

Experimental Study of the Relationship between the Content of Sand in Partially Expansive Clayey Soil and Both Direct Shear and Unconfined Compressive Strength

Dr. Mounzer Omran Alzawi*
Dr. Safwan abdallah**
Dr. Jihad Ibrahim***
Ammar Njeeb Alnmr****

(Received 22 / 1 / 2020. Accepted 17 / 8 / 2020)

□ ABSTRACT □

The mechanical behavior of the expansive clayey soil affects by the adding percentage of sand due to the different components of both the coarse part (sand) and the fine part (clay) which control the cohesion and friction of the soil. Strength properties are also affected by the density and water content of soil. In this research, direct shear and unconfined compressive strength tests were conducted for different percentages of sand with various densities and saturation degrees. It was found that the degree of saturation, dry density and the percentage of sand have a significant effect on the soil strength, the relationship between cohesion and unconfined compressive strength for all percentages of sand was also discussed. The results showed that the optimum percentage of adding sand should not be less than 30% for clayey soils.

Keywords: clay, additive material, direct shear, unconfined pressure, soil-water characteristic curve (SWCC) , partial saturation

* 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.

*** Professor, Department of Soil and Water Sciences , Faculty of agriculture, Tishreen University, Lattakia, Syria .

**** Postgraduate Student, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria . Ammar888999@hotmail.com

دراسة تجريبية للعلاقة بين محتوى التربة الانتفاخية المشبعة جزئياً من الرمل وبين مقاومتي القص المباشر والضغط الحر

* د. منذر عمران الزاوي

** د. صفوان عبد الله

*** د. جهاد إبراهيم

**** عمار نجيب النمر

(تاريخ الإيداع 22 / 1 / 2020. قُبل للنشر في 17 / 8 / 2020)

□ ملخص □

تتأثر السلوكية الميكانيكية للتربة الغضارية الانتفاخية بحسب نسبة الرمل المضافة بها نظراً لاختلاف مكونات كلاً من الجزء الخشن (الرمل) والجزء الناعم (الغضار الانتفاخي) اللذان يتحكمان بالتماسك والاحتكاك للتربة كما يتحكم بخصائص المقاومة أيضاً كلاً من الكثافة ومحتوى المياه. تمّ في هذا البحث إجراء تجارب القص المباشر المستوي والضغط الحر لنسب مختلفة من الرمل المضاف تحت كثافات ودرجات اشباع مختلفة وتبيّن أنّ لكل من درجة الاشباع ونسبة الرمل المضافة تأثير كبير على المقاومة كما تمت مناقشة العلاقة بين التماسك ومقاومة الضغط الحر لكل نسب الرمل المضافة واستنتج علاقة تربط بين التماسك ومقاومة الضغط غير المحصور. وتعتبر نسبة الرمل 30% هي النسبة المثلى التي يجب ألا تقل عنها نسبة الرمل في التربة الانتفاخية لتحقيق أفضل مقاومة عند الاشباع وتزيد هذه النسبة بانخفاض درجة الاشباع.

الكلمات المفتاحية: الغضار، الرمل (المواد المضافة)، القص المباشر، الضغط الحر (الانضغاط غير المحصور)، المنحني المميز تربة-مياه (منحني خاصية التربة-المياه)، الاشباع الجزئي.

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

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

*** أستاذ، قسم علوم التربة والمياه، كلية الهندسة الزراعية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

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

Ammar888999@hotmail.com

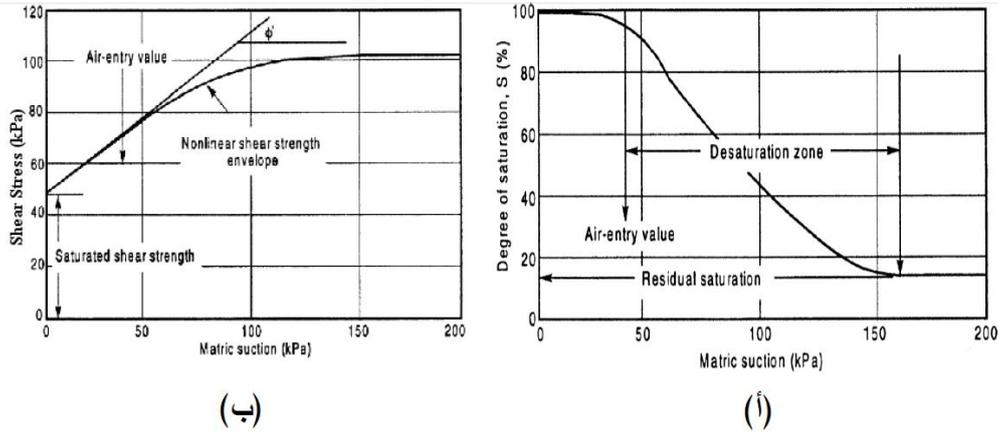
مقدمة:

الرمل هو مادة حبيبية طبيعية ونظراً لقدرة تحملها العالية يمكن أن تستخدم كمادة مالئة فعند خلط الرمل بالتربة المتماسكة بنسب متفاوتة تتغير خصائص اللدونة، والرص والمقاومة في التربة الخليطة (Louafi and Bahar., 2012^[14]; Roy, 2013^[17]; Khemissa et al., 2015^[10]; Hussein et al., 2018^[7]) التربة الناعمة بجزيئات أحشن منها، وبهذه الطريقة يتم تشكيل تدرج حبي أفضل للتربة فيزداد فيها التماسك والاحتكاك، وهذا يعني أن خلط التربة وضغطها بشكل صحيح في الموقع سوف يُحسن من قدرة تحملها. يهدف هذا البحث إلى تقييم نتائج تجارب القص المباشر والضغط الحر لترب انتفاخية مشبعة جزئياً مخلوطة بنسب مختلفة من الرمل.

تنتشر الترب الغضارية الانتفاخية على مساحات واسعة من أراضي الجمهورية العربية السورية وقد تتسبب بأضرار عالية الكلفة عند تأسيس المنشآت والطرق المقامة عليها، فعلى سبيل المثال قُدرت الكلف الناتجة عن تصدعات وانهار المباني والطرق المقامة على التربة الانتفاخية في الولايات المتحدة الأمريكية عام 1985م بحوالي 10مليارات دولار سنوياً، صرف نصفها على إصلاح الطرق وحدها (Steinberg, 1985^[18]). مما يستدعي المتابعة في تعميق الأبحاث المجراة على هذه الأنواع من الترب للحد من أضرارها .

جرب العديد من الباحثين مثل (Kaoua et al.1994^[9]; Bengraa et al. 2005^[2]; Lamara et al. 2006^[11]; Jjuuko et al. 2011^[8]; Chavali et al. 2014^[3]; Nagaraj. 2016^[15]) هذه الأبحاث قد بينت أنّ إضافة بعض المواد الخاملة تساهم في تحسين الترب الانتفاخية إلا أنّ كثيراً من الاستفسارات والأسئلة المفتوحة حول سلوكية التربة الانتفاخية المحسنة لا تزال بحاجة إلى مزيد من البحث، وقد قمنا في هذا السياق ضمن إطار هذا البحث بدراسة تأثير إضافة الرمل بنسب مختلفة على مقاومة التربة الانتفاخية.

تُفهم سلوكية التربة غير المشبعة بوضوح بواسطة المنحني المميز تربة-ماء (منحني خاصية التربة-الماء أو منحني الشد الرطوبي) (SWCC) soil-water characteristic curve، يُعبر المنحني المميز تربة -ماء عن العلاقة بين محتوى الماء واجهاد الامتصاص لعينة التربة (Fredlund and Rahardjo. 1993^[4]). يُحدد محتوى التربة من المياه عموماً بشكل كمي (قيمي) من حيث الرطوبة w ، أو محتوى المياه الحجمي θ التي تعرف بالنسبة بين حجم الماء الى الحجم الكلي للتربة"، أو درجة الاشباع S_r ، فعندما تتغير الحالة الرطوبية في التربة من درجة التشبع التام إلى حالة الجفاف، سيتغير التوزيع الطوري في التربة: تربة - ماء - هواء مع تغير الحالة الإجهادية، كما تقل مساحة التلاصق الرطبة بين الحبيبات أو الكتل الحبيبية مع تزايد إجهادات الامتصاص في التربة (زيادة الجفاف)، ويمكن القول إن ثمة علاقة بين التغيرات التي تحدث في مقاومة القص وبين مساحة التلاصق الرطبة بين الحبيبات أو التكتلات. وبمعنى آخر، توجد علاقة بين منحني خاصية التربة-الماء ومقاومة القص في التربة غير المشبعة (Fredlund and Rahardjo. 1993^[4]; Vanapalli et al.1996^[19]; Vanapalli et al. 1997^[20])، ويوضح الشكل (1) هذه العلاقة. تزداد مقاومة القص بشكل خطي حتى الوصول الى الحد الذي يدخل فيه الهواء، كما أن سرعة الجفاف تكون في قيمتها العليا بين قيمة دخول الهواء وإجهاد الامتصاص المتبقي، ويكون التزايد في هذه المرحلة غير خطي عموماً، بعد الحالة المتبقية يمكن أن تزداد مقاومة القص في التربة غير المشبعة أو تقل أو تبقى ثابتة نسبياً مع زيادة سرعة الجفاف بحسب نوع التربة. (Fredlund and Rahardjo. 1993^[4]; Fredlund et al.1995^[5]; Vanapalli et al. 1996^[19])



الشكل (1) : أ- منحنى خاصية التربة- الماء ب- مقاومة القص بالنسبة لمنحنى خاصية التربة- الماء (Vanapalli et al. 1996^[19])

اقترح (Fredlund and Rahardjo. 1993^[4]; Vanapalli et al. 1996^[19]) معادلة عامة غير خطية لتمثيل مقاومة القص غير المشبعة بالاعتماد على المنحنى المميز تربة-ماء ومعاملات مقاومة القص المشبعة، وتأخذ مجالاً لإجهاد الامتصاص بين (0-1000000) كيلوباسكال . (المعادلة (1)).

