

دراسة تأثير الحقن بغبار أفران الإسمنت (CKD) على مقاومة القص للتربة الرملية الساحلية

د. توفيق فياض*

د. رامي العبدہ**

فاتن السقر***

(تاريخ الإيداع 10 / 9 / 2020. قُبِلَ للنشر في 18 / 11 / 2020)

□ ملخص □

ركّزت العديد من الأبحاث مؤخراً على الاستفادة من النفايات الصناعية الصلبة في تحسين ترب التأسيس الضعيفة نظراً لما تشكّله هذه النفايات من أخطار على البيئة والصحة العامة. إحدى هذه النفايات غبار أفران الإسمنت (Cement Kiln Dust) الذي يُنتج بكميات كبيرة أثناء تصنيع الإسمنت البورتلاندي العادي. نقدم في هذا البحث دراسة عن تأثير الحقن بمعلق غبار أفران الإسمنت (CKD) على مقاومة القص للتربة الرملية في المنطقة الساحلية، ولتحقيق ذلك قمنا بتصميم وتصنيع نموذج حقن مخبري يحاكي عملية الحقن في الموقع، إذ تم حقن التربة بمعلق مكون من نسب مئوية مختلفة من (CKD) وهي % (2, 4, 6, 8, 10, 12) من الوزن الجاف للتربة المعالجة، ونسب خلط (ماء: غبار إسمنت) وهي {W:CKD= (2:1, 4:1, 6:1, 8:1, 10:1)} كما تم إجراء دراسة مخبرية على التربة الرملية قبل وبعد المعالجة بالحقن.

أثبتت النتائج كفاءة استعمال الحقن بمادة (CKD) لتحسين مقاومة التربة الرملية الساحلية للقص؛ إذ تزداد قيم مقاومة القص وتماسك التربة (C) بازدياد مدة المعالجة ونسبة (CKD) المئوية في معلق الحقن، وتنقص تلك القيم بازدياد نسبة (W:CKD) في معلق الحقن، أما قيم زاوية الاحتكاك الداخلي (ϕ) فتزداد بازدياد كل من مدة المعالجة ونسبة (CKD) المئوية ونسبة (W:CKD) في معلق الحقن.

الكلمات المفتاحية: تحسين التربة، الحقن التغلغلي، الترب الرملية، غبار أفران الإسمنت، مقاومة القص، مدة المعالجة، معلق الحقن.

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

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

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

A Study of the Effect of Grouting with Cement Kiln Dust (CKD) on the Shear Strength of Coastal Sandy Soils

Dr. Toufik Fayad^{*}
Dr. Rami Alabdeh^{**}
Faten Alsakr^{***}

(Received 10 / 9 / 2020. Accepted 18 / 11 / 2020)

□ ABSTRACT □

Recently; many researches have focused on the utilization of industrial solid waste to improve weak soils. Because of their threat to the environment and public health, one of these waste is cement kiln dust (CKD) which is produced in large quantities during the manufacture of ordinary Portland cement. In this paper, we present a study on the effect of (CKD) grouts on the shear strength of sandy soils in the coastal region, to achieve the object of this research, we designed and fabricated a laboratory grouting model that simulates grouting site process. The soil was 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), we conducted a laboratory study on sandy soil before and after grouting treatment.

The results proved the efficiency of using grouting cement kiln dust (CKD) to improve the shear strength of sandy soils in the coastal region, as the values of both shear strength and cohesion (C) of grouted soil increase with increasing the (CKD) percentage and curing period, but they decrease when the (W:CKD) ratio increases. While the values of internal friction angle (ϕ) increase when the percentage of (CKD), curing period, and (W:C) ratio increase.

Keywords :Soil Improvement, Permeation Grouting, Sandy Soils, Cement Kiln Dust, Shear Strength, curing period, grout suspension.

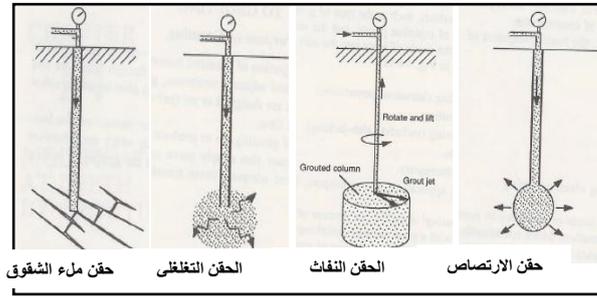
* Associate Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria

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

مقدمة:

تعد تقنية الحقن من أهم وأحدث تقنيات تحسين التربة، وقد أصبحت واسعة الاستخدام في الهندسة الجيوتكنيكية وفي مختلف فروع الهندسة المدنية الأخرى وذلك بسبب ميزات الكثرة، فهي تُستخدم لتحسين تربة التأسيس قبل إنشاء المنشآت أو تحت المنشآت القائمة عندما يكون من الصعب الوصول للتربة المراد تحسينها؛ حيث يمكن أن تُنفذ بزوايا مائلة ويمكن أن تُنفذ من خلال البلاطات الأرضية الموجودة فيتم الوصول للتربة المراد تحسينها بأقل هبوط أو اهتزاز لتلك التربة، كما تتميز بجودة النتائج والاقتصادية وسرعة وسهولة الإنجاز، وتُغني عن استبدال التربة الضعيفة أو عن استخدام الأساسات العميقة، فهي تُستعمل عموماً عندما يتعذر استعمال تقنيات التحسين الأخرى [1,2]. يُعرف الحقن بأنه عملية إدخال مادة الحقن تحت الضغط للتربة عن طريق إجراء فتحات في تلك التربة [3]، وتنقسم تقنيات الحقن إلى الأنماط الأساسية المبينة في الشكل (1) [4].



الشكل (1). أنماط الحقن الرئيسية [4].

إن النمط المتبع في هذا البحث هو الحقن التلغلي (Permeation Grouting) الذي يُستعمل عادةً لتكثيف وتحسين خصائص التربة الحبيبية عن طريق ملء فراغات تلك التربة، إذ يتم ضخ معلق الحقن تحت تأثير الضغط فتتغلغل المادة المحقونة في فراغات التربة ثم تتصلب محسنة خواص التربة بدون قلقلتها. تُصنف مواد الحقن ضمن مجموعتين رئيسيتين: معلقات الحقن ومحاليل الحقن [5,6]. تتأثر فعالية وجودة الحقن بعدة عوامل أهمها نوع التربة ومادة الحقن ونمط الحقن المستخدم ومدى مناسبتها لنوع التربة المحقون [7]. بالرغم من أن للحقن تطبيقات في كل حقول الهندسة المدنية، إلا أن الدراسات المتوفرة عن الحقن ومواد الحقن محدودة جداً حتى اليوم، إذ تتم عمليات الحقن بالاعتماد على الخبرات الموجودة والحس الهندسي بدلاً من الاعتماد على مبادئ وإجراءات مثبتة بنتائج الأبحاث [8,9,10]. مؤخراً اهتمت العديد من الدراسات بتقنية الحقن وخلصت تلك الدراسات إلى أن هذه التقنية تفيد في تحسين قدرة تحمل وسلوك أنواع مختلفة من التربة وأن المثبتات التقليدية (الإسمنت، الكلس، المواد الكيميائية، وغيرها) تفيد في تحسين سلوك التربة المدروسة، ويعتبر الإسمنت مادة الحقن الأكثر استخداماً في الدراسات السابقة، إذ أثبتت نتائج تلك الدراسات أن الحقن بالإسمنت يؤمن زيادة قدرة تحمل وتكثيف التربة الرملية، وأن مقاومة القص للتربة الرملية المحقونة بالإسمنت تزداد بازدياد نسبة الاسمنت المئوية وأيضاً فترة المعالجة [11,12,13,14,15,16]، لكن جميع الدراسات المذكورة استخدمت مواد تقليدية مكلفة اقتصادياً ويجب أخذ ذلك بعين الاعتبار عند استخدامها. لذلك تم التركيز في هذا البحث على استخدام مادة حقن بديلة عن مواد الحقن التقليدية؛ وهي مادة غبار أفران الإسمنت (CKD) الناتجة عن صناعة الإسمنت والتي يُشكل تراكمها خطراً بيئياً وصحياً ويحتاج طمرها لكلفة اقتصادية كبيرة ومساحات شاسعة [17,18]. لقد أُجريت العديد من الأبحاث منها [19,20,21] لاستكشاف تأثير خلط نسب مختلفة من (CKD) على

خواص الترب الرملية بأنواعها وخلصت تلك الأبحاث إلى أن إضافة (CKD) للترب المدروسة يُحسن الخصائص الفيزيائية والميكانيكية ويُخفّض النفاذية، وأن قدرة تحمل الترب المدروسة تزداد بزيادة نسبة (CKD) وبزيادة زمن المعالجة، كما أن خلط التربة الرملية بغبار أفران الإسمنت يحسن الخواص الهندسية للتربة المعالجة بشكل كبير ويحقق فوائد بيئية واقتصادية، ولكن جميع الأبحاث المذكورة استخدمت تقنية الخلط لدراسة تأثير (CKD) كمادة مثبته، لذلك قمنا في هذا البحث باستخدام تقنية الحقن التغلطي (Permeation Grouting) لتحسين مقاومة القص لتربة التأسيس الرملية في المنطقة الساحلية، إذ تُعد مقاومة التربة للقص من أهم الخصائص الميكانيكية عند تصميم أساسات المنشآت [22].

