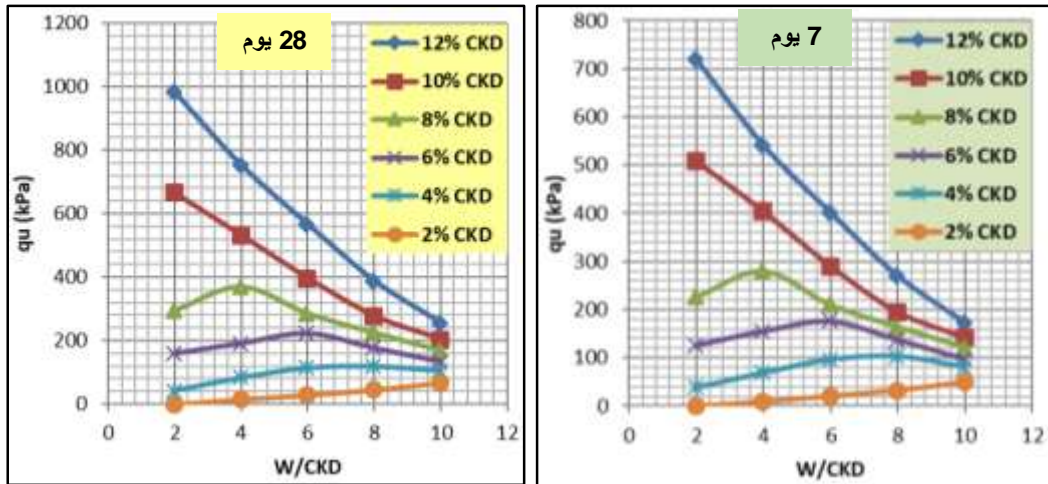
الشكل (9): الجهاز المستخدم لإجراء تجربة الضغط البسيط المحوري

النتائج والمناقشة:

نقدم فيما يلي نتائج تجارب الضغط البسيط عند الانهيار والمنجزة على عينات من التربة المحقونة بنسب غبار الإسمنت % (2, 4, 6, 8, 10, 12) من الوزن الجاف للتربة المعالجة ونسب الخلط المدروسة (W:CKD= (2:1, {4:1, 6:1, 8:1, 10:1})، وذلك من أجل مدتي معالجة (7 و 28) يوم.

1- تأثير تغيير نسبة (W:CKD) في معلق الحقن على مقاومة الضغط الحر (qu) من أجل نسب % (CKD) المدروسة ومدتي المعالجة

يبين الشكل (10) تغيير مقاومة الضغط الحر المكتسبة، بتغيير نسب (W/CKD) وذلك من أجل جميع نسب % (CKD) المدروسة ومن أجل مدتي المعالجة (7، 28) يوم.

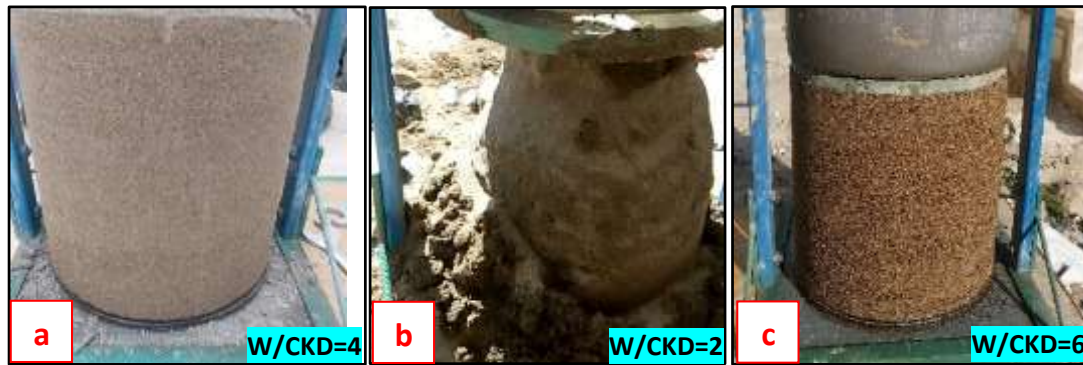


الشكل (10). تغيير مقاومة الضغط الحر بازدياد نسبة (W/CKD) من أجل نسب (CKD) المدروسة ومدتي معالجة

حيث (qu) مقاومة الضغط الحر وهي الإجهاد المحوري الشاقولي الأعظمي الذي تم عنده انهيار العينة. نلاحظ من الشكل (10) أنه:

- تزداد مقاومة الضغط الحر (qu) للعينات المعالجة بازدياد مدة المعالجة من أجل جميع نسب غبار الإسمنت المدروسة، وسبب ذلك أن غبار أفران الإسمنت يشبه الإسمنت في تفاعله مع الماء، أي أنه يحتاج إلى فترة زمنية لإتمام عملية التفاعل وبالتالي اكتساب المقاومة [32,33].
- عند الحقن بنسب غبار الإسمنت المرتفعة (10%, 12%) تنقص (qu) بازدياد نسبة (W:CKD) في معلق الحقن وذلك من أجل مدتي المعالجة (7, 28) يوم. أما عند الحقن بنسب الغبار (4%, 6%, 8%) تزداد (qu) بازدياد نسبة (W:CKD) ومن ثم تعاود الانخفاض؛ فهي تكون أعظمية عند النسبة (W:CKD=8:1) من أجل (CKD=4%)، وأعظمية عند (W:CKD=6:1) من أجل (CKD=6%)، وأعظمية عند (W:CKD=4:1) من أجل (CKD=8%) وذلك من أجل مدتي المعالجة. بينما عند الحقن بالنسبة (CKD=2%) نلاحظ (qu) تزداد بازدياد نسبة (W:CKD) في معلق الحقن وذلك من أجل مدتي المعالجة.
- أي أنه لكل نسبة من نسب غبار الإسمنت المدروسة؛ هناك نسبة (W:CKD) معينة هي النسبة الأفضل التي تؤدي لمعلق حقن بقوامه الأفضل، فعند هذه النسبة تكون كمية الماء في المعلق كافية لعملية التفاعل، وكافية لإخراج الهواء من فراغات التربة، وينتج عنها (qu) أعظمية، كما وجدنا أن قطر انتشار الحقن يكون كاملاً، ومساوياً لقطر الحوض الأسطواني الخاص بمراقبة انتشار الحقن أفقياً، الشكل (11, a).
- أما عندما تقل نسبة (W:CKD) عن النسبة الأفضل فإن المعلق يكون لزجاً وكميته غير كافية لإخراج الهواء من فراغات التربة، كما وأن اللزوجة العالية للمعلق تمنعه من التغلغل جيداً بين حبيبات التربة الرملية، وبالتالي انخفاض مقاومة الضغط الحر (qu)، وهذا يتفق مع دراسات سابقة [6,9,12,16]، وقد لاحظنا أن قطر انتشار الحقن في هذه الحالة أصغر من قطر الحوض، ولا يصل الحقن لأطراف الحوض الأسطواني بسبب لزوجة المعلق، كما هو مبين في الشكل (11, b).
- وعند ازدياد نسبة (W:CKD) عن النسبة الأفضل، فإن قيمة مقاومة الضغط الحر (qu) تتخفض ويُعزى ذلك إلى أنه:

1. يصبح المعلق مائعاً ورخوياً ويخف تركيز المادة الفعالة الرابطة بسبب ازدياد كمية الماء في المعلق، وهذا أيضاً ما لاحظته دراسته سابقة [5,9]؛ مما يؤدي لروابط ضعيفة بين جزيئات الرمل فيقل الالتصاق وبالتالي تقل مقاومة الضغط الحر (qu)، لأن شدة الروابط اللاصقة تنقص بين جزيئات الرمل بازدياد النسبة (W:CKD) وتزداد بنقصان النسبة (W:CKD) وتبدو هذه النتيجة متوافقة مع أبحاث سابقة [16,18,19].
2. تنخفض قيمة (qu) بازدياد النسبة (W:CKD) نتيجةً لازدياد النزف (Bleeding) وهو خروج ذرات الغبار مع كمية الماء الزائدة، وتزداد حدة النزف (Bleeding) بازدياد النسبة (W:CKD)، وذلك يتوافق مع دراسات سابقة درست الحقن بالإسمنت [14].
3. وقد وجدنا في هذه الحالة أنّ قطر انتشار الحقن يكون كاملاً، ومساوياً لقطر الحوض الأسطواني الخاص بمراقبة انتشار الحقن أفقياً، ولكن مقاومة الضغط الحر أقل من المقاومة الأعظمية وذلك من أجل جميع نسب غبار الإسمنت المدروسة، أي أنّ ميوعة وسيولة المعلق أمّنت تغلغله وسهّلت انتشاره أفقياً بشكل تام ولكن المقاومة انخفضت بسبب نزف حبيبات الغبار مع الماء الزائد، الشكل (11,c).

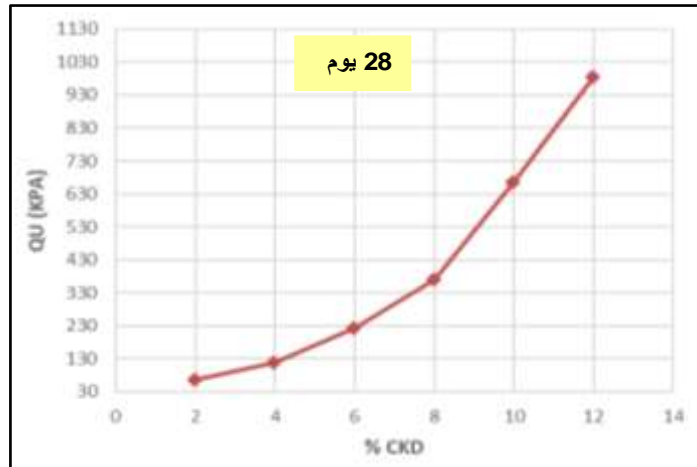


الشكل(11). انتشار الحقن أفقياً لعينة محقونة بالنسبة (CKD=8%) من أجل نسب (W/CKD) مختلفة

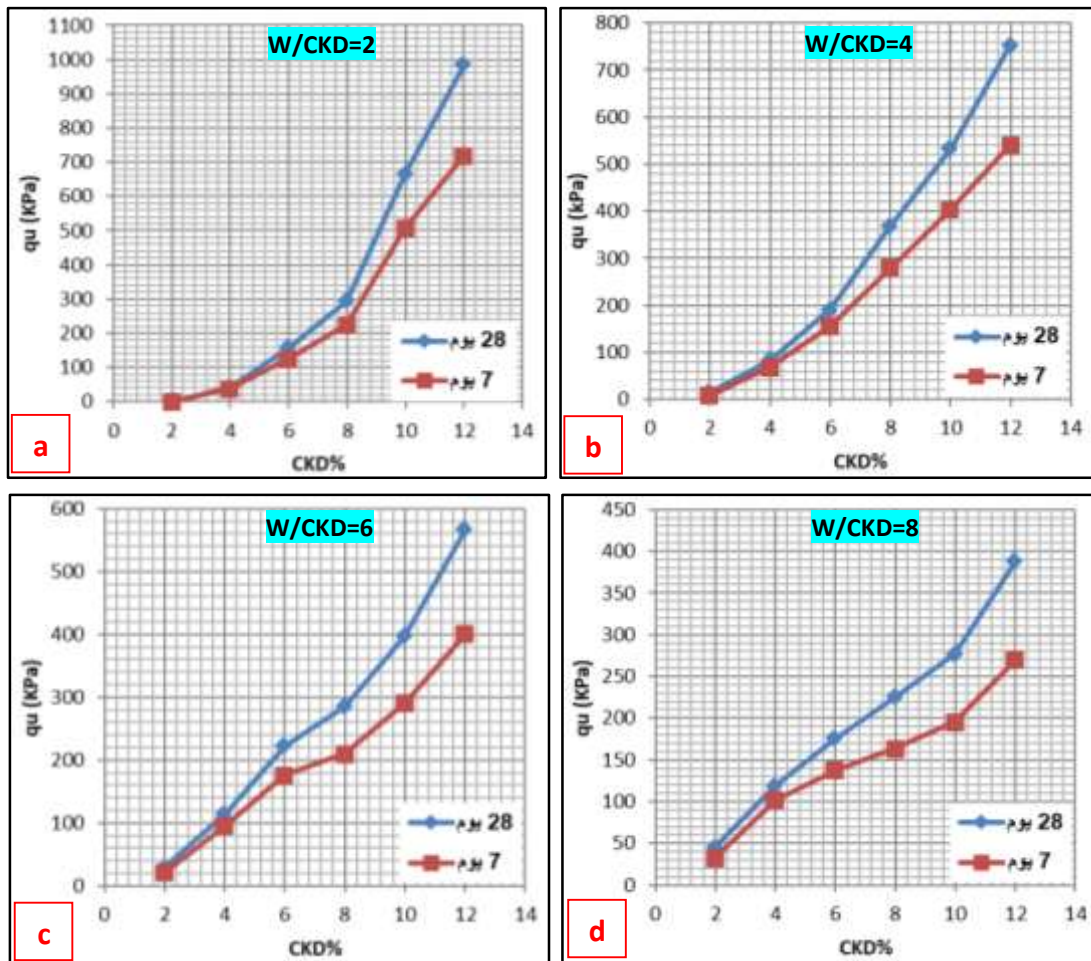
يبين الجدول (4) والشكل (12) قيم مقاومة الضغط الحر من أجل كل نسبة من نسب غبار الإسمنت المدروسة ونسبة (W:CKD) الأفضل المقابلة لها وذلك من أجل مدة معالجة (28) يوم.