عندما تُجرى مقارنة بين معادلة مقاومة القص في التربة غير المشبعة مع معادلة التربة المشبعة يتضح أنّ معادلة مقاومة القص في التربة غير المشبعة هي تطوير لمعادلة التربة المشبعة نفسها حيث أضيف إليها متغيران لحالة الاجهاد وهما إجهاد الامتصاص ($u_a - u_w$) والإجهاد الناظمي الصافي (Net Normal Stress) ($\sigma - u_a$) ، بينما أُدخل متغير لإجهاد واحد هو الإجهاد الناظمي الفعّال ($\sigma - u_w$) .

تُظهر معادلة التربة غير المشبعة المعدلة انتقالاً تدريجياً نحو معادلة التربة المشبعة ، فكلما اقتربت التربة من حالة التشبع تعادّل الضغط المائي المسامي (u_w) مع ضغط الهواء المسامي (u_a) ، وبذلك يقترب إجهاد الامتصاص من الصفر ، وتتعدّم مُركبة الامتصاص في معادلة مقاومة القص في التربة غير المشبعة وتتحول المعادلة (1) إلى المعادلة الخاصة بالتربة المشبعة (Fredlund and Rahardjo. 1993^[4]; Vanapalli et al. 1996^[19])

$$\tau = [c' + (\sigma_n - u_a). \tan \phi'] + [(u_a - u_w). \{\Theta^k . \tan \phi'\}] \quad (1)$$

حيث :

k - معامل الملاءمة الذي يستعمل في إيجاد أفضل تمثيل بين النتائج المقاسة والمتوقعة وهو حوالي 2,3

Θ - المحتوى المائي الاسمي (The normalized volumetric water content) $\Theta = \theta_w / \theta_s$ ، حيث ان :

θ_w - المحتوى المائي الحجمي (volumetric water content) ، و θ_s - المحتوى المائي الحجمي الموافق لاشباع

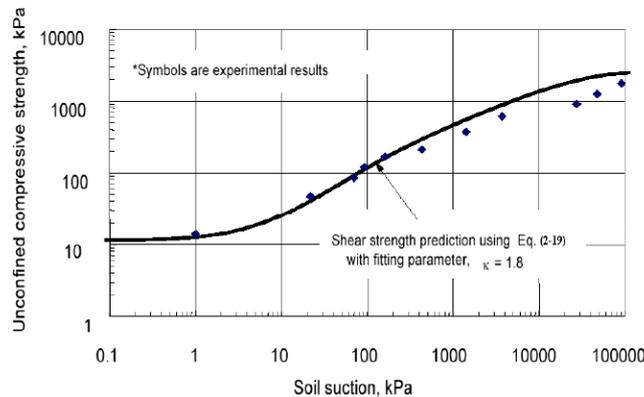
(volumetric water content at a saturation of 100%) 100

يمثل الحد الأول حصة التماسك الفعّال C' ، و حصة الإجهاد العمودي الصافي ($\sigma_n - u_a$) ، أما الحد الثاني فيمثل حصة مقاومة القص الناتجة عن إجهاد الامتصاص (Shear Strength Contribution due to Matric Suction) ، وبذلك يتضح أنّ للاشباع الجزئي تأثيراً كبيراً على المقاومة من خلال إضافة مركبة التماسك الشعري معبراً عنها بإجهاد الامتصاص.

درس العديد من الباحثين سلوك مقاومة القص في التربة غير المشبعة، حيث استخدم بعضهم جهاز القص المباشر المعدل في إيجاد مقاومات القص تحت حالات رطوبة وكثافة مختلفة، واعتمد آخرون على المنحني المميز تربة-ماء، ومعاملات مقاومة القص المشبعة في إيجاد معادلة القص للتربة غير المشبعة (Leong and Rahardjo., 2002^[12]; Vanapalli and Fredlund 2000^[21]; Vanapalli et al.1996^[19]) يعتمد هذا البحث على حالات رطوبة وكثافة مختلفة وتأثيراتها على مقاومة القص بسبب تأثر مقاومة القص في الترب غير المشبعة بالحالة الابتدائية (الكثافة والرطوبة) ، (Vanapalli et al.,2002^[22]) .

قارن (Vanapalli & Lane, 2002^[23]) بين نتائج جهاز القص المباشر التقليدي للتربة المشبعة مع نتائج أخرى لجهاز القص المباشر المعدل الخاص بالتربة غير المشبعة، حيث أجرى دراسته على تربة غضارية رملية. وبيّنت النتائج تقارباً جيداً بينهما.

درس (Vanapalli et al., 2000^[24]) سلوك مقاومة القص لتربة سيلتية غير مشبعة وذلك بالاعتماد على مقاومة القص لتجربة الانضغاط غير المحصور وعلى مجال لإجهاد امتصاص بين (0-1000000) كيلوباسكال ، وقارن الباحث نتائج العملية مع معادلة تمثيل مقاومة القص للتربة غير المشبعة (المعادلة (1)) ، وبيّن الشكل (2) مقارنة بين النتائج العملية المقاسة ، والنتائج النظرية لمقاومة القص غير المحصور مع قيم إجهاد الامتصاص في التربة ، وبيّنت النتائج تقارباً جيداً بينهما مع بعض التباعد في مجال قيم الامتصاص العالية (التي لم ينوه عنها في البحث المذكور) بسبب عدم تجانس توزيع محتوى الرطوبة وإجهادات الامتصاص في التربة على طول مقطع النموذج.



الشكل (2) يبين مقارنة بين النتائج العملية والنظرية لمقاومة القص في اختبار الانضغاط غير المحصور مع اجهاد الامتصاص من أجل عامل ملائمة 1,8 (Vanapalli et al., 2000^[24])

ربط (Al-Dabbagh, 2000^[1]) بين مقاومة الانضغاط غير المحصور وإجهاد الامتصاص ضمن مجال بين $pF(4.75- 3.25)$ لتربة غضارية انتفاخية تحت طاقات رص مختلفة ، ونوه إلى أن العلاقة بين مقاومة الانضغاط غير المحصور وإجهاد الامتصاص لجميع طاقات الرص المأخوذة كانت غير خطية ، واستنتج العلاقة (2) التالية:

$$UCS = 29.055 - 18.465 \gamma_d - 10.422 pF + 7.056 \gamma_d * pF \quad (2)$$

حيث :

UCS - مقاومة الانضغاط غير المحصور (kg/cm^2) ، γ_d : الكثافة الجافة (gr/c^3).

pF - إجهاد الامتصاص في التربة .

يُتَبَيَّن من خلال الدراسة المرجعية أن الأبحاث التي تناولت موضوع الاشباع الجزئي والكثافة ونسبة الرمل معاً وتأثيرها على مقاومة التربة الغضارية قليلة جداً رغم أن سلوكية الترب الغضارية تتأثر جداً بهذه العوامل وهذه هي الثغرة التي حاول هذا البحث أن يسد جزءاً منها.

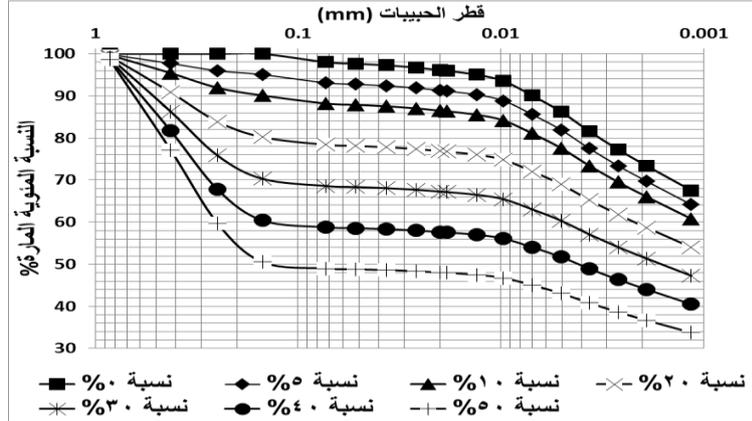
أهمية البحث وأهدافه:

إنَّ الخسائر الناجمة من الأضرار التي تلحقها التربة الانتفاخية في المباني والمنشآت المقامة عليها كبيرة جداً وتُعدُّ التربة القابلة للانتفاخ السبب الرئيس لمعظم الأضرار التي تصيب المنشآت والطرق المقامة عليها والتي قد تصل تكلفتها إلى مليارات الدولارات سنوياً ، ونظراً إلى أنَّ مشاريع البنى التحتية مثل الطرق السريعة والسكك الحديدية والسدود الأرضية وغيرها تتطلب كميات كبيرة جداً من الترب والرديميات قد يكون متعذراً احضارها من مناطق بعيدة بسبب الكلفة العالية لذلك تضطر الجهة صاحبة المشروع إلى استخدام تربة الموقع الموجودة بكميات كبيرة في موقع المشروع وربما تكون تربة انتفاخية لدنة مع محاولة إجراء المعالجة والتحسين اللازم لها كي تكون مقبولة للردم والرص ، وهذا ما يدعو إلى إجراء مزيد من البحوث لتحقيق فهم أعمق لسلوكية هذا النوع من الترب وبالتالي تقليص مشاكلها وتحويلها إلى تربة صالحة للاستخدام في المشاريع المختلفة .