أهمية البحث وأهدافه:

- معالجة مشاكل الترب الرملية في المنطقة الساحلية باستخدام مادة تثبيت محلية غير تقليدية وغير مكلفة اقتصادياً ومتوفرة بكثرة.
- استخدام تقنية الحقن بغبار أفران الإسمنت بدلاً من استخدام الطرق التقليدية ذات الكلفة العالية عند التأسيس على الترب الرملية ضعيفة التحمل (استبدال التربة السيئة بأخرى أفضل، الأساسات العميقة،.. إلخ).
- الاستغناء عن استخدام المواد الصناعية المكلفة اقتصادياً في تحسين الترب الرملية.
- إن الاستفادة من مادة (CKD) في تحسين التربة، سيؤدي للتخلص من الكميات الهائلة لمخلفات معامل الإسمنت في سوريا، والتي تضر بالصحة كون مواقع المعامل قريبة من مناطق مأهولة بالسكان، والتي أيضاً تهدد البيئة وتشكل عبء على عملية صناعة الإسمنت المحلية.

يهدف البحث إلى:

- 1- دراسة تأثير تغيير نسبة % (CKD) في معلق الحقن على مقاومة القص وبارامترات القص (C, ϕ) للتربة الرملية المدروسة.
- 2- دراسة تأثير تغيير نسبة الماء لغبار الإسمنت (W: CKD) في معلق الحقن على مقاومة القص وبارامترات القص (C, ϕ) للتربة الرملية المدروسة.
- 3- دراسة تأثير مدة المعالجة على مقاومة القص وبارامترات القص (C, ϕ) 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 طُبقت على عينات التربة الرملية الطبيعية قبل المعالجة بالحقن.
- 2- تحديد خواص غبار أفران الإسمنت المستخدم من خلال التجارب المخبرية التي طُبقت 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، ومن ثم تحضير العينات المحقونة بعد انتهاء كل عملية حقن.
- 4- إجراء تجارب القص المباشر على عينات التربة الرملية الطبيعية الغير معالجة وعلى عينات التربة المحقونة بمعلق غبار أفران الإسمنت بعد انقضاء فترة المعالجة اللازمة.

1- مواد البحث:

• التربة الرملية: بسبب الانتشار الواسع للتربة الرملية في سوريا بشكل عام وفي المنطقة الساحلية بشكل خاص؛ قمنا بدراسة تأثير حقن مادة (CKD) على مقاومتها للقص، وقد أُحضرت عينات التربة 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. يبين الجدول (1) الخواص الفيزيائية والميكانيكية للتربة الرملية الطبيعية حيث أُجريت جميع التجارب وفق مواصفات ASTM [23]، ويبين الشكل (2) منحني التدرج الحبي لهذه التربة.

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

المواصفات	القيمة
الرطوبة (%)	2.6
الوزن النوعي (Gs)	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 ($\gamma_{d\max} (kN/m^3)$)	16.7
الوزن الحجمي الجاف الأصغري ($\gamma_{d\min} (kN/m^3)$)	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 الانحناء C_Z	0.82
نسبة المار من المنخل 200 (%)	0
تصنيف التربة بحسب (USCS)	تربة رملية فقيرة التدرج الحبي (sp)

• غبار أفران الإسمنت: وهو عبارة عن مُنتج ثانوي يُنتج بكميات كبيرة أثناء تصنيع الإسمنت البورتلاندي العادي، تختلف 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. إن التقدم التكنولوجي خفّض من كمية (CKD) المنتج أثناء عمليات تصنيع الإسمنت، لكن من غير الممكن تخفيضه أكثر وذلك بسبب قضايا تتعلق بكفاءة عملية إنتاج الإسمنت [17,24]، إذ أنه في الفرن النموذجي: كل

طن كلينكر يولد حوالي (0.06-0.07) طن (CKD) [19] وهي كمية مهدورة ضخمة جداً بالنسبة لأي معمل إسمنت في العالم وتشكل عبئاً على البيئة والصحة، لذلك من المفيد اقتصادياً الاستفادة من مادة (CKD) التي تسبب خسارة مالية هامة لصناعة الإسمنت المحلية. في هذا البحث تم استخدام غبار أفران الإسمنت (CKD) المنتج من معمل إسمنت طرطوس، وقد تم إجراء تحليل كيميائي وتحليل حبي لعينات منه في المخبر الموجود بمعمل إسمنت طرطوس. يوضح الجدول (2) نتائج التحليل الكيميائي كما يوضح الجدول (3) بعض الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لغبار الإسمنت، ويبين الشكل (2) منحنى التدرج الحبي لغبار الإسمنت المستخدم في الدراسة، والشكل (3) المناخل المستخدمة للتحليل الحبي لغبار الإسمنت.

الجدول (2): التحليل الكيميائي لغبار الإسمنت المستخدم.

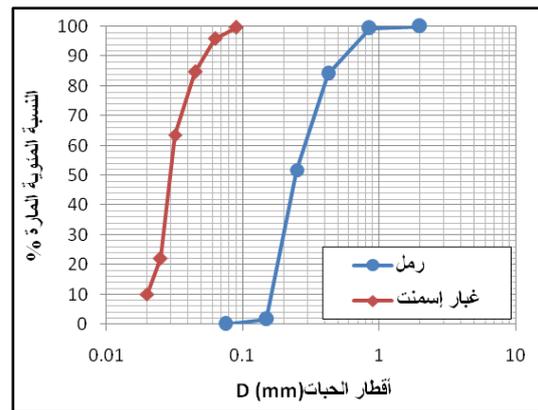
المركب	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I
الوزن (%)	61.88	21.25	4.6	4.1	2.71	3.05	0.61	0.18	1.03

الجدول (3): 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 ميكرون (%)	10.142



الشكل (3) المناخل المستخدمة للتحليل الحبي لغبار الإسمنت.



الشكل (2): منحنى التدرج الحبي للمواد المستخدمة في البحث.

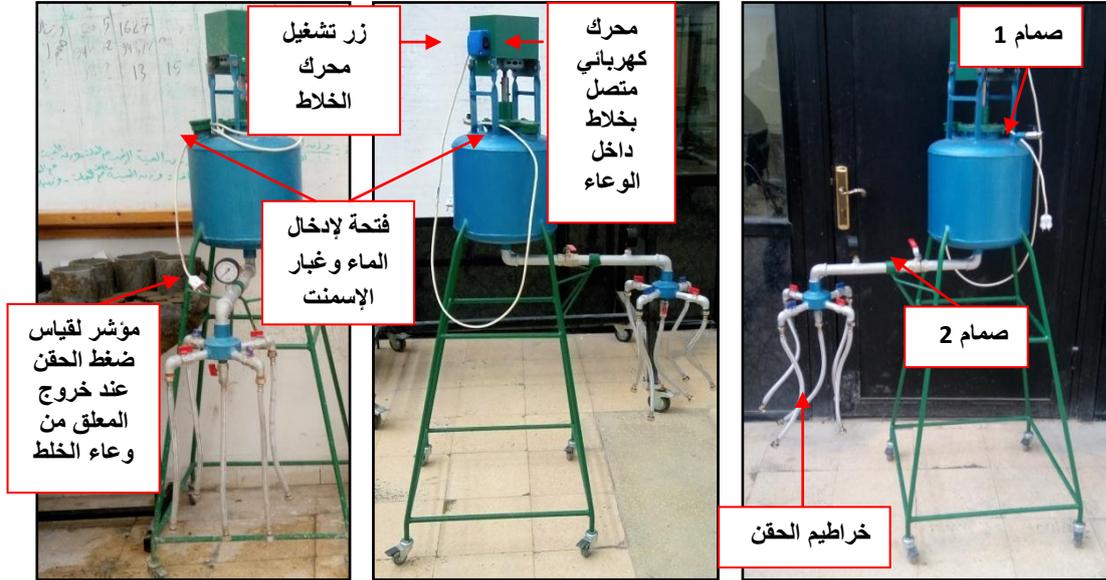
2- الأجهزة والأدوات المستخدمة:

لإنجاز البحث قمنا بتصميم وتصنيع نموذج حقن مخبري يؤمن تنفيذ الحقن بدقة ويسر، ويحاكي عملية الحقن في الموقع ويتألف من المعدات والتجهيزات التالية:

- 1- حوض قابل للفك والتركيب لوضع التربة الرملية فيه، تم تصنيعه من مادة الفيبر الشفاف القاسي والحديد ليتحمل الضغوط العالية في تجربة التحميل، أبعاده (30cm x 30cm x 38cm)، مبين في الشكل (4).
- 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، وبداخله خلاط يتصل بمحرك كهربائي خارجي، يتم في هذا الوعاء خلط معلق الحقن (غبار أفران الإسمنت والماء وفق نسب (W:CKD) المدروسة) آلياً قبل عملية الحقن وطيلة فترة الحقن، الشكل (5).
- 3- خراطيم الحقن الواصلة بين وعاء الخلط وأنايب الحقن الشكل (6).
- 4- أنايب 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 (6).
- 5- ضاغط هواء + منظم للضغط، الشكل (7).