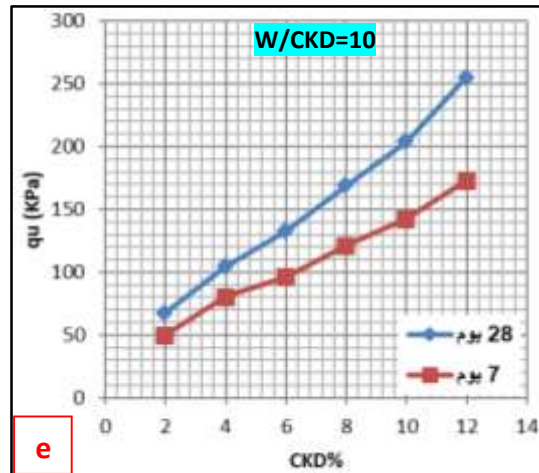
الجدول (4) قيمة مقاومة الضغط الحر (qu) من أجل كل نسبة من نسب % (CKD) ونسبة (W:CKD) الأفضل المقابلة لها عند مدة المعالجة (28) يوم

CKD%	%2	%4	%6	%8	%10	%12
W:CKD	10:1	8:1	6:1	4:1	2:1	2:1
qu (kPa)	67.75	119.21	222.62	369.84	666.84	984.72
qu _(i%) /qu _(2%)		1.76	3.29	5.46	9.84	14.53



الشكل (12). ازدياد مقاومة الضغط الحر (q_u) مع ازدياد نسب $\%$ CKD من أجل نسبة (W:CKD) الأفضل المقابلة لها ومدة معالجة (28) يوم
 نلاحظ من الشكل (12) ازدياد كبير جداً في مقاومة الضغط الحر خصوصاً عند النسب العالية لغبار أفران
 الإسمنت، وذلك بسبب ازدياد المادة الفعالة الرابطة التي تربط جزيئات التربة مع بعضها.
 2- تأثير تغير نسبة $\%$ CKD في معلق الحقن على مقاومة الضغط الحر (q_u) من أجل نسب
 (W:CKD) المدروسة ومدتي المعالجة





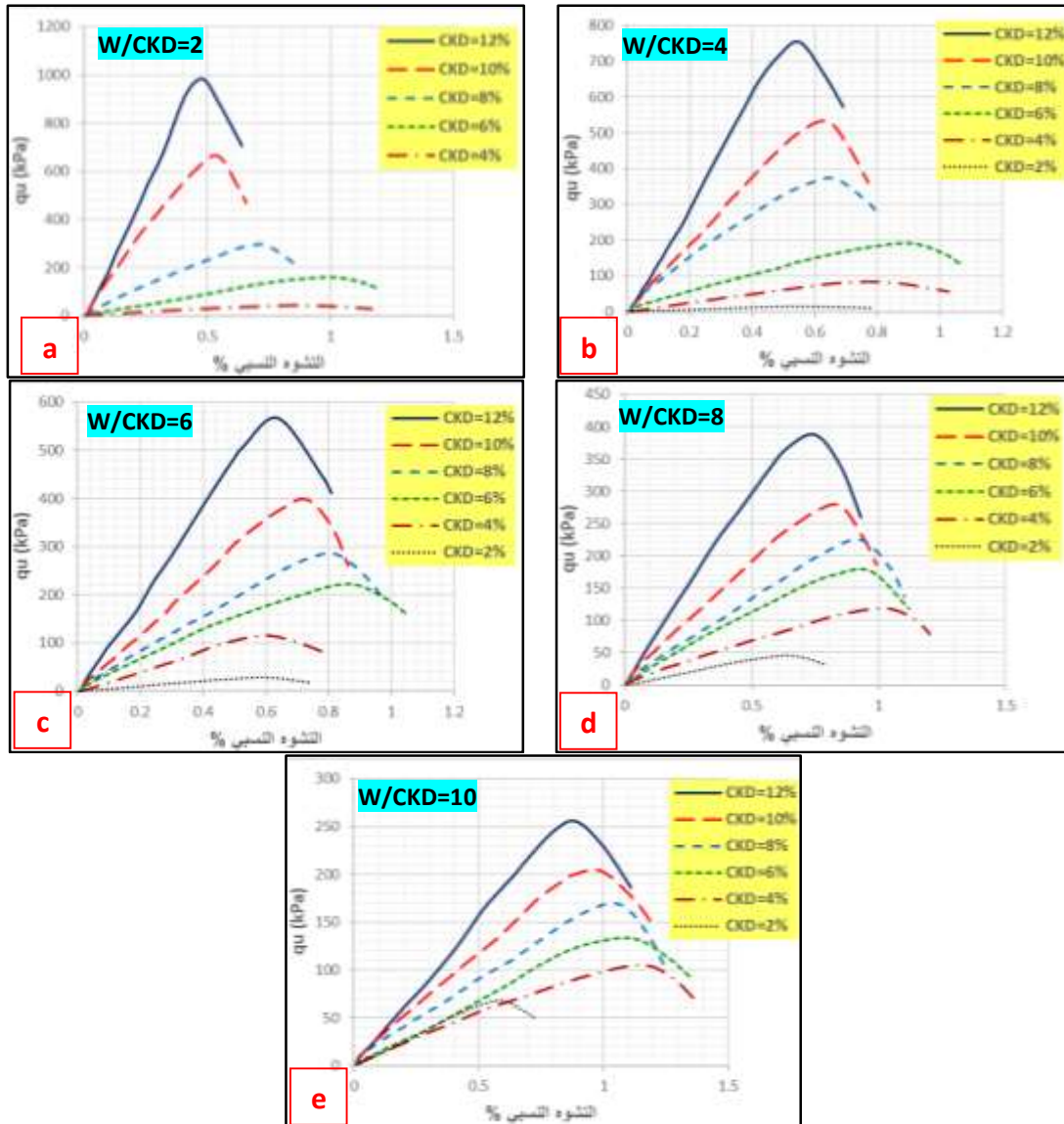
الشكل (13). ازدياد مقاومة الضغط الحر (qu) بازدياد نسبة % (CKD) من أجل نسب (W/CKD) المدروسة ومن أجل مدتي المعالجة من الشكل (13) نلاحظ أنه:

- تزداد مقاومة الضغط الحر بشكل واضح خلال الأيام السبعة الأولى، كما نلاحظ أن تأثير مدة المعالجة أكثر أهمية عند نسب % (CKD) العالية مقارنةً بنسب % (CKD) المنخفضة، وهذا منطقي فبازدياد المادة الرابطة يكون تأثير زمن المعالجة مفيداً بشكل أكبر [32,33].

- اكتسبت التربة الرملية المعالجة مقاومة على الضغط الحر (qu)، وازدادت المقاومة المكتسبة (qu) بشكل كبير بازدياد نسبة % (CKD) في معلق الحقن، ويُعزى ذلك إلى الخصائص التلاصقية لغبار الإسمنت، الناتجة عن مكوناته الكيميائية، وتحديدًا النسبة العالية من (CaO) و (SiO_2) كما رأينا في الجدول (3)، فنتيجةً للتفاعل بين (CaO) و (SiO_2) والماء تتكون مادة رابطة وهي هيدرات سيليكات الكالسيوم والتي يُرمز لها اختصارًا (C- S- H) وهي تقوم بملء الفراغات وربط حبيبات الرمل ببعضها البعض. فبازدياد نسبة % (CKD) في معلق الحقن، تزداد كمية المادة الرابطة (C- S- H)، فتصبح العينة ذات صلابة ومقاومة عالية للضغط الحر. وهذا يدل على تشابه الخصائص التلاصقية للغبار والإسمنت، حيث أن هذه المادة هي المسؤولة عن القوة والصلابة في خلطات الإسمنت [30,33].

3- منحنيات (الإجهاد- تشوه) للتربة الرملية المعالجة بجميع نسب % (CKD) ونسب (W:CKD) ، من أجل مدة معالجة 28 يوم

يتم خلال تجربة الضغط البسيط تسجيل الحملات الشاقولية والتشوهات الشاقولية بشكل متزامن. يبين الشكل (14) العلاقة بين الإجهادات الشاقولية والتشوهات النسبية (% ϵ)، والتي توضح سلوك العينات المحقونة تحت الحمولة المحورية الضاغطة، وذلك لجميع نسب % (CKD) المدروسة ونسب (W/CKD) المدروسة ومن أجل مدة معالجة (28).



الشكل (14) منحنيات (الإجهاد - تشوه) للتربة الرملية المعالجة بجميع نسب % (CKD) ونسب (W/CKD) ومدة معالجة 28 يوم

من الشكل (14) نلاحظ أنه:

- قبل الذروة؛ تزداد الإجهادات الشاقولية بشكل خطي تقريباً مع التشوهات الشاقولية حتى بلوغ الذروة التي تمثل بداية الانهيار، والتي تكون عندها المقاومة قصوى وهي مقاومة الضغط الحر (qu)، وبعد الذروة تتناقص الإجهادات الشاقولية وتستمر التشوهات بالتزايد.
- تتميز المنحنيات التي تمثل العينات المحقونة بنسب مرتفعة من غبار الإسمنت، بزيادة سريعة للإجهادات وبوجود ذروة واضحة، ويبلغ المنحني الذروة عند قيمة منخفضة للتشوهات، كما يُلاحظ أنه كلما ازدادت نسبة الغبار تتناقص قيمة التشوه الذي يحدث عنده الانهيار وذلك من أجل جميع نسب (W/CKD) المدروسة، ويرجع السبب في ذلك لازدياد صلابة العينة بازدياد نسبة غبار الإسمنت.
- تتميز المنحنيات التي تمثل العينات المحقونة بنسب منخفضة من غبار الإسمنت بذروة صغيرة نسبياً.

- أما العينات المحقونة بالنسبة (CKD=2%) فنلاحظ أنها انهارت عند قيمة صغيرة للتشوهات مع زيادة بطيئة للاجهادات وذلك بسبب ضعف صلابة العينات المحقونة بهذه النسبة الضعيفة.

4- نمط انهيار العينات المدروسة

سلكت العينات سلوكاً قسيفاً عند الانهيار، وازدياد نسبة غبار الإسمنت (CKD) أصبح نمط الانهيار أكثر قسافةً، وهذا مشابه لسلوك الترب الحبيبية المعالجة بالإسمنت، ولقد لاحظنا ثلاثة أنماط للانهيار:

1. النمط الأول:

عندما يكون معلق الحقن بقوامه الأفضل أي عند نسبة (W:CKD) الأفضل المقابلة لكل نسبة غبار إسمنت، فإن سطح الانهيار يكون على شكل شق واضح يمتد على كامل طول العينة المنهارة، الشكل (15).