إن هذا البحث هو دراسة تجريبية منظمة تهدف إلى دراسة التأثير التحسيني للرمل على مقاومة الترب الانتفاخية إذا تمت إضافته إليها، ودراسة سلوكيتها الفيزيائية والميكانيكية من خلال اجراء تجارب الضغط الحر والقص المباشر على خلائط من الترب الانتفاخية التي أُضيف إليها الرمل بنسب مختلفة، وذلك عند كثافات ودرجات اشباع مختلفة من أجل التوصل إلى فهم أكثر شمولية لسلوكية هذا النوع من الترب.

طرائق البحث ومواده:

من أجل تحقيق هدف البحث أُحضرت التربة الغضارية الانتفاخية من منطقة دمسرخو - اللاذقية من عمق 3متر من منسوب الأرض الطبيعية وبحيث تم تجاوز ترب الردم والوصول الى عمق طبقة التربة المقصودة . أما بالنسبة إلى تربة الخلط الرملية فقد أُخذت من موقع شقيفات جبلة وهي رمل بحري ناعم تم غسله وتخليصه من المواد الناعمة والحصول على رمل نظيف تماماً صالح للخلط وإجراء التجارب. حُضرت خلائط مختلفة من الترتين المذكورتين أعلاه على أساس الوزن الجاف حيث خلطت التربة الانتفاخية بنسب مختلفة من الرمل : 10 - 20 - 30 - 40 - 50 % فتم تشكيل الخلائط S₁₀ , S₂₀ , S₃₀ , S₄₀ , S₅₀ وهكذا .. حيث سميت الترب الخليطة بحسب نسبة الرمل المضافة إليها . أما S₀₀ فهي ترمز للغضار بدون رمل مضاف . أُجريت في البداية على الإحضارات الرملية تجارب التحليل الحبي (وفقاً للمواصفة ASTM D422-63) ، بأسلوب النخل الجاف للرمل الناعم ، وأجريت على التربة الغضارية تجارب الترسيب بالهايدرومتر ، ويبين الشكل (3) منحنيات التدرج الحبي المركبة للترب الخليطة بحسب نسبة الرمل المضافة إليها .

الشكل (3) منحنيات التدرج الحبي المركب للخلائط المجربة S_{50} , S_{40} , S_{30} , S_{20} , S_{10} , S_{00}

كما أجريت تجارب الوزن النوعي وفق المواصفة (ASTM D854-98) - نتائج هذه التجارب مبينة في الجدول (1).

جدول (1) الوزن النوعي للخلائط المجربة

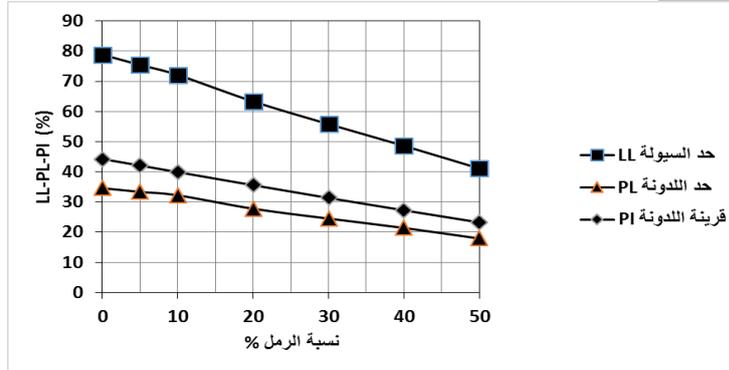
نسبة الرمل %	0	5	10	20	30	40	50	100
الوزن النوعي G	2.7	2.698	2.695	2.690	2.685	2.680	2.675	2.65

تم تحديد التركيب الكيميائي للتربة الانتفاخية في معمل اسمنت طرطوس وبيين الجدول (2) التركيب الكيميائي لها.

جدول (2) التركيب الكيميائي للغضار المستخدم

CHEMICAL COMPOSITION	%
Alumina (Al ₂ O ₃)	12.5
Ferric (Fe ₂ O ₃)	5.5
Calcium (CaO)	12
Magenisium (MgO)	2.4
Silica (SiO ₂)	48.8
(Sodium (Na ₂ O)	1.2
Potassium (K ₂ O)	0.36
Loss of ignition (Lol)	16.24

أجريت كذلك تجارب حدود أتبرغ على الخلائط المذكورة ، وبيين الشكل (4) علاقة حدود Atterberg بنسبة الرمل المضافة.

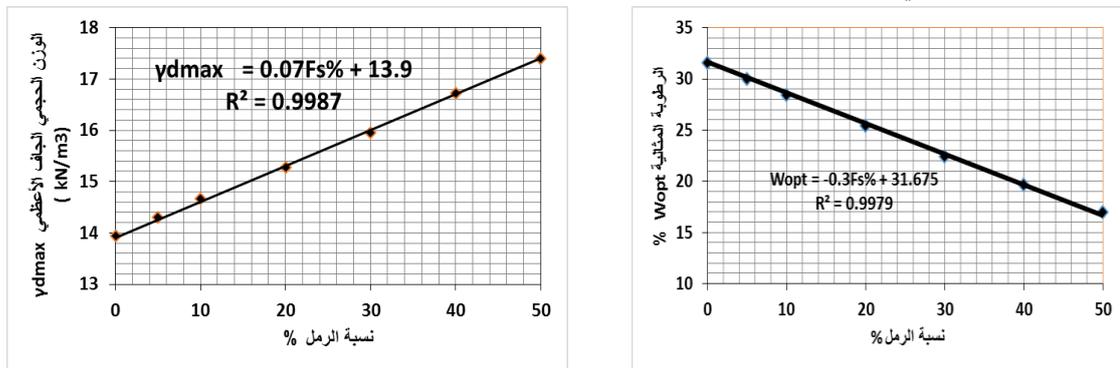


الشكل (4) منحنيات العلاقة بين حدود أتبرغ ونسبة الرمل المضافة

وتوجد نتائج مقارنة لهذه النتائج ضمن أبحاث تجريبية أخرى في مجال تحسين الترب الناعمة بالرمل (Roy, 2003^[17]; Ravi Shankar et al., 2012^[15]).

A- صُنِّفَت التربة الغضارية المستخدمة بحسب قرينة المجموعات وفقا لنظام تصنيف AASHTO ضمن المجموعة 7-5 ، كما صُنِّفَت تحت اسم **CH** وفقا لنظام تصنيف الترب الموحد ، وقد تبين من تجارب التشديد أن ضغط انتفاخها يصل إلى 26N/cm^2 . ونسبة الانتفاخ الحر %127 ، ونسبة الجزء الغضاري (جزيئات ذات قطر أصغر من 0.02mm) هي %73.9 .

أجريت أيضا تجارب الرص (بروكتور النظامية) وفقاً للمواصفة **ASTM D698** وُحِدَّت نسبة الرطوبة المثالية والكثافة الجافة العظمى للخلائط المختلفة ، ويبين الشكل (5) قيم الكثافة الجافة الأعظمية والرطوبة المثالية بحسب نسبة الرمل المضافة في الخليط.



الشكل (5) تغير الكثافة الجافة الاعظمية و الرطوبة المثالية بحسب نسبة الرمل المضافة.

يُلاحظ من الشكل (5) تزايد الكثافة الجافة الأعظمية وتناقص الرطوبة المثالية بزيادة نسبة الرمل المضافة ويُعزى ذلك الى انخفاض شراهة التربة للمياه نظراً لاستبدال جزء من التربة الناعمة الشرة للمياه بجزء خشن عديم الشراهة لايحتفظ بالمياه ، وهذا ما تؤكد قيم الرطوبة المثالية للخلائط حيث نلاحظ انخفاض قيم الرطوبة المثالية بزيادة نسبة الرمل المضافة من %31.6 للغضار الصافي إلى %17 عند نسبة رمل %50 ، وتتراوح القيم ضمن هذا المجال . شكَّلت من أجل اختبارات الضغط غير المحصور (**UCS**) عينات أسطوانية طولها يساوي ضعف قطرها، وأجريت التجارب على الخلائط المختلفة بكثافات مختلفة ودرجات إشباع مختلفة تحت سرعة 2mm/min . شكل (6).



الشكل (6) صور لبعض عينات تجارب الضغط الحر.

كما أجريت تجربة **القص المباشر** بنفس معدل التشوه (السرعة) المستخدم في تجربة الضغط الحر على جميع العينات بنسب الرمل المختلفة كي تكون المقارنة مفيدة والمقارنة دقيقة. الشكل (7) .