الشكل (4): حوض التربة المحقونة.



الشكل (5): وعاء خلط معلق الحقن بداخله.



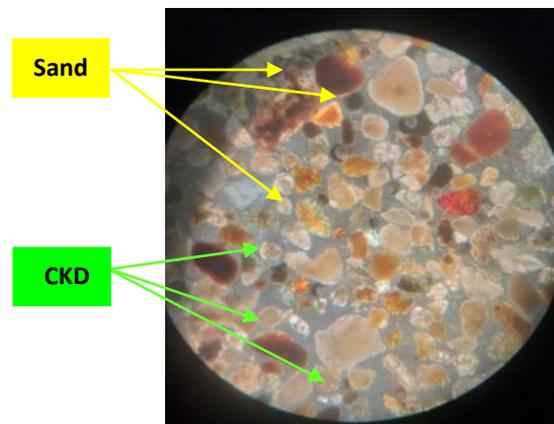
الشكل (7): ضاغط الهواء + منظم للضغط.



الشكل (6): خراطيم الحقن وأنابيب الحقن المثقبة.

3- تنفيذ عملية الحقن في المخبر:

من أجل تحضير العينات المحقونة تم الحقن بمعلق (CKD) بطريقة حقن التغلغل كما يلي: أولاً يتم التأكد من جفاف الحوض تماماً ثم يُدهن بالزيت، من ثم توضع أنابيب الحقن على ارتفاع (5cm) من قاع الحوض على مسامير مثبتة بقاعدة الحوض المعدنية مهمتها تحديد مكان كل أنبوب، ويوضع المُحدد وهو عبارة عن إطار معدني علوي للمحافظة على شاقولية وتباعد الأنابيب كما في الشكل (4). يتم تجفيف التربة في فرن درجة حرارته (105) درجة مئوية لمدة (24) ساعة، ثم يتم سكبها من خلال قمع من ارتفاع ثابت عند أعلى الحوض، فيسقط الرمل في الحوض سقوطاً حراً وبذلك تتم تعبئة الحوض بالتربة بدون أي إزاحة للأنابيب الأربعة. بعد ذلك يتم 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 وتوضع في وعاء الخلط مع ما يناسبها من الماء بحسب نسبة الخلط المدروسة {W:CKD= (2:1, 4:1, 6:1, 8:1, 10:1)} ويتم إدخالهم عبر الفتحة الخاصة بإدخال مواد معلق الحقن لوعاء الخلط المبين في الشكل (5) وبعد إغلاق الفتحة بإحكام، يتم تشغيل المحرك المتصل بالخلط داخل وعاء الخلط ليتم المزج جيداً قبل وخلال عملية الحقن لتفادي انفصال ذرات الغبار عن الماء في المعلق. يقوم ضاغط الهواء بضخ الهواء إلى وعاء الخلط تحت ضغط ثابت (1.5- 2) bar فعند فتح الصمام (1) يُضخ الهواء المضغوط إلى وعاء الخلط، ثم يُفتح الصمام (2) فيُضخ المعلق تحت الضغط داخل خراطيم الحقن الأربعة ومنها لأنابيب الحقن، ومن خلال ثقب هذه الأنابيب إلى التربة، وبذلك يتم انتشار معلق الحقن ضمن مسامات التربة الشكل (8).



الشكل (8): صورة مجهرية لتغلغل معلق الحقن في التربة الرملية بعد (28) يوم.

نلاحظ من الشكل (8) تغلغل معلق الحقن ضمن فراغات التربة وانتشاره أفقياً ووصوله لأطراف العينة يدل على جودة عملية الحقن.

4- تحضير العينات لتجربة القص المباشر:

إن تجربة القص المباشر المستوي من أهم الطرق المخبرية لدراسة مقاومة التربة للقص، لذلك قمنا بعد انتهاء كل عملية حقن مباشرةً بتحضير (6) عينات للقص من أجل كل نسبة مدروسة، وذلك باستخدام حلقات بلاستيكية دائرية المقطع لها نفس قطر وارتفاع حلقة القص المعدنية النظامية ($D = 6.25\text{cm}$) ($H = 2\text{cm}$) الشكل (9)؛ إذ تم غرز الحلقات البلاستيكية في عينة التربة المحقونة، وأُقيت الـ (6) عينات للمعالجة في المخبر لمدة (28,7) يوم كما يبين الشكل (10).



الشكل (9): حلقة القص البلاستيكية.

الشكل (10): بعض العينات المحضرة فور عملية الغرز في التربة المحقونة.

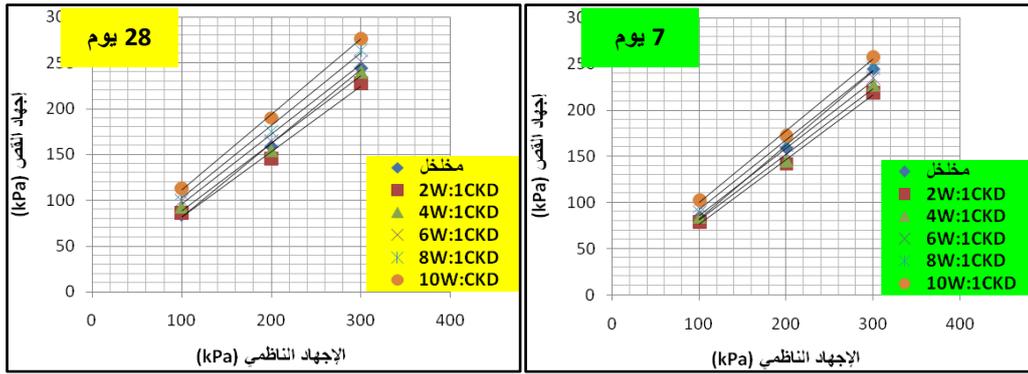
تجربة القص المباشر:

لدراسة تأثير نسب % (CKD) و (W:CKD) وزمن المعالجة، على مقاومة وبارامترات القص للتربة المدروسة، قمنا بإجراء تجارب القص المباشر على عينات التربة الرملية قبل وبعد المعالجة بالحقن، إذ قمنا بإنزال العينات المأخوذة بالغرز على التوالي في علبة القص بعد انقضاء فترة المعالجة المحددة من أجل إجراء التجربة. تم تنفيذ تجارب القص وفق المواصفة (ASTM D3080) وباستخدام جهاز القص المباشر المستوي الموجود في مخبر ميكانيك التربة بجامعة تشرين.

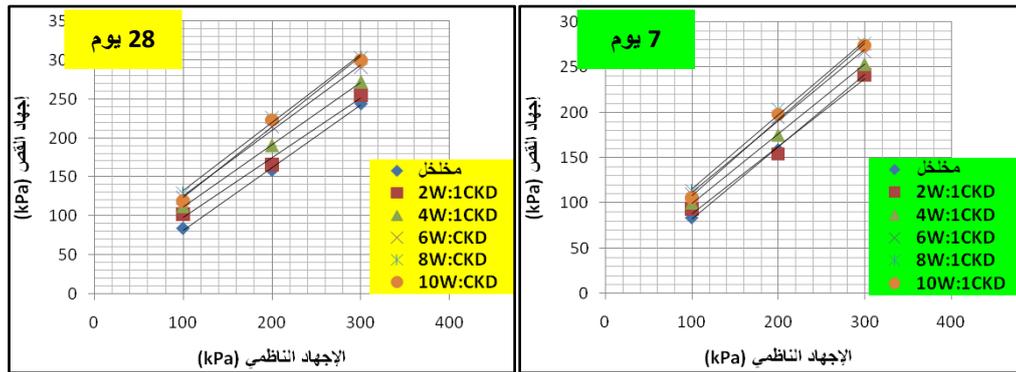
قمنا بتكرار تجربة القص على ثلاث عينات من أجل كل نسبة وكل زمن معالجة، وذلك بتطبيق إجهادات ناظرية مختلفة $(100 - 200 - 300) \text{ kN/m}^2$ على التوالي وبتطبيق إجهاد أفقي متزايد حتى الانهيار وبسرعة ثابتة مقدارها (5 mm/min) من أجل كل إجهاد ناظمي. نقدم فيما يلي نتائج تجارب القص المنجزة على عينات التربة الطبيعية، وعلى (180) عينة 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 { (90) عينة من أجل مدة معالجة (7) يوم و (90) عينة من أجل مدة معالجة (28) يوم }.