الشكل (15) شكل الكسر عند الانهيار (النمط الأول)

2. النمط الثاني:

أما عندما تقل أو تزيد نسبة (W:CKD) عن النسبة الأفضل، أي عندما تكون العينة محقونة بمعلق لزج أو رخو، فإن الكسر لا يكون على كامل طول العينة، وإنما يكون فقط من أعلى أو أسفل العينة، الشكل (16).

3. النمط الثالث:

عندما تكون نسبة (W:CKD) أقل من النسبة الأفضل وأعلى من النسبة الأضعف، ففي هذه الحالات كان شكل كسر العينات عند الانهيار كما هو مبين بالشكل (17)، فقد لاحظنا وجود كتلة كالإسفين في أعلى العينة. مع الإشارة إلى أن هذا النمط تمت ملاحظته فقط عند الحقن بنسب الغبار العالية (6%, 8%, 10%, 12%).



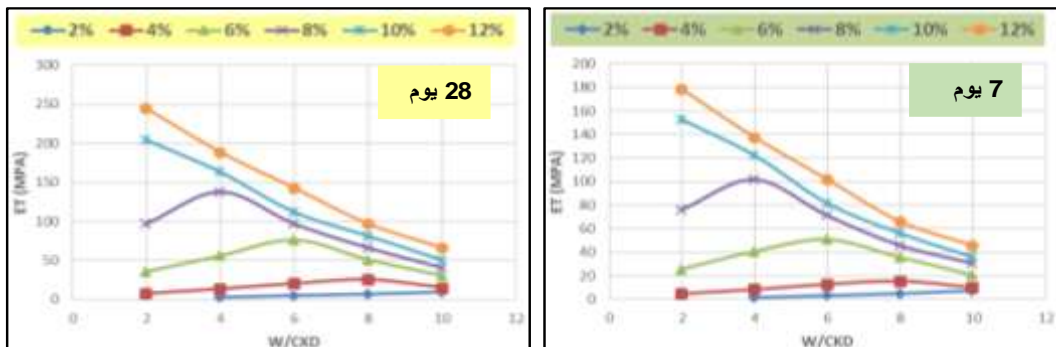
الشكل (16) شكل الكسر عند الانهيار (النمط الثاني)



الشكل (17) شكل الكسر عند الانهيار (النمط الثالث)

5- تأثير تغير نسبة (W:CKD) في معلق الحقن على معامل المرونة المماسي الابتدائي (E_t) من أجل نسب (CKD)% المدروسة ومدتي معالجة

تم تحديد معامل المرونة من منحنيات (الإجهاد-التشوه) الناتجة من تجارب الضغط البسيط لجميع النسب المدروسة.

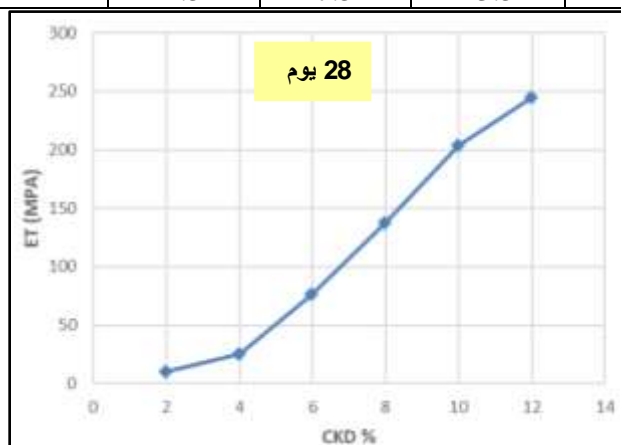


الشكل (18). تغير معامل المرونة المماسي الابتدائي (E_t) بزيادة نسبة (W/CKD) من أجل نسب (CKD)% المدروسة ومن أجل مدتي معالجة

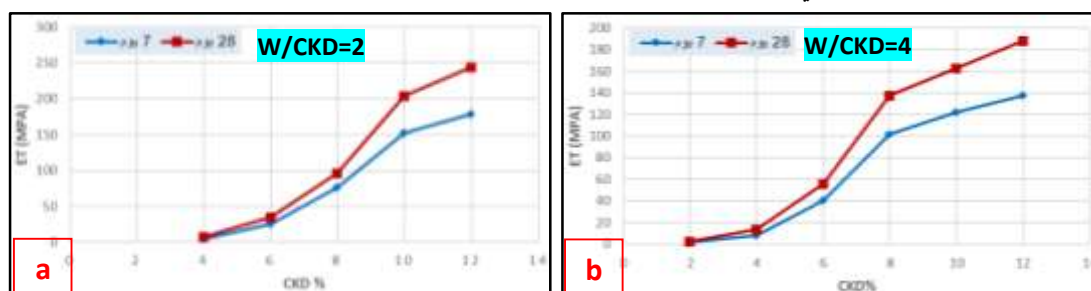
- حيث (Et) معامل المرونة المماسي الابتدائي وقد تم تعيينه من ميل المماس الابتدائي لمنحني (الإجهاد-تشوه) من أجل كل نسبة من النسب المدروسة، نلاحظ من الشكل (18) أنه:
- يزداد (Et) للعينات المعالجة بالحقن بازدياد مدة المعالجة من أجل جميع نسب غبار الإسمنت المدروسة وسبب ذلك اكتمال فترة المعالجة اللازمة لإتمام عملية التفاعل، كما ذكرنا مسبقاً.
 - لكل نسبة من نسب غبار الإسمنت المدروسة؛ هناك نسبة (W:CKD) معينة تعطي أفضل قيمة للمعامل (Et) ومن المنطقي أن (W:CKD) التي نتج عندها أفضل قيمة لمقاومة الضغط الحر من أجل كل نسبة غبار، هي نفسها التي أعطت أفضل قيمة للمعامل (Et) ، لأن المعامل (Et) تم استنتاجه من منحنيات (الإجهاد-تشوه) من أجل كل النسب المدروسة.
 - يبين الجدول (5) والشكل (19) قيم معامل المرونة المماسي (Et) من أجل كل نسبة من نسب غبار الإسمنت المدروسة ونسبة (W:CKD) الأفضل المقابلة لها وذلك من أجل مدة معالجة (28) يوم.