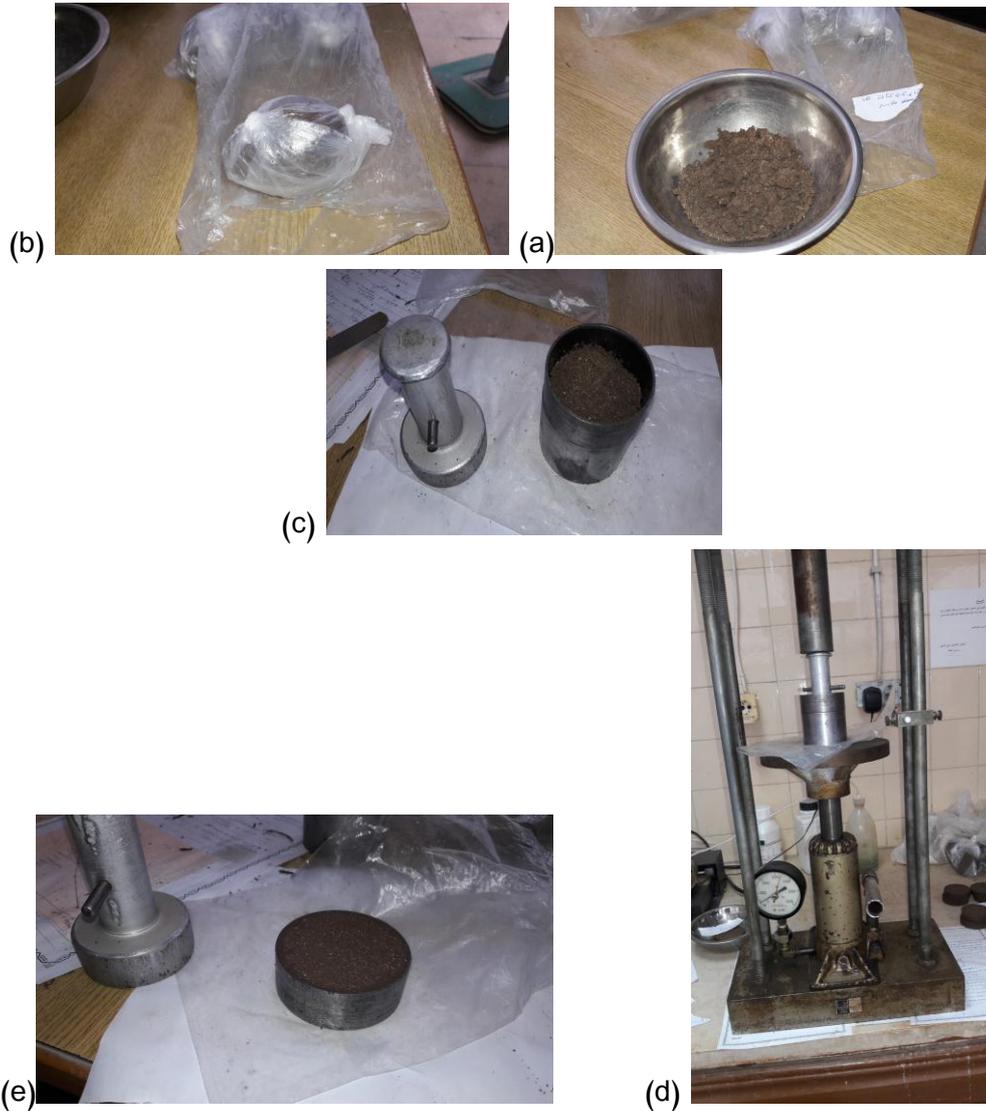
الشكل (7) صور لتجربة القص المباشر.

أما من أجل رسم المنحنيات المميزة تربة-ماء ، تم استخدام **جهاز الضغط الغشائي** في كلية الزراعة بجامعة تشرين حيث شكلت العينات الاسطوانية بالحالات الأولية الموافقة لكثافات ودرجات اشباع أولية مختلفة ثم أُشبعَت ضمن الجهاز وطبقت عليها مستويات مختلفة من اجهاد الامتصاص $pF=(1.8-4.2)$ حيث يعبر pF عن اجهاد امتصاص التربة وهو اللوغاريتم العشري لجهد ماء التربة معبراً عنها بارتفاع عمود ماء بال سم $pF=\log_{10}(h)$ ، ولكل مستوى مطبق تم إيجاد محتوى الماء الحجمي الموافق له (Hartge and Horn, 1991^[6]) ، ويبين الشكل (8) جهاز الضغط الغشائي المستخدم. ومن أجل اجهاد امتصاص $pF>4.2$ تم الاعتماد على تحديد الهيدروسكوبية القصوى $Hy(pF=4.7)$ حيث وضعت العينات بعد تجفيفها في وسط مغلق شبه مشبع البخار (94.3%) باستخدام حمض الكبريت بتركيز 10% وتترك حتى ثبات الوزن لمدة أسبوع تقريباً عند ذلك توزن وتجفف ومن الفارق تحسب الرطوبة الوزنية ثم محتوى الماء الحجمي الذي يوافق عند الهيدروسكوبية القصوى اجهاد امتصاص $pF=4.7$ ، ثم تحسب الهيدروسكوبية التي توافق اجهاد امتصاص $pF=6.1$ من العلاقة $Hy(pF=6.1)=Hy(pF=4.7)/2.1$ (Lieberoth, 1982^[13]) .



الشكل (8) جهاز الضغط الغشائي.

شكلت العينات من التربة الخليطة بكثافات ودرجات اشباع مختلفة لكل نسبة رمل مضافة من 10% الى 50% حيث تم في البداية الخلط الجاف بنسبة الرمل المطلوبة حتى يتحقق التجانس الجيد للعينه، ثم أضيف الماء بالنسبة المطلوبة وخلطت التربة جيداً شكل (9-a)، ومن ثم وضعت في كيس بلاستيكي يحفظ رطوبتها، شكل (9-b)، وتُركت ضمن وعاء عازل لمدة 24 ساعة لضمان انتشار الرطوبة في كامل العينة وتحقيق امتصاص متجانس، ثم أُخرجت العينات بالمكبس الهيدروليكي وشكلت بالكثافة المطلوبة. انظر الأشكال (9-c;d;e).



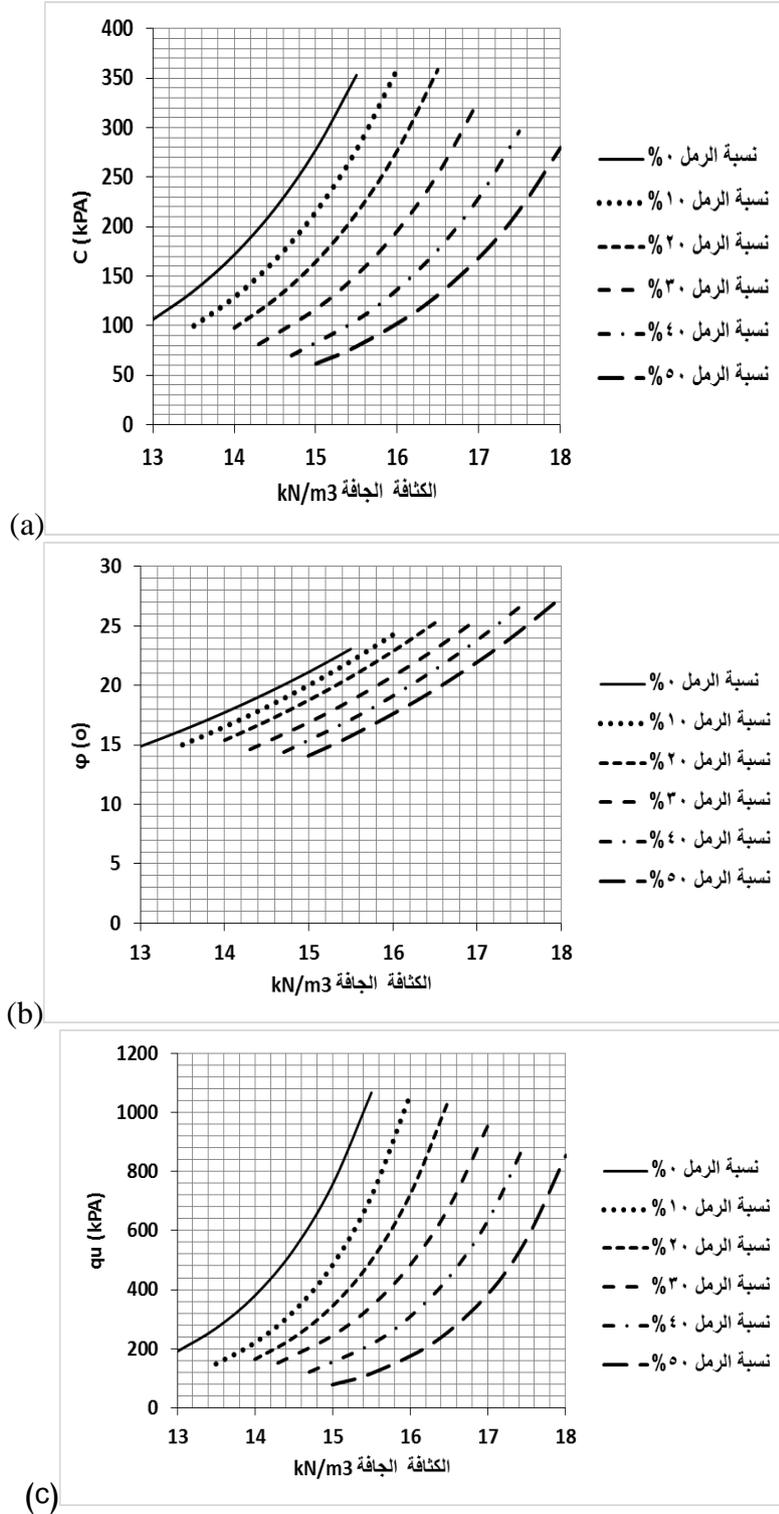
الشكل (9) صور لتشكيل العينات.