النتائج والمناقشة:

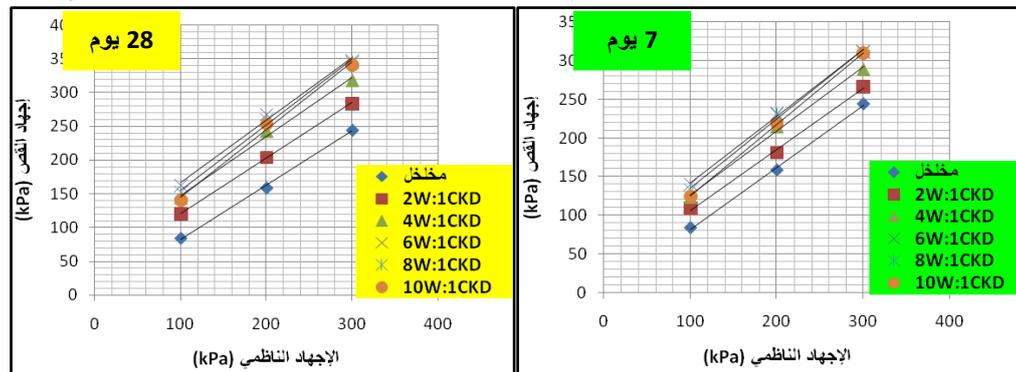
1- منحنيات إجهادات القص المقابلة للإجهادات الناظرية من أجل جميع النسب % (CKD) ونسب (W:CKD) المدروسة وزمني المعالجة:



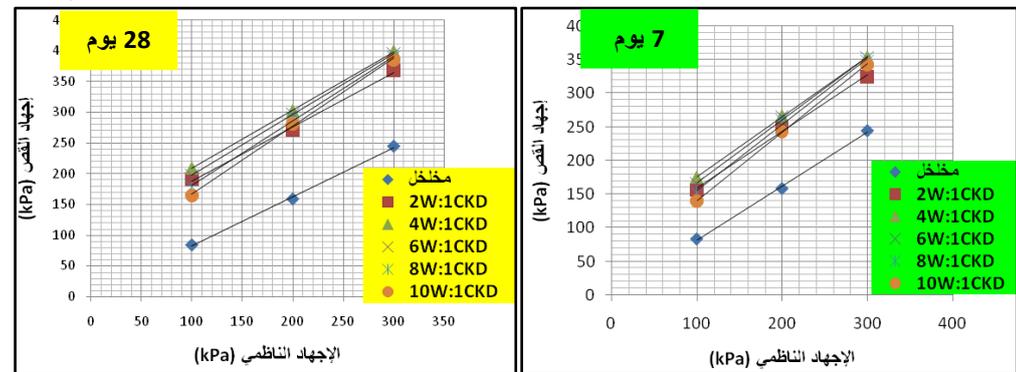
الشكل (11). مستقيمات كولومب من أجل نسبة غبار الإسمنت (CKD=2%) ونسب (W:CKD) المختلفة وزمني المعالجة.



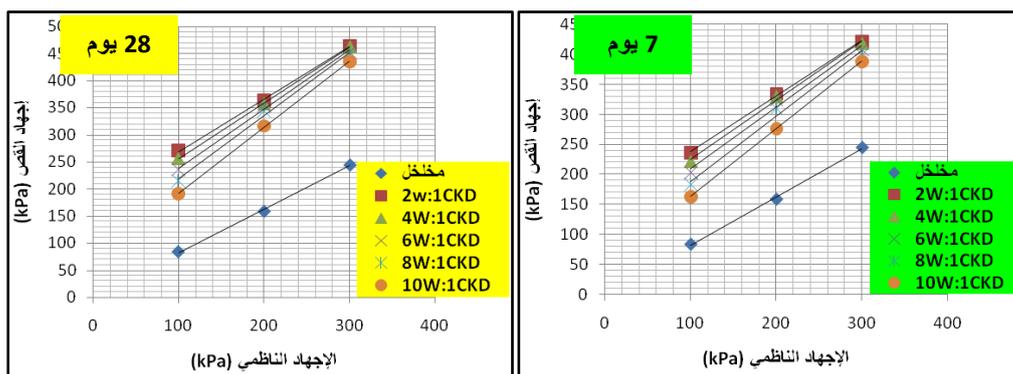
الشكل (12). مستقيمات كولومب من أجل نسبة غبار الإسمنت (CKD=4%) ونسب (W:CKD) المختلفة وزمني المعالجة.



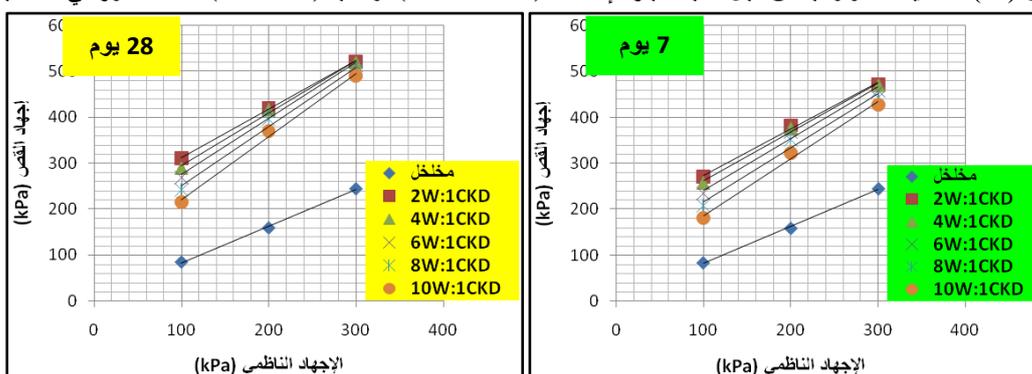
الشكل (13). مستقيمات كولومب من أجل نسبة غبار الإسمنت (CKD=6%) ونسب (W:CKD) المختلفة وزمني المعالجة.



الشكل (14). مستقيمات كولومب من أجل نسبة غبار الإسمنت (CKD=8%) ونسب (W:CKD) المختلفة وزمني المعالجة.



الشكل (15). مستقيمات كولومب من أجل نسبة غبار الإسمنت (CKD=10%) ونسب (W:CKD) المختلفة وزمني المعالجة.

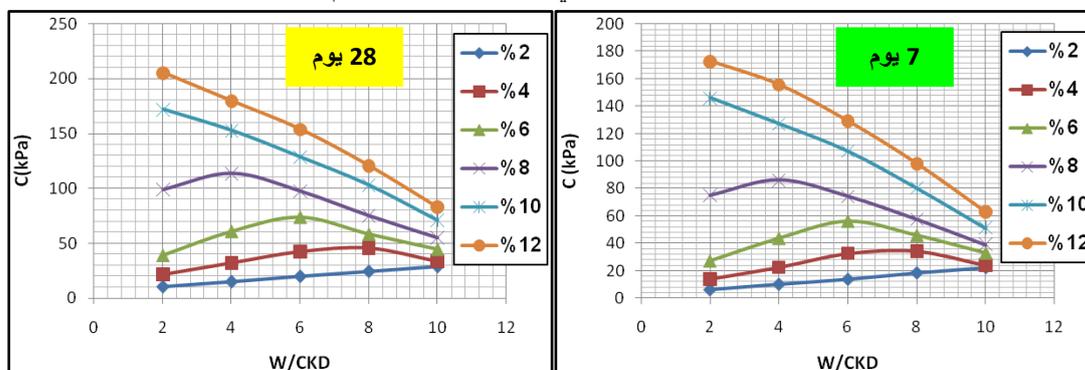


الشكل (16). مستقيمات كولومب من أجل نسبة غبار الإسمنت (CKD=12%) ونسب (W:CKD) المختلفة وزمني المعالجة.