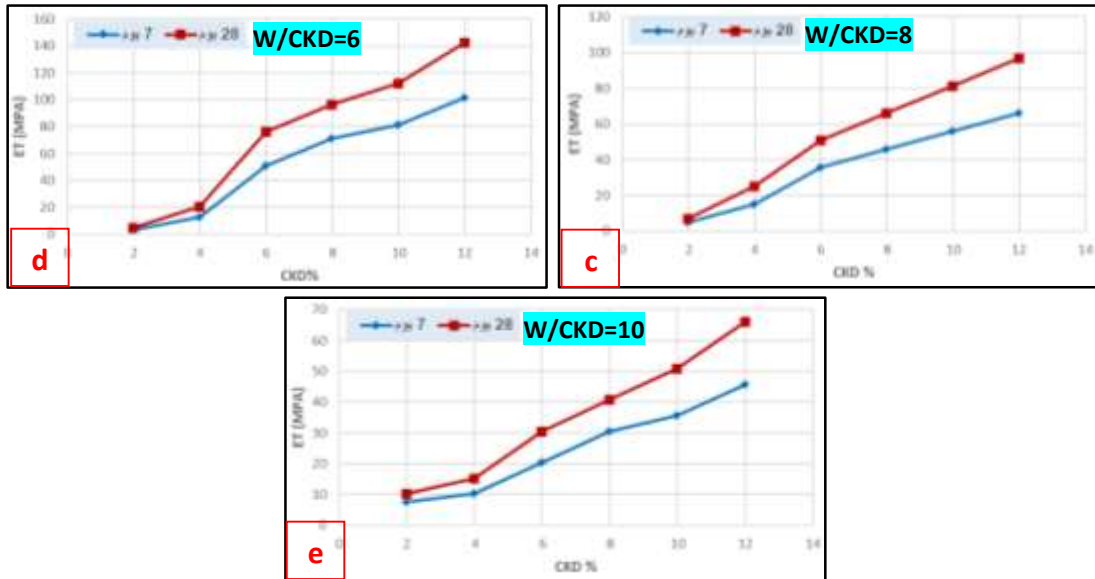
الجدول (5) قيمة معامل المرونة المماسي (Et) من أجل كل نسبة من نسب (CKD) ونسبة (W:CKD) الأفضل المقابلة لها عند مدة المعالجة (28) يوم

CKD%	%2	%4	%6	%8	%10	%12
W:CKD	10:1	8:1	6:1	4:1	2:1	2:1
Et (Mpa)	10.19	25.47	76.41	137.54	203.77	244.54
Et _(i%) /Et _(2%)		2.5	7.5	13.5	20	24



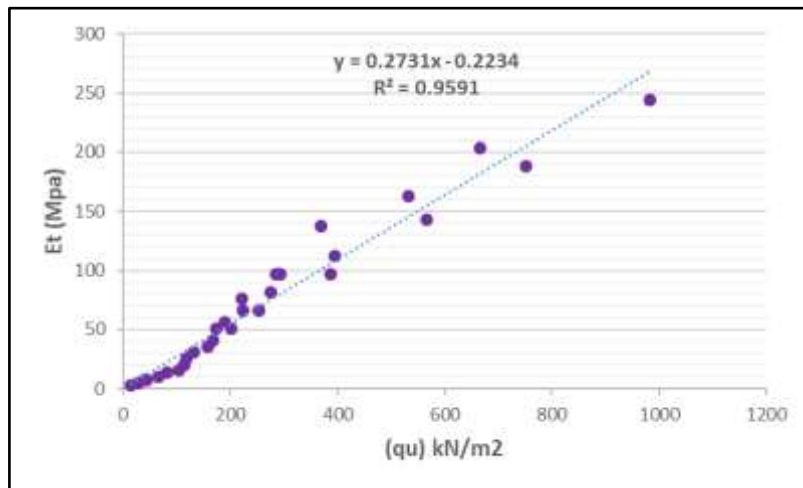
- الشكل (19). ازدياد قيمة معامل المرونة المماسي (Et) مع ازدياد نسب (CKD) من أجل نسبة (W:CKD) الأفضل وزمن معالجة (28) يوم نلاحظ من الشكل (19) زيادة كبيرة جداً في المعامل (Et) بازدياد نسبة غبار الإسمنت، ويتضح أن العلاقة بين المعامل (Et) ونسبة غبار أفران الإسمنت خطية، وخاصةً عندما ازدادت نسبة غبار الإسمنت عن 2%.
6- تأثير تغير نسبة (CKD) في معلق الحقن على معامل المرونة المماسي الابتدائي (Et) من أجل نسب (W:CKD) المدروسة ومدتي معالجة





الشكل (20). ازدياد معامل المرونة المماسي الابتدائي (Et) بازدياد نسبة % (CKD) من أجل نسب (W/CKD) المدروسة ومن أجل مدتي معالجة من الشكل (20) نلاحظ أنه:

- يزداد (Et) بازدياد نسبة % (CKD) في معلق الحقن من أجل مدتي المعالجة ومن أجل جميع نسب (W/CKD) المستخدمة، كما نلاحظ أنّ تأثير مدة المعالجة أكثر أهمية عند الحقن بنسب % (CKD) العالية.
- يزداد (Et) بازدياد نسبة % (CKD) في معلق الحقن، وذلك لنفس السبب الذي أدى إلى ازدياد مقاومة الضغط الحر (qu) وهو ازدياد كمية هيدرات سيليكات الكالسيوم، فقد وجدنا أن العلاقة بين مقاومة الضغط الحر ومعامل المرونة المماسي علاقة خطية بمعامل ارتباط (0.959) كما يبين الشكل (21).