بلغ عدد العينات المشكلة لتجربة الضغط الحر 50 عينة، ولتجارب القص المباشر 192 عينة.

النتائج والمناقشة:

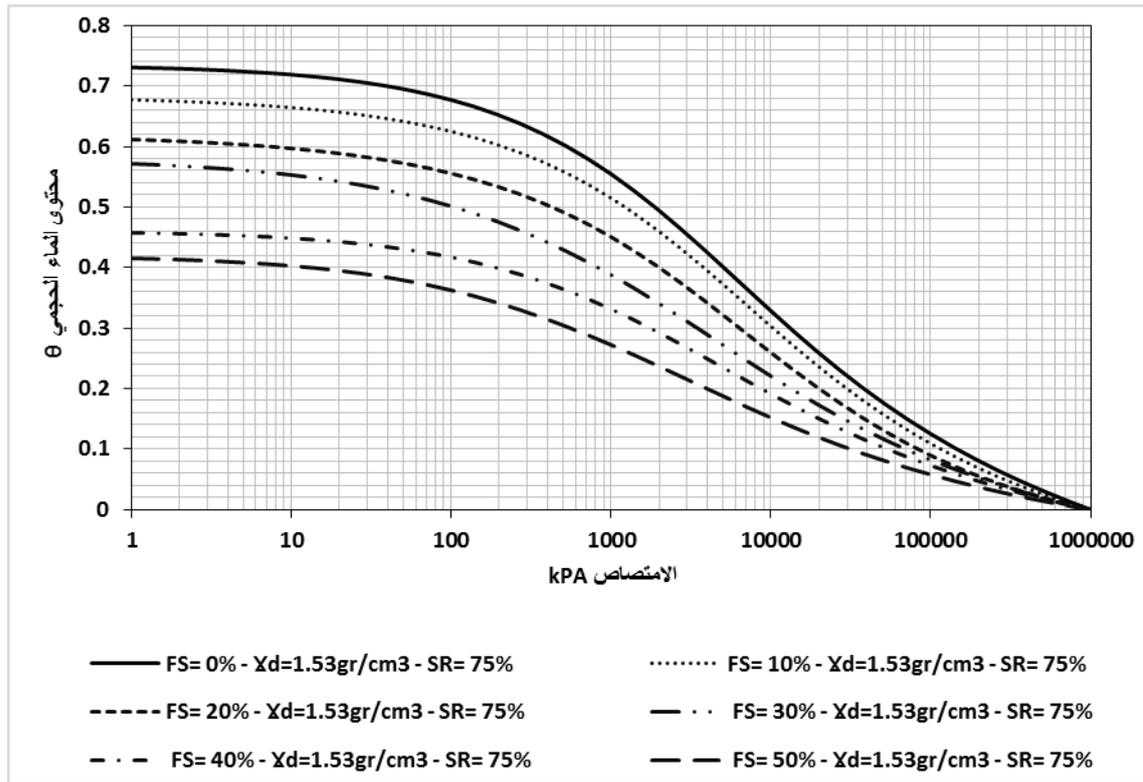
تمت دراسة تأثير الكثافة الجافة بتثبيت درجة الاشباع عند 75% لجميع العينات (S_{50} , S_{40} , S_{30} , S_{20} , S_{10} , S_{00})، وتغيير الكثافات لكل عينة S على حدة، ويبين الشكل (10-a) تغيير قيم مقاومة الضغط غير المحصور q_u مع

الكثافة الجافة للعينات S_{50} , S_{40} , S_{30} , S_{20} , S_{10} , S_{00} ، كما يبين الشكل (10-b;c) تغير قيم التماسك والاحتكاك الناتجة عن تجارب القص المباشر مع الكثافة الجافة لهذه العينات أي بدلالة كل نسبة رمل مضافة.



الشكل (10) تغير بارامترات المقاومة q_u - c - ϕ مع الكثافة الجافة للعينات S_{50} , S_{40} , S_{30} , S_{20} , S_{10} , S_{00} الأشكال a,b,c هي على التوالي : تغير C ، تغير ϕ ، تغير q_u مع الكثافة الجافة

نلاحظ من الشكل (10) تزايد كل من قيم مقاومة الضغط غير المحصور ، والتماسك ، والاحتكاك مع زيادة الكثافة الجافة لكل نسبة رمل محددة مضافة، بينما نلاحظ من أجل نفس الكثافة الجافة تتناقص هذه القيم مع زيادة نسبة الرمل المضافة إلى العينة ويعل السبب أنه مع زيادة نسبة الرمل المضافة من أجل نفس الكثافة الجافة يزيد حجم الفراغات في التربة وتقل كمية المنيرالات الغضارية الشرهة للماء وبالتالي تقل قوى الشد الشعري ضمن مسامات التربة مع زيادة نسبة الرمل المضافة.

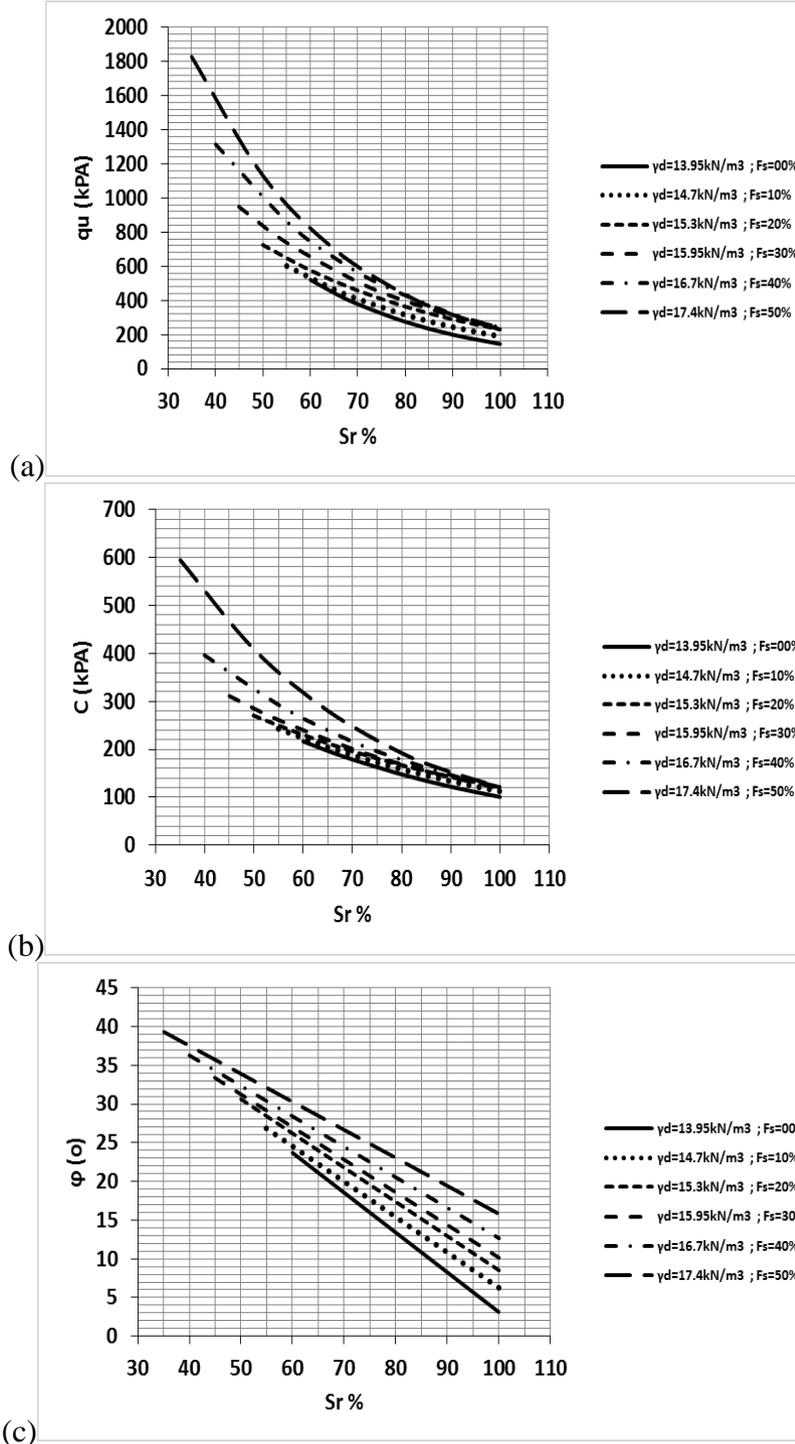


الشكل (11) المنحني المميز مياه-تربة عند نفس الكثافة الأولية 1.53g/cm^3

للعينات $S_{50}, S_{40}, S_{30}, S_{20}, S_{10}, S_{00}$

يبين الشكل (11) أعلاه المنحني المميز ماء-تربة لعينات الخلائط $S_{50}, S_{40}, S_{30}, S_{20}, S_{10}, S_{00}$ عند كثافة أولية 1.53g/cm^3 ثابتة ، والذي يبين أنه يزداد كل من اجهاد الامتصاص ومحتوى الماء الحجمي مع انخفاض نسبة الرمل المضافة وبالعكس.