تُبين الأشكال (11,12,13,14,15,16) المخططات التي تمثل العلاقة بين الإجهادات الناطمية المطبقة والإجهادات القاصة الأعظمية المقابلة لها، برسم تلك المخططات حصلنا على قيمة بارمترتي القص (C, ϕ) الواردين في معادلة القص التي اقترحها العالم كولومب $[\tau = C + \sigma \tan \phi]$ ، وسنعرض النتائج من أجل جميع النسب المدروسة مع تبيان تأثير تغيّر الزمن ونسبة (CKD)% و (W:CKD) على هذه البارمترات.

2- تأثير تغيير نسبة (W:CKD) في معلق الحقن على التماسك من أجل نسب (CKD)% المدروسة وزمني المعالجة:

وجدنا بنتيجة تجربة القص على التربة الطبيعية أن تماسك التربة الطبيعية ($C=2.083$ kPa) وهو تماسك ظاهري مهمل كون التماسك الحقيقي للرمل المفكك يساوي الصفر. يبين الشكل (17) تغير التماسك بعد المعالجة بجميع نسب (CKD)% ونسب (W:CKD) المدروسة من أجل مدتي المعالجة (28,7) يوم.



الشكل (17). تغير التماسك مع تغير نسبة (W/CKD) من أجل نسب (CKD)% المدروسة ومن أجل مدتي معالجة.

نلاحظ من الشكل (17) أنه:

- يزداد التماسك للتربة المعالجة بالحقن بازياد زمن المعالجة من أجل جميع نسب غبار الإسمنت المدروسة.
- عند الحقن بنسب غبار الإسمنت المرتفعة (10%,12%) ينقص التماسك بازياد نسبة (W:CKD) في معلق الحقن وذلك من أجل مدتي المعالجة (7,28) يوم.
- عند الحقن بنسب الغبار (4%,6%,8%) يزداد التماسك بازياد نسبة (W:CKD) ومن ثم يعاود الانخفاض؛ فهو يكون أعظمي عند النسبة (W:CKD=8:1) من أجل (CKD=4%)، وأعظمي عند (W:CKD=6:1) من أجل (CKD=6%)، وأعظمي عند (W:CKD=4:1) من أجل (CKD=8%).
- عند الحقن بالنسبة (CKD=2%) وجدنا أن التماسك يزداد بازياد نسبة (W:CKD) في معلق الحقن.
- نستنتج أنه من أجل كل نسبة (CKD)% هناك نسبة (W:CKD) تعطي أفضل قيمة للتماسك كما يبين الجدول (4)، فقد وجدنا أن معلق الحقن يكون بقوامه الأفضل عند نسبة (W:CKD) الأفضل المقابلة لكل نسبة غبار إسمنت، وقبل نسبة (W:CKD) الأفضل يكون لزجاً وبعدها يكون مائعاً.

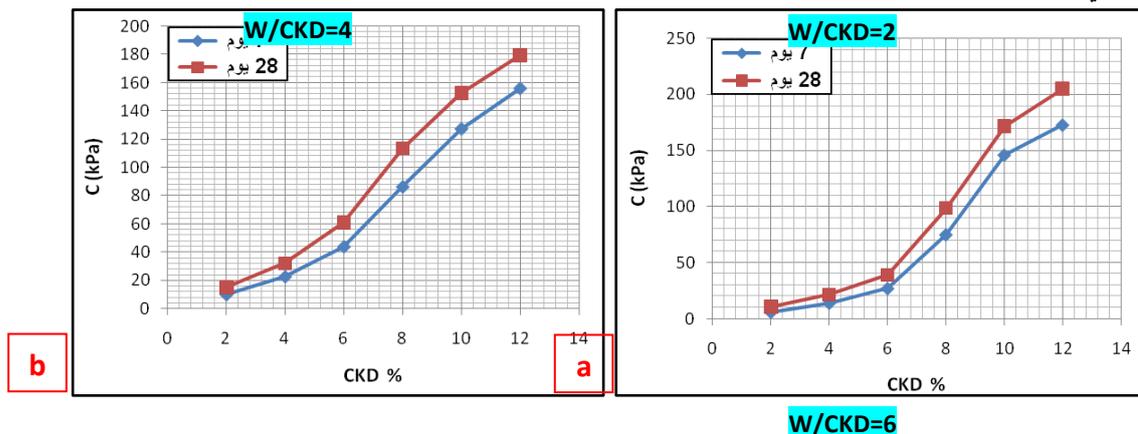
الجدول (4) قيمة التماسك من أجل كل نسبة من نسب (CKD)% ونسبة (W:CKD) الأفضل المقابلة لها عند زمن المعالجة (28) يوم.

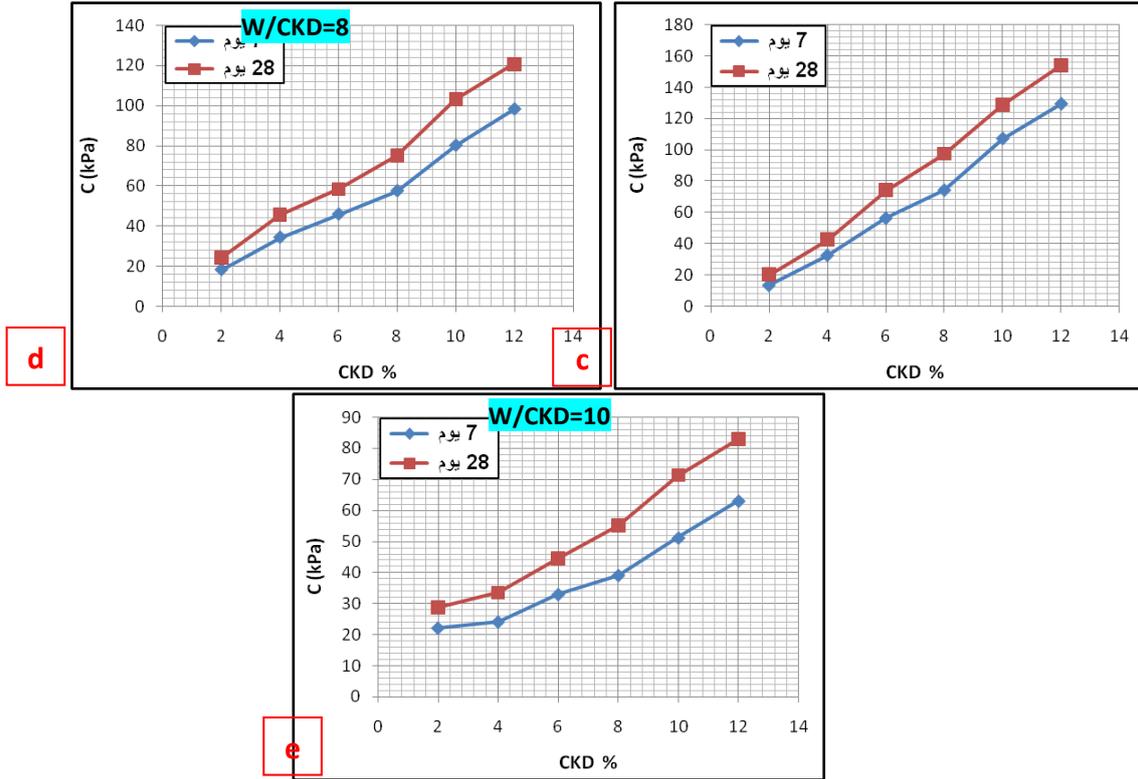
CKD%	%0	%2	%4	%6	%8	%10	%12
W:CKD	----	10:1	8:1	6:1	4:1	2:1	2:1
C (kPa)	2.08	28.75	45.72	74.06	113.5	171.9	205.4
C_T/C_N	----	13.80	21.95	35.55	54.49	82.53	98.60

حيث: C_N يرمز لتماسك التربة الطبيعية و C_T يرمز لتماسك التربة المعالجة.

نلاحظ من الجدول (4) ازياد كبير في التماسك خصوصاً عند النسب العالية لغبار الإسمنت، ويُعزى ذلك إلى أن معلق الحقن يتغلغل في فراغات التربة ويملأها ثم يتصلب فيقوم بربط حبيبات التربة مع بعضها البعض فيصبح هناك تماسك في التربة تزداد قيمته بازياد نسبة غبار الإسمنت وزمن المعالجة.