الشكل (21). العلاقة بين مقاومة الضغط الحر (qu) ومعامل المرونة المماسي الابتدائي (Et) من أجل جميع نسب % (CKD) وجميع نسب (W/CKD) المدروسة ومن أجل مدة معالجة 28 يوم

نلاحظ من النتائج الواردة في الجداول والأشكال السابقة أن التربة الرملية الطبيعية المفككة التي تُفترض مقاومتها للضغط الحر (qu) مساوية للصفر [5]، قد اكتسبت مقاومة عالية للضغط الحر بعد الحقن بمعلق غبار أفران الإسمنت، وازدادت المقاومة المكتسبة بازدياد نسبة غبار الإسمنت في معلق الحقن، وذلك نتيجةً لتشكل مادة رابطة

لاصقة هيدرات سيليكات الكالسيوم (C- S- H) التي تقوم بملء الفراغات وربط حبيبات الرمل ببعضها البعض، مما جعل التربة المحقونة تتمتع بخواص جديدة وكأنها مادة وسطية بين الرمل والبيتون [5]، تتوافق نتائج البحث مع أبحاث سابقة درست تحسين مقاومة الضغط الحر لترب رملية تم حقنها بالإسمنت كما سبق وأشرنا أثناء عرض النتائج ومناقشتها، مما يدل على أن فعالية غبار أفران الإسمنت تشبه إلى حد كبير فعالية الإسمنت في تحسين مقاومة الضغط الحر للترب الرملية، إضافةً لكونه يتميز عن الإسمنت بأنه أكثر نعومة مما يسمح لمعلق غبار الإسمنت بالتغلغل في فراغات التربة، مما ينعكس إيجاباً على جودة الحقن وكفاءة الحقن التي تعتمد بشكل رئيسي على تغلغل معلق الحقن خلال فراغات التربة [6].

الاستنتاجات والتوصيات:

بالاستناد على النتائج التجريبية التي وردت في هذه المقالة نستنتج ما يلي:

الاستنتاجات:

- اكتسبت التربة الرملية الساحلية المعالجة بالحقن بمعلق غبار أفران الإسمنت مقاومة عالية للضغط الحر وزيادة كبيرة في معامل المرونة المماسي.
- ازدياد مقاومة الضغط الحر (qu) ومعامل المرونة المماسي (Et) بازياد نسبة % (CKD) في معلق الحقن، وتكون نسبة الزيادة في قيم (qu) و (Et) عالية جداً عند الحقن بالنسب العالية ل % (CKD).
- ازدياد مقاومة الضغط الحر (qu) ومعامل المرونة المماسي (Et) للتربة الرملية المعالجة بالحقن بنقصان النسبة (W:CKD) في معلق الحقن ويظهر ذلك بوضوح عند بنسب % (CKD) العالية.
- وجدنا أنه من أجل كل نسبة من نسب غبار أفران الإسمنت هناك نسبة (W:CKD) تعطي أفضل مقاومة للضغط الحر، إذ يكون معلق الحقن بقوامه الأفضل عند نسبة (W:CKD) الأفضل المقابلة لكل نسبة غبار إسمنت، أما قبل نسبة (W:CKD) الأمثل فيكون لزجاً، وبعدها يكون مائعاً.
- بازياد مدة المعالجة تزداد مقاومة الضغط الحر (qu) كما يزداد معامل المرونة المماسي (Et) ، ويكون تأثير مدة المعالجة أكثر أهمية عند نسب % (CKD) العالية مقارنةً بنسب % (CKD) المنخفضة.
- من أجل العينات المحقونة بنسب غبار الإسمنت العالية فإن منحنى علاقة الإجهادات بالتشوهات النسبية يتميز بوجود ذروة واضحة، أما من أجل العينات المحقونة بنسب الغبار المنخفضة فتكون الذروة صغيرة نسبياً.
- علاقة (الإجهادات-التشوهات) خطية تقريباً قبل الذروة، أما بعد الذروة فتتناقص الإجهادات الشاقولية وتستمر التشوهات بالتزايد.
- يتناقص التشوه الشاقولي الذي يتم عنده الانهيار بازياد نسبة الغبار.
- تسلك العينات عند الانهيار سلوكاً قسيفاً (Brittle) ويزداد قسافةً بازياد نسبة غبار الإسمنت.
- عندما يكون معلق الحقن بقوامه الأفضل (وذلك من أجل كل نسبة غبار إسمنت) يكون شق الانهيار واضح وعلى كامل طول العينة، أما عندما يكون معلق الحقن رخواً أو لزجاً فلا يكون هناك شق واضح ويحدث انهيار العينة من الأعلى أو الأسفل.

التوصيات:

- 1- نوصي باستخدام غبار أفران الإسمنت المنتج في معامل الإسمنت في سوريا لتحسين ترب التأسيس، كونه مشابه إلى حد بعيد للإسمنت البورتلاندي العادي خاصة في محتوى (Cao) و (SiO₂) مما يجعله مؤهلاً لإنتاج مواد لاصقة رابطة جيدة عند تفاعله مع الماء.
- 2- نوصي باستخدام تقنية الحقن لتحسين مقاومة الضغط البسيط للترب الرملية المفككة فهي تقنية فعالة واقتصادية.
- 3- نوصي بالقيام بأبحاث إضافية لمعرفة تأثير الحقن بمعلق غبار أفران الإسمنت على أنواع أخرى من الترب.

References:

- [1] CHANG, M. H.; MAO, T. W.; HUANG, R. C. *A Study on the Improvements of Geotechnical Properties of In-Situ Soils by Grouting*. Geomech Eng, Vol.10, No.4, 2016, 527-546.
- [2] IBRAGIMOV, M. N. *Soil Stabilization with Cement Grouts*. Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. 42, No.2, 2005, 67-72.
- [3] DAYAKAR, P.; RAMAN, K. V.; RAJU, K. V. B. *Study on Permeation Grouting Using Cement Grout in Sandy Soils*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JACE) ISSN. Vol. 4, Issue 4, Nov- Dec 2012, 05-10.
- [4] RAJU, V. R.; VALLURI, S. *Practical Application of Ground Improvement*. Symposium on Engineering of Ground & Environmental Geotechniques (SEG2), 2008.
- [5] DANO, C.; HICHER, P. Y.; TAILLIEZ, S. *Engineering properties of grouted sands*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(3), 2004, 328-338.
- [6] AKBULUT, S.; SAGLAMER, A. *Estimating The Groutability of Granular Soils: A New Approach*. Tunnelling and underground space technology, 17(4), 2002, 371-380.
- [7] SCHWARZ, L. G.; CHIRUMALLA, M. *Effect of Injection Pressure on Permeability and Strength of Microfine Cement Grouted Sand*. Grouting for ground improvement: Innovative concepts and applications, 2007, 1-15.
- [8] MOLLAMAHMUTOGLU, M.; YILMAZ, Y. *Engineering Properties of Medium-To-fine Sands Injected with Microfine Cement Grout*. Marine Georesources & Geotechnology, Vol. 29, No. 2, 2011, 95-109.
- [9] MOLLAMAHMUTOGLU, M.; AVCI, E. *Effectiveness of Microfine Portland Cement Grouting On the Strength and Permeability of Medium to Fine Sands*. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 59(3), 2015, 319-326.
- [10] ABRAHAM, B. M; KUMAR, T. G. S; SRIDHARAN, A; Jose, B. T. *strength Improvement of loose sandy soils by grouting*. Indian Geotech Journal, 44(3), (July-September 2014), 234-240.
- [11] SANTHOSH KUMAR, T. G; ABRAHAM, B. M; SRIDHARAN, A; JOSE, B. T. *Bearing Capacity Improvement of Loose Sandy Foundation Soils through Grouting*. Engineering Research and Applications (IJERA) India, Vol.1(3), 2011,1026-1033.
- [12] RAMAN, K. V.; DAYAKAR, P.; RAJU, K. V. B. *Improvement of sandy soil by low pressure grouting using cement grout*, Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences, JCPS, Vol. 9, Issue 2, April- June 2016, 190-194.
- [13] GANTA, S. *Improvement of Bearing Capacity of Sandy Soil by Grouting*, (IJITR) International Journal of Innovative Technology and Research, Vol. 5, No. 5, August-September 2017,7267-7270.

- [14] OZGUREL, H. G.; VIPULANANDAN, C. *Effect of Grain Size and Distribution on Permeability and Mechanical Behavior of Acrylamide Grouted Sand*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(12), 2005, 1457-1465.
- [15] AVCI, E.; MOLLAMAHMUTOĞLU, M. *UCS properties of superfine cement-grouted sand*. Journal of Materials in Civil Engineering, 28(12), 2016,06016015-1.
- [16] MARKOU, I. N.; DROUDAKIS, A. I. *Factors Affecting Engineering Properties of Microfine Cement Grouted Sands*. Geotechnical and Geological Engineering, Vol.31, No. 4, 2013, 1041-1058.
- [17] CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. *Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(2), 2007, 197-205.
- [18] CHOO, H.; LEE, W.; LEE, C. *Overconsolidation and Cementation in Sands: Impacts On Geotechnical Properties and Evaluation Using Dilatometer Tests*. Geotechnical Testing Journal, 41(5), 2018, 915-929.
- [19] CHOO, H.; NAM, H.; LEE, W. *A Practical Method for Estimating Maximum Shear Modulus of Cemented Sands Using Unconfined Compressive Strength*. Journal of Applied Geophysics, 147,2017, 102-108.
- [20] MIRZA, J.; SALEH, K.; LANGEVIN, M. A.; MIRZA, S.; BHUTTA, M. A. R.; TAHIR, M. M. *Properties of Microfine Cement Grouts at 4 Degrees C, 10 Degrees C and 20 Degrees C*. Construction and Building Materials, 47, 2013, 1145-1153.
- [21] EKLUND, D.; STILLE, H. *Penetrability Due to Filtration Tendency of Cement-Based Grouts*. Tunnelling and Underground Space Technology, 23(4), 389-398.
- [22] ISMAIL, A.I.M.; BELAL, Z.L. *Use of Cement Kiln Dust On the Engineering Modification of Soil Materials*. Nile Delta, Egypt, Geotech.Geol. Eng,34,2016, 463-469.
- [23] TAHA, R.; AL-RAWAS, A.; AL-HARTHY, A. AL-SIYABI, H. *Use of Cement By-Pass Dust in Soil Stabilization*. Engineering Journal of the University of Qatar, Vol. 14, 2001, 61-76.
- [24] ADASKA, W. S; TAUBERT, D. H. *Beneficial uses of cement kiln dust*. 50th Cement Industry Technical Conference IEEE-IAS, USA, May 19-22, 2008 Paper No. 1627.
- [25] MILLER, G. A; ZAMAN, M. *Field and Laboratory Evaluation of Cement Kiln Dust as A Soil Stabilizer*. Transportation Research Record, Transportation Record Board, TRB, National Research Council, Washington, D.C., No.1714,2000, 25-32.
- [26] HAWKINS, G. J; BHATTY, J. I; OHARE, A. T. *Cement kiln dust production, management and disposal*, R & D Serial No.2327, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 2003.
- [27] KUMAR, A.; SINGH, A.K. *Stabilization of Soil using Cement Kiln Dust*. international Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. Vol.6, Issue 6. 2017,11631-11637.
- [28] AL-REFEAI, T. O; AL-KARNI, A. A. *Experimental study on the utilization of cement kiln dust for modification*. J. King Soud University, Eng. Sci., Vol. 11, No. 2, K.S.A., 1999, 217-232.
- [29] ELMASHAD, M. E. *Soil Improvement Using Cement Dust Mixture*. Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 58,2011,413-416.
- [30] Miller, G.A. Azad, S. 2000. *Influence of Soil Type on Stabilization with Cement Kiln Dust*. Construction and Building Materials, Vol. 14, 2000, 89-97.
- [31] American Society for Testing and Materials, ASTM Standard C33, 2015, Volume 04.08 Soil and Rock (I); D420-D5876.

[32] MASLEHUDDIN, M.; AL-AMOUDI, O.S.B.; REHMAN, M.K.; ALI, M.R.; BERRY, M.S. *Properties of Cement Kiln Dust Concrete*. Construction and Building Materials, Vol. 23, Issue 6, 2009, 2357-2361.

[33] MASLEHUDDIN, M.; AL-AMOUDI, O.S.B.; SHAMEEM, M.; REHMAN, M.K. *Usage of Cement Kiln Dust in Cement Products – Research Review and Preliminary Investigations*, Construction and Building Materials, Vol. 22, pp. 2008, 2369-2375.