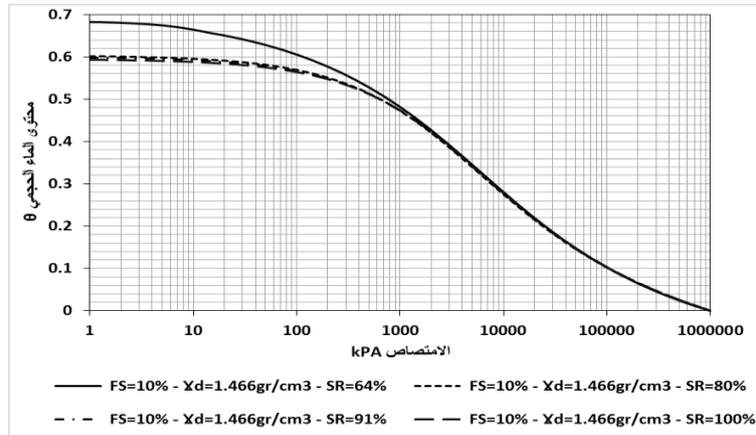
دُرس تغيّر درجة الإشباع لكل عينة من العينات المختلطة $S_{50}, S_{40}, S_{30}, S_{20}, S_{10}, S_{00}$ على حدة حيث ثبتت لكل عينة S الكثافة الجافة الأعظمية الخاصة بها المحسوبة من بروكتور النظامية ، وتبين أنّ العينة التي فيها نسبة الرمل أكبر تكون كثافتها الجافة أكبر ، ويبين الشكل (12) تغيّر مقاومة الضغط غير المحصور q_u والتماسك C وزاوية الاحتكاك الداخلي ϕ مع درجة الإشباع S_r لكل عينة من العينات .



الشكل (12) تغير البارامترات q_u - C - ϕ مع درجة الاشباع للعينات S_{50} , S_{40} , S_{30} , S_{20} , S_{10} , S_{00} .
 الاشكال a,b,c هي على التوالي: تغير q_u ، تغير C ، تغير ϕ مع درجة الاشباع

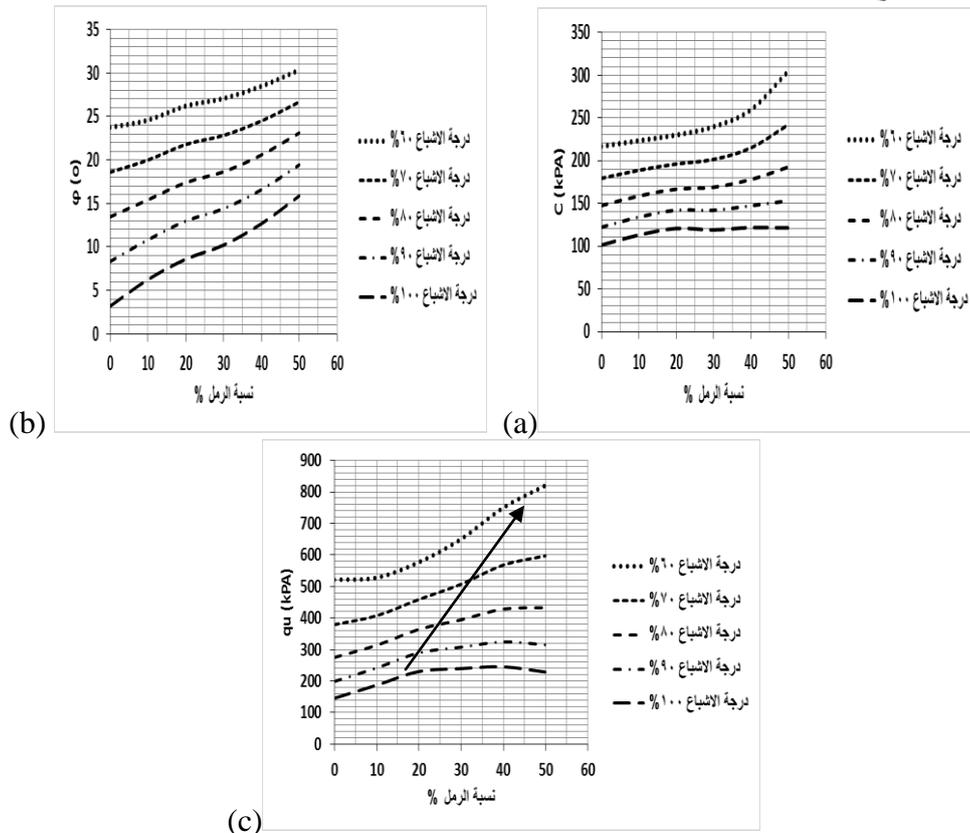
نلاحظ من الشكل (12) تناقص كل من مقاومة الضغط غير المحصور q_u والتماسك C وزاوية الاحتكاك ϕ مع تزايد درجة الاشباع ونلاحظ أن التناقص في التماسك ومقاومة الضغط غير المحصور يكون كبيراً حتى درجة اشباع حوالي $S_r=80\%$ يصبح بعدها التناقص أقل حدة نظراً إلى أن معظم مسامات التربة قد صارت مليئة بالمياه، ويصبح الشد

الشعري منخفضاً ، وهذا ما يبينه الشكل (13) الذي يعرض نموذجاً من المنحنيات المميزة ماء - تربة للعيينة S_{10} بكثافة أولية محددة لكن بدرجات إشباع أولية متغيرة ، ويُلاحظ أنّ محتوى الماء الحجمي يغدو أقل مع تزايد درجة الإشباع الأولية لكن مع الوصول إلى درجة إشباع $S_r=80\%$ يصبح محتوى الماء الحجمي ثابتاً تقريباً وتصبح المنحنيات المميزة منطبقة أي تصبح شراحتها للمياه ضعيفة بعد درجة الإشباع الأولية $S_r=80\%$.



الشكل (13) المنحنيات المميزة ماء - تربة للعيينة S_{10} بكثافة أولية ثابتة ودرجات اشباع أولية مختلفة

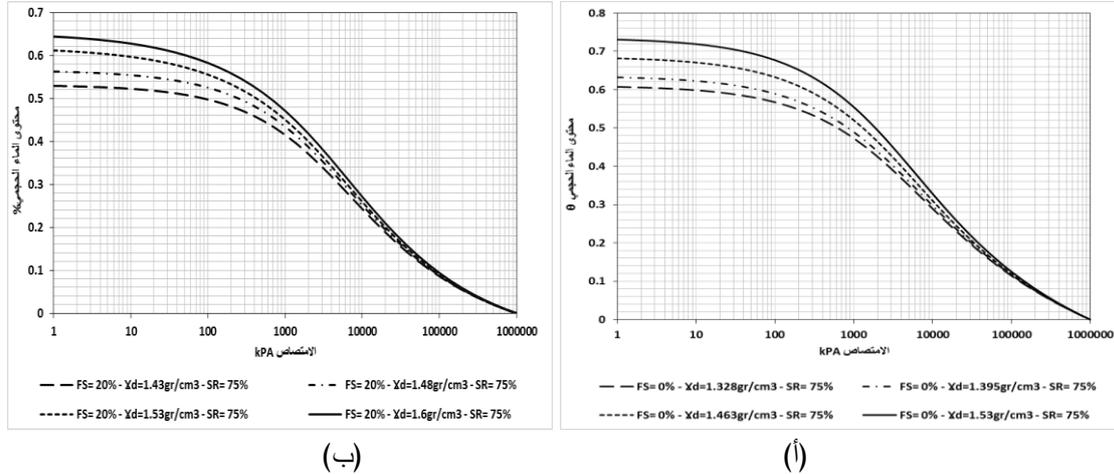
يبين الشكل (14) تغير مقاومة الضغط غير المحصور q_u والتماسك C وزاوية الاحتكاك ϕ مع نسبة الرمل المضافة بحسب درجة الإشباع.



الشكل (14) تغير البارامترات ϕ - C - q_u مع نسبة الرمل في العينة الغضارية بدلالة درجة اشباعها الاشكال a,b,c هي على التوالي : تغير C ، تغير ϕ ، تغير q_u مع نسبة الرمل في العينة

ويبدو من الشكل (14) أنّ كلاً من مقاومة الضغط غير المحصور q_u والتماسك C وزاوية الاحتكاك ϕ تزداد مع ازدياد محتوى العينة الغضارية من الرمل حتى نسبة محددة تصبح بعدها حدة الزيادة لكل من مقاومة الضغط غير المحصور والتماسك أقل كلما زادت درجة الإشباع ، ويحدث العكس تماماً بالنسبة إلى زاوية الاحتكاك ، كما لوحظ أنه عند نسبة رمل محددة يحدث عموماً ثبات في قيمة المقاومة وهذه النسبة من الرمل المضاف هي حوالي 20% أي للعينة S_{20} وذلك عند درجات الإشباع العالية الأكبر من عن $S_r=80\%$ ، لكن السلوكية تختلف من أجل درجات الإشباع المنخفضة حيث تستمر بارامترات المقاومة في الزيادة الملحوظة بعد النسبة 20% ، وتفسير ذلك يرتبط بالشد الشعري فمن أجل نفس العينة إذا شكلت بكثافات مختلفة فإن زيادة الكثافة تعمل على زيادة قوى الشد الشعري كما هو مبين الشكل (15) الذي يبين نموذجاً عن المنحنيات المميزة مياه-تربة للعينين S_{20} ، S_{00} شكلتا بكثافات أولية مختلفة لكن بتثبيت درجة الإشباع عند $S_r=75\%$.