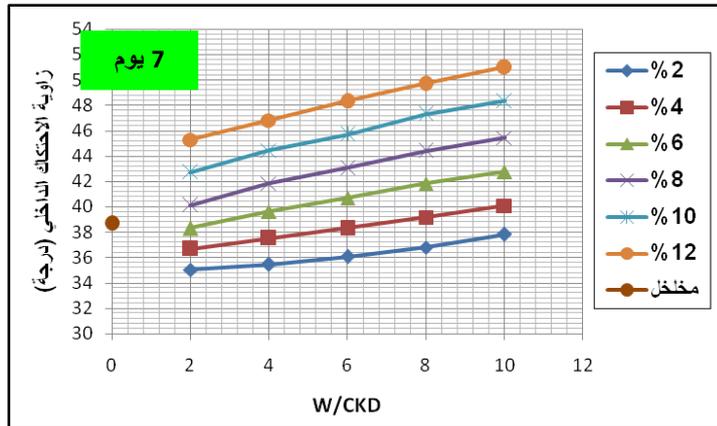
3- تأثير تغير نسبة (CKD)% في معلق الحقن على التماسك من أجل نسب (W:CKD) المدروسة وزمني المعالجة:



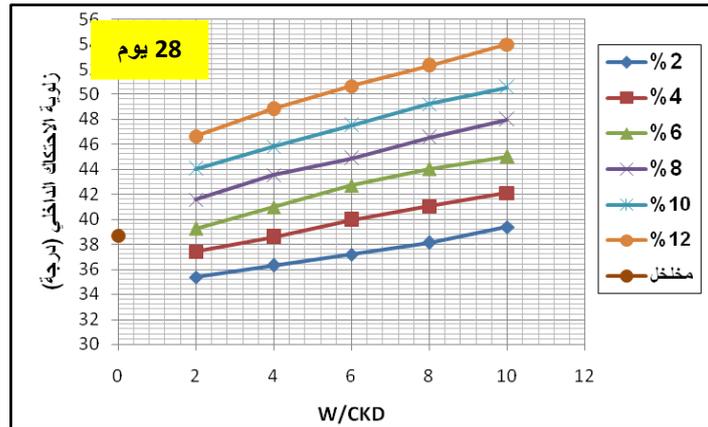


الشكل (18). تغير التماسك مع تغير نسبة (CKD)% من أجل نسب (W/CKD) المدروسة ومن أجل زمني المعالجة.

نلاحظ من الشكل (18) أنه يزداد (C) بازدياد (CKD)% في معلق الحقن من أجل زمني المعالجة وجميع نسب (W/CKD).
 4- تأثير تغير نسبة (W:CKD) في معلق الحقن على زاوية الاحتكاك الداخلي (ϕ) من أجل نسب (CKD)% المدروسة وزمني المعالجة:



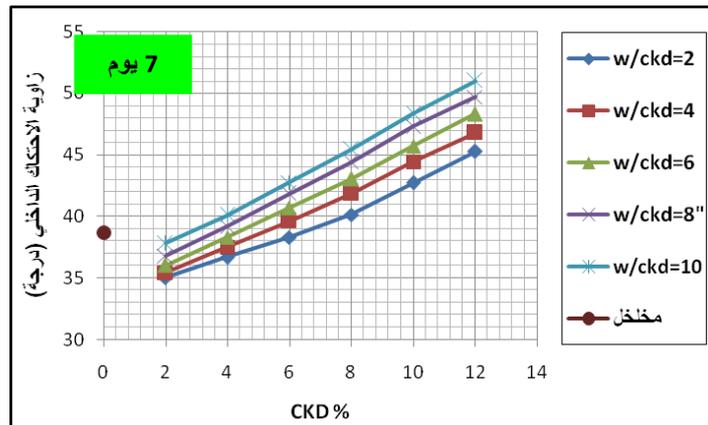
الشكل (19). تغير (ϕ) مع تغير نسبة (W/CKD) من أجل نسب (CKD)% المدروسة ومن أجل زمني معالجة.



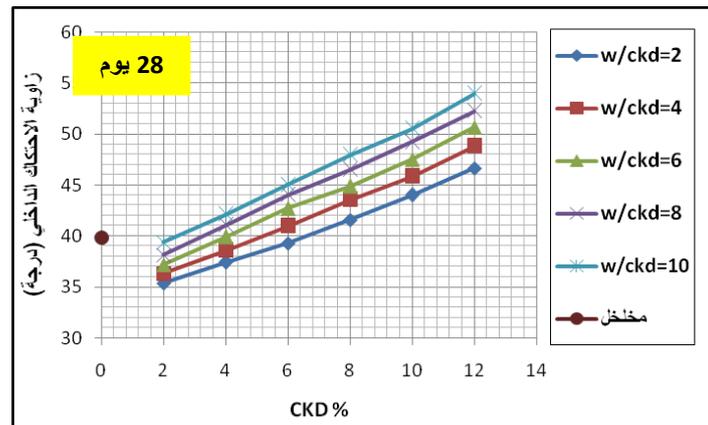
الشكل (20). تغير (ϕ) مع تغير نسبة (W/CKD) من أجل نسب (CKD) المدروسة ومن أجل زمني معالجة.

من الشكلين (19,20) نجد أن (ϕ) تزداد مع تزايد نسبة (W/CKD) وتزايد الزمن من أجل كل نسبة مئوية من نسب غبار الإسمنت.

5- تأثير تغير نسبة (CKD) في معلق الحفن على زاوية الاحتكاك الداخلي (ϕ) من أجل نسب (W:CKD) المدروسة وزمني المعالجة:

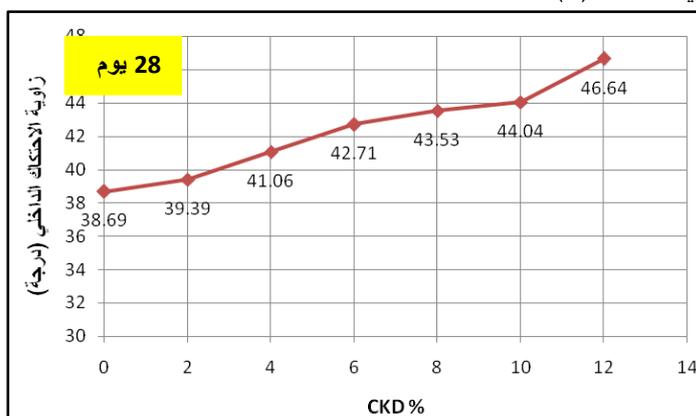


الشكل (21). تغير (ϕ) مع تغير نسبة (CKD) من أجل نسب (W/CKD) المدروسة ومن أجل مدة معالجة (7) يوم.



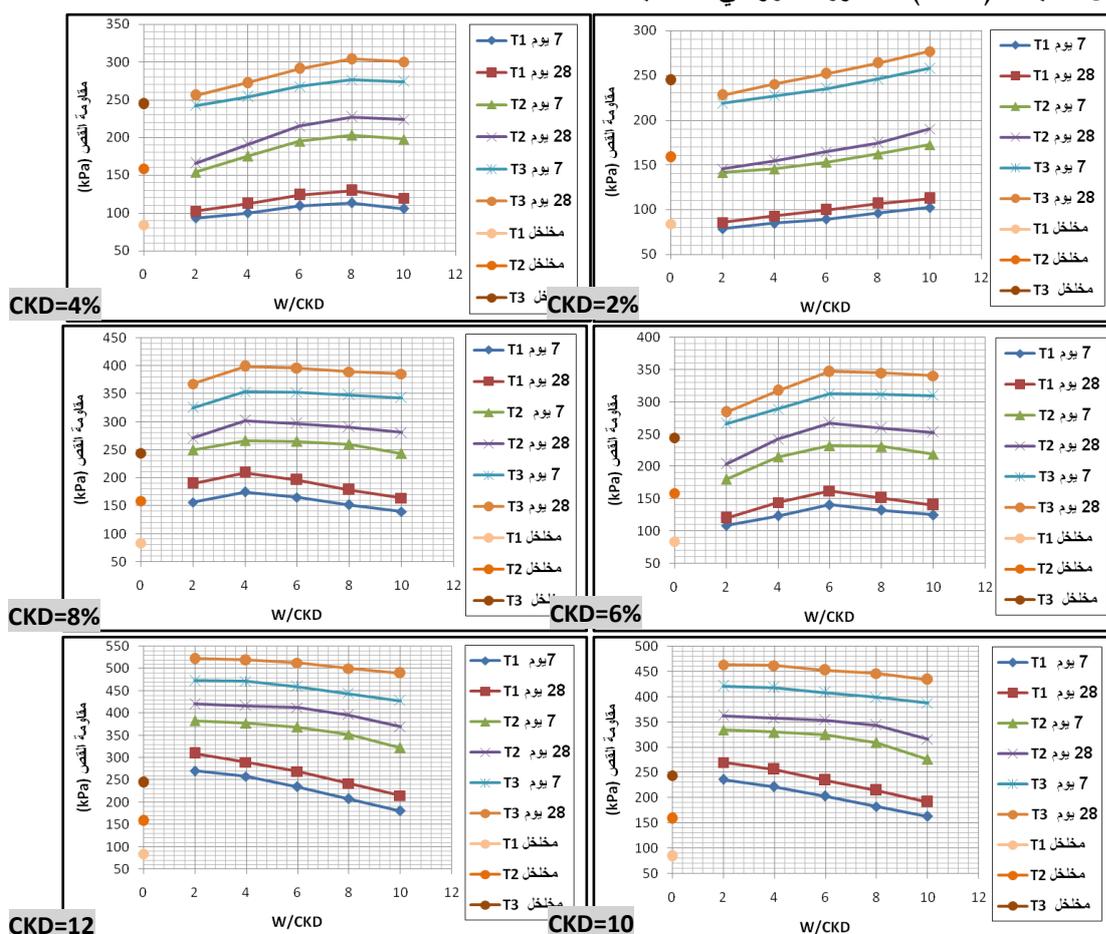
الشكل (22). تغير (ϕ) مع تغير نسبة (CKD) من أجل نسب (W/CKD) المدروسة ومن أجل مدة معالجة (28) يوم.

من الشكلين (21،22) نجد أن (ϕ) تزداد بشكل خطي مع تزايد $(CKD)\%$ وأيضاً تزداد (ϕ) مع تزايد الزمن من أجل جميع نسب (W:CKD)، وبين الشكل التالي تغير قيم (ϕ) مع تغير $(CKD)\%$ من أجل نسب (W:CKD) الأفضل المذكورة أعلاه في الجدول (4).



الشكل (23). ازدياد قيمة زاوية الاحتكاك مع تغير نسب (CKD) من أجل نسبة (W:CKD) الأفضل وزمن معالجة (28) يوم.

6- تأثير تغير نسبة (W:CKD) في معلق الحقن على مقاومة القص من أجل الإجهادات الناعمة الثلاثة ومن أجل نسب $(CKD)\%$ المدروسة وزمني المعالجة:



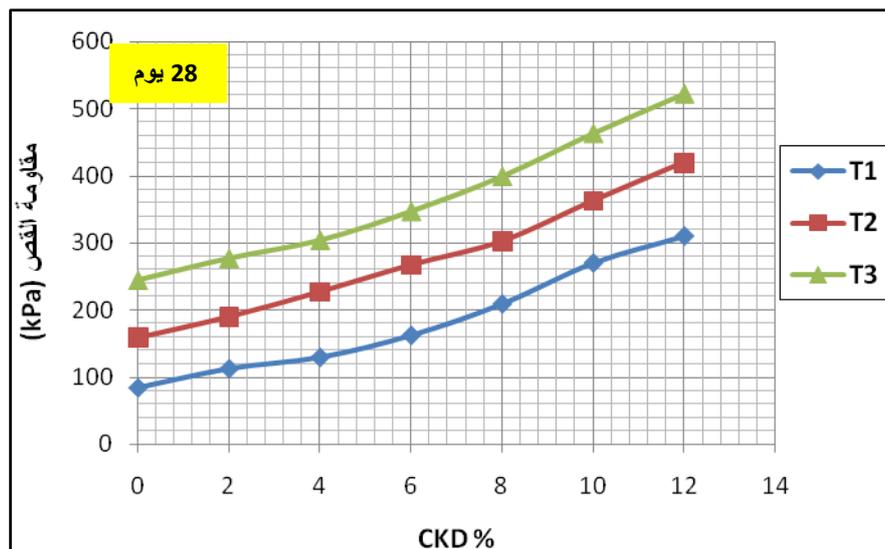
الشكل (24). تأثير نسبة (W/CKD) على مقاومة القص للعينات المعالجة من أجل زمني معالجة ومن أجل نسب $(CKD)\%$ حيث $(T1, T2, T3)$ إجهادات القص المقابلة للإجهادات الناعمة ($100, 200, 300 \text{ kN/m}^2$) على التوالي.

نستنتج من الشكل (24) أنه:

- تزداد مقاومة القص للتربة المعالجة بالحقن بازدياد الإجهاد الناظمي المطبق وزمن المعالجة وذلك من أجل جميع نسب غبار الإسمنت المدروسة.
- وأنه عند الحقن بنسب غبار الإسمنت المرتفعة (10%, 12%) تنقص مقاومة القص بازدياد نسبة (W:CKD) في معلق الحقل وذلك من أجل زمني المعالجة.
- أما عند الحقن بنسب الغبار (4%, 6%, 8%) تزداد مقاومة القص بازدياد نسبة (W:CKD) في معلق الحقل 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 زمني المعالجة.
- وعند الحقن بنسبة الغبار (CKD=2%) وجدنا أن مقاومة القص تزداد بازدياد نسبة (W:CKD) في معلق الحقل وذلك من أجل زمني المعالجة.
- إذاً من أجل كل نسبة (CKD)% هناك نسبة (W:CKD) تعطي أفضل قيمة لمقاومة القص كما يبين الجدول (5) والشكل (25)، لأن معلق الحقل يكون بقوامه الأفضل عند نسبة (W:CKD) الأفضل المقابلة لكل نسبة غبار إسمنت، وقبل نسبة (W:CKD) الأفضل يكون لزجاً ويعدها يكون مائعاً.

الجدول (5). قيمة مقاومة القص من أجل نسب (CKD)% ونسبة (W:CKD) الأفضل المقابلة لها عند (28) يوم.

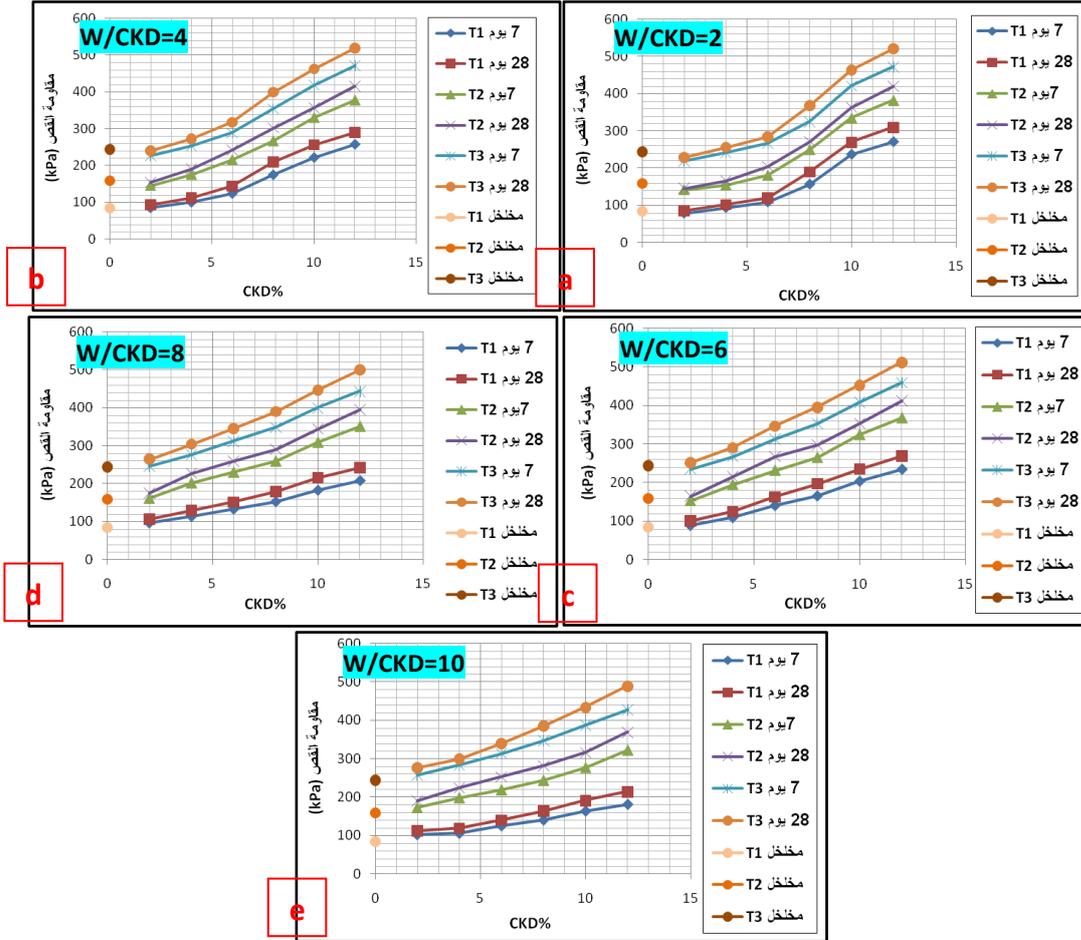
CKD%	%0	%2	%4	%6	%8	%10	%12
W:CKD	----	10:1	8:1	6:1	4:1	2:1	2:1
T1 (kPa)	84.06	112.5	129.38	162.19	209.06	270	310
T2 (kPa)	158.75	190	227.19	267.19	302.5	362.81	420
T3 (kPa)	244.38	276.88	303.75	346.88	399.06	463.44	521.88



الشكل (25). ازدياد مقاومة القص مع تغير نسب (CKD) من أجل نسب (W:CKD) الأفضل وزمني معالجة.