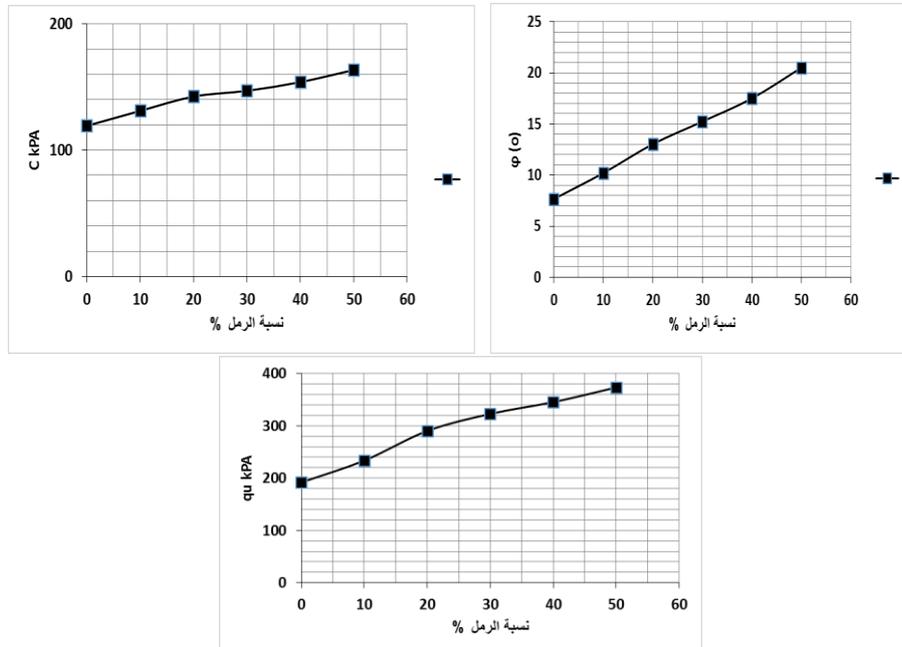
إنّ زيادة الإشباع ونسبة الرمل تقلل من قوى الشد الشعري فمن أجل درجة اشباع 90% مثلاً تستمر المقاومة في الازدياد مع ازدياد نسبة الرمل في العينة بسبب زيادة الكثافة الجافة ، وتكون ازدياد قوى الشد الشعري الناتجة عن زيادة الكثافة أكبر من الانخفاض في قوى الشد الشعري الناجم عن زيادة نسبة الرمل ، وذلك حتى الوصول إلى نسبة الرمل 20-30% فيحدث انخفاض أكبر في قوى الشد الشعري بزيادة محتوى العينة من الرمل المضاف تساوي أو قد تزيد عن زيادة قوى الشد الشعري الناجمة عن تزايد الكثافة الجافة ، ونظراً إلى أن انخفاض درجة الإشباع يزيد من قوى الشد الشعري بشكل كبير فإنّ زيادة نسبة الرمل يصبح تأثيرها طفيفاً على الشد الشعري مقارنة بانخفاض درجة الإشباع لذلك تستمر المقاومة بالارتفاع في درجات الإشباع المنخفضة حتى نسبة رمل محددة تزيد عن 50% لم نصل إليها في دراستنا.



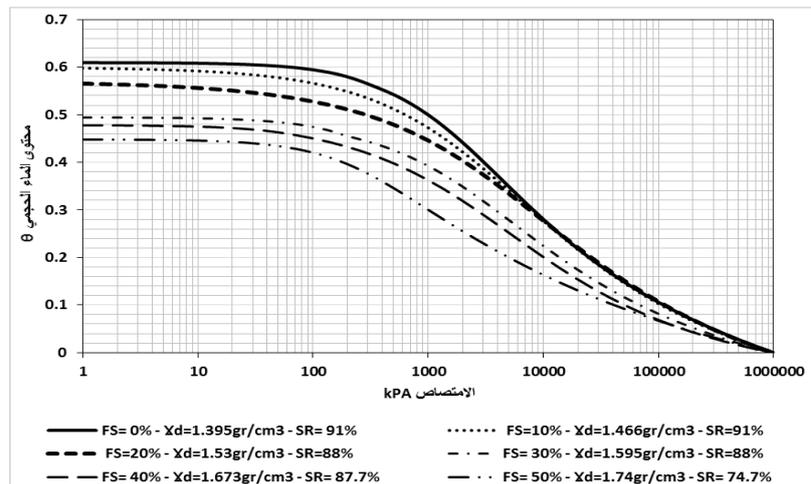
الشكل (15) المنحنيات المميزة مياه-تربة للعينتين S_{20} ، S_{00} المشكلتين عند نفس درجة الإشباع لكن بكثافات أولية مختلفة

بالنسبة إلى تجارب الضغط الحر والقص المباشر التي أجريت على العينات S_{10} ، S_{20} ، S_{30} ، S_{40} ، S_{50} التي تمّ تشكيل كل منها بالرطوبة المثالية والكثافة الجافة الاعظمية من تجربة بروكتور ، ولوحظ أنّ بارامترات المقاومة تزداد مع زيادة نسبة الرمل المضاف نظراً لأن الكثافة الجافة الاعظمية تزداد مع زيادة نسبة الرمل، ونلاحظ وجود نقطة انعطاف ضمن المجال 20-30% تصبح بعدها الزيادة أقل حدة كما هو مبين بالشكل (16) وذلك بسبب الانخفاض الكبير لقوى الشد الشعري في العينة بعد نسبة رمل مضافة 20% كما هو مبين بالشكل (17) الذي يعرض المنحنيات

المميزة مياه تربة للعينات S_{10} , S_{20} , S_{30} , S_{40} , S_{50} التي تم تشكيل كل منها بالرطوبة المثالية والكثافة الجافة الاعظمية من تجربة بروكتور لذلك يمكن اعتبار أن النسبة المثالية للرمل الواجب إضافتها الى العينة الغضارية المنتخبة هي 30% ولايجب أن تقل عن هذه القيمة إذا أريد تحسين مقاومة التربة الانتفاخية .



الشكل (16) تغير مقاومة الضغط غير المحصور q_u و التماسك C و الاحتكاك ϕ بحسب نسبة الرمل في العينة للعينات S_{50} , S_{40} , S_{30} , S_{20} , S_{10} , S_{00} التي تم تشكيل كل منها بالرطوبة المثالية والكثافة الجافة الاعظمية من تجربة بروكتور



الشكل (17) المنحنيات المميزة مياه تربة للعينات S_{50} , S_{40} , S_{30} , S_{20} , S_{10} , S_{00} التي تم تشكيل كل منها بالرطوبة المثالية والكثافة الجافة الاعظمية من تجربة بروكتور

نظراً إلى أنّ سلوكية القص المباشر السريع تحاكي سلوكية الضغط الحر تمّ التوصل إلى علاقة تجريبية وهي العلاقة (3) التالية تربط بين التماسك غير المصرف C_u الذي يحصل عليه من تجربة القص المباشر المستوي وبين القيمة

المعروفة للتماسك غير المصرف $C_u = q_u/2$ التي هي نصف قيمة مقاومة الضغط غير المحصور ، وذلك بدلالة الكثافة الجافة ودرجة الإشباع ونسبة الرمل F_s في العينة الغضارية :

$$q_u/2 = 3,13 \times C_u \times \gamma_d - C_u \times S_r - C_u \times \gamma_d \times F_s - 2,59 \times C_u \quad (R^2=0.988) \quad (3)$$

حيث :

C_u - التماسك غير المصرف kPA من تجربة قص مباشر سريع

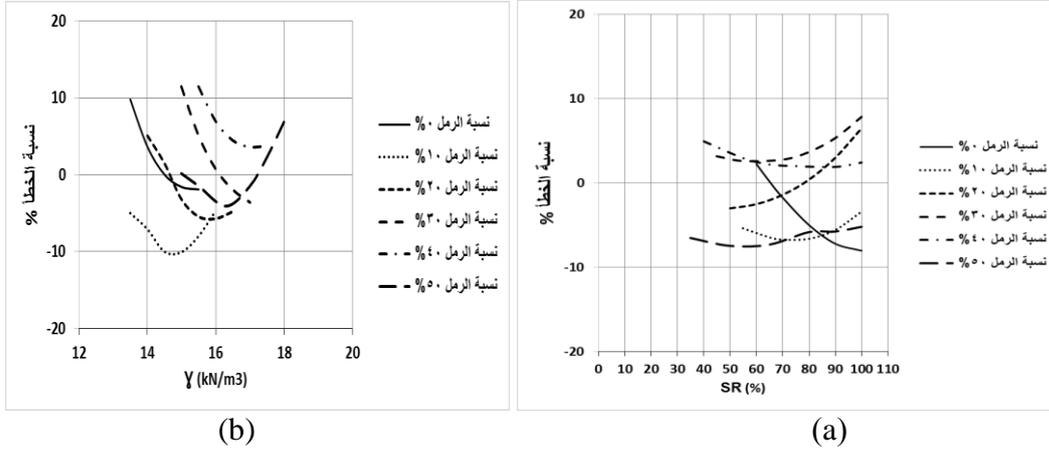
γ_d - الكثافة الجافة gr/c^3

S_R - درجة الاشباع قيمة مثال 70% تدخل بالعلاقة 0.7

F_s - نسبة المواد الخشنة قيمة 30% تدخل بالعلاقة 0.3

تصلح العلاقة (3) إذا كان الرمل المضاف الى العينة الغضارية منتظم التدرج الحبي ولاتزيد نسبته في العينة عن 50% ، وتكون نسبة الخطأ أو الانحراف في العلاقة (13) تحت هذه الشروط بحدود 10% عن القيم الفعلية كما هو

مبين بالشكل (17) :



الشكل (17) نسبة الخطأ في توقع $q_u/2$ باستخدام العلاقة المستنتجة (a) نسبة الخطأ بحسب درجة الاشباع لنسب الخلط المختلفة (b) نسبة الخطأ بحسب الكثافة الجافة لنسب الخلط المختلفة

الاستنتاجات والتوصيات:

اعتماداً على النتائج التجريبية تم استنتاج مايلي:

1- ينخفض كل من حدي السيولة واللدونة وقرينة اللدونة وتزداد الكثافة الجافة الاعظمية وتتناقص الرطوبة المثالية بزيادة نسبة الرمل المضافة.