نلاحظ من الشكل (25) والجدول (5) ازدياد مقاومة القص بازياد نسبة غبار الإسمنت، وتُعزى الزيادة الحاصلة في مقاومة القص لتغلغل معلق الحقن الذي يملأ الفراغات ويحسن الترابط والتلاصق بين جزيئات التربة مما يؤدي لزيادة قيم مقاومة القص بحسب قيمة غبار الإسمنت.

7- تأثير تغير نسبة % (CKD) في معلق الحقن على مقاومة القص من أجل الإجهادات الناعمة الثلاثة ومن أجل نسب (W/CKD) المدروسة وزمني المعالجة:
يبين الشكل (26) أن قيم مقاومة القص تزداد بازياد نسبة % (CKD) وبازياد زمن المعالجة وذلك من أجل الإجهادات الناعمة الثلاثة ومن أجل جميع نسب (W:CKD) المستخدمة.



الشكل (26). تأثير نسبة % (CKD) على مقاومة القص للعينات المعالجة من أجل زمني المعالجة ومن أجل جميع نسب (W/CKD) حيث (T1, T2, T3) إجهادات القص المقابلة للإجهادات الناعمة (100, 200, 300 kN/m²) على التوالي.

نلاحظ من الجداول والمخططات الواردة أعلاه تحسناً كبيراً جداً في بارامترات ومقاومة القص للتربة الرملية المحقونة بمعلق غبار أفران الإسمنت وذلك بسبب التلاصق بين جزيئات الرمل الذي يسببه الحقن بمعلق غبار الإسمنت مما يجعل التربة المحقونة تتمتع بخواص جديدة وكأنها مادة وسطية بين الرمل والبيتون [5].
تتوافق نتائج البحث مع أبحاث سابقة [8,9,10] درست تحسين ترب رملية بالحقن بالإسمنت، مما يدل على أن فعالية غبار أفران الإسمنت تشبه إلى حد كبير فعالية الإسمنت في تحسين خصائص الترب الرملية، إضافة لكونه

يتميز عن الإسمنت بأنه أكثر نعومة مما يسمح لمعلق غبار الإسمنت بالتغلغل في التربة التي لا يمكن لمعلق إسمنت أن يدخل فراغاتها.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- 1- تزداد قيم مقاومة القص للتربة الرملية المعالجة بالحقن بازداد نسبة % (CKD) في معلق الحقن ويزداد مدة المعالجة.
- 2- تزداد قيم مقاومة القص للتربة الرملية المعالجة بالحقن بانخفاض نسبة (W/CKD) في معلق الحقن ويظهر ذلك بوضوح عند نسب % (CKD) العالية.
- 3- تزداد قيم تماسك التربة الرملية المعالجة بالحقن بازداد نسبة % (CKD) في معلق الحقن ويزداد مدة المعالجة وبتناقص نسبة (W/CKD) في معلق الحقن، وتكون نسبة الزيادة في التماسك عالية جداً عند النسب العالية لـ % (CKD).
- 4- تزداد قيم زاوية الاحتكاك الداخلي (ϕ) مع ازدياد كل من نسبة % (CKD) ونسبة (W/CKD) في معلق الحقن ومع ازدياد مدة المعالجة. ولكن الزيادة في قيمة (ϕ) طفيفة عند نسب % (CKD) المنخفضة.
- 5- وجدنا أنه من أجل كل نسبة من نسب غبار أفران الإسمنت هناك نسبة (W:CKD) تعطي أفضل مقاومة قص وتماسك، 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 مائلاً.
- 6- تأثير مدة المعالجة أكثر أهمية عند نسب % (CKD) العالية مقارنةً بنسب % (CKD) المنخفضة.

التوصيات:

- 1- نوصي باستخدام مادة غبار أفران الإسمنت لزيادة مقاومة التربة الرملية للقص كبديل متوفر وجيد واقتصادي لمادة الإسمنت البورتلاندي العادي.
- 2- نوصي باستخدام تقنية الحقن لتحسين مقاومة القص للتربة الرملية المفككة.
- 3- نوصي بالقيام بأبحاث إضافية لمعرفة تأثير الحقن بمعلق غبار أفران الإسمنت على أنواع أخرى من التربة.

References:

- [1] IBRAGIMOV, M. N. *Soil Stabilization With Cement Grouts*. Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. 42, No.2, 2005, 67-72.
- [2] PLESCAN, C.; ROTARU, A. *Aspects Concerning The Improvement of Soil Against Liquefaction*. Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, CONSTRUCTIONS. ARCHITECTURE Section. January 2010, 39-45.
- [3] DAYAKAR, P.; MARTINLUTHER, S.; ARUNYA, A. *Study on Effect of Cement Based HPMC Grout on bearing capacity of coarse grained*. International Journal of Computer & Organization Trends, Vol. 2 Issue 5 Number 1, Sep 2012, pp 20-28.
- [4] SIVAKUMAR, B. *Ground Improvement, Ground Treatment Using Grouting*. Lecture 20, NPTEL Course. Department of Civil Engineering Indian Institute of Since, 2015.
- [5] DANO, C.; HICHER, P. Y.; TAILLIEZ, S. *Engineering properties of grouted sands*, J Geotech Geoenviron Eng ASCE, 130(3), 2004, 328–338.

- [6] KAZEMIAN, S.; HUAT, B.B.K. *Assessment and Comparison of Grouting and Injection Method in Geotechnical Engineering*. European Journal of Scientific Research, Vol. 27, No. 2, 2009, 234-247.
- [7] RAJU, V.R.; VALLURI, S. *Practical Application Of Ground Improvement*. Symposium on Engineering of Ground & Environmental Geotechniques (SEG2). 2008.
- [8] KUMAR, T.G.S.; ABRAHAM, B.M.; SRIDHARAN, A.; JOSE, B.T. *Improvement of shear strength of loose sandy soils by grouting*, Proceedings of the ICE—Ground Improvement. 2013.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] RAMAN, K. V.; DAYAKAR, P.; RAJU, K. V. B. *Study on Permeation Grouting with Cement and Chebulic Myrobalan Grout in Sandy Soils*, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 4, Issue 6, June 2015, 4448-4456.
- [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] 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.
- [14] KHAN, N.; KHAN, IZAZ.; ULLAH, A.; YASIR, M.; NASEER, SH. *Performance Evaluation of Cement Grouting by Universal Testing Machine to Improve the Bearing Capacity of Sandy Soil*, Irrigation & Drainage Systems Engineering, Vol. 7, Issue 2, 2018.
- [15] GAMIL, Y.; BAKAR, I.; AHMED, K. *Simulation and Development of Instrumental Setup to Be Used for Cement Grouting of Sand Soil*, Italian Journal of Science & Engineering, Vol. 1, N. 1, June 2017, 16-27.
- [16] 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.
- [17] ADASKA, W. S; TAUBERT, D. H. *Beneficial uses of cement kiln dust*. 50th Cement Industry Technical Conference IEEE-IAS, Miami, USA, , May 19-22, 2008 Paper No. 1627.
- [18] MILLER, G. A; ZAMAN, M. *Field and Laboratory Evaluation of Cement Kiln Dust as A Soil Stabilizer*. Transportation Research Record, Transportation Record Bored, TRB, National Research Council, Washington, D.C., No.1714,2000, 25-32.
- [19] 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.
- [20] ELMASHAD, M. E. *Soil Improvement Using Cement Dust Mixture*. Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 58,2011,413-416.
- [21] ABDEL AZIZ, E. M; ALTOHAMY, A; TOWFEEK. A. *Physical and Chemical Properties for Using Cement Kiln Dust*. Journal of Engineering Science, Assiut University, Vol. 38, No.3, Egypt, 2010.
- [22] ROY, S; BHALLA, S. K. *Role of Geotechnical Properties of Soil in Civil Engineering Structures*. Resources and Environment, India, 7(4), 2017, 103-109.

- [23] American Society for Testing and Materials, ASTM Standard C33, 2015, Volume 04.08 Soil and Rock (I); D420-D5876.
- [24] 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.