2- تزداد مقاومة الضغط غير المحصور q_u والتماسك C وزاوية الاحتكاك ϕ مع زيادة الكثافة الجافة فمن أجل نسبة الرمل المضافة 30% زادت بنسب 530% - 300% - 75% على التوالي من كثافة $14.3kN/m^3$ حتى كثافة $16.9kN/m^3$ ، في حين يتناقص كل منها مع ازدياد نسبة الرمل في العينة من أجل نفس الكثافة الجافة حيث تناقصت بنسب 89% - 78% - 32% على التوالي من نسبة رمل مضافة 0% حتى نسبة رمل مضافة 50% لكثافة جافة $15.5kN/m^3$.

3- يتناقص بشكل حاد كل من مقاومة الضغط غير المحصور q_u والتماسك C وزاوية الاحتكاك ϕ مع زيادة درجة الاشباع حتى درجة اشباع حوالي 80% ليصبح التناقص أقل حدة لأن معظم مسامات التربة تكون قد أصبحت مليئة بالمياه وبالتالي ينخفض الشد الشعري. فمن أجل نسبة الرمل المضافة 30% تناقصت مقاومة الضغط غير المحصور q_u والتماسك C وزاوية الاحتكاك ϕ بنسب 76% - 61% - 69% على التوالي من درجة اشباع 45% حتى درجة اشباع 100% .

4- تزداد مقاومة الضغط غير المحصور q_u والتماسك C وزاوية الاحتكاك ϕ مع زيادة نسبة الرمل المضافة الموافقة لكثافتها الجافة الأعظمية لدرجة إشباع ثابتة حتى نسبة محددة 20% عند درجات الإشباع العالية ثم تصبح الزيادة بعدها طفيفة. فمن أجل درجة الاشباع 100% زادت مقاومة الضغط غير المحصور q_u والتماسك C وزاوية الاحتكاك ϕ بنسب 59% - 17% - 172% على التوالي من نسبة رمل مضافة 0% حتى نسبة رمل مضافة 20% .

5- تعتبر نسبة الرمل 30% هي النسبة المثلى التي لا يجب أن تقل عنها نسبة الرمل المضافة الى التربة الانتقائية إذا أريد تحسينها وتحقيق أفضل مقاومة عند درجات الاشباع العالية.

6- تم استنتاج علاقة تربط بين التماسك غير المصروف C_u ومقاومة الضغط غير المحصور q_u بحيث يمكن استنتاج أحدهما بدلالة الأخرى بدلالة نسبة الرمل F_s والكثافة الجافة γ_d ودرجة الاشباع S_r في العينة :

$$q_u/2 = 3,13 \times C_u \times \gamma_d - C_u \times S_r - C_u \times \gamma_d \times F_s - 2,59 \times C_u$$

العلاقة صالحة لرمل منتظم التدرج الحبي بنسبة لا تزيد عن 50% .

كما خالصنا الى التوصيات النهائية التالية المتعلقة بالبحث:

- ☒ لا بد من أجل التوسع في البحث من إجراء مزيد من الأبحاث لدراسة تأثير بنية التربة وخشونتها واختلاف أبعاد الحبيبات على المقاومة وعلى قيمة النسبة الحرجة.
- ☒ ضرورة تعميم البحث ليشمل الترب الرملية جيدة التدرج لخلطها بالترب الانتقائية المستخدمة ومقارنة النتائج المستحصل عليها مع نتائج هذا البحث.

References:

1. AL-DABBAGH, A. W. Study of Expansive Behavior of Clay Using Soil Suction as Applied to Wahda District Soil in Mosul Area. M.Sc. Thesis, Civil Engineering Department, University of Mosul, Iraq. 2000.
2. BENGRAA, L; HACHICHI, A; BOUROKBA, S.A; BENAÏSSA, A. *Étude de la stabilisation des argiles gonflantes par ajout de sable de carrière*, Université du Tlemcen, Tlemcen, 2005, 101-112.
3. CHAVALI, R.V.P; SHARMA, R.K. *Influence of sand and fly ash on clayey soil stabilization*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) International Conference on Advances in Engineering & Technology - 2014 (ICAET-2014), 2014, 36-40.
4. FREDLUND, D. G; RAHARDJO, H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons, 1993,544.
5. FREDLUND, D.G; VANAPALLI, S. K; XING, A; PUF AHL, D. E. *Predicting The Shear Strength Function for Unsaturated Soils Using The Soil Water Characteristic Curve*, 1st International Conference on Unsaturated Soils, Paris, Vol 1, 1995, 63-69.
6. Hartge,K. H; Horn, R. *Einführung in die Bodenphysik*, Ferdinnand Enke Verlag Stuttgart, Germany, 1991 , 303.

7. HUSSEIN, N.M., AL RAWI , O.S. AND ASSAF M.N . *effect of sand additives on the engineering properties of fine grained soils* . ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, VOL. 13, 2018, 3197-3206.
8. JJUUKO, S; KALUMBA, D; BAGAMPADDE, U. *The use of locally available sand in stabilization of Ugandan clayey soils: Case study of clayey soil from Busega area*, Uganda Institution of Professional Engineers 16th National Technology Conference (NTC 2011), Umaru. 2011,18p
9. KAOUA, F; DERRICHE, Z; LARADI, N. *Contribution à l'étude de la stabilisation des sols gonflants par ajout de sable*, Algérie Equipement: Revue Technique de l'Ecole National des Travaux Publiques, Vol15, 1994, 12-15.
10. KHEMISSA, M; MAHAMED, A; MEKKI, L. *Problematic soil mechanics in the Algerian arid and semi-arid regions: Case of M'sila expansive clays*, J. Appl. Eng. Sci. Technol., 1(2), 2015, 37-41.
11. LAMARA, M; GUEDDOUDA, M.K; BENABED, B. *Stabilisation physico-chimique des argiles gonflantes (sable de dunes+sel)*, Revue Française de Géotechnique, Vol 115, 2006, 25-35.
12. LEONG, E. C; RAHARDJO, H. *Soil-Water Characteristic Curves of Compacted Residual Soils*, Proceedings of 3 rd Int. Conf. on unsaturated soils 10-13 march, Recife-Brazil, Vol 1, 2002, 271-276.
13. LIEBEROTH, I. *Lehrbuch der Bodenkunde*.UEBDeutscher Landwirtschaftsverlag. Berlin, Germany, 1982.
14. LOUAFI, B; BAHAR, R. *SAND: An additive for stabilization of swelling clay soils*, Int. J. Geosci., Vol 3, 2012, 719-725.
15. NAGARAJ, H. B. *Influence of gradation and proportion of sand on stress–strain behavior of clay–sand mixtures*. International journal of Geo-Engineering, 2016 7:19
16. RAVI SHANKAR, A.U; CHANDRASEKHAR, A; PRAKASH BHAT H. *Experimental investigations on lithomargic clay stabilized with sand and coir*, Indian Highways, 40(2), 2012, 21-31.
17. ROY, T.K. *Influence of sand on strength characteristics of cohesive soil for using as subgrade of road*, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Vol 104, 2013, 218–224.
18. STEINBERG, M. L. *Controlling Expansive Soil Destructiveness by Deep Vertical Geomembranes on Four Highways*, Transportation Research Record no. 1032, National Research Council, Washington, D.C. , U.S.A., 1985, 48-53
19. VANAPALLI, S. K; FREDLUND, D. G; PUFAHL, D. E; CLIFTON, A. W. *Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction*, Canadian Geotechnical Journal, 33(3), 1996, 379-392.
20. VANAPALLI, S.K; FREDLUND, D.G; PUFAHL, D.E. *Saturated- Unsaturated Shear Strength and Hydraulic Conductivity Behavior of a Compacted Glacial Till*, 50th Canadian Geotechnical Conference, Ottawa, October 20-22, 1997, 625-632.
21. VANAPALLI, S.K; FREDLUND, D.G. *Comparison of Empirical Procedures to Predict The Shear Strength of Unsaturated Soils Uses The Soil-Water Characteristic Curve*, Geo-Denver, American Society of Civil Engineers, Special Publication No. 99, 2000, 195–209.
22. VANAPALLI, S. K; PUFAHL, D. E; FREDLUND, D. G. *Effect of Compaction on The Unsaturated Shear Strength of a Compacted Till*, Proceedings of 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils 10-13 march, Recife-Brazil, Vol. 1, 2002, 271-276.

23. VANAPALLI, S. K; LANE, J. *A Simple Technique for Determining The Shear Strength of Unsaturated Soils Using The Conventional Direct Shear Apparatus*, Second Canadian Specialty Conference on Computer Applications in Geotechnique, April, 2002, Winnipeg, 2002, 245-253.
24. VANAPALLI, S.K; WRIGHT, A; D.G. FREDLUND. *Shear Strength of Two Unsaturated Silty Soils Over The Suction Range From 0 to 1,000,000 kPa*, 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal, October 15-18, 2000, 1161-1168.